

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"**

**ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΝΙΣΥΡΟ**

Χρήστος Σταματόπουλος

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται
για μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για το Διεπιστημονικό - Διατμηματικό
Δίπλωμα Ειδίκευσης
του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου
"Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Χρ. Κορωναίος

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Αν.Καθηγητής Χρ. Κορωναίος
Καθηγητής Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγήτρια Μ. Λοϊζίδου

**Περιβάλλον
και
Ανάπτυξη**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΟΣΙΜΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΝΙΣΥΡΟ

Χρήστος Σταματόπουλος

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται
για μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για το Διεπιστημονικό - Διατμηματικό
Δίπλωμα Ειδίκευσης
του Δ.Π.Μ.Σ. του Ε.Μ.Πολυτεχνείου
"Περιβάλλον και Ανάπτυξη"

**Περιβάλλον
και
Ανάπτυξη**

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Χρ. Κορωναίος

Επιτροπή Παρακολούθησης:

Αν.Καθηγητής Χρ. Κορωναίος
Καθηγητής Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγήτρια Μ. Λοιζίδου

*Στη Μαριάννα,
την αστείρευτη πηγή της ζωής μου*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη

Abstract

Πρόλογος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ **1**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ **6**

2.1 Θερμικές διεργασίες **8**

2.1.1 Άμεση Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων (*Multi-Stage Flash (MSF) Distillation*) **8**

2.1.2 Απόσταξη Πολλαπλής Επίδρασης (*Multi Effect (ME) Distillation*) **12**

2.1.3 Απόσταξη με Συμπίεση Ατμών (*Vapor Compression (VC) Distillation*) **14**

2.1.4 Ηλιακή Απόσταξη (*Solar Distillation*) **15**

2.2 Διεργασίες Μεμβρανών **16**

2.2.1 Αντίστροφη Ώσμωση (*Reverse Osmosis (RO)*) **16**

2.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (*Electrodialysis (ED)*) **21**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ **24**

3.1 Αιολικό Δυναμικό **25**

3.1.1 Ευστάθεια Ατμόσφαιρας **25**

3.1.2 Τραχύτητα Εδάφους **29**

3.1.3 Βασικά Ανεμολογικά Μεγέθη **31**

3.2 Ανεμογεννήτριες **33**

3.2.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών **33**

3.2.2 Τύποι Ανεμογεννητριών **36**

3.2.2.1 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα **36**

3.2.2.2 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών με Βάση την Εγκατεστημένη Ισχύ **37**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

39

4.1 Υφιστάμενη Κατάσταση στα Νησιά του Αιγαίου	39
4.1.1 Μεταφορά Νερού σε Νησιά του Αιγαίου	40
4.1.2 Η Αφαλάτωση στα Νησιά του Αιγαίου: Ένας Εναλλακτικός Τρόπος Κάλυψης των Αναγκών σε Νερό	43
4.1.3 Το Αιολικό Δυναμικό στα Νησιά του Αιγαίου	44
4.2 Προσδιορισμός των Κύριων Παραμέτρων της Μονάδας Αφαλάτωσης	47
4.2.1 Μεμβράνη Αντίστροφης Ωσμωσης	49
4.2.1.1 Το θαλασσινό Νερό ως Πηγή Τροφοδοσίας	50
4.2.1.2 Ανάλυση Συμπεριφοράς της Χρησιμοποιούμενης Μεμβράνης Αντίστροφης Ωσμωσης	51
4.2.2 Σύζευξη Ανεμογεννήτριας-Αντλίας: Εναλλακτικές Επιλογές Μηχανικής Μετάδοσης Ισχύος	59
4.2.2.1 Μηχανική σύνδεση Ανεμογεννήτριας-Φυγοκεντρικής Αντλίας	59
4.2.2.2 Πρώτη Επιλογή Σύζευξης Α/Γ-Αντλίας	61
4.2.2.3 Δεύτερη Επιλογή Α/Γ-Αντλίας	69
4.2.2.4 Εν Σειρά Σύνδεση Επιπρόσθετων Στοιχείων Αφαλάτωσης	77
4.2.3 Επιμέρους Συνιστώσες της Εγκατάστασης Αφαλάτωσης	84
4.2.3.1 Βαλβίδα Ρύθμισης Πίεσης	84
4.2.3.2 Βαλβίδα Ελέγχου Ροής	85
4.2.3.3 Μονάδα Προεπεξεργασίας Θαλασσινού Νερού	86
4.2.3.4 Τρίοδη Βαλβίδα Ελέγχου Πίεσης	87
4.2.3.5 Τελικό Στάδιο Επεξεργασίας	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

88

5.1 Αρχικό Κόστος Κεφαλαίου και Περιοδικά Κόστη	88
5.1.1 Κόστος Προκαταρκτικής Μελέτης Επιτευξιμότητας	88
5.1.2 Κόστος Ανάπτυξης Προτεινόμενου Έργου	91

5.1.3 Κόστος Μηχανικού Σχεδιασμού	93
5.1.4 Κόστος Εξοπλισμού	95
5.1.4.1 Κόστος Εξοπλισμού Παραγωγής Ενέργειας (Συστοιχία Α/Γ)	95
5.1.4.2 Κόστος Εξοπλισμού Αφαλάτωσης Θαλασσινού Νερού	97
5.1.5 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας	100
5.2 Αξιολόγηση Επενδύσεων	102
5.2.1 Βασικές Έννοιες Επενδύσεων	102
5.2.1.1 Χρηματορροή	102
5.2.1.2 Χρονική Αξία Χρήματος	103
5.2.1.3 Πληθωρισμός	103
5.2.1.4 Αποσβέσεις	104
5.2.2 Κριτήρια Οικονομικής Αξιολόγησης	105
5.2.2.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV)	105
5.2.2.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR)	106
5.2.2.3 Περίοδος Ανάκτησης Κεφαλαίου	107
5.3 Μελέτη Ευαισθησίας Επενδυτικού Σχεδίου	108
5.3.1 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Χείριστη Εκτίμηση Κόστους	111
5.3.1.1 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Αποκλειστική Παραγωγή Νερού	111
5.3.1.2 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Συμπαραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Αφαλατωμένου Νερού	113
5.3.1.3 Ετήσια Αύξηση της Τιμής Πώλησης του Παραγόμενου Αφαλατωμένου Νερού	115
5.3.2 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Βέλτιστη Εκτίμηση Κόστους	118
5.3.2.1 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Αποκλειστική Παραγωγή Νερού	118
5.3.2.2 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Συμπαραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Αφαλατωμένου Νερού	121
5.3.2.3 Ετήσια Αύξηση της Τιμής Πώλησης του Παραγόμενου Αφαλατωμένου Νερού	122
5.4 Περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

128

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η τεχνοοικονομική μελέτη της συμβολής της αιολικής ενέργειας στην αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Η διεργασία της αφαλάτωσης καθίσταται ζωτικής σημασίας ιδιαίτερα για περιοχές της λεγόμενης άγονης γραμμής και για τα νησιά που αντιμετωπίζουν έντονα το πρόβλημα της λειψυδρίας. Με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση του πλανήτη να καθιστούν ιδιαίτερα δυσοίωνο και ζοφερό το μέλλον για τις επόμενες γενεές η εκτεταμένη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προβάλλει επιτακτική ανάγκη. Η φύση έχει προικίσει τα ελληνικά νησιά του Αιγαίου με πληθώρα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην οποία συμπεριλαμβάνεται και η αιολική. Γι' αυτό το λόγο η αφαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης με τροφοδότηση από συστοιχία ανεμογεννητριών δύναται να συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη προσέγγιση της διαχείρισης των υδατικών πόρων και να ανακουφίσει τις νησιώτικες τοπικές οικονομίες εξασφαλίζοντας ένα βαθμό ενεργειακής αυτοτέλειας.

Στη συγκεκριμένη μελέτη επιχειρείται να εξεταστεί η ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με αποκλειστική αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού στο νησί της Νισύρου. Ελέγχονται ορισμένες βασικές παράμετροι του τιθέμενου προβλήματος όπως είναι η παροχή του παραγόμενου νερού και η περιεκτικότητά του σε TDS, η πίεση του υποπροϊόντος ύδατος, η καταναλισκόμενη ισχύς και η ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια της κάθε μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης και ο συντελεστής ανάκτησης. Ακόλουθα, με τη χρήση τριών κριτηρίων αξιολόγησης της καθαρής παρούσας αξίας, του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και της περιόδου ανάκτησης κεφαλαίου πραγματοποιείται μελέτη ευαισθησίας του επενδυτικού σχεδίου εγκατάστασης της εν λόγω μονάδας. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι η συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μία ετήσια αύξηση της τάξεως του 1% στην τιμή διάθεσης του νερού καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική την αγορά του από τους κατοίκους του νησιού. Επιπρόσθετα, εκτός από την προνομιακή τιμή διάθεσης του νερού το νησί απολαμβάνει σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη όπως είναι η εξοικονόμηση καυσίμου, η αποφυγή εκπομπών αέριων ρύπων, η αναβάθμιση της ποιότητας ζωής και καλυτέρευση των συνθηκών διαβίωσης των κατοίκων του.

Abstract

The aim of the current study is the techno-economical contemplation of the contribution of wind energy in the desalination of seawater. The process is of vital significance especially for the so called arid areas as well as for those islands where scarcity of water is a major problem. Having to deal with issues like the greenhouse effect and global warming the future appears to be rather dim and unpromising for the generations to come. Thus, extensive utilization renewable resources of energy is a matter of the utmost importance. Such sources can be found in abundance in the Aegean islands. It is for this reason that the desalination of reverse osmosis being supplied by a wind farm contributes to an integrated approach of the water resources management and therefore comes to the relief of the island's local economy, ensuring a degree of energy autonomy.

An attempt is being made to study the energy efficiency of a reverse osmosis desalination system with the exclusive utilization of the available wind potential at the island of Nisiros. Certain basic parameters of the problem in question are being closely examined, namely, the flow rate of water production and its concentration in TDS, the concentration pressure, the consumed power, the specific consumed energy of each reverse osmosis membrane and the recovery ratio. Furthermore, with the use of three assessment criteria that of net present value, internal rate of return and payback period, a sensitivity analysis of the investment is being conducted. The study has shown that the electrical energy co-production combined with an annual water price increase of approximately 1% makes its purchase by the island's residents even more appealing to them. Last but not least, except for considerably low prices in water sales, there are major environmental and social benefits for the island, such as reduction in fuel consumption, avoidance of greenhouse gases emission and most important of all more advanced living conditions for the inhabitants of Nisiros.

Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης η οποία θα αξιοποιεί το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό για τις ενεργειακές απαιτήσεις της. Η σύζευξη των Α/Γ και των αντλιών που τροφοδοτούν με θαλασσινό νερό τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης υλοποιείται μηχανικά και αποφεύγεται με τον τρόπο αυτό μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική που συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες. Στην εργασία αυτή περιλαμβάνονται 6 κεφάλαια το περιεχόμενο των οποίων συνοψίζεται ακολούθως:

Κεφάλαιο 1: Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με την αφαλάτωση και την αιολική ενέργεια. Τονίζεται η ανάγκη υιοθέτησης μίας ολοκληρωμένης προσέγγισης στη διαχείριση των υδατικών πόρων και σχολιάζεται η συμβολή της αφαλάτωσης προς την κατεύθυνση αυτή. Επιπρόσθετα γίνεται μία συνοπτική αναφορά σε μελέτες και εργασίες που έχουν εκπονηθεί και αφορούν τις μεθόδους αφαλάτωσης και την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού.

Κεφάλαιο 2: Πραγματοποιείται συνοπτική περιγραφή των υπάρχουσών μεθόδων αφαλάτωσης οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικές ομάδες: τις θερμικές διεργασίες και τις διεργασίες μεμβρανών. Στην τελευταία ομάδα ανήκει και η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης.

Κεφάλαιο 3: Γίνεται αναφορά στην αιολική ενέργεια και παρατίθενται θεμελιώδη στοιχεία για τους παράγοντες που επηρεάζουν τοπικά το αιολικό δυναμικό, περιγράφονται βασικά ανεμολογικά μεγέθη καθώς και τα μέρη που απαρτίζουν μία ανεμογεννήτρια.

Κεφάλαιο 4: Αναφέρονται τα απαραίτητα στοιχεία με τη συμβολή των οποίων θα μελετηθεί μονάδα αφαλάτωσης η οποία τροφοδοτείται με ενέργεια από συστοιχία ανεμογεννητριών. Αφού προηγηθεί προσδιορισμός των επιμέρους συνιστωσών που συνθέτουν την εγκατάσταση αφαλάτωσης ακολουθεί μελέτη της απόδοσής της με βάση 6 χαρακτηριστικά μεγέθη.

Κεφάλαιο 5: Λαμβάνει χώρα οικονομική αξιολόγηση της ενδεχόμενης επένδυσης αφού καθοριστούν τα σταθερά και περιοδικά κόστη. Με βάση τρία κριτήρια αξιολόγησης ελέγχεται υπό ποιες συνθήκες η επένδυση δύναται να καταστεί συμφέρουσα και αποδεκτή. Επιπρόσθετα, αναλύονται τα κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Κεφάλαιο 6: Συνοψίζονται όλα τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη συγκεκριμένη εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειψυδρία στα νησιά του Αιγαίου αποτελεί μία πραγματικότητα λόγω της ιδιαιτερότητας των οικοσυστημάτων που αυτά παρουσιάζουν και των περιορισμένων υδάτινων πόρων. Το εν λόγω πρόβλημα καθίσταται εντονότερο από την άναρχη τουριστική ανάπτυξη που παρατηρείται στα νησιά αυτά. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα της λειψυδρίας δύναται να αναλυθεί στις παραμέτρους που περιγράφονται ακολούθως:

- ☉ Τα μικρού μεγέθους ετήσια βροχομετρικά ύψη (η Αμοργός παρουσιάζει 350mm βροχόπτωσης ανά έτος)
- ☉ Οι υπόγειοι υδροφορείς δεν μπορούν εύκολα να συγκρατήσουν το νερό καθώς είναι μικροί και συνδέονται με τη θάλασσα. Με την εντατική άντληση νερού εισέρχεται το θαλασσινό νερό στα υπόγεια ύδατα, αλλοιώνοντας την ποιότητα του νερού και καταστρέφοντας τον υπόγειο υδροφόρα.
- ☉ Τα νησιά δεν είναι επίπεδα, έχουν έντονο ανάγλυφο και επομένως μεγάλες κλίσεις. Οι ροές είναι χειμαρικές: το νερό διοχετεύεται με μεγάλη ταχύτητα προς τη θάλασσα.
- ☉ Δεν υπάρχει φυτοκάλυψη με αποτέλεσμα το νερό να μη συγκρατείται, να ρέει και να χάνεται.
- ☉ Μεγάλη εξάτμιση που οφείλεται στους ισχυρούς ανέμους και στην έντονη ηλιοφάνεια.

Προκειμένου να επιλυθεί το βασικό πρόβλημα της λειψυδρίας απαιτείται η υιοθέτηση ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων οι οποίες περιλαμβάνουν τεχνικές λύσεις που μπορούν να αναζητηθούν στη διασύνδεση υδατικών συστημάτων, την αποδοτικότερη μεταφορά νερού, τη βελτίωση της αποδοτικότητας και παραγωγικότητάς του, την αξιοποίηση χαμηλής ποιότητάς του (ανακύκλωση, αφαλάτωση) και την αύξηση της χωρητικότητας των λεκανών απορροής. Εκτός από την τεχνοκρατική διάσταση που εντάσσεται στη Στρατηγική Φάση της Ολοκληρωμένης Προσέγγισης η Επιχειρησιακή Φάση είναι εξίσου σημαντική

σύμφωνα με την οποία εξασφαλίζεται η ορθολογική εφαρμογή και λειτουργία των μέτρων που προτείνονται και των έργων που εκπονούνται.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι τάσεις που διαμορφώνονται στο Αιγαίο οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διατηρησιμότητα της ανάπτυξης δε μπορεί να εξασφαλισθεί. Αυτό οφείλεται στη συνεχή αύξηση του κόστους του νερού, στη συνεχή αύξηση της κατανάλωσης λόγω τουριστικών δραστηριοτήτων και στην άρδευση με υφάλμυρο νερό υψηλής αλατότητας. Τα προαναφερθέντα συντελούν στην εξαφάνιση της γεωργίας και τη σταδιακή καταστροφή του παραγωγικού δυναμικού των αντίστοιχων εδαφικών εκτάσεων με τον κίνδυνο ερημοποίησης να ελλοχεύει. Επιβαρυντικός παράγοντας αποτελεί και η αναμενόμενη κλιματική αλλαγή που θα οξύνει ακόμα πιο πολύ τα υφιστάμενα προβλήματα.

Για την αποφυγή αναποτελεσματικών και υπο-βέλτιστων λύσεων θα πρέπει η διαχείριση του νερού να ενταχθεί σε μία ολοκληρωμένη προσέγγιση όπου τα φυσικά διαθέσιμα στο σύνολό τους θα πρέπει να θεωρηθούν ότι υπόκεινται σε καθεστώς αλληλεξάρτησης και αλληλεπίδρασης μεταξύ τους αλλά και με τα ανθρώπινα διαθέσιμα. Αυτό που απαιτείται είναι η Δυναμική Διαχείριση που βασίζεται στην ολοκληρωμένη θεώρηση όλων των επιμέρους συστημάτων που άμεσα ή έμμεσα επηρεάζουν τον κύκλο του νερού. Κυρίαρχο στοιχείο θα είναι ο μακροχρόνιος προληπτικός σχεδιασμός και η σύνταξη σχεδίων προσαρμογής για τις δυσμενέστερες συνθήκες που έπονται. Προς αυτή την κατεύθυνση επιβάλλεται να αξιοποιηθεί και η τεχνολογία προκειμένου να συνεισφέρει ενεργά και αποτελεσματικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στην αναβάθμιση των συνθηκών διαβίωσης των κατοίκων των νησιών. Συγκεκριμένα, οι εξελίξεις στις μεθόδους αφαλάτωσης σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των τεχνολογιών αξιοποίησης ανανεώσιμων φυσικών διαθεσίμων έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν πολυδιάστατα στην ανάπτυξη των νησιών η οποία θα τελείται αναμφισβήτητα σε διαλεκτική αρμονία και σεβασμό στον άνθρωπο και στο περιβάλλον του.

Λόγω της υφιστάμενης κατάστασης που επικρατεί στα νησιά του Αιγαίου η αποσπασματική εποχική τουριστική δραστηριότητα αποτελεί μονόδρομο στην προώθηση της ανάπτυξης και τείνει να αποτελέσει σχεδόν αποκλειστική ενασχόληση των κατοίκων. Βασικοί τομείς ανάπτυξης των νησιών αυτών όπως είναι η γεωργία, η αλιεία και η κτηνοτροφία κινδυνεύουν να περιοριστούν σημαντικά ή ακόμα και να εξαφανιστούν. Όμως οι τομείς αυτοί βρίσκονται σε αλληλεξάρτηση και αλληλεπίδραση με τον τουρισμό η ανάπτυξη του οποίου εδράζεται τόσο στη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων όπως τη γη και το νερό, όσο και στη διατήρηση της φυσικής ομορφιάς και βιοποικιλότητας. Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης τροφοδοτούμενες με αιολική ενέργεια συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Εξασφαλίζουν στους κατοίκους καθαρό νερό, ένα αδιαπραγμάτευτο φυσικό διαθέσιμο το οποίο αναδεικνύεται τελικά σε αγαθό προνομιακής κατανάλωσης για συγκεκριμένες περιοχές και κράτη. Επιπρόσθετα, δύναται να εξασφαλισθεί ενεργειακή αυτοτέλεια με συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεδομένου ότι τα ελληνικά νησιά εξαρτώνται ισχυρά από το πετρέλαιο για την παραγωγή ενέργειας, τις μεταφορές και τη θέρμανση. Οι τοπικές οικονομίες θα ανακουφιστούν λαμβάνοντας υπόψη ότι η διακύμανση των πετρελαϊκών τιμών προκαλεί σοβαρό πλήγμα σε αυτές. Η υπεράντληση των υδάτων θα περιοριστεί αποτρέποντας την εισροή θαλασσινού νερού στους παράκτιους και υπόγειους υδροφορείς βελτιώνοντας την ποιότητα κυρίως του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αρχίζουν να χρησιμοποιούνται ευρέως προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αύξηση που παρατηρείται στη ζήτηση του καθαρού νερού, λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της ανάπτυξης της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με τον περιορισμό των αξιοποιήσιμων υδατικών πόρων που οφείλεται κυρίως στις έντονες κλιματικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα σε ολόκληρο τον πλανήτη. Οι τεχνολογίες αφαλάτωσης νερού απασχολούν τη διεθνή επιστημονική κοινότητα και αυτό είναι έκδηλο από τη πληθώρα δημοσιεύσεων σε διάφορα έγκριτα περιοδικά. Οι M.A. Darwish και συνεργάτες [3] υπολόγισαν την ανηγμένη ενέργεια που καταναλώνεται από τις μονάδες αφαλάτωσης με Άμεση Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων τη μοναδική μέθοδο που χρησιμοποιείται έως σήμερα στην περιοχή του Κουβέιτ. Η ανηγμένη ενέργεια που καταναλώνεται υπολογίστηκε ότι ανέρχεται σε 25kWh/m^3 ποσό που είναι αρκετά υψηλότερο συγκρινόμενο με άλλες μεθόδους αφαλάτωσης όπως είναι η Αντίστροφη Ωσμωση όπου η μέση κατανάλωση είναι 5kWh/m^3 και η Απόσταξη Πολλαπλής Επίδρασης με κατανάλωση 12kWh/m^3 .

Η μικρή ειδική ενέργεια που καταναλώνεται από μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης αποτελεί βασική αιτία για την ευρύτερη εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου. Οι Ghazi Al-Enezi και Nagla Fawzi [1] μελέτησαν παραμετρικά την απόδοση των μεμβρανών αυτών. Συγκεκριμένα ασχολήθηκαν με εγκατάσταση αφαλάτωσης μίας βαθμίδας, δύο βαθμίδων και με μονάδα δύο περασμάτων με τους υπολογισμούς τους να πραγματοποιούνται συναρτήσει της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας και της θερμοκρασίας. Οι Masaru Kurihara και συνεργάτες [10] ανέπτυξαν μία μέθοδο προκειμένου να περιορίσουν ακόμα περισσότερο την ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια καθώς και το μέγεθος του χώρου εγκατάστασης. Πρόκειται για μία μονάδα αφαλάτωσης μετατροπής άλμης δύο βαθμίδων (BCS, Brine Conversion System). Με βάση τη συγκεκριμένη μέθοδο λειτουργεί με επιτυχία πιλοτική εγκατάσταση στο Toray's Ehime. Οι Gerry Filteau και Peter Moss [5] δημοσίευσαν

πληροφορίες και τεχνικά στοιχεία για την απόδοση και τα χαρακτηριστικά μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης που λειτουργούσαν σε πολύ χαμηλότερη πίεση τροφοδοσίας. Οι S.A. Avlonitis και συνεργάτες [2] αξιολόγησαν και εκτίμησαν την καταναλισκόμενη ενέργεια καθώς και το κόστος αντικατάστασης των μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού (SWRO, SeaWater Reverse Osmosis). Πρότειναν μεθόδους για τη μείωση του κόστους ενέργειας και για βέλτιστη διαδικασία καθαρισμού των μεμβρανών. Ειδικότερα η μέθοδος καθαρισμού που προτάθηκε βασίστηκε σε συνδυασμό υδροδυναμικού και χημικού καθαρισμού σύμφωνα με τον οποίο η απόδοση των μεμβρανών βελτιώνεται ενώ ο χρόνος ζωής τους επιμηκύνεται. Επιπρόσθετα, οι Ioannis Karagiannis και Petros G. Soldatos [8] πραγματοποίησαν περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης στα νησιά του Αιγαίου σχετικά με την κατανάλωση του νερού. Δημοσίευσαν στοιχεία που αφορούν τις μεταφερόμενες ποσότητες νερού, την εποχικότητα της ζήτησης καθώς και τις υφιστάμενες μονάδες αφαλάτωσης που έχουν εγκατασταθεί στα νησιά του Αιγαίου.

Το γεγονός ότι τα αέρια του θερμοκηπίου ασκούν συνεχώς εντονότερη επίδραση στο κλίμα του πλανήτη σε συνδυασμό με την ειδική χαμηλή καταναλισκόμενη ενέργεια των μονάδων αντίστροφης ώσμωσης ώθησε τους επιστήμονες να μελετήσουν το ενδεχόμενο οι μονάδες αυτές να τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι J.K. Kaldellis και συνεργάτες [7] και D. Voiontas και συνεργάτες [23] μελέτησαν την οικονομική βιωσιμότητα εγκαταστάσεων, στις οποίες εφαρμόστηκαν αντιπροσωπευτικές μέθοδοι αφαλάτωσης σε συνδυασμό με την αξιοποίηση διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, χρησιμοποιώντας μία ολοκληρωμένη ανάλυση κόστους-οφέλους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανέδειξαν την τροφοδότηση με ΑΠΕ των συστημάτων αφαλάτωσης ως μία πολλά υποσχόμενη και βιώσιμη μέθοδο για την ικανοποίηση των αναγκών σε πόσιμο νερό. Το ενδιαφέρον έχει στραφεί ιδιαίτερα στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας προς την κατεύθυνση αυτή. Οι Ignacio da la Nuez Pestana και συνεργάτες [17] και Essam Sh. Mohamed και συνεργάτες [16] μελέτησαν εγκατάσταση αφαλάτωσης τροφοδοτούμενης με αιολική ενέργεια. Η τροφοδότηση πραγματοποιείται αφού προηγηθεί μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και ακόλουθα η τελευταία διοχετεύεται στις αντλίες θαλασσινού νερού. Οι Macros S. Miranda και David Infield [15] ανέπτυξαν ένα αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης ιδιαίτερα χρήσιμο για τα νησιά και τις απομονωμένες περιοχές. Το σύστημα αυτό μοντελοποιήθηκε ώστε να μη γίνεται χρήση συσσωρευτών στοιχείο που είναι σύνηθες σε αυτόνομες μονάδες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η παραγωγή του νερού εξαρτάται από τη στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου.

Πολλοί επιστήμονες έχουν εστιάσει το ενδιαφέρον τους στην άμεση αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας με μηχανική σύζευξη χωρίς να μεσολαβεί μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια που συνεπάγεται σημαντικές απώλειες. Εκτεταμένη έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Liu και συνεργάτες [11] οι οποίοι κατασκεύασαν μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης που περιελάμβανε σύστημα ανεμόμυλου-αντλίας, ρυθμιστή ροής και πίεσης, στοιχείο μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης και σύστημα ελέγχου. Με το σύστημα ελέγχου επετεύχθη λειτουργία της μονάδας για ταχύτητες ανέμου κάτω από 5m/sec. Δεδομένου ότι η σύζευξη Α/Γ-αντλίας παρουσιάζει ιδιαιτερότητες και δυσκολίες στην υλοποίησή της οι Juan La Rotta, Alvaro Pinilla [20] μελέτησαν πειραματικά την απόδοση και τη δυναμική συμπεριφορά μίας εμπορικής αντλίας θετικής μετατόπισης οδηγούμενη από Α/Γ. Οι Rod Robinson και συνεργάτες [19] σε περίοδο 2 ετών εξέτασαν το ενδεχόμενο αξιοποίησης υπόγειων υδάτων που θα καθίστανται πόσιμα αφού υποστούν αφαλάτωση. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται με οδήγηση των αντλιών του συστήματος αφαλάτωσης άμεσα από Α/Γ. Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός του πρωτότυπου συστήματος, η κατασκευή του και ο διαγνωστικός έλεγχος προκειμένου να προσδιοριστεί η ποσότητα και ποιότητα του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού και η αξιοπιστία λειτουργίας του υπό διάφορες συνθήκες. Οι Mathew S. και Pandey P.K. [14] μοντελοποίησαν μαθηματικά τη σύζευξη Α/Γ και φυγοκεντρικής αντλίας και το συγκεκριμένο μοντέλο επιβεβαιώθηκε πειραματικά. Με την εν λόγω μοντελοποίηση ευρέθηκε ότι οι φυγοκεντρικές αντλίες παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά συγκρινόμενες με τις παλινδρομικές αντλίες. Από τα ανωτέρω είναι έκδηλο πως η αφαλάτωση και η αιολική ενέργεια παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον και μπορούν να μελετηθούν σε ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

Αφαλάτωση είναι μία διεργασία διαχωρισμού του νερού από αλατούχα υδατικά διαλύματα. Η συγκέντρωση σε άλατα του διαχωριζόμενου νερού, ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετεί, κυμαίνεται από τιμές μικρότερες των 100 ppm (μεγάλης καθαρότητας νερό) έως και 35000-50000 ppm (θαλασσινό νερό) με το υφάλμυρο νερό να αντιστοιχεί σε τιμές μερικών χιλιάδων ppm (περίπου 10000 ppm).

Πολλές μέθοδοι έχουν εφαρμοστεί για την αφαλάτωση του νερού με αρκετά διαδεδομένη τη διεργασία της απόσταξης. Η εξάτμιση του διαλύματος προκαλείται από την πρόσδοση σε αυτό ποσού θερμότητας ή τη μείωση της τάσης των ατμών του και ακόλουθα λαμβάνει χώρα συμπύκνωση των σχηματιζόμενων υδρατμών σε ψυχρές επιφάνειες παράγοντας πόσιμο νερό. Οι κυριότερες διεργασίες απόσταξης που ανήκουν στην κατηγορία των θερμικών διεργασιών είναι η Άμεση Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων (*Multi-Stage Flash (MSF) Distillation*), η Απόσταξη Πολλαπλής Επίδρασης (*Multi Effect (ME) Distillation*) η Απόσταξη με Συμπίεση Ατμών (*Vapor Compression (VC) Distillation*) και η Ηλιακή Απόσταξη (*Solar Distillation*). Μία άλλη κατηγορία διεργασιών αξιοποιεί βασική ιδιότητα των μεμβρανών που είναι η επιλεκτική διαπερατότητά τους, σύμφωνα με την οποία, υπό την επίδραση μίας εξωτερικής δύναμης, επιτρέπεται η διέλευση είτε του νερού είτε των ιόντων άλατος μέσα από αυτές. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν η Αντίστροφη Ώσμωση (*Reverse Osmosis (RO)*), η Ηλεκτροδιάλυση (*Electrodialysis (ED)*) και η Απόσταξη Μεμβράνης (*Membrane Distillation (MD)*). Το εξωτερικό αίτιο που επιβάλλεται δύναται να είναι πίεση, διαφορά δυναμικού ή θερμότητα αντίστοιχα. Μία διεργασία που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό υδατικών διαλυμάτων χαμηλής αλατότητας είναι η Ιοντοεναλλαγή (*Ion Exchange (IE)*) κατά την οποία ιόντα άλατος δεσμεύονται από ένα υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα της επιλεκτικής απορρόφησης επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό μείωση της αλατότητας του νερού στο διάλυμα. Από τις ανωτέρω διεργασίες η Αντίστροφη Ώσμωση είναι η νεότερη μέθοδος που άρχισε να χρησιμοποιείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 και καταλαμβάνει το 1/3 της

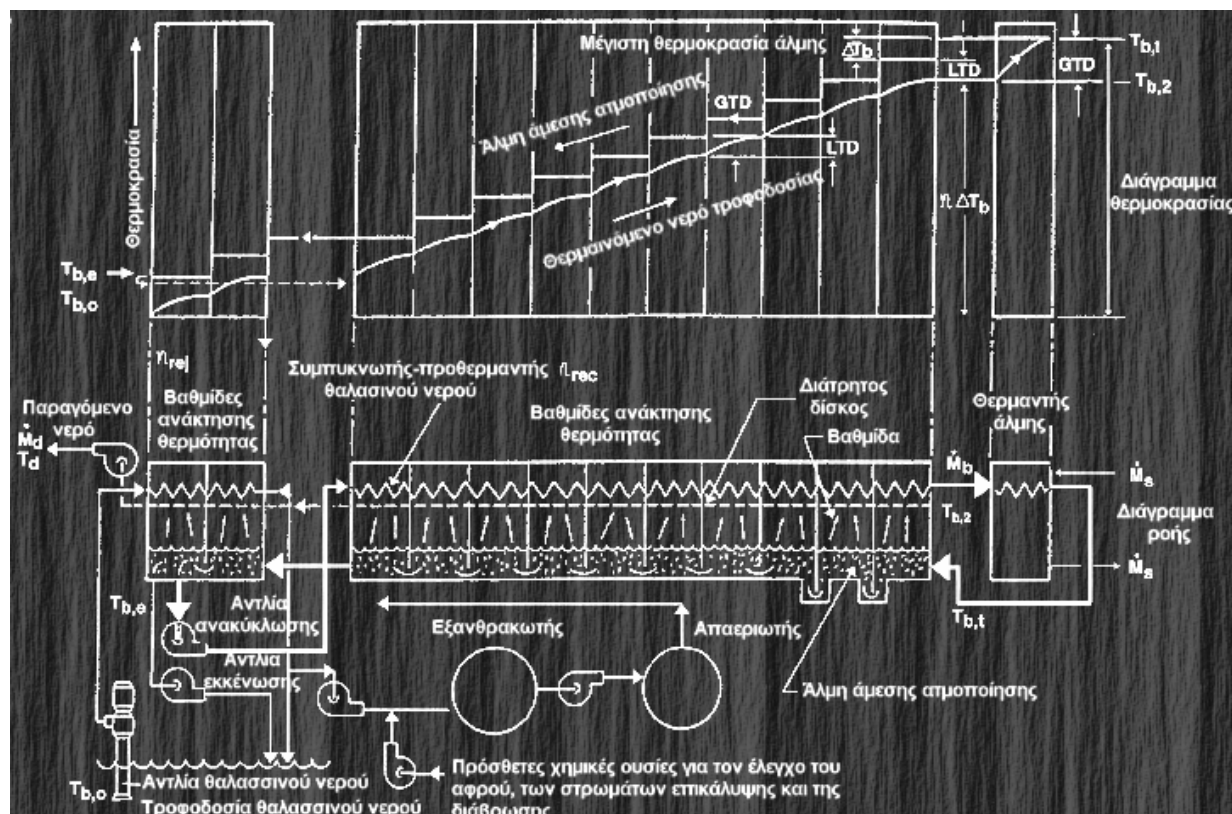
αγοράς διότι απαιτεί μικρότερη ποσότητα ενέργειας για το ίδιο αποτέλεσμα διαχωρισμού και η λειτουργία του δεν επιβαρύνει ιδιαίτερα το περιβάλλον.

Δύο πτυχές της αρχής λειτουργίας της διεργασίας αφαλάτωσης απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Η πρώτη πτυχή σχετίζεται με την έντονη διαβρωτική συμπεριφορά του θαλασσινού νερού η οποία παρατηρείται σε διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών και οι οποίες απαιτούν ακριβά αντιδιαβρωτικά υλικά. Τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κράματα χαλκού-νικελίου, ανοξείδωτος χάλυβας, τιτάνιο και, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, πολυμερή με ενίσχυση ινών. Η δεύτερη πτυχή σχετίζεται με το σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης. Διάφορες ουσίες που συναντώνται σε υδατικά διαλύματα και ιδιαίτερα το θειικό ασβέστιο (CaSO_4), το υδροξείδιο του μαγνησίου (MgOH), το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) παρουσιάζουν την τάση να δημιουργούν κατακρημνίσματα όταν υπερβαίνεται μία συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας και συγκέντρωσης. Τα κατακρημνίσματα, τα οποία συνήθως αναμειγνύονται με ακαθαρσίες που εισέρχονται με το θαλασσινό νερό και με προϊόντα διάβρωσης, σταδιακά αποφράσσουν τις σωληνώσεις και όταν επικάθονται σε επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας μειώνουν το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας ελαττώνοντας την απόδοση της εγκατάστασης. Καθώς η θερμοκρασία στην οποία λειτουργούν οι μεμβράνες περιορίζει το σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης, αυτές είναι ευαίσθητες όχι μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες κατακρημνισμάτων ή ακόμα και ακαθαρσιών αλλά και στην παρουσία συγκεκριμένων αλάτων και άλλων στοιχείων που περιορίζουν την ικανότητά τους να διαχωρίσουν το νερό από το άλας. Για την αντιμετώπιση της διάβρωσης, του σχηματισμού στρωμάτων επικάλυψης και άλλων προβλημάτων, το προς αφαλάτωση νερό προεπεξεργάζεται. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει καθαρισμό του προς αφαλάτωση νερού, αφαίρεση του αέρα (απαερίωση), του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και επιλεκτική αφαίρεση αλάτων που προκαλούν σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης (αποσκλήρυνση). Επιπρόσθετα ενδέχεται να περιλαμβάνει την προσθήκη χημικών ουσιών που επιτρέπουν τη λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς την εναπόθεση των σχηματιζόμενων κατακρημνισμάτων.

Το αλατούχο ύδωρ, συμπεριλαμβανομένου και του θαλασσινού, περιέχει, πέρα από ανόργανα άλατα, οργανική ύλη και διάφορα σωματίδια. Η σύνθεσή του διαφέρει ανάλογα με την τοπολογία του και μεταβάλλεται με το χρόνο λόγω φυσικών και τεχνητών διεργασιών. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης απαιτεί πολύ καλή γνώση της σύστασης του αλατούχου νερού και των ιδιοτήτων του. Οι κυριότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται σήμερα ή βρίσκονται σε προχωρημένο ερευνητικό στάδιο περιγράφονται ακόλουθα.

2.1 Θερμικές Διεργασίες

2.1.1 Άμεση Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων (Multi-Stage Flash (MSF) Distillation)



Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα MSF διεργασίας

Η αρχή λειτουργίας σχεδόν των περισσότερων και μεγαλύτερων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης MSF περιγράφεται στο σχήμα 2.1. Το (θαλασσινό) νερό τροφοδοσίας προθερμαίνεται μέσω θερμότητας, που έχει ανακτηθεί εσωτερικά από συμπυκνόμενο υδρατμό, καθώς διέρχεται από τα διάφορα στάδια της διεργασίας. Ακολούθως θερμαίνεται σε δοχείο (θερμαντής άλμης, brine heater) έως μία μέγιστη θερμοκρασία από ατμό παραγόμενο από εξωτερική πηγή θερμότητας. Το νερό αυτό θερμοκρασίας $T_{b,t}$ διοχετεύεται ως ρεύμα ελεύθερης επιφάνειας μέσα από μία αλληλουχία βαθμίδων οι οποίες διαμορφώνονται από κατακόρυφα τοιχώματα διαχωρίζοντας την ποσότητα υδρατμού σε καθένα από τα στάδια της διαδικασίας. Τα τοιχώματα αυτά επιτρέπουν τα ποσά υδρατμού της κάθε βαθμίδας να υπόκεινται σε σταθερή αλλά διαφορετική μεταξύ τους πίεση, η οποία μειώνεται κατά μήκος της διαδρομής που διασχίζει το νερό τροφοδοσίας λόγω της σταδιακής μείωσης της θερμοκρασίας στο συμπυκνωτή-προθερμαντή θαλασσινού νερού (feedwater

heating condenser). Ο τελευταίος εγκαθίσταται άνωθεν του ρεύματος θαλασσινού νερού και η παρουσία του βελτιώνει την απόδοση της εγκατάστασης. Η επικρατούσα πίεση σε κάθε στάδιο επιτρέπει την ατμοποίηση του εισερχόμενου νερού. Η λανθάνουσα θερμότητα ή θερμότητα ατμοποίησης παρέχεται από τη μείωση της αισθητής θερμότητας του ατμοποιούμενου νερού με επακόλουθη σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας του ρεύματος νερού τροφοδοσίας. Η ατμοποίηση έχει ως αποτέλεσμα την έντονη παραγωγή φυσαλίδων που συνοδεύεται από τυρβώδη ροή και είναι γνωστή ως **άμεση ατμοποίηση** (flash evaporation). Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της MSF διεργασίας είναι το γεγονός ότι η ατμοποίηση προέρχεται από το ρεύμα του (θαλασσινού) νερού τροφοδοσίας και όχι από τις θερμαινόμενες επιφάνειες (όπως συμβαίνει με άλλες διεργασίες απόσταξης) στις οποίες η εξάτμιση συνήθως προκαλεί σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης και επομένως σταδιακή μείωση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι η αισθητή θερμότητα του νερού είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τη λανθάνουσα θερμότητα και η μέγιστη θερμοκρασία περιορίζεται λόγω του ενδεχόμενου σχηματισμού στρωμάτων επικάλυψης και διάβρωσης υπαγορεύει την ανάγκη για αρκετά μεγάλη παροχή του ρεύματος τροφοδοσίας. Για παράδειγμα αν μία MSF εγκατάσταση λειτουργεί με μέγιστη θερμοκρασία $T_{b,t}=90^{\circ}\text{C}$ ¹ στην είσοδο του ατμοποιητή και με θερμοκρασία εξόδου $T_{b,e}=40^{\circ}\text{C}$ που αντιστοιχεί σε συνθήκες περιβάλλοντος, η ολική πτώση θερμοκρασίας του ρεύματος τροφοδοσίας θα είναι 50°C . Με βάση τις ανωτέρω τιμές, ο ενεργειακός ισολογισμός μεταξύ της αισθητής θερμότητας του νερού τροφοδοσίας του οποίου η παροχή είναι \dot{m}_b και της λανθάνουσας θερμότητας που απαιτείται για την παραγωγή υδρατμού με παροχή \dot{m}_d είναι:

$$(\dot{m}_b - \dot{m}_d)c_p(T_{b,t} - T_{b,e}) = \dot{m}_d h_{fg} \quad (2.1)$$

όπου c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα και h_{fg} η λανθάνουσα θερμότητα του νερού. Με βάση την εξίσωση (2.1) και λαμβάνοντας την τιμή της c_p και της h_{fg} για θερμοκρασία ίση με $\bar{T} = \frac{T_{b,t} + T_{b,e}}{2} = \frac{40^{\circ}\text{C} + 90^{\circ}\text{C}}{2} = 65^{\circ}\text{C}$ (ήτοι $c_p=4.187 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ και $h_{fg}=2346 \text{ kJ/kg}$) είναι δυνατόν να υπολογιστεί προσεγγιστικά ο λόγος μαζών του νερού τροφοδοσίας προς το παραγόμενο νερό:

$$\frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_d} = 1 + \frac{h_{fg}}{c_p(T_{d,t} - T_{b,e})} = 1 + \frac{2346}{4.187(90 - 40)} = 12.21 \frac{\text{kg νερού τροφοδοσίας}}{\text{kg παραγόμενου νερού}}$$

¹ Οι δείκτες b, d, και s αναφέρονται στο νερό τροφοδοσίας, στο παραγόμενο νερό και στο θερμαίνον υδρατμό (θερμαντή άλμης) αντίστοιχα.

Η υψηλή τιμή του λόγου αυτού επιβαρύνει το κόστος ενέργειας, του εξοπλισμού άντλησης καθώς και ορισμένων στοιχείων της εγκατάστασης όπως συμβαίνει με τα δοχεία εξάτμισης τα οποία απαιτείται να είναι μεγάλου μεγέθους για την επίτευξη βέλτιστων βαθμών ατμοποίησης.

Ο παραγόμενος υδρατμός διέρχεται μέσα από διάτρητο δίσκο (*demister*) που τοποθετείται για την αφαίρεση των σταγονιδίων θαλασσινού νερού που ενδεχόμενα εγκλωβίζονται στο εξατμιζόμενο νερό και συμπαρασύρονται από αυτό. Ακόλουθα, συνεχίζει να ανέρχεται και συμπυκνώνεται στον αγωγό συλλογής του συμπυκνωτή εξασφαλίζοντας εσωτερική ανάκτηση θερμότητας με τη μεταφορά της θερμότητας συμπύκνωσης στο νερό τροφοδοσίας το οποίο με τον τρόπο αυτό προθερμαίνεται. Η εσωτερική ανάκτηση θερμότητας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διεργασίας.

Η ενεργειακή απόδοση των εγκαταστάσεων απόσταξης συνήθως εκτιμάται από το *λόγο απόδοσης* (*performance ratio, PR*) που τυπικά ορίζεται από τη σχέση:

$$PR = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_s} \quad (2.2)$$

όπου \dot{m}_s είναι η παροχή μάζας του θερμαίνοντος υδρατμού, ήτοι του υδρατμού που χρησιμοποιείται στο θερμαντή άλμης για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Δεδομένου ότι η λανθάνουσα θερμότητα είναι περίπου ίδια τόσο για τη διεργασία της απόσταξης όσο και για το θερμαίνον υδρατμό ο λόγος απόδοσης αποτελεί και λόγο της θερμότητας που απαιτείται για την παραγωγή μίας μονάδας προϊόντος (προϊόν απόσταξης) προς την εξωτερική θερμότητα που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό. Το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας που διοχετεύεται για να ανέλθει το νερό τροφοδοσίας σε θερμοκρασία $T_{b,t}$ προέρχεται από εσωτερική ανάκτηση ενώ η εξωτερική πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας του προθερμασμένου νερού τροφοδοσίας, που εξέρχεται από τη θερμότερη βαθμίδα, από $T_{b,2}$ σε $T_{b,t}$. Με βάση το σχήμα (2.1), τη σχέση (2.1) και χρησιμοποιώντας ισολογισμό ενέργειας ο λόγος απόδοσης δύναται να οριστεί εναλλακτικά σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$PR = \frac{\dot{m}_b (\overline{c}_{p,b})_{e \rightarrow t} (T_{b,t} - T_{b,e}) / h_{fg,b}}{\dot{m}_b (\overline{c}_{p,b})_{2 \rightarrow t} (T_{b,t} - T_{b,2}) / h_{fg,s}} \approx \frac{T_{b,t} - T_{b,e}}{T_{b,t} - T_{b,2}} \quad (2.3)$$

Όπου $(\overline{c}_{p,b})_{e \rightarrow t}$ και $(\overline{c}_{p,b})_{2 \rightarrow t}$ είναι οι μέσες ειδικές θερμοχωρητικότητες του θαλασσινού νερού για θερμοκρασιακά εύρη $T_{b,e} \rightarrow T_{b,t}$ και $T_{b,2} \rightarrow T_{b,t}$ αντίστοιχα. Από την ανωτέρω σχέση είναι προφανές ότι ο λόγος απόδοσης αυξάνει με τη θερμοκρασία $T_{b,2}$ στην έξοδο του

συμπυκνωτή-προθερμαντή θαλασσινού νερού. Επιπλέον είναι προφανές ότι αύξηση του αριθμού των βαθμίδων (που συνεπάγεται αναλογική αύξηση της επιφάνειας του συμπυκνωτή με την παραδοχή ότι δεν μεταβάλλεται σημαντικά ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας) για δεδομένη θερμοκρασία $T_{b,t}$ αυξάνει τη θερμοκρασία $T_{b,2}$ και επομένως προκαλεί αύξηση του PR.

Με τη θεώρηση ότι η πτώση θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας ΔT_b είναι ίδιος σε κάθε βαθμίδα είναι δυνατόν να συσχετιστεί ο αριθμός των βαθμίδων με τον PR σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$PR = \frac{1}{\frac{LTD}{T_{b,t} - T_{b,e}} + \frac{1}{n}} \quad (2.4)$$

όπου LTD είναι η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του υδρατμού και του θερμαινόμενου νερού τροφοδοσίας (που διέρχεται από το συμπυκνωτή-προθερμαντή θαλασσινού νερού) κάθε βαθμίδας. Η εξίσωση (2.4) δείχνει ότι με την αύξηση των αριθμών των βαθμίδων ο PR αυξάνεται, ήτοι μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας ανακτάται εσωτερικά που θα απαιτούσε μεγαλύτερη επιφάνεια στο συμπυκνωτή-προθερμαντή θαλασσινού νερού. Η απαιτούμενη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, A , ανά μονάδα μάζας παραγόμενου νερού απόσταξης, αναφερόμενη σε όλη τη διάταξη ανάκτησης (που αποτελείται από n_{rec} βαθμίδες) και λαμβάνοντας μέσες τιμές του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας U , προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$A = n_{rec} A_n = n_{rec} \frac{h_{b,fg}}{U(LMTD)} \quad (2.5)$$

όπου $LMTD$ είναι η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του συμπυκνούμενου υδρατμού στην εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων και του θερμαινόμενου νερού τροφοδοσίας στο εσωτερικό των σωλήνων του συμπυκνωτή-προθερμαντή θαλασσινού νερού.

Για μία οποιαδήποτε βαθμίδα το LMTD παρέχεται από την παρακάτω σχέση:

$$LMTD = \frac{GTD - LTD}{\ln \frac{GTD}{LTD}} = \frac{(T_{b,t} - T_{b,2}) - LTD}{\ln \left(\frac{T_{b,t} - T_{b,2}}{LTD} \right)} \quad (2.6)$$

όπου GTD είναι η μέγιστη διαφορά μεταξύ του υδρατμού και του νερού τροφοδοσίας του συμπυκνωτή-προθερμαντή. Με τη βοήθεια των εξισώσεων (2.5) και (2.6) προκύπτει ότι:

$$A = \frac{h_{fg,b}}{U} \frac{n_{rec}}{(T_{b,t} - T_{b,e})} \ln \left(\frac{n_{rec}}{n_{rec} - PR} \right) \quad (2.7)$$

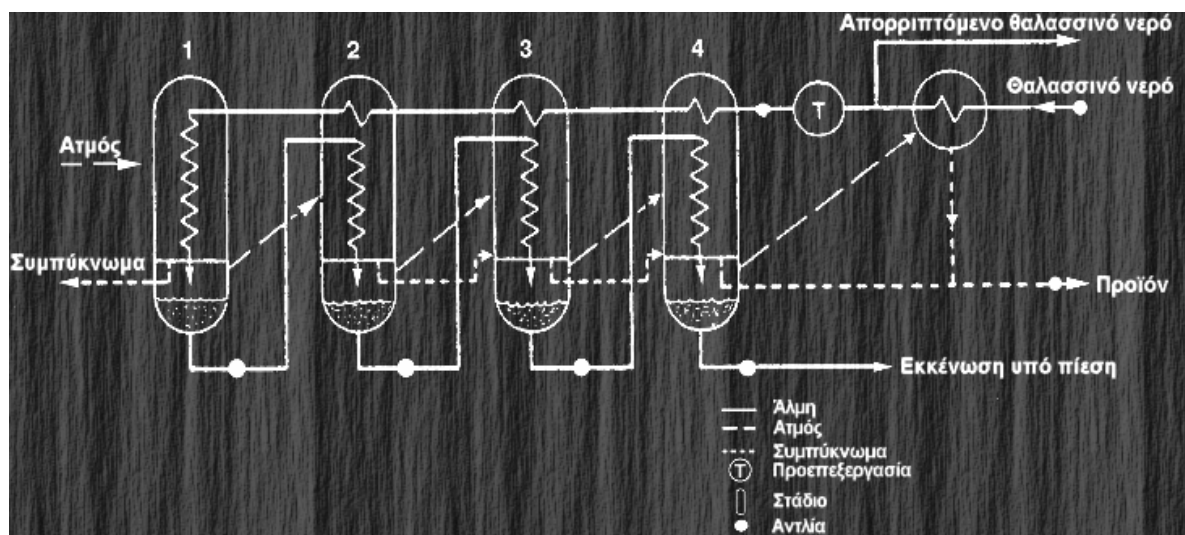
Εξετάζοντας την εξίσωση (2.7) εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απαιτούμενη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας του τμήματος ανάκτησης ανά μονάδα μάζας παραγόμενου νερού απόσταξης αυξάνεται σημαντικά στην περίπτωση που ο το PR αυξάνεται, και μειώνεται αμελητέα καθώς ο αριθμός των βαθμίδων ανάκτησης, η_{rec} , αυξάνεται.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1 ένα μέρος της άλμης αναμειγνύεται με το προεπεξεργασμένο νερό τροφοδοσίας και ανακυκλώνεται στο συμπυκνωτή-προθερμαντή. Η προεπεξεργασία περιλαμβάνει αφαίρεση CO₂, απαερίωση και προσθήκη χημικών ουσιών που περιορίζουν το σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης, τη διάβρωση και τη δημιουργία αφρού.

Δεδομένου ότι η συναλλαγή θερμότητας στην εγκατάσταση είναι εσωτερική, για να είναι ευσταθής η λειτουργία της απαιτείται να αποβάλλεται στο περιβάλλον ποσό ενέργειας ίσο με τη συνολική ενέργεια που προσδίδεται εξωτερικά σε αυτήν. Συνεπώς, η θερμότητα που προσδίδεται στο νερό τροφοδοσίας (καθώς και η ενέργεια που προσδίδεται μέσω των αντλιών) αποβάλλεται στις βαθμίδες απόρριψης. Θεωρώντας ότι η πτώση θερμοκρασίας σε κάθε βαθμίδα είναι ίδια και ότι η ενέργεια άντλησης είναι αμελητέα συγκρινόμενη με τη θερμότητα που προσδίδεται από το θερμαντή άλμης, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο λόγος του των βαθμίδων ανάκτησης προς τις βαθμίδες απόρριψης (η_{rej}) μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ίσος με το PR.

2.1.2 Απόσταξη Πολλαπλής Επίδρασης (*Multi Effect (ME) Distillation*)

Η αρχή λειτουργίας της διεργασίας αυτής (σχήμα 2.2.1) βασίζεται στη χρησιμοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας του υδρατμού που παράγεται σε ένα στάδιο (*effect*) για την παραγωγή υδρατμού σε επόμενο στάδιο επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό εσωτερική ανάκτηση θερμότητας και ικανοποιητικό ενεργειακό βαθμό απόδοσης. Στη διεργασία αυτή χρησιμοποιούνται εκτεταμένα *ατμοποιητές οριζόντιου σωλήνα ME (HTME)* και *κατακόρυφου σωλήνα ME (VTE)*. Στους ατμοποιητές HTME, ο υδρατμός ανακυκλώνεται μέσω οριζόντιας δέσμης σωλήνων, οι οποίοι εκτίθενται σε εξωτερικό ψεκασμό με ψυχρότερο θαλασσινό νερό. Ο υδρατμός που διέρχεται από αυτούς τους σωλήνες συμπυκνώνεται και η λανθάνουσα θερμότητα μεταφέρεται μέσα από τα τοιχώματά τους στο θαλασσινό νερό που προσκρούει στην εξωτερική επιφάνειά τους προκαλώντας την εξάτμισή του. Ο υδρατμός που παράγεται



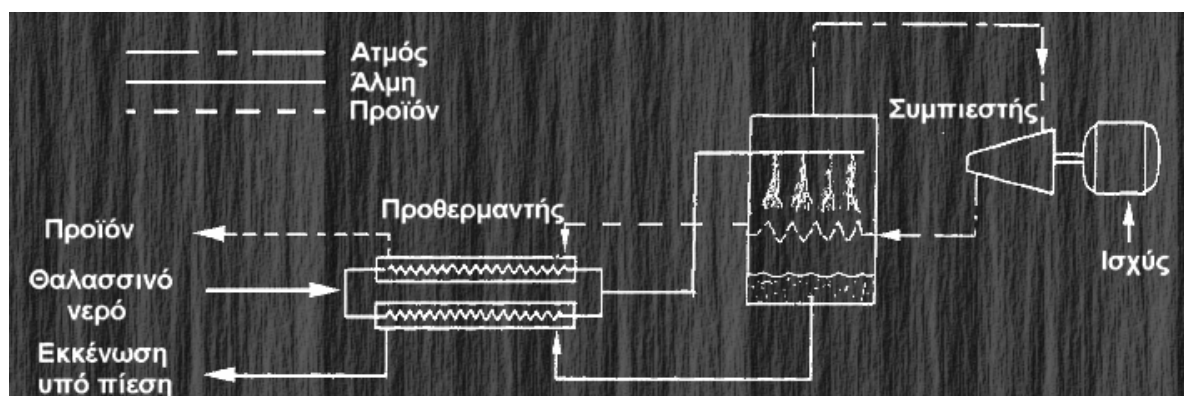
Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα ΜΕ διεργασίας

ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων του επόμενου σταδίου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από στάδιο σε στάδιο.

Στους συμπυκνωτές VTE το θαλασσινό νερό τυπικά ρέει καθοδικά στο εσωτερικό κατακόρυφων σωλήνων και ατμοποιείται στο εξωτερικό αυτών, ως αποτέλεσμα της συμπύκνωσης του υδρατμού που προέρχεται από προηγούμενο στάδιο υψηλότερης θερμοκρασίας. Παρόλο που η εσωτερική ανάκτηση αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό για τις μεθόδους MSF και ME, υπάρχουν τρεις ειδοποιεί διαφορές μεταξύ τους. Η πρώτη διαφορά είναι ότι στη διεργασία ME η εξάτμιση λαμβάνει χώρα στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας ενώ στη διεργασία MSF συμβαίνει στην ελεύθερη επιφάνεια του ρεύματος νερού τροφοδοσίας. Το γεγονός αυτό καθιστά τη ME διεργασία πιο επιρρεπή στο σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης. Συγχρόνως ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του υδρατμού και του προθερμασμένου θαλασσινού νερού είναι χαμηλότερος στη MSF διεργασία διότι το θερμαινόμενο θαλασσινό νερό δε ζέει. Αντίθετα, στη ME διεργασία το θερμαινόμενο θαλασσινό νερό ζέει που σημαίνει ότι οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας σε κατάσταση βρασμού είναι σημαντικά υψηλότεροι συγκρινόμενοι με αυτούς όπου συναλλαγή θερμότητας δεν προκαλεί ζέση. Επιπλέον, στη διεργασία ME απαιτείται μικρότερη παροχή νερού τροφοδοσίας σε σχέση με τη MSF διεργασία. Συγκεκριμένα, για τον περιορισμό στο 1/3 της συγκέντρωσης του νερού τροφοδοσίας στο τελευταίο στάδιο της διεργασίας απαιτείται ροή θαλασσινού νερού παροχής μόνο 1.5 φορές μεγαλύτερη από την παροχή του παραγόμενου νερού απόσταξης. Επιπρόσθετα, απαιτείται μία αντλία για κάθε στάδιο αλλά μικρότερης ισχύος από τις αντλίες που χρησιμοποιούνται στη MSF διεργασία.

2.1.3 Απόσταξη με Συμπίεση Ατμών (*Vapor Compression (VC) Distillation*)

Όπως προαναφέρθηκε η τάση των ατμών του θαλασσινού νερού είναι χαμηλότερη από το καθαρό νερό στην ίδια θερμοκρασία, με τη διαφορά πίεσης να είναι ανάλογη προς την άνοδο του σημείου βρασμού. Η αφαλάτωση στη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται με την ατμοποίηση του θαλασσινού νερού και τη συμπύκνωσή του παρέχοντας καθαρό νερό. Για το λόγο αυτό, η πίεση του παραγόμενου από το θαλασσινό νερό υδρατμού πρέπει να αυξηθεί κατά μέγεθος ίσο με την προαναφερόμενη διαφορά πίεσης, προσαυξημένη κατά ένα ποσό για την αντιστάθμιση των διαφόρων απωλειών. Με τον τρόπο αυτό η θερμότητα για την εξάτμιση του νερού προέρχεται από τη συμπίεση του ατμού και όχι από την άμεση συναλλαγή θερμότητας από την παραγωγή ατμού σε ένα λέβητα. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται η απόσταξη με συμπίεση ατμών.

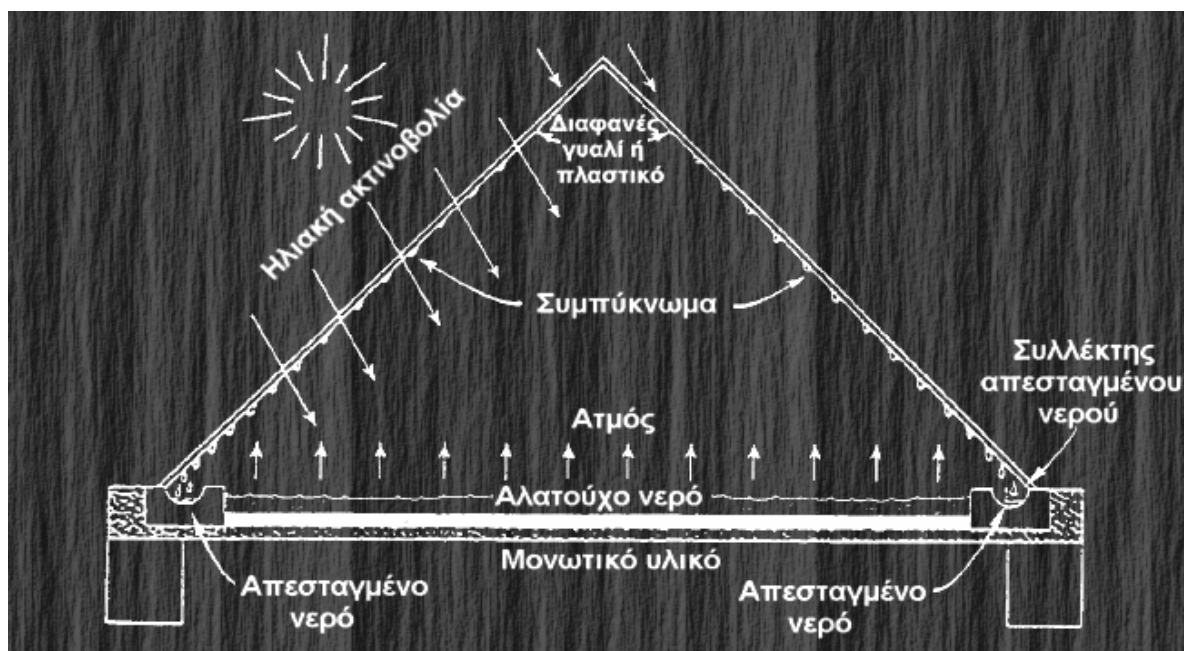


Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα VC διεργασίας

Επιπλέον όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 η θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού υπό πίεση ανακτάται εσωτερικά χρησιμοποιώντας αυτή για την ατμοποίηση του θαλασσινού νερού. Επιπρόσθετη ανάκτηση ποσότητας θερμότητας πραγματοποιείται με τη μεταφορά θερμότητας από το εκρέον ρεύμα άλμης και το παραγόμενο νερό απόσταξης (το οποίο πρέπει να ψυχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος) στο νερό τροφοδοσίας το οποίο με τον τρόπο αυτό προθερμαίνεται. Στο σχηματικό διάγραμμα 2.3 το προθερμασμένο νερό τροφοδοσίας ψεκάζεται σε δέσμη οριζόντιων σωλήνων που μεταφέρουν το συμπυκνωμένο και υπό πίεση υδρατμό σε θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή του νερού τροφοδοσίας. Τα σταγονίδια που δημιουργούνται από το μηχανισμό ψεκασμού εξατμίζονται λόγω της επαφής τους με την εξωτερική επιφάνεια των σωλήνων και παρέχεται η απαραίτητη ψύξη για την εσωτερικά διενεργούμενη συμπύκνωση. Εναλλακτικά στη θέση του συμπιεστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας διαχύτης και συγκεκριμένα ένα αποκλίνον ακροφύσιο το

οποίο ενισχύει την αξιοπιστία του συστήματος λόγω της απλότητας στο σχεδιασμό αλλά και της απουσίας κινούμενων τμημάτων αλλά παράλληλα μειώνει την απόδοση της εγκατάστασης διότι ένας διαχύτης είναι λιγότερο αποδοτικός συγκριτικά με ένα μηχανικό συμπιεστή.

2.1.4 Ηλιακή Απόσταξη (Solar Distillation)



Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακής απόσταξης

Πολλές περιοχές που παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα λειψυδρίας παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του χρόνου. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα στη χρήση της ηλιακής ενέργειας σχετίζεται με το κόστος της εγκατάστασης. Έτσι απαιτείται μεγάλη επιφάνεια συλλογής λόγω του γεγονότος ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι διαχεόμενη. Για παράδειγμα θεωρώντας μίας βαθμίδας ηλιακό αποστακτήρα, παράγεται από αυτόν 3.5 με 4.8 kg καθαρού νερού ανά m^2 την ημέρα ή απαιτούνται 208 με 286 m^2 συλλέκτες ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή $1m^3$ καθαρού νερού την ημέρα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 ένας ηλιακός αποστακτήρας αποτελείται από μία δεξαμενή θαλασσινού νερού στην οποία το νερό εκτίθεται στον ήλιο και θερμαίνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από αυτήν του περιβάλλοντος προκαλεί εξάτμιση του θαλασσινού νερού διαχωρίζοντας με τον τρόπο αυτό το καθαρό νερό (με τη μορφή ατμού) από το αλατούχο διάλυμά του. Ο ατμός συμπυκνώνεται στο ψυχρότερο κάλυμμα του αποστακτήρα και το συμπύκνωμα αυτό συλλέγεται από τους συλλέκτες απεσταγμένου νερού (*distillate trough*). Καθώς η θερμότητα συμπύκνωσης σε μίας

βαθμίδας ηλιακό αποστακτήρα χάνεται στο περιβάλλον, είναι φανερό πως είναι δυνατόν να κατασκευαστούν μεγαλύτερης αποδοτικότητας αποστακτήρες με σχεδιασμό πολλαπλών βαθμίδων όπου η θερμότητα συμπύκνωσης χρησιμοποιείται για την εξάτμιση επιπρόσθετης ποσότητας θαλασσινού νερού. Ένας αριθμός τέτοιων αποστακτήρων έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί αλλά δεν είναι ακόμη ανταγωνιστικοί.

2.2 Διεργασίες Μεμβρανών

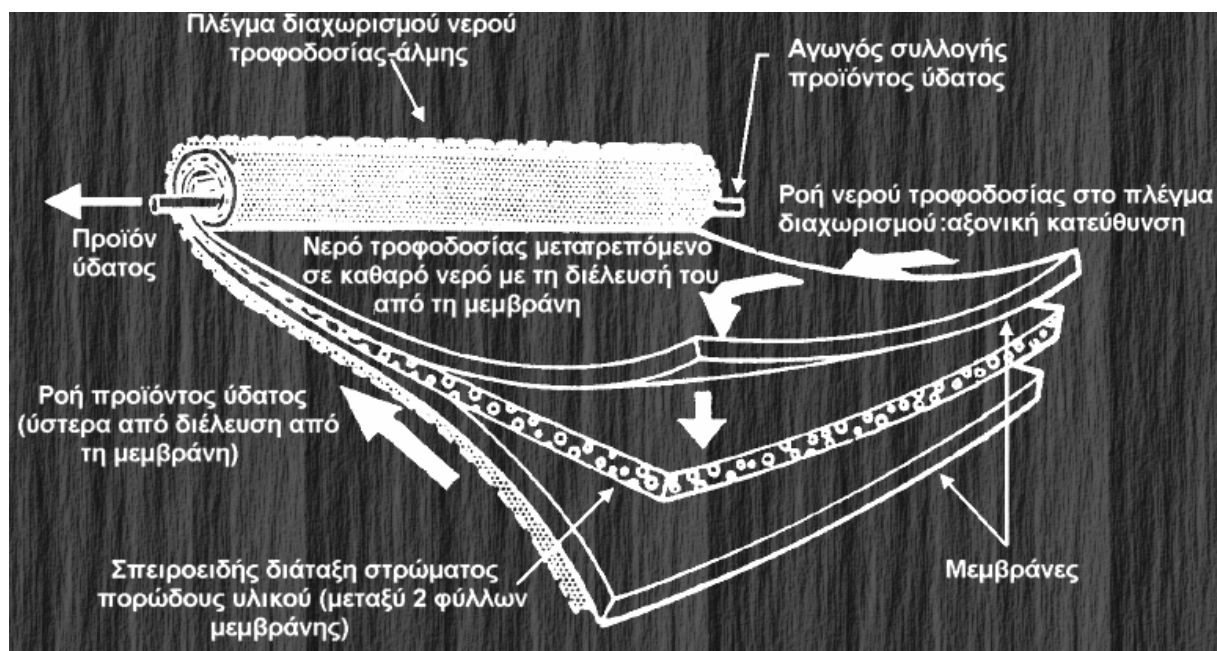
2.2.1 Αντίστροφη Ωσμωση (*Reverse Osmosis (RO)*)

Ο διαχωρισμός σωματιδίων από το υγρό που τα περιέχει με την επιβολή πίεσης σε αυτό και τη διέλευσή του μέσα από πορώδη επιφάνεια όπου σωματίδια μεγαλύτερα από το μέγεθος των πόρων παραμένουν στην ανάντι πλευρά της μεμβράνης είναι γνωστός ως **διήθηση**. Ημιπερατές μεμβράνες μεγάλης πυκνότητας που διαχωρίζουν τα ιόντα των αλάτων από το νερό συγκρατώντας τα άλατα στην ανάντι πλευρά και επιτρέποντας το υπό πίεση καθαρό νερό να διέλθει μέσα από τη μεμβράνη είχαν παρασκευαστεί στη δεκαετία του 1950. Η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται **ώσμωση**. Αν μία ημιπερατή μεμβράνη τοποθετείται για να διαχωρίσει το νερό από το αλατούχο διάλυμά του αυτό τείνει να ρέει μέσα από τη μεμβράνη προς το αλατούχο διάλυμα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στα κύτταρα των ζωντανών οργανισμών. Η κινητήρια δύναμη του ρεύματος αυτού είναι ανάλογη με τη διαφορά συγκέντρωσης μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης και ονομάζεται **ωσμωτική πίεση** η οποία είναι υψηλότερη κατά **2.51 MPa** στην πλευρά της μεμβράνης όπου βρίσκεται το καθαρό νερό για τυπικό θαλασσινό νερό των 25°C. Αν πίεση μεγαλύτερη από την ωσμωτική επιβληθεί στην πλευρά της μεμβράνης όπου βρίσκεται το αλατούχο υδατικό διάλυμα, το ρεύμα του νερού δύναται να αντιστραφεί έτσι ώστε το νερό να διέλθει μέσα από τη μεμβράνη από την πλευρά του διαλύματος στην πλευρά του καθαρού νερού. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **αντίστροφη ώσμωση** και αποτελεί βασική αρχή στην οποία βασίζεται η αφαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης (*RO*).

Αντίθετα με τα φίλτρα, η επιλεκτική διήθηση του νερού στην αντίστροφη ώσμωση δε σχετίζεται με το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης και των ιόντων άλατος. Μία εξήγηση που θα μπορούσε να δοθεί για το εν λόγω φαινόμενο σχετίζεται με το πολύ λεπτό ενεργό επιφανειακό στρώμα της μεμβράνης το οποίο σχηματίζει δεσμούς υδρογόνου με τα μόρια του νερού καθιστώντας τα τελευταία μη ικανά να διαλύσουν το άλας. Με τον τρόπο αυτό το άλας δε δύναται να διαπεράσει το στρώμα αυτό. Τα μόρια του νερού που προσεγγίζουν το στρώμα μεταφέρονται μέσα από αυτό σχηματίζοντας με το ίδιο δεσμούς υδρογόνου μετατοπίζοντας

τα μόρια νερού που προγενέστερα είχαν δεσμευθεί από το υδρογόνο στις περιοχές αυτές. Το μετατοπισμένα μόρια νερού κινούνται με τριχοειδή δράση μέσα από τους πόρους του υπόλοιπου τμήματος της μεμβράνης και καταλήγουν στην πλευρά του καθαρού νερού.

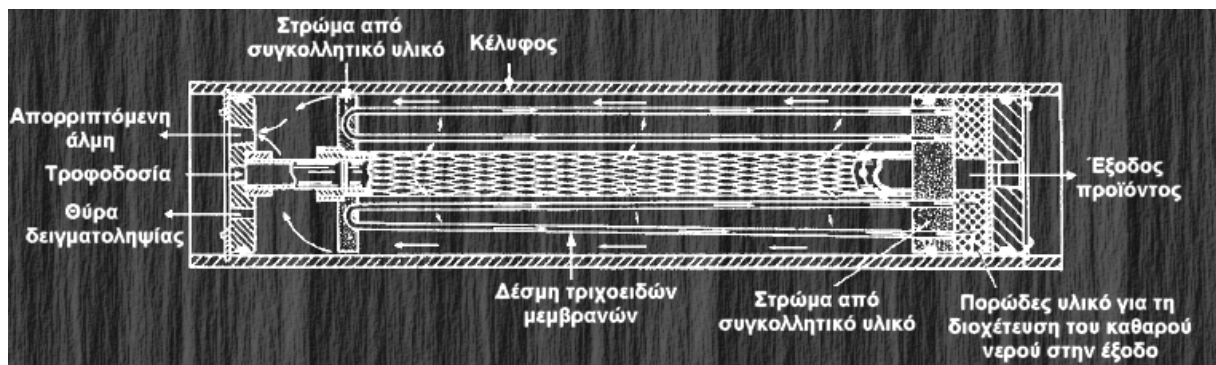
Οι πιο διαδεδομένοι τύποι μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στις RO εγκαταστάσεις είναι οι σπειροειδείς και οι τριχοειδείς.



Σχήμα 2.5: Σπειροειδής τύπος μεμβράνης

Στους σπειροειδείς τύπους (σχήμα 2.5) δύο φύλλα επικολλώνται μεταξύ τους και περιβάλλουν με σπειροειδή διάταξη ένα διάτρητο σωλήνα σχηματίζοντας ένα κύλινδρο. Ένα από τα φύλλα αυτά αποτελείται από πέντε στρώματα εκ των οποίων τα δύο εξωτερικά αποτελούν τις ημιπερατές μεμβράνες. Κάθε μία από αυτές υποστηρίζεται από ειδικό υλικό για ενίσχυση της μηχανικής τους αντοχής ενώ το κεντρικό στρώμα που παρεμβάλλεται ανάμεσά τους είναι λεπτότερο από πορώδες υλικό και παραλαμβάνει το καθαρό νερό. Το δεύτερο εκ των δύο φύλλων αποτελείται από πορώδες πλέγμα μέσα από το οποίο διέρχεται το υψηλής πίεσης θαλασσινό νερό τροφοδοσίας σε αξονική κατεύθυνση. Το παραγόμενο νερό διαχωρίζεται από το αλατούχο διάλυμά του και διέρχεται μέσα από τις δύο μεμβράνες προς το κεντρικό στρώμα το οποίο διοχετεύει σπειροειδώς το καθαρό νερό προς το κέντρο του κυλίνδρου καταλήγοντας στο διάτρητο σωλήνα. Οι ημιπερατές μεμβράνες τυπικά κατασκευάζονται από οξική κυτταρίνη και πρόσφατα από διάφορα σύνθετα υλικά πολυμερών.

Οι τριχοειδείς τύποι μεμβρανών (σχήμα 2.6) αποτελούνται από δέσμη μεγάλου αριθμού ινών ημιπερατής μεμβράνης (με εσωτερική κυλινδρική κοιλότητα) εξωτερικής διαμέτρου 25~250 μm (τυπικό πάχος των τοιχωμάτων των ινών 5 με 50 μm) τοποθετημένη σε δοχείο πίεσης που εμπεριέχει θαλασσινό νερό. Ο κοίλος πυρήνας της κάθε ίνας στεγανοποιείται στο ένα άκρο. Το υπό πίεση θαλασσινό νερό διοχετεύεται στη μονάδα μέσα από ένα κεντρικό πορώδη σωλήνα τροφοδοσίας προκειμένου να επιτευχθεί η κυκλοφορία του στην εξωτερική επιφάνεια των ινών και η διέλευσή του μέσα από τα τοιχώματα της μεμβράνης στον κοίλο πυρήνα της. Συνακόλουθα το καθαρό νερό οδηγείται στο ελεύθερο άκρο της κάθε ίνας όπου και συλλέγεται. Η άλμη με τη συνεχώς αυξανόμενη συγκέντρωση της ρέει ακτινικά και αποτίθεται στο εξωτερικό κέλυφος της δέσμης των ινών. Οι ίνες αυτές συνήθως κατασκευάζονται από πολυαμίδιο ή τριοξική κυτταρίνη, παρέχοντας 20 φορές μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου συγκριτικά με το σπειροειδή τύπο.



Σχήμα 2.6: Τριχοειδής τύπος μεμβράνης

Η βασική προσεγγιστική εξίσωση που περιγράφει τη διαδικασία διαχωρισμού η οποία παρέχει το ρεύμα νερού m_w'' ($\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}$) κατά μήκος της RO μεμβράνης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη επιστρώσεις σε αυτήν από διάφορα σωματίδια (*fouling*), έχει ως εξής

$$m_w'' = K_{pe} K_{cf} \left[(P_f - P_p) - (\pi_f - \pi_p) \right] \quad (2.8)$$

όπου P η πίεση και π η οσμωτική πίεση του νερού ή του αλατούχου διαλύματός του, f και p οι δείκτες που αντιστοιχούν στο θαλασσινό νερό τροφοδοσίας και στο παραγόμενο νερό, K_{pe} , η σταθερά διαπερατότητας της μεμβράνης στο νερό (σε $\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}/\text{Pa}$) η οποία τυπικά αυξάνεται με τη θερμοκρασία: μία εγκατάσταση σχεδιασμένη να λειτουργεί σε θερμοκρασία 20°C , είναι δυνατόν να παράγει έως και 24% περισσότερο νερό στην περίπτωση που η θερμοκρασία αυτού είναι 28°C ,

K_{cf} , ο συντελεστής διόρθωσης της συμπίεσης (αδιάστατος αριθμός) ο οποίος σχετίζεται με τη μείωση της παροχής του ρεύματος λόγω της αυξανόμενης πυκνότητας της παρεμβλλόμενης μεμβράνης και αυξάνεται με την πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας. Υπολογίζεται συνήθως από τη σχέση

$$K_{cf} = B \cdot C(T) \cdot C(P) \cdot C(t) \quad (2.9)$$

όπου B είναι μία σταθερά,

$C(T)$ αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του συντελεστή K_{cf} για τη συγκεκριμένη μεμβράνη,

$C(P)$ αντιπροσωπεύει την εξάρτησή του από την πίεση ενώ μία υψηλότερη διαφορά πίεσης στη μεμβράνη σύμφωνα με τη σχέση (2.8) αυξάνει τον όρο εντός αγκύλης, υψηλότερη πίεση τροφοδοσίας (P_f) τείνει να συμπιέζει τη μεμβράνη και επομένως να μειώνει την παροχή του ρεύματος, τυπικά σύμφωνα με τη σχέση

$$C(P) = P_f^n \quad (2.10)$$

όπου n είναι ένας αρνητικός αριθμός και

$C(t)$ αντιπροσωπεύει την εξάρτησή του από το χρόνο και δίδεται από τη σχέση

$$C(t) = t^m \quad (2.11)$$

όπου t είναι ο χρόνος λειτουργίας και m ένας αρνητικός αριθμός εξαρτώμενος από το είδος της μεμβράνης.

Η απαιτούμενη επιφάνεια A της μεμβράνης δύναται να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση

$$\dot{m}_p A = \frac{\dot{m}_p}{m_p^n f} \quad (2.12)$$

όπου \dot{m}_p είναι η παραγόμενη παροχή μάζας καθαρού νερού της εγκατάστασης (kg/sec) και f ($0 < f \leq 1$) ο συντελεστής εκμετάλλευσης ο οποίος διορθώνει την ανωτέρω εξίσωση και σχετίζεται με το γεγονός ότι η επιφάνεια της μεμβράνης δεν ευρίσκεται σε επαφή εξ ολοκλήρου με το ρεύμα του θαλασσινού νερού λόγω του πορώδους πλέγματος που εμπεριέχει και λόγω της ύπαρξης άλλων στοιχείων. Ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός παρέχει τιμή $f > 0.9$.

Εξετάζοντας την εξίσωση (2.8) εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο βαθμός διαχωρισμού του νερού αυξάνει με τη σταθερά διαπερατότητας της μεμβράνης στο νερό K_{pe} . Όμως το ίδιο συμβαίνει με το ρεύμα του άλατος μέσα από τη μεμβράνη με αποτέλεσμα το προϊόν που προκύπτει να έχει υψηλότερη συγκέντρωση.

Η εφαρμοζόμενη πίεση για τις RO εγκαταστάσεις εξαρτάται από την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, τον τύπο της μεμβράνης και την επιθυμητή καθαρότητα του νερού. Κυμαίνεται από 1.5 MPa για χαμηλές συγκεντρώσεις του νερού τροφοδοσίας ή μεμβράνες μεγάλων ρευμάτων, δύναται να παίρνει τιμές 2.5~4 MPa για υφάλμυρα νερά και έως 6~8.4 MPa για αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Τυπικές τιμές παροχής υφάλμυρου νερού διαμέσου σπειροειδούς τύπου μεμβράνης είναι περίπου 600 με 800 kg/(m²day) με *συντελεστή ανάκτησης (Recovery Ratio, RR)* ίσο με 15% και κατά μέσο όρο απόρριψη άλατος 99.5%. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως ένα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει μία εγκατάσταση αφαλάτωσης με μεμβράνη είναι ο **συντελεστής απόρριψης** του άλατος που ορίζεται ως:

$$\eta = \frac{(\text{ποσότητα των αλάτων που απορρίπτεται})}{(\text{ποσότητα των αλάτων στο νερό τροφοδοσίας})} = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.13)$$

όπου C_p , C_f είναι η συγκέντρωση του παραγόμενου νερού και του νερού τροφοδοσίας αντίστοιχα.

Ο **συντελεστής ανάκτησης**, εξίσου σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τη μεμβράνη αφαλάτωσης, ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$RR = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} \quad (2.14)$$

όπου \dot{m}_p η παροχή του παραγόμενου νερού και \dot{m}_f η παροχή του νερού τροφοδοσίας.

Οι παροχές σε τριχοειδούς τύπου μεμβράνες είναι 20 με 30 φορές μικρότερες αλλά το ολικό μέγεθος του συστήματος RO δεν αυξάνει λόγω του γεγονότος ότι οι τριχοειδούς τύπου μεμβράνες έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου. Το RR και ο συντελεστής απόρριψης του άλατος είναι παρόμοιοι με αυτούς των μεμβρανών σπειροειδούς τύπου.

Καθώς η προς απόρριψη άλμη είναι υπό μεγάλη πίεση, είναι δυνατή η ανάκτηση ενέργειας διοχετεύοντας την άλμη αυτή μέσα από υδραυλικούς στροβίλους, μειώνοντας έτσι την ολική κατανάλωση ενέργειας έως και 20%. Οι απαιτήσεις της RO αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού με ανάκτηση ενέργειας είναι περίπου 5~9 KWh ή 18~33 MJ ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος ανά m³ παραγόμενου καθαρού νερού. Συγκριτικά, η MSF διεργασία απαιτεί 120 με 280 MJ θερμότητας και περίπου 15 MJ μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος (για ανάγκες άντλησης και άλλων ενισχυτικών λειτουργιών) ανά m³. Επομένως, η ενέργεια που απαιτείται στην RO διεργασία είναι μικρότερη από τη MSF διεργασία.

Η διάρκεια ζωής των μεμβρανών επηρεάζεται από τη σταδιακή χημική αποσύνθεση ή μετατροπή. Για παράδειγμα οι μεμβράνες οξικής κυτταρίνης υδρολύονται με το χρόνο. Ο

βαθμός υδρόλυσης παρουσιάζει ένα απότομο ελάχιστο για διάλυμα με pH 4.5-5 και αυξάνει δραματικά με τη θερμοκρασία.

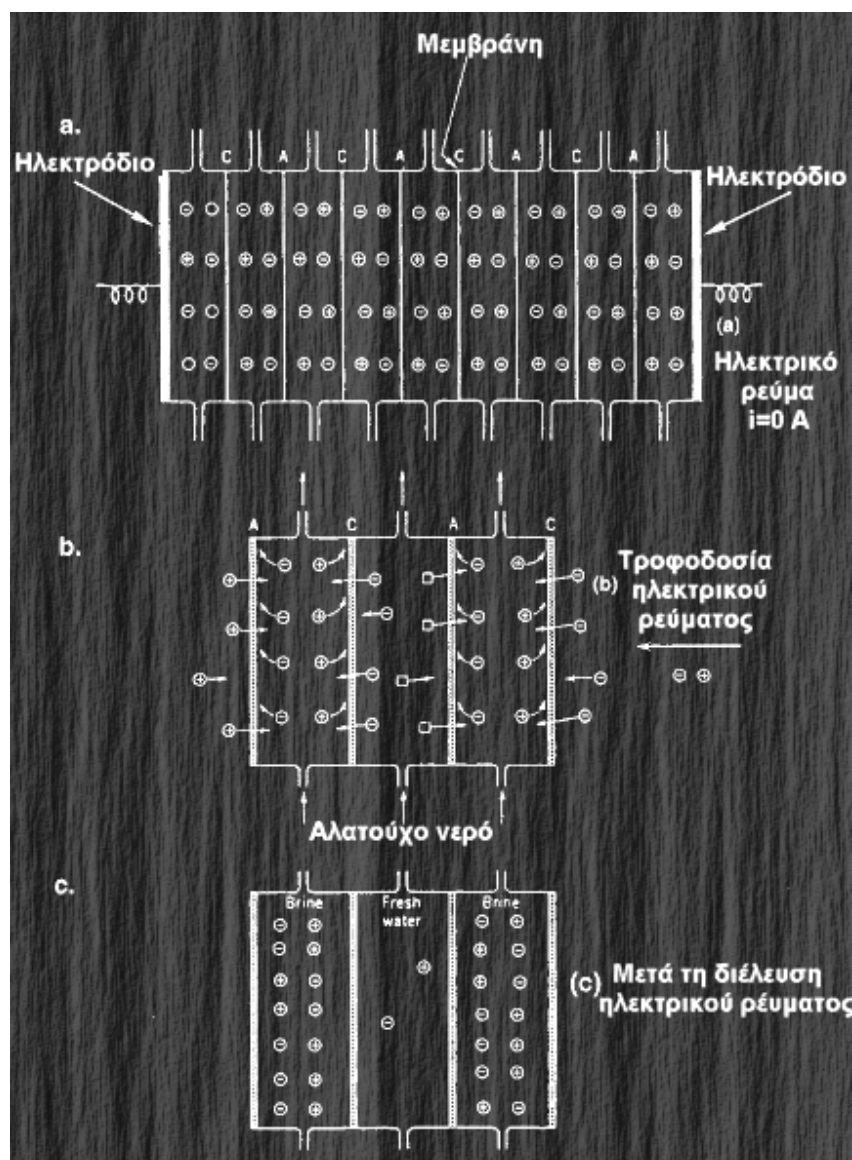
Οι μεμβράνες είναι επιρρεπείς στην απόφραξη τους από σκόνη και στην εξασθένηση της επιλεκτικής τους ικανότητας λόγω της παρουσίας μικροοργανισμών στο θαλασσινό νερό. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη προσεγμένη προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας η οποία δύναται να περιλαμβάνει διήθηση, χλωρίωση για την καταστροφή οργανικής ύλης και μικροοργανισμών, αφαίρεση επιπρόσθετης ποσότητας χλωρίου για την αποφυγή οξειδωσης και προσθήκη διαφόρων προσθετικών για την αποφυγή δημιουργίας στρωμάτων επικάλυψης θεικού ασβεστίου (CaSO_4) και σχηματισμού αφρού. Απαραίτητος αποτελεί και ο περιοδικός καθαρισμός της μεμβράνης (χημικός ή μηχανικός). Όλες οι ανωτέρω εργασίες επιβαρύνουν το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας.

2.2.2 Ηλεκτροδιάλυση (*Electrodialysis (ED)*)

Στη διεργασία της ηλεκτροδιάλυσης το αλατούχο διάλυμα διοχετεύεται μεταξύ δύο μεμβρανών η μία διαπερατή στα κατιόντα και η δεύτερη διαπερατή στα ανιόντα. Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα διοχετεύεται στο σύστημα μέσω δύο ηλεκτροδίων, της ανόδου και της καθόδου, που εκτίθενται στο διάλυμα (σχήμα 2.7). Με τον τρόπο αυτό προκαλείται κίνηση των κατιόντων του διαλύματος προς την κάθοδο και των ανιόντων στην άνοδο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7 τα ανιόντα και τα κατιόντα καθώς κατευθύνονται προς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα διέρχονται μέσα από τις αντίστοιχες μεμβράνες που είναι διαπερατές σε αυτά. Η κίνηση των ιόντων αυτών μειώνει τη συγκέντρωση του άλατος στο νερό τροφοδοσίας του θαλάμου στον οποίο προϋπήρχαν ενώ αυξάνει τη συγκέντρωση στους γειτονικούς θαλάμους. Δεκάδες με εκατοντάδες τέτοιοι θάλαμοι συναποτελούν μία τυπική εγκατάσταση ED που οδηγεί στη δημιουργία εναλλασσόμενων τμημάτων καθαρού νερού και άλμης. Στη συγκεκριμένη διαδικασία η τροφοδοσία του θαλασσινού νερού είναι συνεχής προς όλους τους θαλάμους ενώ τόσο το παραγόμενο καθαρό νερό όσο και η άλμη εξέρχονται με εναλλαγή. Το μέγεθος των μεμβρανών είναι περίπου $0.5 \times 1 \text{ m}^2$ και απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1 mm . Κατασκευάζονται συνήθως από πολυμερή και ενισχύονται με πλέγματα από άλλα πολυμερή ή fiberglass.

Για τη διεργασία αυτή απαιτείται προσεγμένη και εκτενής προεπεξεργασία παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στη RO διεργασία. Τα λειτουργικά προβλήματα που προκαλούνται



Σχήμα 2.7: Σχηματική διάταξη ηλεκτροδιάλυσης

λόγω δημιουργίας στρωμάτων επικάλυψης περιορίζονται με την αντίστροφη διεργασία της ηλεκτροδιάλυσης (*EDR*) κατά την οποία το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό ρεύμα περιοδικά αντιστρέφει τους πόλους του (περίπου 3-4 φορές την ώρα) με αποτέλεσμα να προλαμβάνεται η συσσώρευση επαρκούς ποσότητας άλατος στις μεμβράνες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν καθίζηση των αλάτων και την επακόλουθη δημιουργία στρωμάτων επικάλυψης.

Η τάση που χρησιμοποιείται είναι κατά προσέγγιση **1V** ανά ζεύγος μεμβρανών ενώ το ηλεκτρικό ρεύμα είναι της τάξεως των **100 A** ανά μονάδα επιφάνειας (m^2) της μεμβράνης. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας αυξάνει με τη συγκέντρωση του νερού τροφοδοσίας και ανέρχεται στα **10 MW** ανά μονάδα όγκου (m^3) παραγόμενου νερού και ανά **1000 ppm** μείωση

της αλατότητας. Από την ενέργεια αυτή η μισή ποσότητα χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό και η υπόλοιπη για την άντληση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια που εμπεριέχεται στον άνεμο. Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και την περιστροφή της γης. Συγκεκριμένα περίπου 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη γη μετατρέπεται σε αιολική. Επιπλέον η αδράνεια, λόγω της περιστροφής της γης, τείνει να στρέψει τον ψυχρό αέρα που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης και τον θέτει σε κίνηση (ως προς την κινούμενη επιφάνεια της γης). Η συνολική ισχύς των ανέμων στη γη υπολογίζεται σε $3.6 \cdot 10^9$ MW. Η ισχύς ρεύματος του αέρα είναι ανάλογη της πυκνότητάς του και του κύβου της ταχύτητάς του. Έτσι για την ίδια ταχύτητα και διατομή το ρεύμα αέρα θα έχει περίπου 800 φορές μικρότερη ενέργεια από αντίστοιχη δέσμη νερού. Συνεπώς η αιολική ενέργεια είναι μία «αραιή» ή «ήπια» μορφή ενέργειας, δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που δύναται να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφανείας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Το εν λόγω μειονέκτημα αντιμετωπίζεται με τη σημερινή τεχνολογία με τη βοήθεια της οποίας καθίσταται δυνατή η κατασκευή ανεμοκινητήρων μεγάλων διαστάσεων που σταδιακά ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι παρέχει άμεσα μηχανική ενέργεια που στην τεχνική ορολογία χαρακτηρίζεται ως «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας η οποία δύναται να μετατραπεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας. Συνεπώς, η αιολική ενέργεια αποτελεί αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιόλογο δυναμικό στη διάθεση της ανθρωπότητας και αποτελεί μία από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

3.1 Αιολικό Δυναμικό

Η σχετική κίνηση του ανέμου ως προς την επιφάνεια της γης σε συνδυασμό με το ιξώδες του, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός στρώματος αέρα, το οποίο ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, όπου η σχετική ταχύτητα μεταβάλλεται από μηδέν στην επιφάνεια της γης έως την τιμή για την οποία ο άνεμος έχει πλήρως διαμορφωθεί λόγω αμελητέων δυνάμεων τριβής. Το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος μεταβάλλεται χρονικά και τοπικά. Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η τιμή αυτή είναι η τραχύτητα του εδάφους και η κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας.

3.1.1 Ευστάθεια Ατμόσφαιρας

Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας του εδάφους και της ηλιακής ακτινοβολίας διέρχεται από την ατμόσφαιρα με τρόπο ώστε ο καθαρός αέρας να δύναται να θεωρηθεί διαφανής στην ακτινοβολία. Κοντά στο έδαφος, δηλαδή στα πρώτα 10 μέτρα, λαμβάνει χώρα αισθητή συναλλαγή θερμότητας του αέρα με την επιφάνεια του εδάφους. Ο καθαρός αέρας μπορεί να θεωρηθεί ότι θερμαίνεται ή ψύχεται λόγω γειτνίασης με το έδαφος (συναγωγή) παρά με ακτινοβολία.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν δεν υπάρχουν καθόλου σύννεφα ή έστω η νέφωση είναι μικρή, η επιφάνεια του εδάφους θερμαίνεται διαρκώς από τον ήλιο. Συγχρόνως, όμως χάνεται συνεχώς θερμότητα λόγω ακτινοβολίας και μόνο όταν ο ρυθμός θέρμανσης από τον ήλιο ξεπεράσει τις απώλειες λόγω ακτινοβολίας, το έδαφος αρχίζει να θερμαίνεται. Όταν θερμανθεί αρκετά, αρχίζει η κυκλοφορία ρευμάτων συναγωγής που μεταφέρουν θερμότητα σε μεγαλύτερη κατά ύψος μάζα αέρα.

Επειδή ο αέρας είναι συμπιεστό, με την ανύψωση διαστέλλεται καθώς κινείται σε στρώματα με χαμηλότερη πίεση, με αποτέλεσμα λόγω της διαστολής να ψύχεται. Το ποσό κατά το οποίο ψύχεται μπορεί να υπολογιστεί από την καταστατική εξίσωση των αερίων:

$$P = \rho RT \quad P = \rho RT \quad (3.1)$$

που συνδέει την πίεση P με την πυκνότητα ρ και τη θερμοκρασία T μέσω της σταθεράς των αερίων R που εξαρτάται από τη χημική σύνθεση του αερίου:

$$\frac{P}{P_o} = \left(\frac{\rho}{\rho_o} \right)^\gamma \quad (3.2)$$

για αδιαβατική μεταβολή, όπου P_o , ρ_o είναι οι αρχικές τιμές σε μια μεταβολή και γ ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων του αέρα σε σταθερή πίεση, σταθερό όγκο και την υδροστατική εξίσωση:

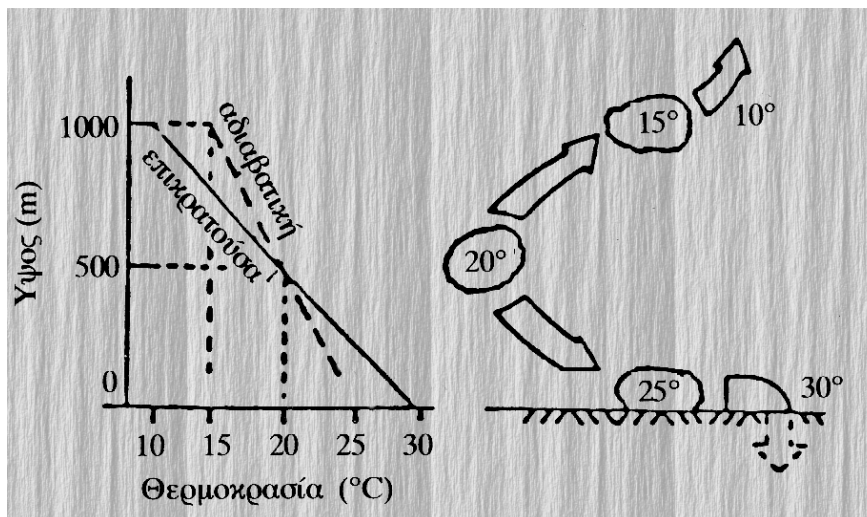
$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3.3)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και z το ύψος.

Εάν ένα στοιχειώδες τμήμα του αέρα που ανυψώνεται, έχει την ίδια πίεση με το περιβάλλον του και μόνο μία πολύ μικρή διαφορά στη θερμοκρασία και το περιβάλλον βρίσκεται σε υδροστατική ισορροπία, μπορεί να απαλειφθεί η πυκνότητα από την (3.1) μέσω της (3.2) και στη συνέχεια διαφορίζοντας ως προς z , μέσω της (3.3) δύναται να ληφθεί η κατακόρυφη κλίση της θερμοκρασίας:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{(\gamma - 1) \cdot g}{\gamma \cdot R} \quad (3.4)$$

Οι ανωτέρω συνθήκες αντιστοιχούν στην ουδέτερη ισορροπία. Αν η κλίση ξεπερνούσε την τιμή της εξίσωσης (3.4) ένα στοιχειώδες τμήμα του ρευστού θα ανέβαινε σε ψυχρότερα από τη δική του θερμοκρασία στρώματα και επομένως θα συνέχιζε να ανεβαίνει (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Υπεραδιαβατικές συνθήκες

Κατά παρόμοιο τρόπο, εάν η κλίση είναι μικρότερη της τιμής αυτής το στοιχείο που ανυψώνεται θα ανέβαινε σε θερμότερα από τη δική του θερμοκρασία στρώματα και σαν

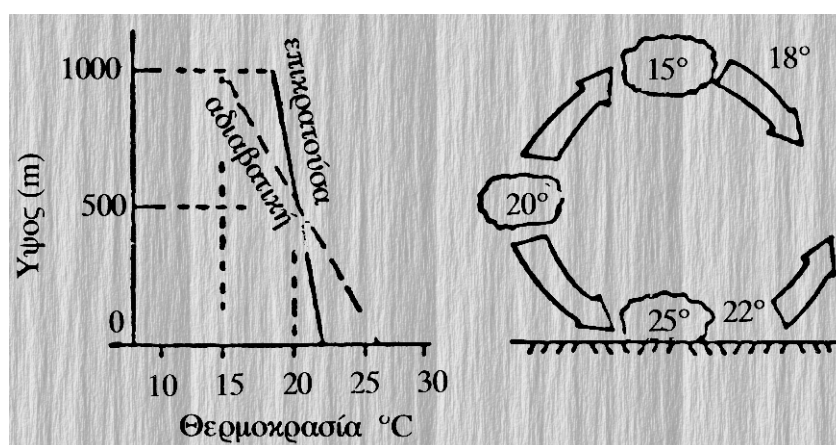
συνέπεια θα κατερχόταν και πάλι (σχήμα 2.2). Επομένως η κατάσταση της ατμόσφαιρας είναι:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{(\gamma - 1) \cdot g}{\gamma \cdot R} \quad (\text{Ουδέτερη})$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \leq -\frac{(\gamma - 1) \cdot g}{\gamma \cdot R} \quad (\text{Ευσταθής})$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} > -\frac{(\gamma - 1) \cdot g}{\gamma \cdot R} \quad (\text{Ασταθής})$$

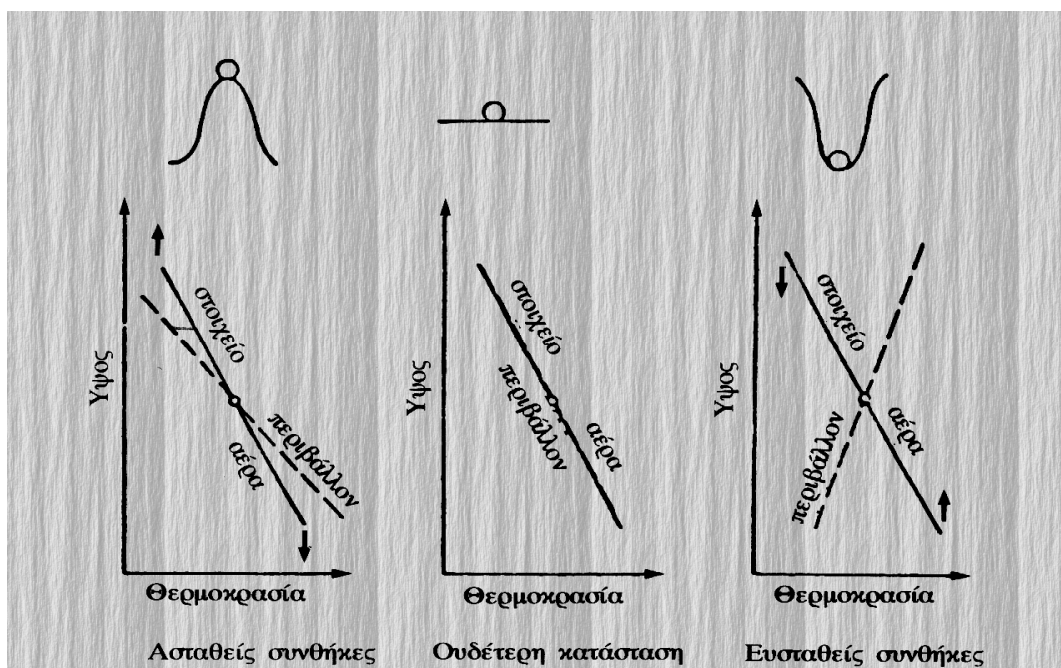
ανάλογα με το ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας με το ύψος (σχήμα 3.3).



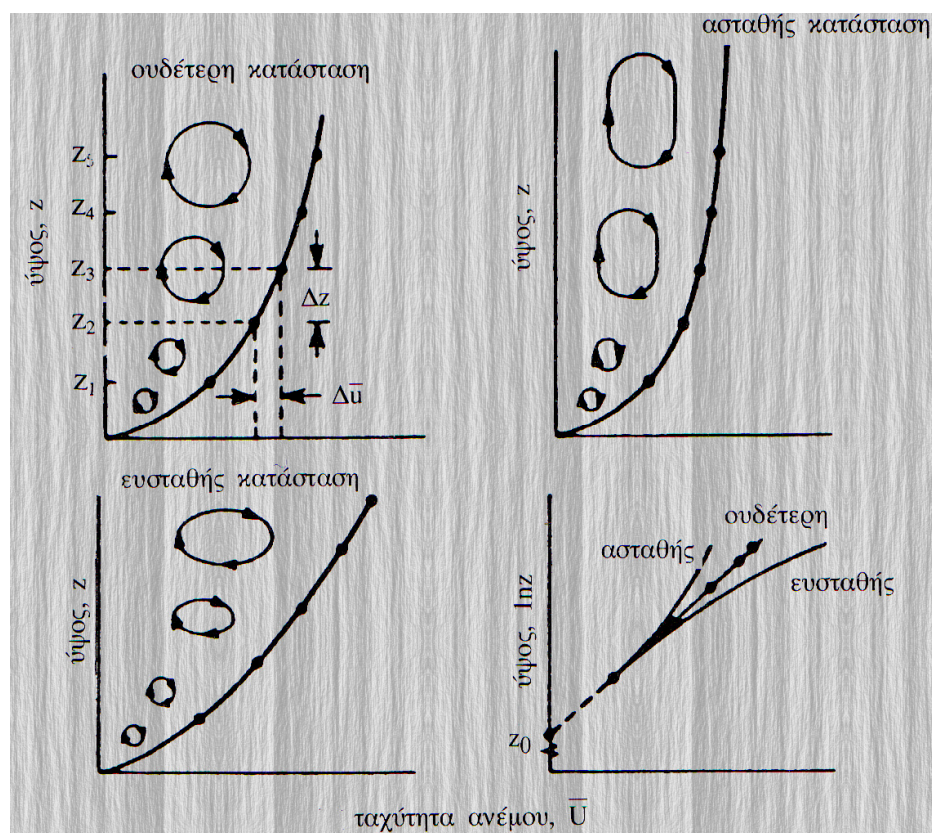
Σχήμα 3.2: Υποαδιαβατικές συνθήκες

Η ουδέτερη κλίση ονομάζεται ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα επειδή δε λαμβάνεται υπόψη η λανθάνουσα θερμότητα συμπίκνωσης των υδρατμών του περιβάλλοντος. Η τιμή της για την ατμόσφαιρα είναι σταθερή και περίπου 1°C ανά 100 μέτρα. ενώ η τιμή 6.5 °C ανά 1000 μέτρα αφορά την ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα.

Οι ουδέτερες συνθήκες δεν είναι συνήθειες, ιδιαίτερα σε ανέμους μικρής έντασης. Για να δημιουργηθούν, ο αέρας πρέπει να είναι έντονα αναμεμιγμένος είτε λόγω έντασης είτε επειδή το έδαφος, που είναι ήδη ζεστό, αναμιγνύει τον αέρα που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος με ρεύματα μεταφοράς (συναγωγή) ενώ η διαδικασία ψύξης του εδάφους δεν έχει προχωρήσει τόσο ώστε να δημιουργηθούν ασταθείς συνθήκες. Σε ανέμους χαμηλής έντασης το έδαφος είναι συνήθως είτε ψυχρότερο από τον αέρα και στην περίπτωση αυτή τα κατώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας βρίσκονται σε ευσταθή κατάσταση, είτε είναι θερμότερο και ο αέρας είναι σε ασταθή κατάσταση κοντά στο έδαφος. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η επίδραση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.



Σχήμα 3.3: Είδη ισορροπίας και αντιστοιχία με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες



Σχήμα 3.4: Επίδραση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

3.1.2 Τραχύτητα Εδάφους

Το πρόβλημα έκφρασης της κατακόρυφης μεταβολής της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου έχει αποτελέσει αντικείμενο πληθώρας μελετών. Οι μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιβλιογραφία για την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι οι κατωτέρω:

$$\frac{U}{U_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^n \quad (\text{εκθετικός νόμος}) \quad (3.5)$$

$$\frac{U}{U_o} = \frac{\ln \frac{h}{z_o}}{\ln \frac{h_o}{z_o}} \quad (\text{λογαριθμικός νόμος}) \quad (3.6)$$

όπου U η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος h , U_o η ταχύτητα στο ύψος h_o , z_o το ύψος τραχύτητας του εδάφους, n η παράμετρος που εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους.

Σύμφωνα με τον Gouieres η σχέση (3.6) είναι πιο κατάλληλη για ύψη 30-50m, ενώ η σχέση (3.5) είναι πιο ακριβής για μεγαλύτερα ύψη. Για ύψη κάτω των 30m και οι δύο σχέσεις προσεγγίζουν με την ίδια αξιοπιστία την πραγματική μεταβολή της ταχύτητας, με την προϋπόθεση ότι το έδαφος είναι σχετικά ομαλό. Κατά τους Wame και Calman οι παράγοντες z_o , n συνδέονται με τη σχέση:

$$n = 0.04 \cdot \ln(z_o) + 0.003 \cdot [\ln(z_o)]^2 + 0.24 \quad (3.7)$$

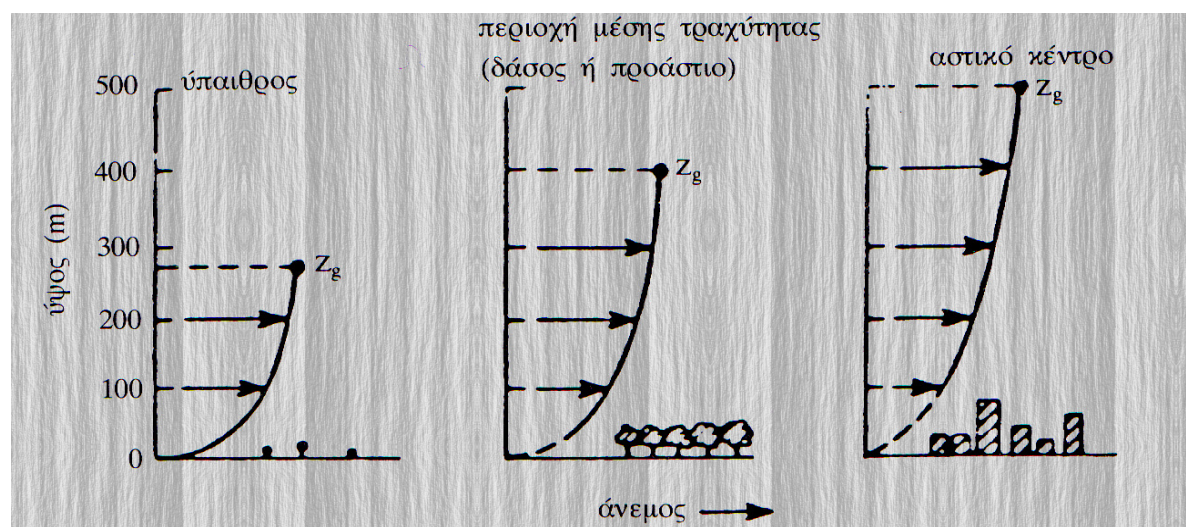
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα ύψη h και h_o δε μετρώνται από την επιφάνεια του εδάφους, αλλά πάνω από το επίπεδο μηδενικής ταχύτητας ανέμου (π.χ. σε ένα χωράφι πάνω από το μέσο ύψος των σπαρτών). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά τιμές των z_o , n για διάφορες κατηγορίες τραχύτητας εδάφους.

Από τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν (3.5) και (3.6) εκτεταμένη χρήση πραγματοποιείται στον εκθετικό νόμο λόγω της απλούστερης μορφής του.

Είδος Εδάφους	Τραχύτητα επιφάνειας(mm)	$n(mm)$	$z_0(mm)$
1.Λείο			
Πάγος	0.01	0.1	0.001
Βάλτοι	0.4		
Χιόνι	1		
Θάλασσα	2	0.13	0.02
2.Μέτρια Τραχύ			
Χαμηλά χόρτα	1	0.13	0.01
Σπαρτά	30-70		0.05
Αγροτικές εκτάσεις	200	0.2	0.3
3.Τραχύ			
Αγροτικές εκτάσεις με δένδρα	1000	0.2	0.3
Δάση, προάστια	1500	0.27	2
4. Πολύ Τραχύ			
Αστικές περιοχές	1000-4000	0.27-0.4	2-10

Πίνακας 3.1: Τιμές n_0 και z για διάφορα είδη τραχύτητας εδάφους

Τα προαναφερθέντα δύνανται να συνοψισθούν στο ακόλουθο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

3.1.3 Βασικά Ανεμολογικά Μεγέθη

Η ενέργεια που εμπεριέχεται στον άνεμο λόγω της ταχύτητάς του παρέχεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{\text{ανέμου}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \quad (3.8)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα που πνέει με ταχύτητα U και διέρχεται από επιφάνεια εμβαδού A .

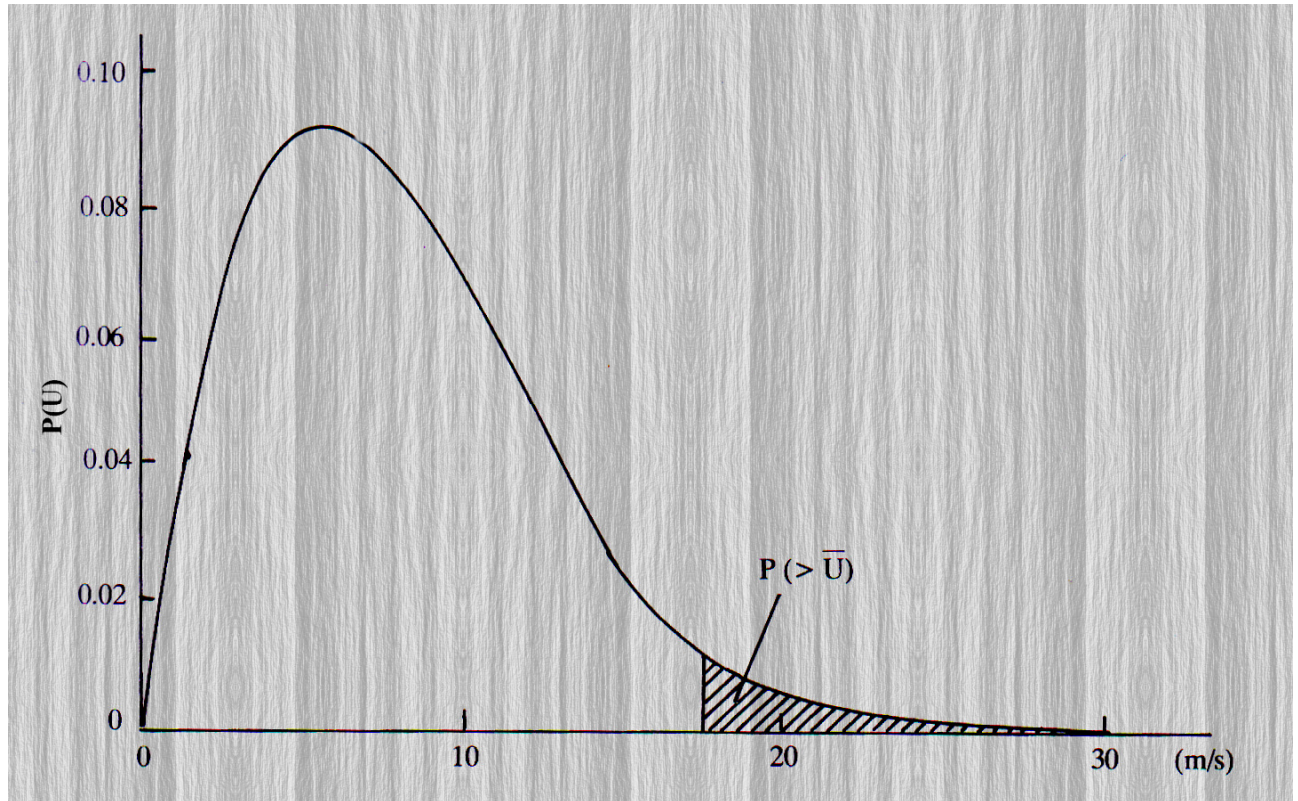
Ένα άλλο μέγεθος το οποίο είναι σημαντικό στην αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού αποτελεί και η μέση τιμή ταχύτητας η οποία μπορεί να είναι ετήσια (καταγραφή των μέσων ετήσιων ταχυτήτων), εποχιακή (μέση τιμή χειμώνα), ημερήσια (μέση τιμή ημέρας) και τέλος μέση ωριαία τιμή. Οι εποχιακές και ημερήσιες τιμές επηρεάζονται από τη διαδοχή των εποχών και την εναλλαγή ημέρας-νύκτας. Η ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας με διάρκεια ζωής 20 τουλάχιστον ετών θα εξαρτηθεί από τη μέση ετήσια τιμή ταχύτητας ανέμου στη θέση εγκατάστασής της. Η μέση ετήσια τιμή θα προκύψει από μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου για πολλά χρόνια προκειμένου να εξαχθεί η μέση ετήσια ταχύτητα. Μετρήσεις αποδεικνύουν ότι η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου κάθε χρόνο διαφέρει από μέρος σε μέρος και από χρόνο σε χρόνο με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται ανεμολογικές μετρήσεις τουλάχιστον 3-5 ετών στη θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.

Εκτός από τη γνώση της μέσης ετήσιας ταχύτητας στη θέση εγκατάστασης μίας ανεμογεννήτριας είναι χρήσιμο για ενεργειακούς υπολογισμούς να είναι γνωστή η διάρκεια πνοής του ανέμου με βάση την οποία χαράσσεται η καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας. Η συγκεκριμένη καμπύλη εκφράζει την πυκνότητα πιθανότητας ο άνεμος να έχει ταχύτητα μεταξύ $U-dU/2$ και $U+dU/2$. Η εν λόγω πυκνότητα πιθανότητας δύναται να περιγραφεί αναλυτικά από την κατανομή Weibull. Τυπική μορφή της κατανομής Weibull παρατίθεται στο σχήμα (3.6). Πρόκειται για μία διπαραμετρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας με παραμέτρους c και k που δείχνει τη συχνότητα εμφάνισης της στιγμιαίας ταχύτητας U και ορίζεται ως:

$$P(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (3.9)$$

όπου U η στιγμιαία ταχύτητα ανέμου. Η παράμετρος k καθορίζει το ύψος της κατανομής Weibull και ονομάζεται συντελεστής μορφής. Η παράμετρος c επηρεάζει την κατανομή κατά τον οριζόντιο άξονα και ονομάζεται συντελεστής κλίμακας. Οι παράμετροι κλίμακας

ταχύτητας c και μορφής k της κατανομής Weibull είναι δυνατόν να υπολογιστούν αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή, προσαρμόζοντας με ελάχιστα τετράγωνα την αναλυτική σχέση στα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 3.6: Τυπική μορφή κατανομής Weibull

Η μέση ταχύτητα του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί όταν δίνονται οι παράμετροι c και k της κατανομής Weibull από τη σχέση:

$$\bar{U} = \int_{U=0}^{\infty} U \cdot P(U) \cdot dU = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.10)$$

όπου Γ η συνάρτηση Γάμα. Με γνωστά το k και τη μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται το c .

Η διάρκεια πνοής του ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$P(U \leq U_x) = \int_0^{U_x} P(U) \cdot dU = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k\right] \quad (3.11)$$

και εκφράζει την πιθανότητα να φυσάει άνεμος ταχύτητας μικρότερης της U_x ή το ποσοστό της χρονικής διάρκειας για την οποία φυσάει άνεμος μικρότερος της U_x .

Η μέση ετήσια τιμή της ισχύος του ανέμου προκύπτει από τη σχέση:

$$\bar{P} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot P(U) dU \approx \rho \cdot (\bar{U})^3 \quad (3.12)$$

δηλαδή η μέση ετήσια ισχύς του ανέμου είναι διπλάσια αυτής που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον κύβο της μέσης ετήσιας τιμής ταχύτητας του ανέμου.

Η συνολική ετήσια ενέργεια του ανέμου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E = 8760 \cdot \bar{P} \quad (3.13)$$

3.2 Ανεμογεννήτριες

Η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού πραγματοποιείται με τη βοήθεια των ανεμογεννητριών. Έτσι λοιπόν η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο μέσω μίας αεροδυναμικής διάταξης. Αυτό το μηχανικό έργο δύναται να είναι εκμεταλλεύσιμο τοπικά. Στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε διότι δε χρειάζεται αποκλειστικά μηχανικό έργο είτε διότι ο τύπος της κατανάλωσης δε συμπίπτει με την περιοχή όπου είναι εγκατεστημένος ο ανεμοκινητήρας, δηλαδή απαιτείται η μεταφορά της δεσμευόμενης αιολικής ενέργειας. Η πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας στην οποία μετατρέπεται το μηχανικό έργο είναι η ηλεκτρική. Εντούτοις, επιστημονικές έρευνες έχουν στραφεί προς την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού για την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο καύσιμο αναδεικνύοντας μία οικολογικά αποδεκτή λύση δεδομένου ότι η καύση του υδρογόνου παράγει ως καυσαέριο νερό σε αέρια μορφή (υδρατμούς).

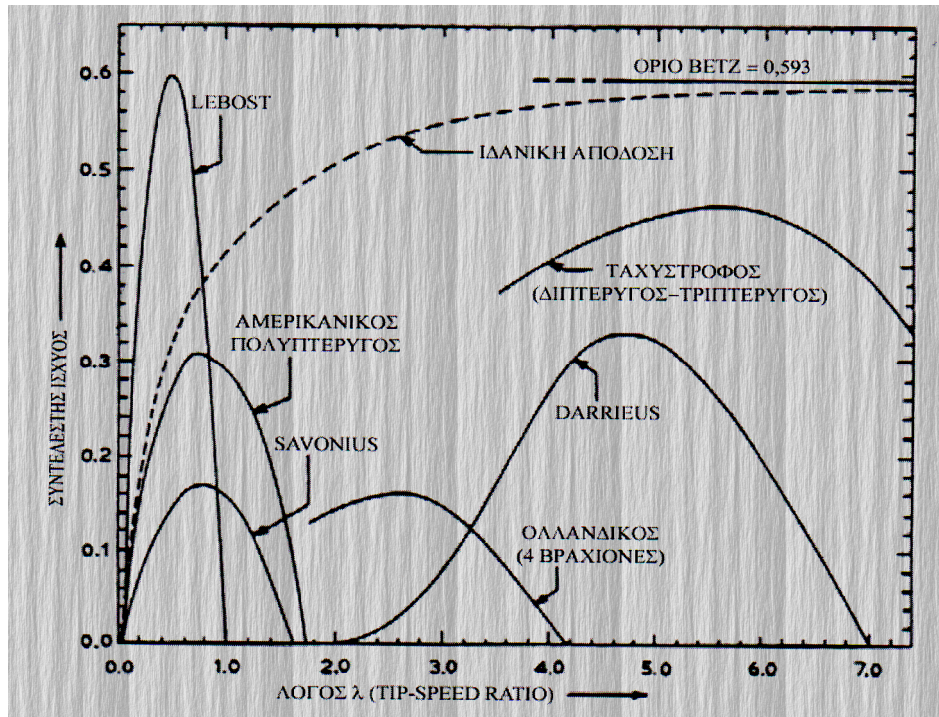
3.2.1 Χαρακτηριστικά Ανεμογεννητριών

Η ισχύς που αποδίδεται από μία ανεμογεννήτρια παρέχεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{AT} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \quad (3.14)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα που πνέει με ταχύτητα U και διέρχεται από επιφάνεια εμβαδού A . Από την παραπάνω σχέση ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συντελεστής C_p ο οποίος ονομάζεται συντελεστής ισχύος, εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και είναι συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ . Η ταχύτητα ακροπτερυγίου ορίζεται από τη σχέση $\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U}$ όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (ο φέρων πτερύγια) και R η ακτίνα του. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο

συντελεστής ισχύος είναι $C_{p,max} = \frac{16}{27} = 59\%$ και ονομάζεται *όριο του Betz*. Αυτό σημαίνει ότι ο βέλτιστος δρομέας κάτω από δανικές συνθήκες λειτουργίας δύναται να δεσμεύει μόνο 59% της ισχύος του ανέμου. Το όριο αυτό αποτελεί μέγιστος βαθμός απόδοσης για ιδανική έλικα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μεταβολές του συντελεστή ισχύος για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου.

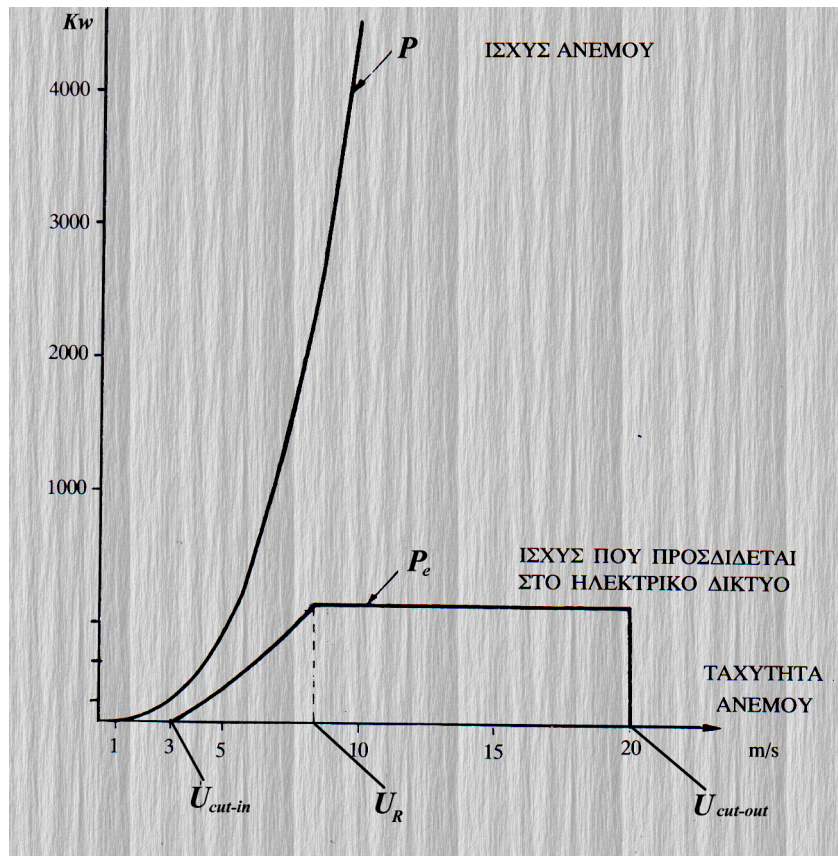


Σχήμα 3.7: Συντελεστής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου

Μία ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από τρεις τιμές ταχύτητας του ανέμου:

- ☉ Την ταχύτητα U_{cut-in} η οποία ονομάζεται **ταχύτητα έναρξης λειτουργίας** δηλαδή η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να περιστρέφεται.
- ☉ Την ταχύτητα U_R που αποτελεί τη μικρότερη ταχύτητα στην οποία ο δρομέας αναπτύσσει την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας και ονομάζεται **ονομαστική ταχύτητα ανέμου**.
- ☉ Την ταχύτητα $U_{cut-out}$ η οποία καλείται **ταχύτητα διακοπής λειτουργίας** για την οποία λαμβάνει χώρα διακοπή της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας κυρίως για λόγους ασφαλείας.

Τα ανωτέρω συνοψίζονται στο σχήμα που ακολουθεί όπου παρατίθενται η καμπύλη ισχύος του ανέμου καθώς και μίας τυπικής ανεμογεννήτριας. Με βάση το σχήμα αυτό αλλά και την εξαγόμενη κατανομή Weibull είναι δυνατόν να υπολογιστεί το ποσό της ενέργειας που παράγεται από μία ανεμογεννήτρια. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι το ποσό αυτό είναι διάφορο της ποσότητας $E_R = 8760 \cdot P_R$, όπου P_R είναι η **ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας**, δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει έντονη διακύμανση στο χρόνο.



Σχήμα 3.8: Καμπύλη ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτριας

Για να υπολογιστεί η πραγματικά αποδιδόμενη ετήσια ενέργεια θα πρέπει να υπολογιστεί η μέση τιμή της ισχύος $\overline{P_g}$ με τη βοήθεια των εξισώσεων (3.9), (3.11) και (3.14):

$$\overline{P_g} = \int_0^{\infty} C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \cdot P(U) \cdot dU =$$

$$\int_{U_{cut-in}}^{U_R} C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \cdot P(U) \cdot dU + \int_{U_R}^{U_{cut-out}} C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \cdot P(U) \cdot dU = \int_{U_{cut-in}}^{U_R} C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \cdot P(U) \cdot dU + P_R \cdot [P(U \leq U_{cut-out}) - P(U \leq U_R)] \quad (3.15)$$

Επομένως η ενέργεια που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_g = 8760 \cdot \overline{P_g} \quad (3.16)$$

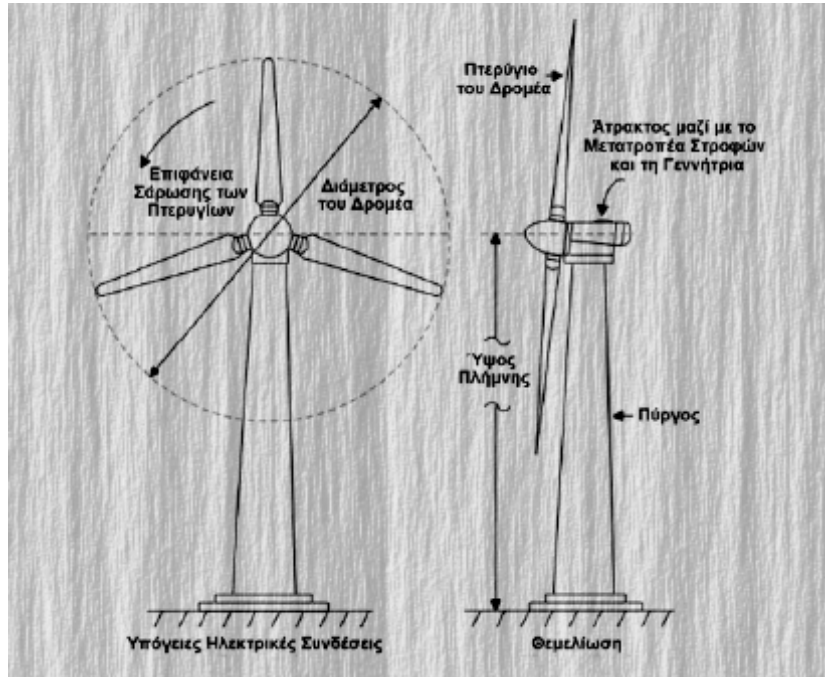
3.2.2 Τύποι Ανεμογεννητριών

Δύο κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι ανεμογεννήτριες είναι οι αιολικές μηχανές **οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα**. Από τις δύο αυτές κατηγορίες ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει στους ανεμοκινητήρες οριζόντιου άξονα.

3.2.2.1 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Τα κύρια μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι ο **δρομέας, το σύστημα μεταβολής στροφών και μετάδοσης ισχύος (κιβώτιο ταχυτήτων), το σύστημα πέδησης, τα έδρανα του άξονα, οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και η θεμελίωση**. Στο σχήμα 3.9 παρατίθεται η σχηματική διάταξη μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Ο **δρομέας** είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στη σχεδίαση του αιολικού συστήματος και αποτελείται από την **πλήμνη** και τα **πτερύγια**. Το πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο ή να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης. Η πλήμνη παραλαμβάνει τα φορτία και τις ροπές και είναι συνδεδεμένη με άξονα χαμηλής ταχύτητας. Το **κιβώτιο ταχυτήτων** παραλαμβάνει την κινητική ενέργεια από την άτρακτο χαμηλής ταχύτητας και την μεταφέρει στην **άτρακτο υψηλής ταχύτητας** με ένα λόγο μετάδοσης **50:1**. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια, προτιμώνται όμως οι ασύγχρονες λόγω της απλότητας κατασκευής τους ενώ οι σύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά στα αδύναμα δίκτυα. Το **σύστημα προσανατολισμού** είναι ένας σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει το



Σχήμα 3.9: Σχηματική διάταξη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν. Επιπλέον το ανεμόμετρο ενεργοποιεί και απενεργοποιεί την ανεμογεννήτρια για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου. Ο **πύργος** της ανεμογεννήτριας στηρίζει το θάλαμο της ανεμογεννήτριας και το δρομέα. Μπορεί να είναι τύπου δικτύωματος, σωληνωτός και σπανιότερα κατασκευασμένος από σκυρόδεμα. Η **θεμελίωση** γίνεται με οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετούνται οι κοχλίες του πύργου. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί την αύξηση της αντοχής και την εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται προς την πλευρά της βάσης. Μεγάλη σημασία έχει η γείωση που πρέπει να έχει η μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.

3.2.2.2 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών με Βάση την Εγκατεστημένη Ισχύ

Οι ανεμογεννήτριες με βάση την εγκατεστημένη ισχύ διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες

- Ⓢ Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος <20KW
- Ⓢ Ανεμογεννήτριες μέσης ισχύος 20-250KW
- Ⓢ Ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος >250KW

Τα πλεονεκτήματα των μεγάλων και μικρών ανεμογεννητριών συνοψίζονται ακόλουθα:

(i) Πλεονεκτήματα μεγάλων ανεμογεννητριών

- Ⓢ Υπάρχουν οικονομίες κλίμακας στις ανεμογεννήτριες δηλαδή οι μεγαλύτερες μηχανές είναι συνήθως ικανές να αποδώσουν την ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλότερο κόστος

από τις μικρότερες μηχανές. Ο λόγος είναι ότι το κόστος των θεμελίων, του οδικού δικτύου, της ηλεκτρικής σύνδεσης πλέγματος και διαφόρων άλλων στοιχείων στο στρόβιλο (όπως το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου) είναι κάπως ανεξάρτητο από το μέγεθος της μηχανής.

- ⊗ Οι μεγαλύτερες μηχανές είναι ιδανικές για την παράκτια αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Το κόστος των θεμελίων δεν αυξάνεται αναλογικά προς το μέγεθος της μηχανής και οι δαπάνες συντήρησης είναι κατά ένα μεγάλο μέρος ανεξάρτητες από το μέγεθος της μηχανής.
- ⊗ Στις περιοχές όπου είναι δύσκολο να βρεθούν οι περιοχές για περισσότερες από μία ανεμογεννήτριες, ένας μεγάλος ανεμοκινητήρας είναι αποτελεσματικότερος.

(ii) Πλεονεκτήματα μικρών ανεμογεννητριών

- ⊗ Το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να είναι πάρα πολύ αδύνατο για να διαχειριστεί την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία μεγάλη μηχανή. Το γεγονός αυτό συμβαίνει σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμών και μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή.
- ⊗ Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο (που αποτελείται από μικρές ανεμογεννήτριες) παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση.
- ⊗ Το κόστος χρησιμοποίησης μεγάλων γερανοφόρων οχημάτων και της οικοδόμησης ενός δρόμου αρκετά ισχυρού για να φέρει τα τμήματα των ανεμογεννητριών μπορεί να καταστήσει τις μικρές ανεμογεννήτριες οικονομικότερες σε ορισμένες περιοχές.
- ⊗ Σε ενδεχόμενο προσωρινής διακοπής λειτουργίας των ανεμοκινητήρων (λόγω ατμοσφαιρικής ηλεκτρικής εκκένωσης) οι επιπτώσεις είναι ασήμαντες σε σύγκριση με μία μεγάλη ανεμογεννήτρια.
- ⊗ Οι μεγάλες αιολικές μηχανές έχουν συνήθως χαμηλότερη περιστροφική ταχύτητα σε σύγκριση με τις μικρότερες μηχανές το οποίο σημαίνει ότι μια μεγάλη μηχανή δεν προσελκύει τόση προσοχή όση πολλές μικρές και γρήγορα κινούμενες μηχανές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗ ΜΕ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί η εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης που βασίζεται στη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης και ως πηγή ενέργειας θα αξιοποιηθεί η αιολική με τη βοήθεια συστοιχίας ανεμογεννητριών. Η παραγόμενη από το αιολικό πάρκο ενέργεια θα αξιοποιηθεί από τη μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης με μηχανική μετάδοση ισχύος. Συγκεκριμένα, η μηχανική μετάδοση θα καταστεί δυνατή μέσω υδραυλικού κυκλώματος και αποφεύγεται με τον τρόπο αυτό η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η εν λόγω εγκατάσταση θα εφαρμοστεί στο νησί της Νισύρου και θα αξιολογηθεί η ενεργειακή της απόδοση με βάση τα δεδομένα του συγκεκριμένου νησιού.

4.1 Υφιστάμενη Κατάσταση στα Νησιά του Αιγαίου

Το κλίμα που επικρατεί στα νησιά είναι τυπικά ξηρό Μεσογειακό. Η πλειονότητα των νησιών αυτών παρουσιάζει περιορισμένους υδατικούς πόρους και υπάρχει αδυναμία κάλυψης των αναγκών των αντίστοιχων πληθυσμών σε νερό. Το πρόβλημα γίνεται οξύτερο ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες όπου η ζήτηση σε πόσιμο νερό αυξάνεται δραματικά (5 φορές ως προς την κανονική ζήτηση). Το έλλειμμα αυτό σε νερό αντιμετωπίζεται κυρίως μέσω της ναυσιπλοΐας όπου μεταφέρονται ποσότητες νερού σε υψηλά κόστη που ανέρχονται σε **5-8€/m³**.

4.1.1 Μεταφορά Νερού σε Νησιά του Αιγαίου

Για την κάλυψη των αναγκών σε νερό, αυτό μεταφέρεται σε 20 νησιά στις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα. Στους πίνακες 4.1 και 4.2 συνοψίζονται τα επίσημα στοιχεία σχετικά με τη μεταφορά ύδατος στα εν λόγω νησιά κατά την περίοδο 1997-2004.

	Ποσότητα νερού (m ³)	Κάτοικοι (μόνιμος πληθυσμός)
Αμοργός	9050	1859
Κουφονήσια	39600	366
Κίμωλος	27922	769
Ηρακλειά	14408	151
Σχοινούσα	31846	206
Φολέγανδρος	36270	667
Σίκινος	10748	238
Θηρασία	9168	268
Δονούσα	-	163
Μήλος	159800	4771
Σύνολο	338812	9458

**Πίνακας 4.1 Μεταφερόμενη ποσότητα νερού το έτος 2004
σε νησιά των Κυκλάδων**

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου[38]

Θα πρέπει να διευκρινιστεί πως στους πίνακες 4.1 και 4.2 ο συνολικός πληθυσμός στα νησιά αυξάνεται 2~5 φορές γεγονός που σημαίνει ότι δεν παρέχεται κάποιο χρήσιμο συμπέρασμα διαιρώντας τη στήλη της ποσότητας του νερού με τον αντίστοιχο πληθυσμό προκειμένου να εξαχθεί η καταναλισκόμενη ποσότητα νερού ανά κάτοικο (m³/κάτοικο). Αυτό συμβαίνει διότι στη στήλη όπου αναγράφεται ο αριθμός των κατοίκων περιλαμβάνονται μόνο όσοι διαμένουν μόνιμα στα αντίστοιχα νησιά. Επιπροσθέτως, στον πίνακα 4.3 φαίνεται η ποσότητα και το κόστος του μεταφερόμενου νερού για την περίοδο 1997-2004 σε νησιά των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων ενώ στο σχήμα 4.1 παρατίθεται ενδεικτικά η εποχικότητα που παρουσιάζει η ζήτηση του νερού στα νησιά των Κυκλάδων το έτος 2004 και αναδεικνύεται η χρονική της διακύμανση.

	Ποσότητα νερού (m ³)	Κάτοικοι (μόνιμος πληθυσμός)
Αγαθονήσι	12120	158
Λειψοί	41672	698
Μεγίστη	58934	509
Νίσυρος	22766	948
Πάτμος	249325	2984
Σύμη	277140	2606
Χάλκη	53180	313
Παλιόνησος(Βόρεια Κάλυμνος)	900	-
Ψέριμος	1300	130
Λέρος	42150	8123
Σύνολο	759487	15960

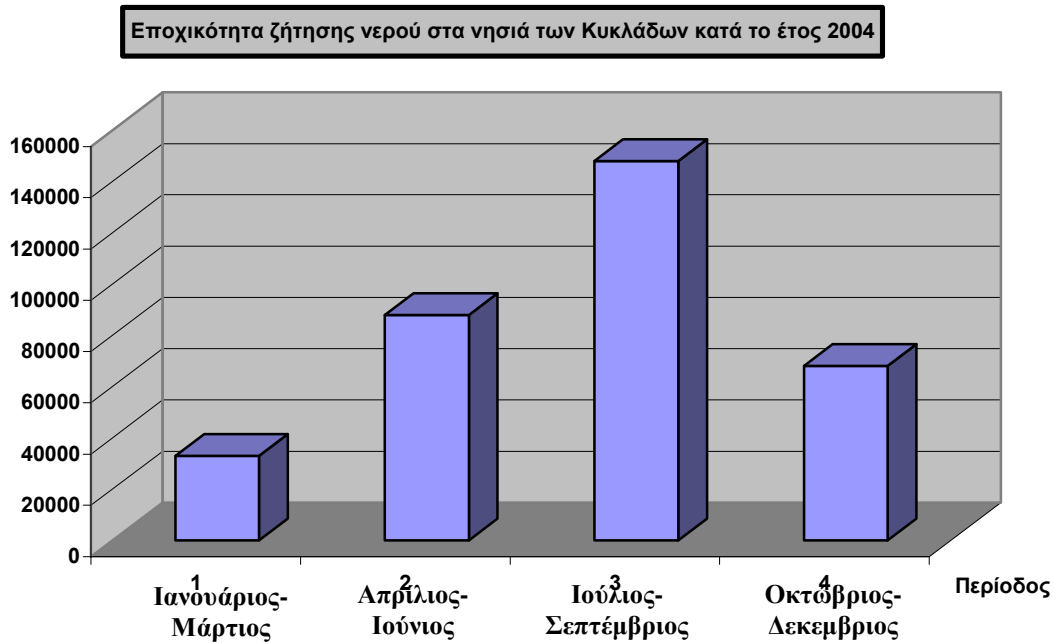
Πίνακας 4.2 Μεταφερόμενη ποσότητα νερού το έτος 2004 σε νησιά των Δωδεκανήσων

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου[38]

Έτος	Κυκλάδες		Δωδεκάνησα	
	Ποσότητα νερού (m ³)	Κόστος (€)	Ποσότητα νερού (m ³)	Κόστος (€)
1997	86	311	402	933
1998	91	650	484	1312
1999	87	672	461	1407
2000	145	1158	555	2004
2001	202	1625	621	2722
2002	328	2561	617	3109
2003	335	2772	605	3214
2004	337	2787	759	4034

Πίνακας 4.3 Μεταφερόμενη ποσότητα νερού και συνολικό κόστος αυτού στα νησιά των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων κατά την περίοδο 1997-2004

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου[38]



Σχήμα 4.1 Η χρονική διακύμανση της ζήτησης νερού στα νησιά των Κυκλάδων το έτος 2004

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου[38]

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω δεδομένα παρατηρείται μία σημαντική αύξηση από 500000 m³ το 1997 σε 1100000 m³ το 2004 ενώ η ζήτηση κατά την περίοδο του καλοκαιριού καταλαμβάνει προσεγγιστικά το 50% της συνολικής ετήσιας ζήτησης σε νερό. Παρά το γεγονός ότι αυτή η λύση είναι η πιο επιβαρυντική οικονομικά, εντούτοις η πολιτική αυτή έχει υιοθετηθεί για πολλά νησιά προς το παρόν με το υπουργείο Αιγαίου να επιδοτεί κατά ένα μεγάλο μέρος τις δραστηριότητες μεταφοράς ύδατος. Για το έτος 2005, σύμφωνα με τη σύμβαση μεταξύ του υπουργείου και των εταιρειών υπεργολαβίας, το κόστος του μεταφερόμενου νερού προς τα νησιά των Κυκλάδων ήταν περίπου **7.60€/m³** (συμπεριλαμβανομένου ΦΠΑ) ενώ στο σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων ήταν περίπου **5.35€/m³** (συμπεριλαμβανομένου ΦΠΑ). Η διαφορά που παρουσιάζεται στην τιμή των δύο αυτών προορισμών οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση των Κυκλαδικών νησιών το νερό μεταφέρεται από την ΕΥΔΑΠ (Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας) ενώ στην περίπτωση των Δωδεκανήσων το νερό μεταφέρεται από τη Ρόδο το μεγαλύτερο νησί του συμπλέγματος.

4.1.2 Η Αφαλάτωση στα Νησιά του Αιγαίου: Ένας Εναλλακτικός Τρόπος Κάλυψης των Αναγκών σε Νερό

Η αφαλάτωση του νερού αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες του πληθυσμού σε νερό. Ήδη σε αρκετά νησιά του Αιγαίου έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν αρκετές μονάδες αφαλάτωσης. Όπως προαναφέρθηκε η αφαλάτωση είναι δυνατόν να επιτευχθεί με μεθόδους που εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες:

Κυκλάδες	Τοποθεσία	Δυναμικότητα παραγωγής νερού (m ³ /d)		Έτος εγκατάστασης
Σύρος	Ανω Σύρος	1.	120	1993
		2.	250	2000
		3.	500	2002
	Ερμούπολη	1.	800	1992
		2.	800	1997
		3.	800 (2 μονάδες)	2001
		4.	250 (4 μονάδες)	2002
	Ποσειδωνία	1.	800 (3 μονάδες)	2002
		1.	1000	2001
	Τος	Μυλοπότας	1.	1000
Μύκονος	Κόρφος	1.	1200 (2 μονάδες)	1989
		2.	2250 (3 μονάδες)	2001
Πάρος	Νάουσα	1.	1200	2002
Σίφνος	Καμάρες	1.	500	2001
Τήνος	Τήνος	1.	500	2001
Σαντορίνη	Οία	1.	380	1995
Δωδεκάνησα				
Μεγίστη	Μεγίστη	1.	50	1990
Νίσυρος	Νίσυρος	1.	300	1991
		2.	350	2002

Πίνακας 4.4 Μονάδες αφαλάτωσης εγκατεστημένες στα νησιά του Αιγαίου

Πηγή: Υπουργείο Αιγαίου[38]

τις θερμικές διεργασίες και τις διεργασίες μέσω μεμβρανών. Οι θερμικές διεργασίες απαιτούν θερμότητα με τη μορφή υδρατμού χαμηλής πίεσης ή ζεστού νερού σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ **70-120 °C** και εξαρτώνται από τη χρησιμοποιούμενη διεργασία. Από την άλλη πλευρά οι διεργασίες μέσω μεμβρανών απαιτούν ενέργεια ιονισμού (ηλεκτροδιάλυση) ή θαλασσινό νερό υπό υψηλή πίεση (αντίστροφη ώσμωση). Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως στα νησιά του Αιγαίου είναι η αντίστροφη ώσμωση.

Η αφαλάτωση αποτελεί μία καθοριστική λύση στο πρόβλημα των νησιών του Αιγαίου, δύναται να συμβάλει στην ολοκληρωμένη ανάπτυξη αυτών και να προωθήσει τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης του πληθυσμού τους. Οι μονάδες που έχουν εγκατασταθεί στα νησιά λειτουργούν υπό τον έλεγχο των τοπικών Δημοτικών Εταιρειών Ύδατος οι οποίες κάθε έτος καθορίζουν την τιμή πώλησης του νερού. Στον πίνακα 44 παρατίθενται όλες οι μονάδες αφαλάτωσης που έχουν εγκατασταθεί στα νησιά του Αιγαίου.

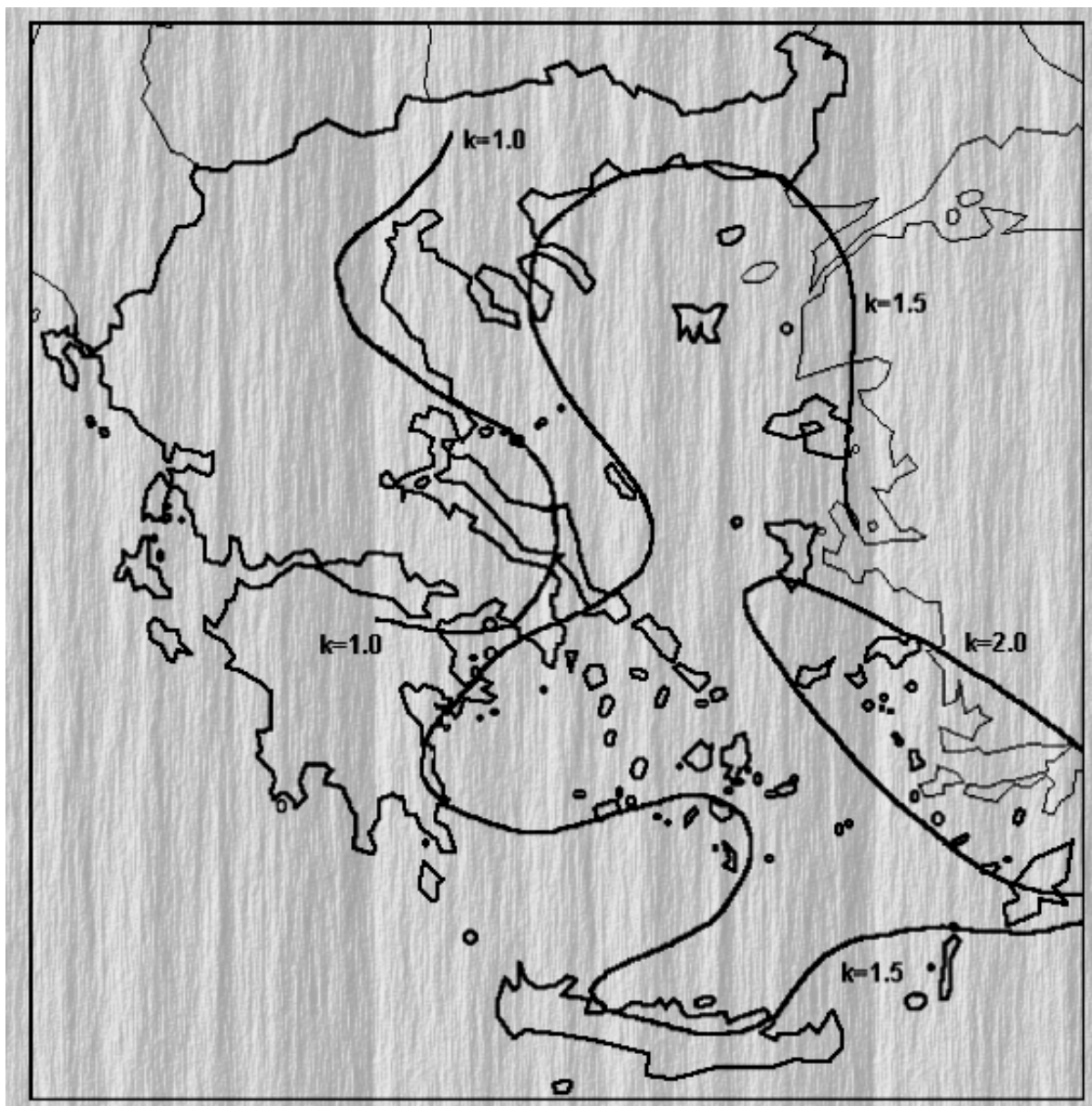
Αξιοποιώντας τα ανωτέρω δεδομένα θα υπολογιστεί η μέγιστη ζήτηση σε νερό του πληθυσμού της Νισύρου. Η μέγιστη ζήτηση σε νερό παρατηρείται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (περίοδος Ιούνιος-Αύγουστος) σύμφωνα με τα προαναφερθέντα. Επιπροσθέτως, την περίοδο αυτή παρατηρείται έως και διπλασιασμός του πληθυσμού του συγκεκριμένου νησιού που οφείλεται στην προσέλευση σε αυτό παραθεριστών. Έτσι θεωρώντας τη χειρίστη περίπτωση του διπλασιασμού του πληθυσμού προκύπτει ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αυτός ανέρχεται σε **N = 948 × 2 = 1896 κατοίκους**. Δεδομένου ότι η μέγιστη κατανάλωση ανά κάτοικο είναι **150 lt/κάτοικο/d** για την περίπτωση των μόνιμων κατοίκων και **200 lt/κάτοικο/d** για την περίπτωση των παραθεριστών έπεται ότι η συνολική ημερήσια κατανάλωση πόσιμου νερού θα είναι:

$$\Delta = 948 \times 150 + (1896 - 948) \times 200 = 331800 \text{ lt/d ή } 331.8 \text{ m}^3/\text{d}$$

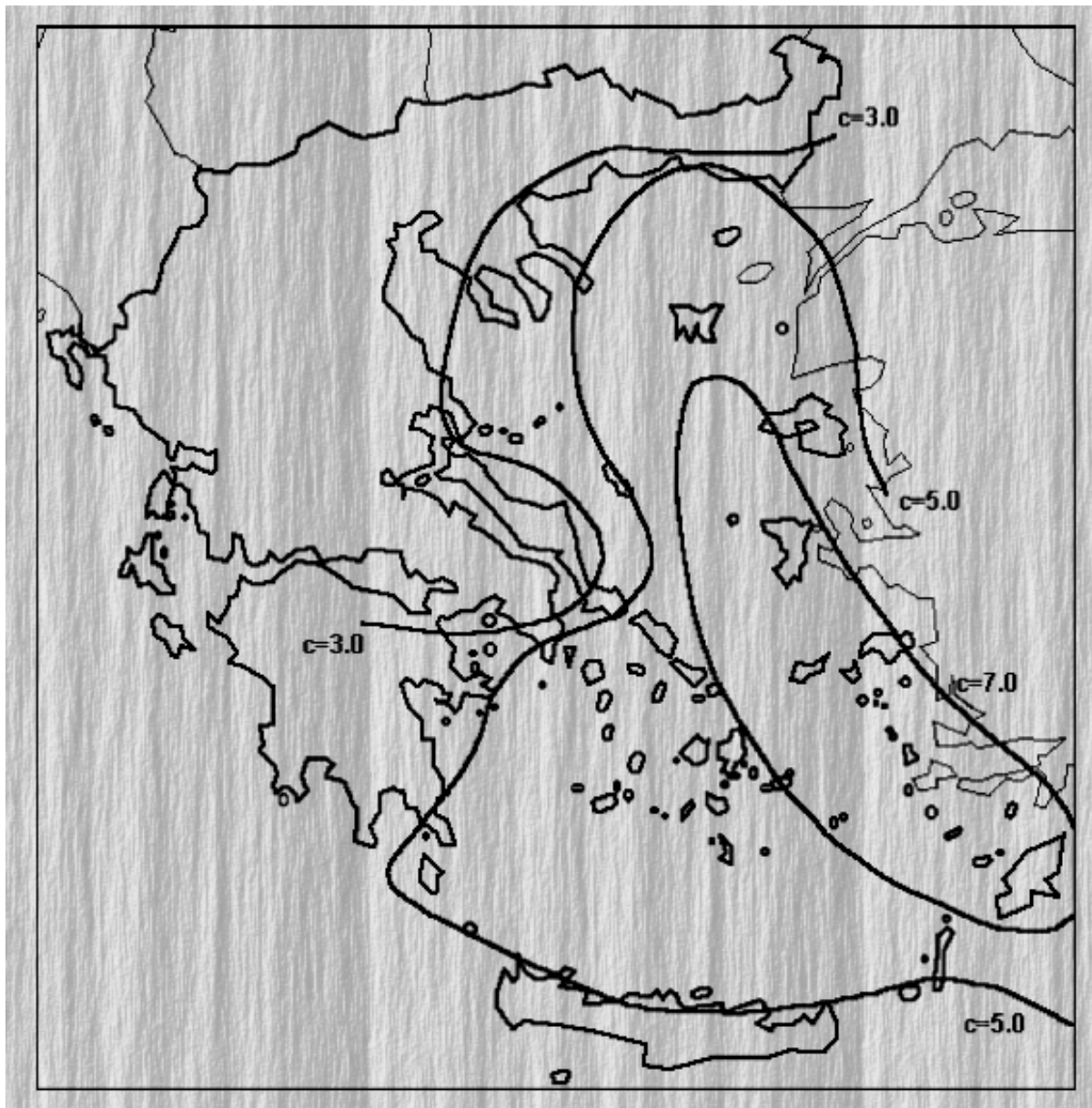
4.1.3 Το Αιολικό Δυναμικό στα Νησιά του Αιγαίου

Για την αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού όπως προαναφέρθηκε δεν αρκεί μόνο η γνώση της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και δύο στατιστικών συντελεστών (ήτοι ο συντελεστής μορφής **k** και ο συντελεστής κλίμακας **c**) που καθορίζουν την καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας **Weibull**. Στο σχήμα 4.2 παρατίθεται η γεωγραφική κατανομή του συντελεστή μορφής στην περιοχή κυρίως του Αιγαίου Πελάγους ενώ αντίστοιχα στο σχήμα 4.3 παρατίθεται η κατανομή του συντελεστή κλίμακας. Από τους χάρτες αυτούς είναι δυνατόν να εξαχθούν οι τιμές **k** και **c** για την περίπτωση της Νισύρου. Έτσι λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ότι ο συντελεστής μορφής είναι **k = 2.0** ενώ ο συντελεστής

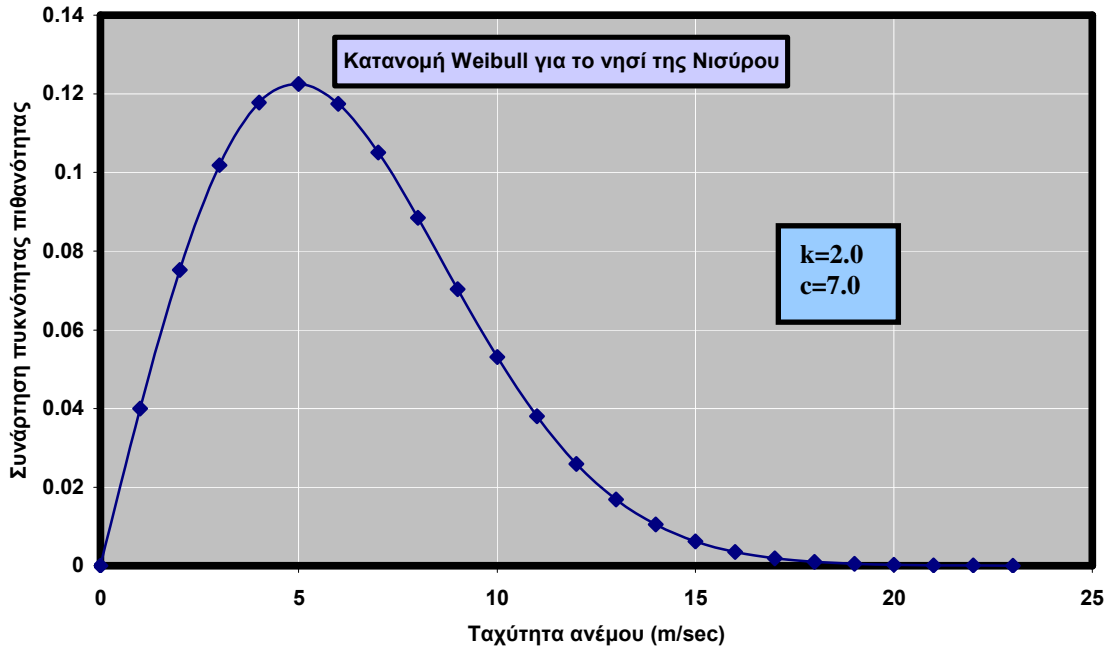
μορφής είναι $c = 7.0\text{m/sec}$. Με βάση τις τιμές αυτές μπορεί να χαρακτηί η κατανομή Weibull όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.2: Γεωγραφική κατανομή συντελεστή μορφής k [22]



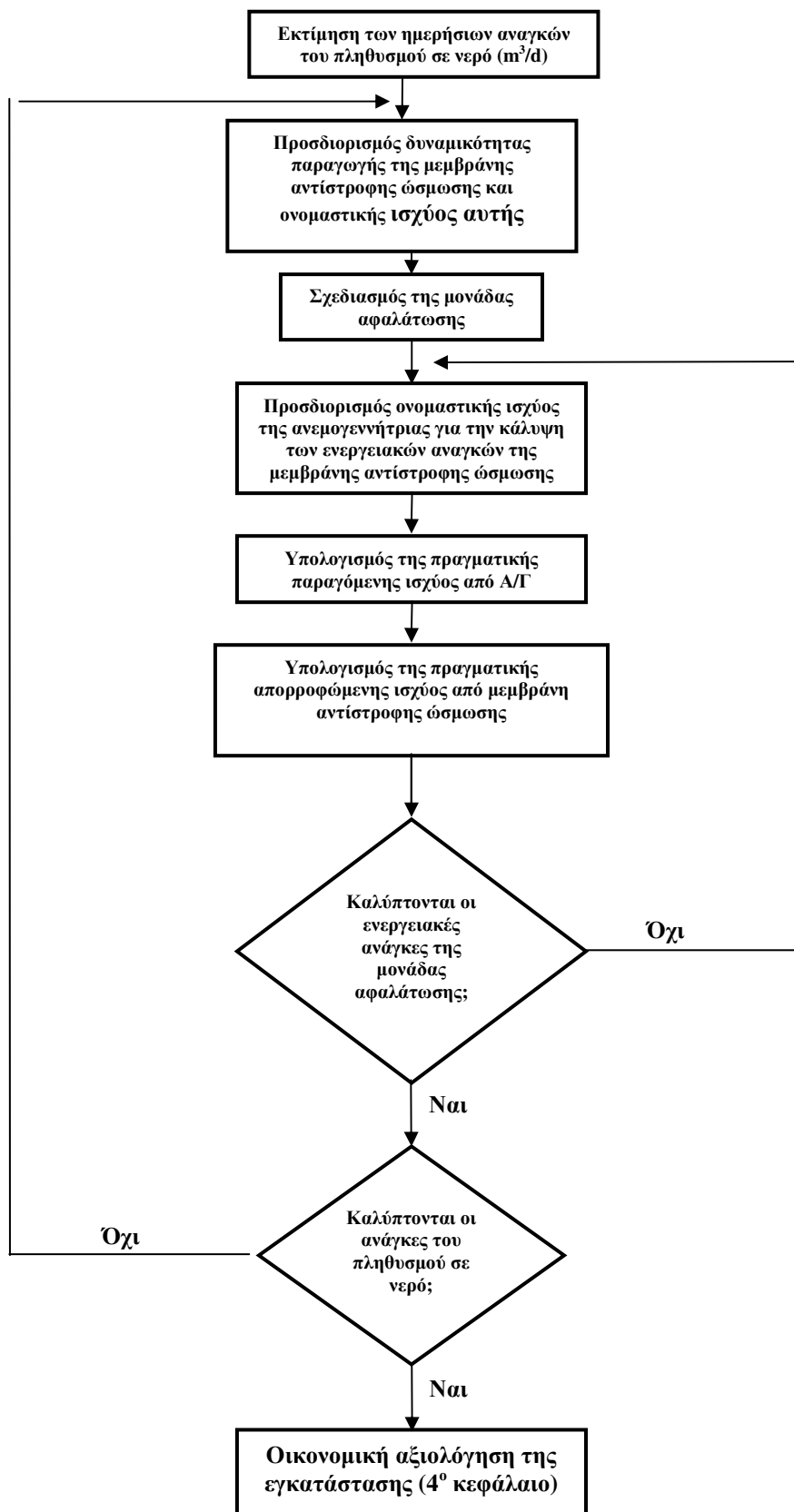
Σχήμα 4.3: Γεωγραφική κατανομή συντελεστή μορφής c [22]



Σχήμα 4.4: Κατανομή Weibull για το νησί της Νισύρου με $k=2.0$ και $c=7.0$

4.2 Προσδιορισμός των Κύριων Παραμέτρων της Μονάδας Αφαλάτωσης

Το τιθέμενο πρόβλημα θα επιλυθεί λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στη Νίσυρο όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.1 για το αιολικό δυναμικό και τις ανάγκες του πληθυσμού του εν λόγω νησιού. Ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής παρατίθεται στο σχήμα 4.5. Αρχικά εκτιμώνται οι ημερήσιες ανάγκες του πληθυσμού σε νερό προκειμένου να προσδιοριστεί η δυναμικότητα παραγωγής της μονάδας αφαλάτωσης καθώς και η ισχύς που αυτή καταναλώνει. Ακολουθεί ο σχεδιασμός και η επιλογή της μεμβράνης αφαλάτωσης ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες των κατοίκων της Νισύρου και στη συνέχεια επιλέγεται το μοντέλο της ανεμογεννήτριας η οποία θα καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης. Αφού υλοποιηθούν οι ανωτέρω ενέργειες θα πραγματοποιηθεί έλεγχος του συστήματος προκειμένου να προσδιοριστεί η πραγματική ισχύς της ανεμογεννήτριας με βάση τις ιδιαίτερες ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αξιοποιώντας τα δεδομένα της παραγράφου 4.1. Έτσι καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικής ημερήσιας παραγωγής πόσιμου νερού από τη μεμβράνη



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής διαδικασίας προσδιορισμού των συνιστωσών του προβλήματος

αφαλάτωσης. Με βάση το τελευταίο δεδομένο θα διενεργηθεί έλεγχος του συστήματος και θα εξεταστεί το ενδεχόμενο κάλυψης ή μη των ενεργειακών αναγκών της μεμβράνης από το επιλεγόμενο μοντέλο ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση που δεν επαρκεί η παραγόμενη από την Α/Γ ισχύς τότε επαναπροσδιορίζεται αυτή και επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου το πρόβλημα συγκλίνει. Στην περίπτωση που η παραγόμενη από την Α/Γ ισχύς επαρκεί τότε διενεργείται έλεγχος επάρκειας της πραγματικής ημερήσιας παραγωγής πόσιμου νερού. Αν οι ανάγκες του πληθυσμού δεν καλύπτονται τότε λαμβάνει χώρα επαναπροσδιορισμός της χρησιμοποιούμενης μεμβράνης ή εναλλακτικά του αριθμού των στοιχείων μεμβράνης και επανάληψη της σχετικής διαδικασίας. Στην περίπτωση όμως που η παραγωγή νερού επαρκεί για τις ανάγκες του πληθυσμού γίνεται μετάβαση στο επόμενο βήμα το οποίο περιλαμβάνει οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης και θα πραγματοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2.1 Μεμβράνη Αντίστροφης Ωσμωσης

Το κυριότερο κριτήριο για την επιλογή της μεθόδου αυτής αποτέλεσε η ενέργεια που καταναλώνεται ανά κυβικό παραγόμενου νερού. Η επιλογή αυτή ανταποκρίνεται με επάρκεια στη φύση του εν λόγω προβλήματος δεδομένου ότι απαιτείται η μονάδα αφαλάτωσης να καταναλώνει όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια ανά κυβικό παραγόμενου νερού σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η παροχή ενέργειας πραγματοποιείται μέσω υδραυλικού κυκλώματος με μηχανική μετάδοση. Στον πίνακα 4.5 που ακολουθεί παρατίθεται η ενέργεια

Τεχνολογία Αφαλάτωσης	Ειδική Ενέργεια (kWh/m³)
Άμεση Απόσταξη Πολλαπλών Βαθμίδων (Multi-Stage Flash Distillation, MSF)	10-14.5
Απόσταξη Πολλαπλής Επίδρασης (Multi Effect Distillation, ME)	6-9
Απόσταξη με Συμπίεση Ατμών (Vapor Compression Distillation, VC)	7-15
Ηλεκτροδιάλυση (ElectroDialysis, ED)	0.7-2.2
Αντίστροφη Ωσμωση (Reverse Osmosis, RO)	0.5-2.5
Υφάλμυρο νερό	
Θαλασσινό νερό	4-13

Πίνακας 4.5 Ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια ανά μέθοδο αφαλάτωσης [12]

που καταναλώνεται από τις διάφορες τεχνολογίες αφαλάτωσης σε kWh/m³. Είναι έκδηλο ότι η μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης για αφαλάτωση θαλασσινού νερού κατατάσσεται στις μεθόδους που έχει από τις λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις.

4.2.1.1 Το θαλασσινό Νερό ως Πηγή Τροφοδοσίας

Ως νερό τροφοδοσίας θα χρησιμοποιηθεί το θαλασσινό νερό. Ένα κριτήριο αξιολόγησης της ποιότητας του νερού αποτελούν τα **Συνολικά Διαλυμένα Σωματίδια (Total Dissolved Solids, TDS)** και υποδηλώνουν τη συνολική ποσότητα των στερεών σωματιδίων σε mg/l που απομένουν μετά την εξάτμιση του διαλύματος. Θα πρέπει να ειπωθεί πως και η ηλεκτρική αγωγιμότητα μπορεί να παρέχει μία προσεγγιστική τιμή των TDS σε ένα διάλυμα κάτι που στην πράξη υλοποιείται με τη χρήση αγωγιμέτρων.

Χαρακτηριστικό	Θάλασσα Αιγαίου Πελάγους
pH	8.2
TDS(mg/l)	38000
Na⁺	12000
K⁺	580
Ca²⁺	400
Mg²⁺	1480
NH₄⁺	0.005
Cl⁻	21900
HCO₃⁻	165
SO₄²⁻	3030
NO₃⁻	0.5
As	0.05
B	5
SiO₂	2

**Πίνακας 4.6 Ποιότητα θαλασσινού νερού του
Αιγαίου Πελάγους [25]**

Στον πίνακα 4.6 παρατίθεται η περιεκτικότητα της θάλασσας του Αιγαίου σε ολικά διαλυμένα στερεά καθώς και η οξύτητα αυτού. Υπενθυμίζεται πως το νερό θεωρείται πόσιμο για **TDS<1000ppm²** ενώ για αστική υδροδότηση προτιμάται η περιεκτικότητα του πόσιμου νερού να κυμαίνεται περίπου στα **100ppm(TDS)**.

4.2.1.2 Ανάλυση Συμπεριφοράς της Χρησιμοποιούμενης Μεμβράνης Αντίστροφης Ώσμωσης

Μία μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης παρουσιάζει πολυπαραμετρική συμπεριφορά λειτουργίας. Συγκεκριμένα, η παροχή του παραγόμενου νερού καθώς και ο συντελεστής απόρριψης του άλατος αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μεμβράνης που επηρεάζονται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- ☉ **Πίεση του νερού τροφοδοσίας**
- ☉ **Θερμοκρασία**
- ☉ **Συντελεστή ανάκτησης**
- ☉ **Περιεκτικότητα του νερού τροφοδοσίας σε άλατα**

Στα σχήματα που ακολουθούν διαφαίνεται ο τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν τα δύο αυτά βασικά μεγέθη. Οι εξισώσεις και οι τιμές που παρατίθενται ακόλουθα είναι ενδεικτικές και περιγράφουν αντιπροσωπευτικά τις μεταβολές των δύο βασικών μεγεθών. Στο σχήμα 4.6 διαφαίνεται πως αύξηση της πίεσης προκαλεί γραμμική αύξηση της παροχής του παραγόμενου νερού και αύξηση του συντελεστή απόρριψης. Οι αναλυτικές σχέσεις που συνδέουν τις εξαρτημένες μεταβλητές (παροχή παραγόμενου νερού, συντελεστής απόρριψης) με την ανεξάρτητη μεταβλητή (πίεση τροφοδοσίας) είναι οι εξής:

$$Q_p = 0.717 \cdot P_f - 19.701 \quad (4.1)$$

όπου Q_p , P_f η παροχή του προϊόντος (m³/d) και η πίεση του νερού τροφοδοσίας (bar) αντίστοιχα και

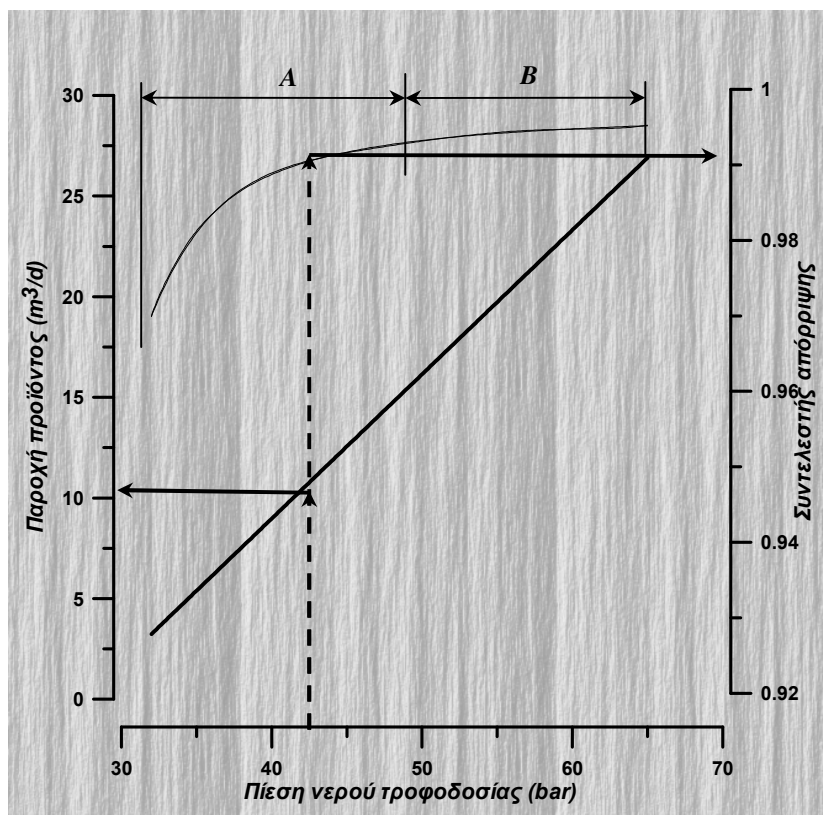
$$\eta = 5.95 \cdot 10^{-9} \cdot P_f^5 - 1.56 \cdot 10^{-6} \cdot P_f^4 + 1.63 \cdot 10^{-4} \cdot P_f^3 - 8.47 \cdot 10^{-3} \cdot P_f^2 + 0.22 \cdot P_f - 1.29 \quad (4.2)$$

όπου η ο συντελεστής απόρριψης της μεμβράνης.

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό στην περιοχή A (32 bar-44 bar) παρατηρούνται έντονες μεταβολές στην κλίση της καμπύλης η - P_f γεγονός που συνεπάγεται ότι μία μικρή μεταβολή της πίεσης τροφοδοσίας δύναται να προκαλέσει σημαντική αύξηση στο συντελεστή απόρριψης της μεμβράνης. Αντίθετα, στην περιοχή B (44 bar- 68 bar) η κλίση της καμπύλης

1.Σημειώνεται πως 1ppm=1mg/l

$\eta\text{-}P_f$ παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές γεγονός που συνεπάγεται ότι μικρές μεταβολές της πίεσης τροφοδοσίας προκαλεί μικρές μεταβολές του συντελεστή απόρριψης. Οι έντονες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή A παρέχουν χαμηλές τιμές του συντελεστή απόρριψης (96.99%-99.32%) που αντιστοιχούν ταυτόχρονα σε χαμηλές τιμές της παροχής του προϊόντος ύδατος και κυμαίνονται από 3.02 m³/d έως 16.49 m³/d. Στην περίπτωση όμως της περιοχής B οι τιμές της παροχής κυμαίνονται από 16.49 m³/h έως 26.35 m³/d με αντίστοιχες υψηλές τιμές του συντελεστή απόρριψης (99.32%-99.52) όπου και για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη περιοχή πρέπει να αποτελεί την επιθυμητή περιοχή λειτουργίας της μεμβράνης.



Σχήμα 4.6: Επίδραση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας στην παροχή προϊόντος και το συντελεστή απόρριψης

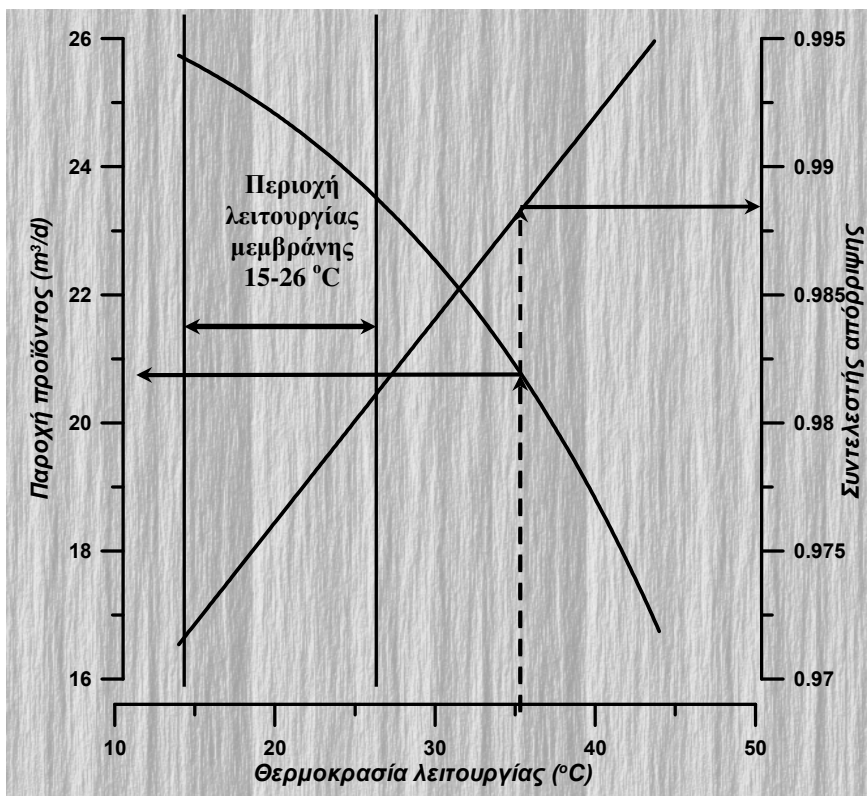
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα που απεικονίζεται στο σχήμα 4.7. Σε αυτό φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας, δηλαδή της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας, στην παροχή του προϊόντος και στο συντελεστή απόρριψης της μεμβράνης. Η παροχή του προϊόντος μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση

$$Q_p = 0.317 \cdot T_f + 12.103 \quad (4.3)$$

όπου T_f η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, ενώ η αναλυτική σχέση που συνδέει το συντελεστή απόρριψης με τη θερμοκρασία λειτουργίας είναι η εξής:

$$\eta = -3.19 \cdot 10^{-9} \cdot T_f^4 + 1.03 \cdot 10^{-7} \cdot T_f^3 - 9.77 \cdot 10^{-6} \cdot T_f^2 - 7.20 \cdot T_f + 1 \quad (4.4)$$

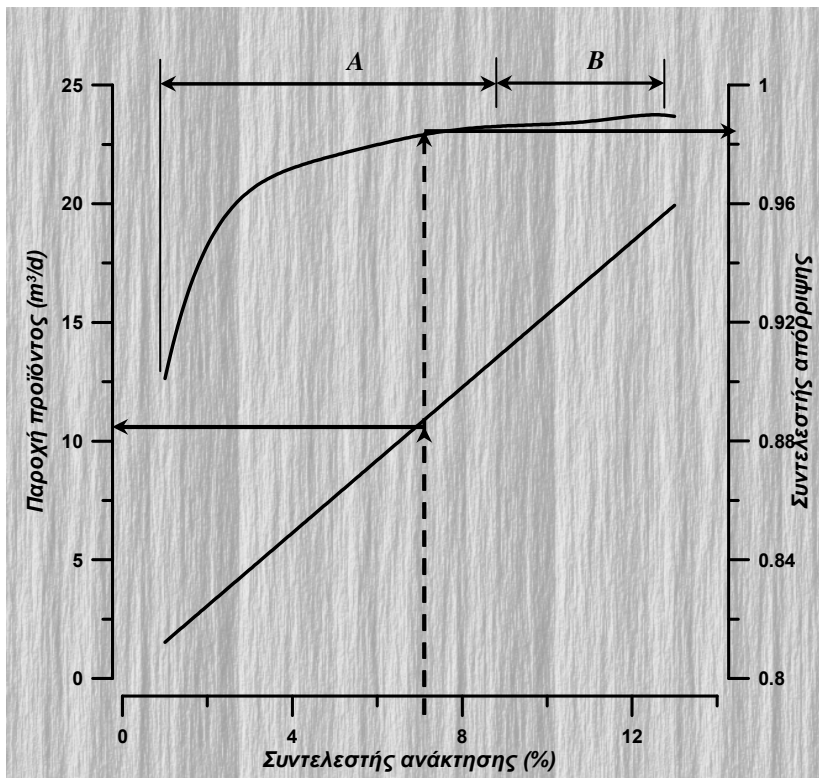
Δεδομένου ότι η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας (σε βάθος 3-4 m) κυμαίνεται ετησίως από 15 °C έως 26 °C έπεται ότι ο συντελεστής απόρριψης της μεμβράνης θα κυμαίνεται από 98.90%-99.43% με τις χαμηλότερες τιμές να αντιστοιχούν τους θερινούς μήνες και τις υψηλότερες τιμές τη χειμερινή περίοδο. Ανύψωση του συντελεστή απόρριψης θα μπορούσε να επιτευχθεί με επιβολή ψυκτικού φορτίου στο νερό τροφοδοσίας το οποίο καθιστά το σύστημα επιβαρυντικά ενεργοβόρο ενώ αυξάνεται ο βαθμός πολυπλοκότητας του συστήματος. Το πρόβλημα της ανύψωσης θα μπορούσε να επιλυθεί αποτελεσματικά εμβαπτίζοντας τις σωληνώσεις αναρρόφησης θαλασσινού νερού σε μεγαλύτερο βάθος όπου και η θερμοκρασία θα είναι χαμηλότερη συγκριτικά με αυτήν που επικρατεί στην επιφάνειά της.



Σχήμα 4.7: Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στην παροχή προϊόντος και το συντελεστή απόρριψης

Περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας δύναται να επιφέρει, σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 4.7, μείωση της παροχής του προϊόντος ύδατος. Με την επίτευξη μείωσης της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ επέρχεται μείωση της παροχής κατά $dQ_p=0.317 dT_f=0.317 \cdot 1=0.317\text{ m}^3/d$ και αύξηση του συντελεστή απόρριψης κατά $d\eta = 0.044 \cdot dT_f = 0.044 \cdot 1 = 0.044\%$ ποσοστό που αντιστοιχεί σε μεταβολή της συγκέντρωσης C_p του προϊόντος ύδατος κατά $dC_p=17\text{ TDS}$. Συνοψίζοντας, μεταβολή της θερμοκρασίας δύναται να επιφέρει βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος ύδατος χωρίς να μειώνεται σημαντικά η παροχή αυτού.

Στο σχήμα 4.8 που ακολουθεί απεικονίζεται η επίδραση του συντελεστή ανάκτησης στην παροχή προϊόντος και στο συντελεστή απόρριψης. Η μεταβολές των δύο μεγεθών παρουσιάζουν ομοιότητα με τις αντίστοιχες που συμβαίνουν στο σχήμα 4.6. Για το λόγο αυτό η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα είναι αντίστοιχη με την περίπτωση που περιγράφεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.8: Επίδραση του συντελεστή ανάκτησης στην παροχή προϊόντος και το συντελεστή απόρριψης

Οι αναλυτικές σχέσεις που συνδέουν τις εξαρτημένες μεταβλητές (παροχή παραγόμενου νερού, συντελεστής απόρριψης) με την ανεξάρτητη μεταβλητή (πίεση τροφοδοσίας) είναι οι εξής:

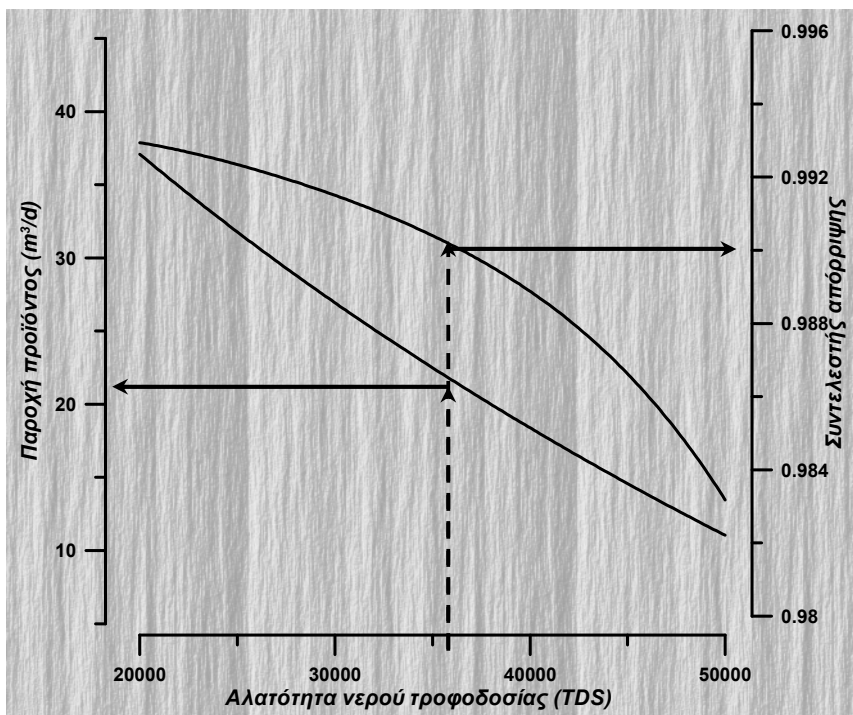
$$Q_p = 1.769 \cdot RR + 0.002 \quad (4.4)$$

όπου **RR** ο συντελεστής ανάκτησης της μεμβράνης (%).

$$\eta = -1.14 \cdot 10^{-6} \cdot RR^6 + 5.47 \cdot 10^{-5} \cdot RR^5 - 1.05 \cdot 10^{-3} \cdot RR^4 + 0.01 \cdot RR^3 - 0.06 \cdot RR^2 + 0.16 \cdot RR + 0.77 \quad (4.5)$$

Για τους λόγους που περιγράφηκαν στην περίπτωση του σχήματος 4.6 η επιθυμητή περιοχή λειτουργίας της μεμβράνης πρέπει να εμπίπτει στην περιοχή Β (9%-13%) όπου οι τιμές της παροχής κυμαίνονται από 13.8 m³/d έως 19.93 m³/d με αντίστοιχες υψηλές τιμές του συντελεστή απόρριψης (98.60%-98.95%) έναντι του εύρους των τιμών παροχής από 1.53 m³/d έως 13.8 m³/d και του συντελεστή απόρριψης από 90.08% έως 98.60% που παρατηρείται στην περιοχή Α.

Στο σχήμα 4.9 φαίνεται η επίδραση της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό το υφάλμυρο νερό (20000-35000 TDS) παρουσιάζει υψηλές τιμές παροχής προϊόντος ύδατος (37.09 m³/d -23.35 m³/d) και συντελεστή ανάκτησης (99.30%-99.07%). Εναλλακτικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το υφάλμυρο νερό απαιτεί επιβολή χαμηλότερης πίεσης στην είσοδο της μεμβράνης.



Σχήμα 4.9: Επίδραση της αλατότητας του νερού τροφοδοσίας στην παροχή προϊόντος και το συντελεστή απόρριψης

Αντίθετα, το θαλασσινό νερό (35000-50000 TDS) παρέχει χαμηλότερες τιμές παροχής προϊόντος ύδατος (23.35 m³/d -11.04 m³/d) και συντελεστή ανάκτησης (99.30%-98.32%). Με βάση τα προαναφερόμενα ένας τρόπος για να βελτιωθεί η απόδοση της μεμβράνης είναι η ανάμειξη μίας ποσότητας προϊόντος ύδατος με το νερό τροφοδοσίας. Με τον τρόπο αυτό η αλατότητα του νερού τροφοδοσίας μειώνεται ενώ αυξάνεται η παροχή του καθαρού νερού και βελτιώνεται η ποιότητά του με τη μείωση που λαμβάνει χώρα στο συντελεστή ανάκτησης της μεμβράνης.

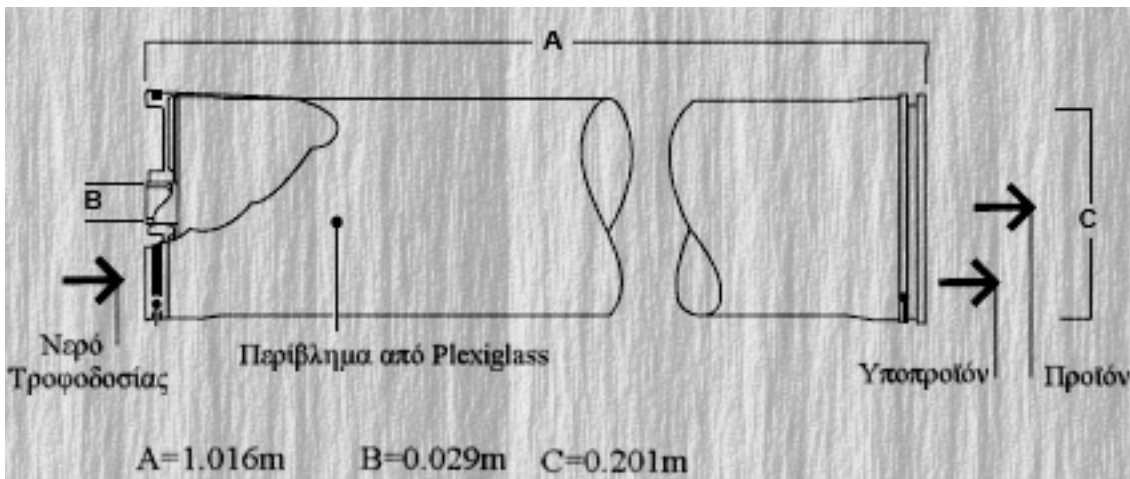
Εκτός από τα προαναφερόμενα μεγέθη σημαντική αποτελεί και η γνώση της πτώσης πίεσης που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό της μεμβράνης συναρτήσει της παροχής εισόδου. Η γνώση της πτώσης πίεσης στο εσωτερικό της μεμβράνης είναι απαραίτητη δεδομένου ότι αυτή θα εισαχθεί στο υδραυλικό κύκλωμα και εν συνεχεία με βάση αυτή θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση των φυγοκεντρικών αντλιών.

Ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης στη μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης θα υπολογιστεί με τη βοήθεια του λογισμικού **ROSA (Reverse Osmosis System Analysis)** που παρέχεται από την εταιρεία **DOW** αφού πρώτα πραγματοποιηθεί επιλογή της κατάλληλης μεμβράνης. Με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες του προβλήματος όπου οι ανάγκες σε νερό του πληθυσμού της Νισύρου ανέρχονται σε 900m³/d (μέγιστη απαίτηση) ως στοιχείο μεμβράνης θα επιλεγεί η μεμβράνη με την κωδική ονομασία **SW30HR-380** της DOW τα χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας της οποίας παρέχονται στον πίνακα 4.7.

Μεμβράνη	Ενεργός Επιφάνεια (m ²)	Πίεση λειτουργίας (bar)	Παροχή Παραγόμενου Νερού (m ³ /d)	Συντελεστής Απόρριψης Αλατος (%)
SW30HR-30	35	55	23	99.7
Περιορισμοί στη λειτουργία της μεμβράνης				
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας			45 °C	
Μέγιστη πίεση λειτουργίας			69 bar	
Μέγιστη πτώση πίεσης			1 bar	

Πίνακας 4.7 Χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας της μεμβράνης SW30HR-380 [40]

Επιπλέον στο σχήμα 4.10 που ακολουθεί παρατίθενται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιλεγόμενης μεμβράνης.



Σχήμα 4.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης SW30HR-380 [40]

Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό του πληθυσμού της Νισύρου θα πρέπει να

χρησιμοποιηθούν $N = \frac{331.8m^3/d}{23m^3/d} \approx 15$ στοιχεία μεμβράνης τα οποία θα συνδέονται

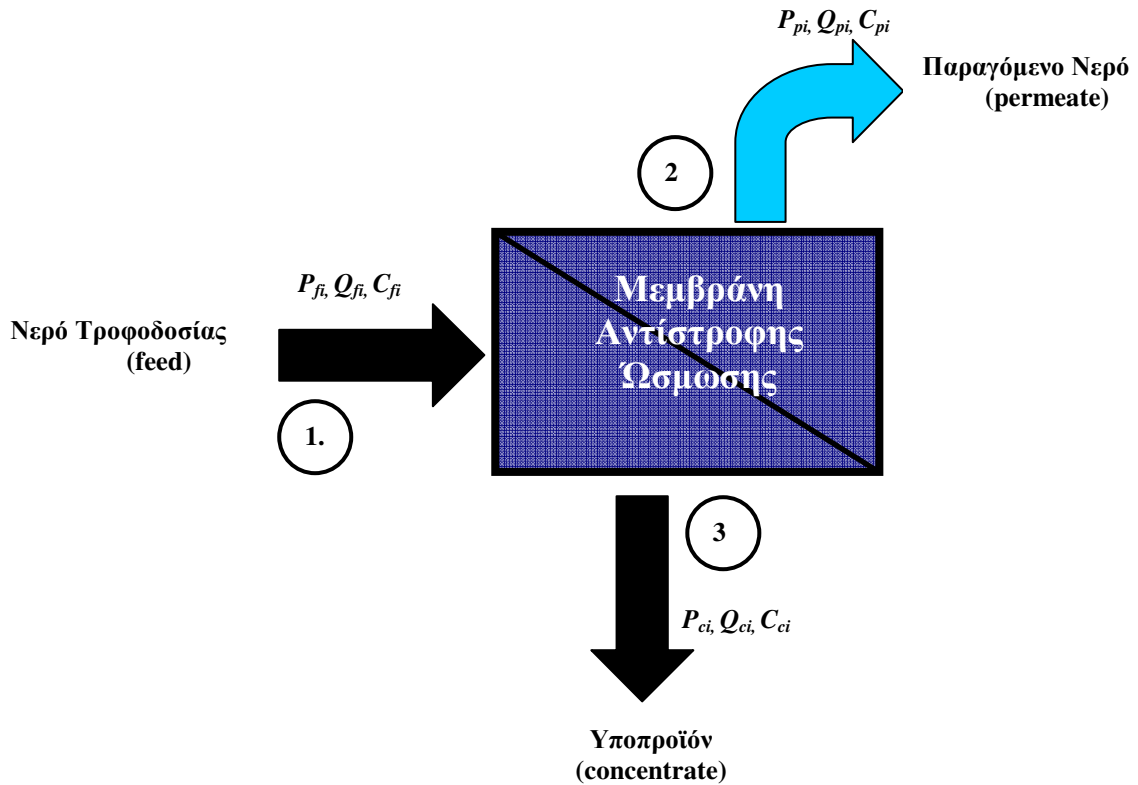
μεταξύ τους με παράλληλη διάταξη. Για να πραγματοποιηθεί μία πρώτη εκτίμηση της συνολικής παροχής τροφοδοσίας νερού θεωρείται ότι κάθε στοιχείο μεμβράνης παρέχει $Q_{pi} = 23m^3/d$ (σχήμα 4.11). Επίσης δεδομένου ότι ο συντελεστής ανάκτησης είναι $R=13\%$

σύμφωνα με τις παρεχόμενες από την κατασκευάστρια εταιρεία προδιαγραφές έπεται ότι η παροχή τροφοδοσίας κάθε στοιχείου μεμβράνης θα είναι $Q_{fi} = \frac{Q_{pi}}{R} = \frac{23}{0.13} = 176m^3/d$ με τη

συνολική παροχή τροφοδοσίας να ανέρχεται σε

$Q_f = N \cdot Q_{fi} = 15 \cdot 176 = 2640m^3/d$ ή $110m^3/h$. Επιπλέον η ονομαστική τιμή της πίεσης εισόδου στη μονάδα αφαλάτωσης, δεδομένου του τρόπου διάταξης των μεμβρανών (παράλληλη διάταξη), θεωρείται ότι είναι $P_f=55bar$ (πίνακας 4.7) ή εναλλακτικά

εκπεφρασμένη σε mΣΥ $H_{max} = \frac{P_{max}}{\rho_w \cdot g} = \frac{55 \cdot 10^5 N/m^2}{996 kg/m^3 \cdot 9.81m/sec^2} = 563mΣΥ$.



Σχήμα 4.11: Σχηματική απεικόνιση της μεμβράνης αντίστροφης όσμωσης

Με τη βοήθεια του λογισμικού ROSA η πτώση πίεσης μεταξύ των θέσεων 1 και 3 είναι $\Delta P_{13i} = P_{fi} - P_{ci} = 55 - 54.42 = 0.58 \text{ bar}$ και επομένως η ισχύς που αξιοποιείται από τη μεμβράνη αφαλάτωσης είναι

$$N_i = \left(\Delta P_{13i} (\text{bar}) \cdot Q_{ci} (\text{m}^3 / \text{d}) + \Delta P_{12i} (\text{bar}) \cdot Q_{si} (\text{m}^3 / \text{d}) \right) \cdot \frac{10^5}{24 \cdot 3600} =$$

$$(0.58 \cdot 162.03 + 55 \cdot 14.89) \cdot \frac{10^5}{24 \cdot 3600} = 1056 \text{ W} \text{ ή } 1.056 \text{ kW}$$

ενώ η ισχύς που απαιτείται από τη διαδικασία αφαλάτωσης του νερού είναι $N_{igross} = 14.08 \text{ Kw}$ και επομένως η συνολικά απαιτούμενη ενέργεια θα είναι $N = 15 \cdot 14.08 = 211.25 \text{ kW}$.

Έτσι λοιπόν καθίσταται δυνατή μία πρώτη εκτίμηση της επιλεγόμενης ανεμογεννήτριας αλλά και της αντίστοιχης αντλίας. Στο σημείο αυτό όμως θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένα βασικά στοιχεία μοντελοποίησης της σύζευξης ανεμογεννήτριας-αντλίας τα οποία είναι απαραίτητα για την περαιτέρω ανάλυση του προβλήματος.

4.2.2 Σύζευξη Ανεμογεννήτριας-Αντλίας: Εναλλακτικές Επιλογές Μηχανικής Μετάδοσης Ισχύος

Στην εν λόγω παράγραφο θα πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση σύζευξης ανεμογεννήτριας-αντλίας. Συγκεκριμένα, θα μελετηθεί η περίπτωση μηχανικής σύνδεσης ανεμογεννήτριας-φυγοκεντρικής αντλίας.

4.2.2.1 Μηχανική Σύνδεση Ανεμογεννήτριας-Φυγοκεντρικής Αντλίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 η ισχύς που αποδίδεται από μία ανεμογεννήτρια παρέχεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{A/G} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot U_{\Sigma A}^3 \cdot \frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \quad (4.6)$$

όπου D_T είναι η διάμετρος του δρομέα και ρ_a η πυκνότητα του αέρα.

Επιπλέον η ισχύς που απορροφά μία φυγοκεντρική αντλία δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$N_{pump} = \frac{\rho_w \cdot g \cdot H_{\Sigma A} \cdot Q_{\Sigma A}}{\eta} \quad (4.7)$$

όπου ρ_w η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου, ήτοι το νερό, g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($=9.81\text{m/sec}^2$), $H_{\Sigma A}$ είναι το ολικό ύψος της αντλίας, δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα μάζας του υγρού την οποία προσδίδει η αντλία και $Q_{\Sigma A}$ η παροχή της αντλίας (τα δύο τελευταία μεγέθη αναφέρονται στο σημείο λειτουργίας της αντλίας).

Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται ότι τόσο η Α/Γ όσο και η αντλία λειτουργούν στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας τους. Λόγω της μηχανικής συνδέσεως ανεμογεννήτριας-αντλίας ισχύει ότι $N_{A/G} = N_{pump}$ από την οποία προκύπτει ότι η παροχή της αντλίας θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{\Sigma A} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \eta \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \left[\frac{\pi \cdot D_T^2}{4} \right] \cdot \frac{U_{\Sigma A}^3}{g \cdot H_{\Sigma A}} \quad (4.8)$$

Δεδομένου όμως του γεγονότος ότι η ταχύτητα του αέρα μεταβάλλεται όπως φαίνεται και από την κατανομή Weibull του σχήματος 4.4 και ότι η ταχύτητα ακροπερυγίου του δρομέα $\lambda_{\Sigma A}$ διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια κάποιου κιβωτίου ταχυτήτων έπεται ότι και η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου. Έστω n είναι η ταχύτητα περιστροφής της φυγοκεντρικής αντλίας διάφορη από την ταχύτητα περιστροφής

$n_{\Sigma A}$ στο σημείο λειτουργίας της. Τότε η παροχή της αντλίας Q στο νέο σημείο λειτουργίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = Q_{\Sigma A} \cdot \frac{n}{n_{\Sigma A}} \quad (4.9)$$

ενώ το ολικό ύψος που παρέχει η αντλία στο σημείο λειτουργίας της είναι:

$$H = H_{\Sigma A} \cdot \left(\frac{n}{n_{\Sigma A}}\right)^2 \quad H = H_{\Sigma A} \cdot \left(\frac{n}{n_{\Sigma A}}\right)^2 \quad (4.10)$$

Επιπλέον η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας συσχετιζόμενη με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας θα δίνεται από τη σχέση 4.11 σύμφωνα με την οποία:

$$n_{pump} = i_{pA} \cdot \lambda_{\Sigma A} \cdot U \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot D_T}\right) \quad (4.11)$$

όπου i_{pA} η σχέση μετάδοσης της βαθμίδας αντλίας-Α/Γ δηλαδή $i_{pA} = n_{pump} / n_{A/G}$

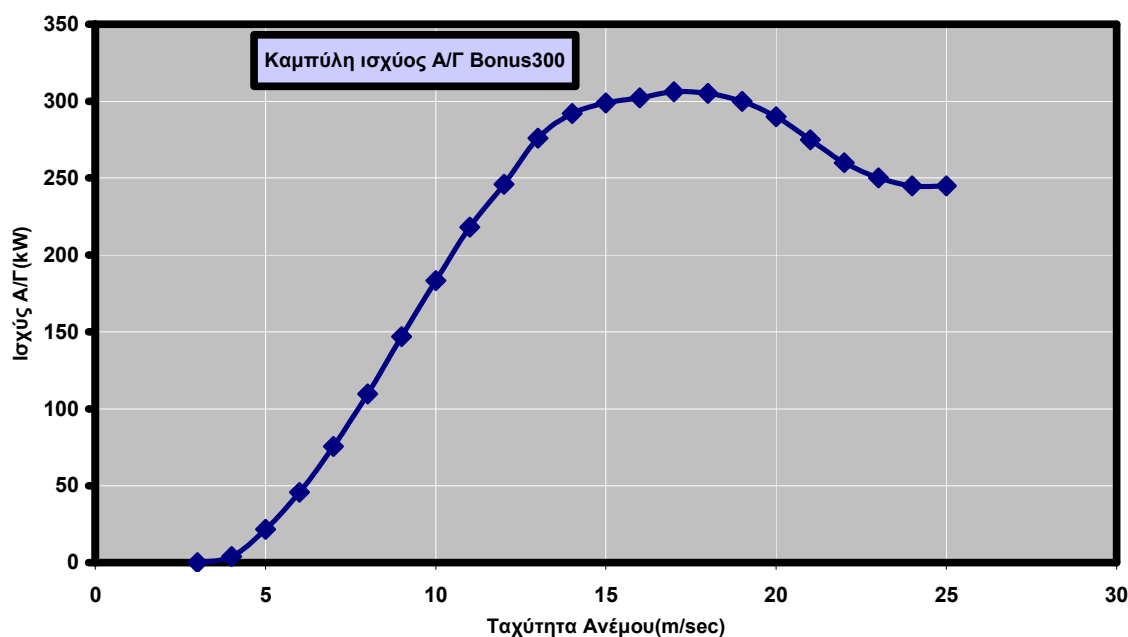
Έτσι λοιπόν η παροχή της αντλίας για οποιαδήποτε παροχή θα δίνεται από τον παρακάτω τύπο που προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων (4.8), (4.9) και (4.11):

$$Q = \frac{1}{8} \cdot C_p \cdot \eta \cdot U \cdot D_T \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \cdot \left(\frac{U_{\Sigma A}^3}{g \cdot H_{\Sigma A}}\right) \cdot \left(\frac{i_{pA} \cdot \lambda_{\Sigma A}}{n_{\Sigma A}}\right) \quad (4.12)$$

Σύμφωνα με την ανάλυση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο αυτή προκειμένου η Α/Γ να λειτουργεί στο μέγιστο C_p απαιτείται κατάλληλο κιβώτιο ταχυτήτων προκειμένου να διατηρηθεί η αδιάστατη ταχύτητα ακροπερυγίου σταθερή. Με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα του ανέμου είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας.

4.2.2.2 Πρώτη Επιλογή Σύζευξης Α/Γ-Αντλίας

Για την τροφοδότηση των στοιχείων αφαλάτωσης θα χρησιμοποιηθεί 1 Α/Γ της εταιρείας **Bonus** ονομαστικής ισχύος **300kW**. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας φαίνεται στο σχήμα 4.12 ενώ τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της παρατίθενται στον πίνακα 4.8. Για την επιλεγόμενη Α/Γ θεωρείται ότι $\lambda_{\Sigma A}=6$, $\rho_a=1.193\text{kg/m}^3$ και $C_p=0.35$ και συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας $CF=0.24$. Η ανεμογεννήτρια αυτή θα συζευχθεί με μία αντλία φυγοκεντρική.

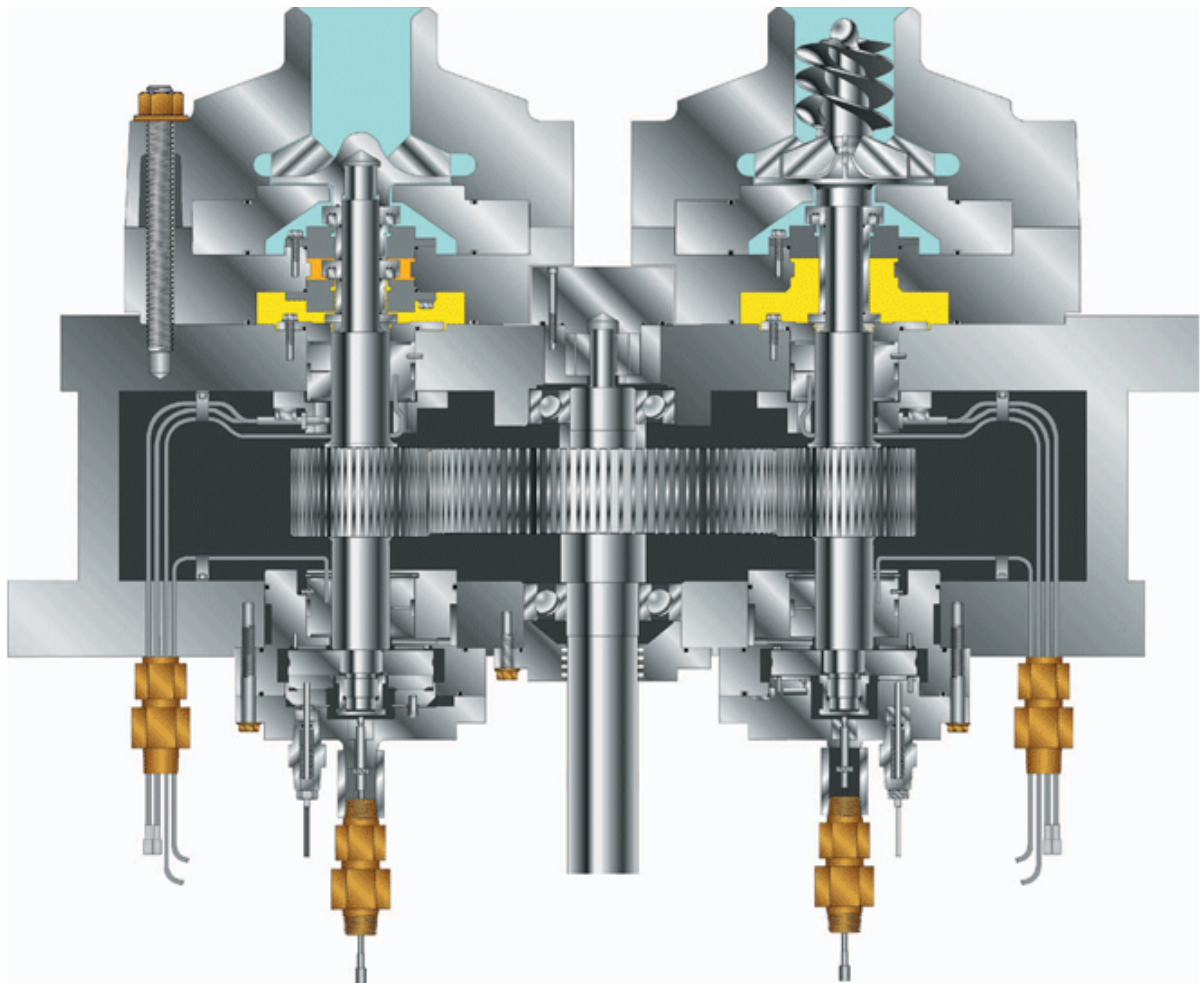


Σχήμα 4.12: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Bonus300

Διάμετρος δρομέα(m)	31
Ύψος δρομέα (m)	30
Ονομαστική ισχύς (kW)	300
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ($u_{\text{cut-in}}$, m/sec)	5
Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ($u_{\text{cut-out}}$, m/sec)	25
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/sec)	15
Αριθμός πτερυγίων	3

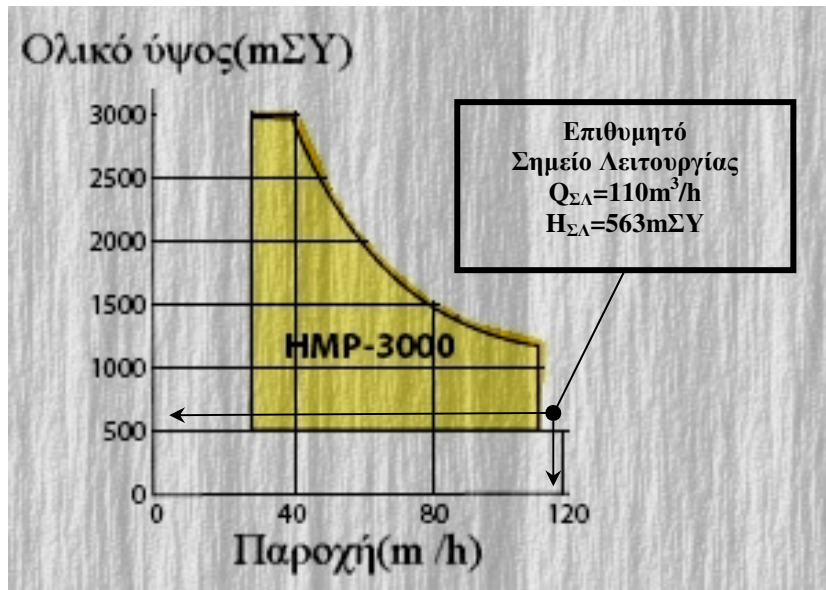
Πίνακας 4.8 Γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας Bonus300

Όπως ειπώθηκε στην παράγραφο 4.2.1.2 η ονομαστική πίεση λειτουργίας της μεμβράνης αφαλάτωσης είναι $P_{max}=55bar$ ή $H_{max} = \frac{P_{max}}{\rho_w \cdot g} = \frac{55 \cdot 10^5 N/m^2}{996 kg/m^3 \cdot 9.81m/sec^2} = 563m\Sigma Y$. Αυτό σημαίνει πως η αντλία πρέπει να παρέχει $Q=110 m^3/h$ και $H=563 m\Sigma Y$. Οι αντλία που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι πολλαπλών βαθμίδων της εταιρείας **Sundyne** και έχει την κωδική ονομασία **HMP-3000**. Στο σχήμα 4.13 που ακολουθεί παρατίθεται μία τομή της επιλεγόμενης φυγοκεντρικής αντλίας. Όπως φαίνεται πρόκειται για μία αντλία δύο βαθμίδων.



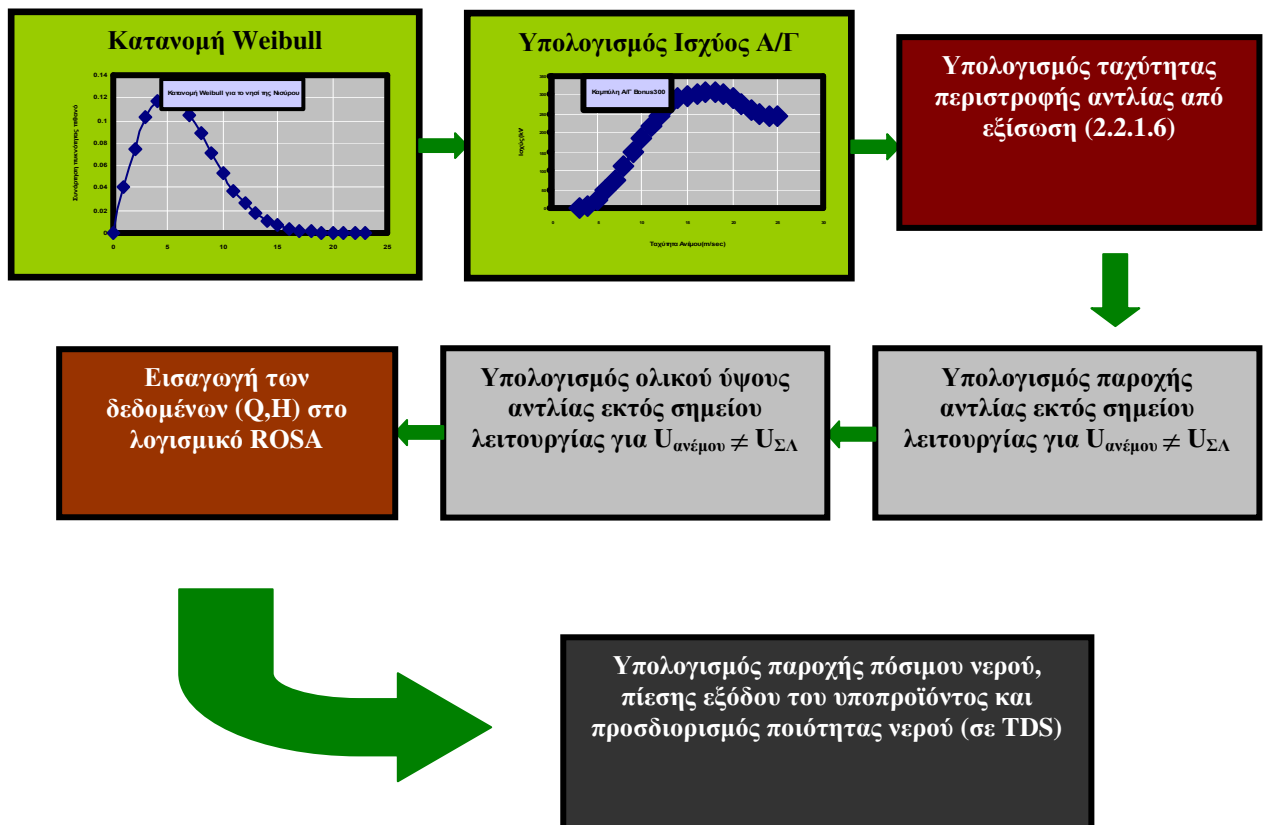
Σχήμα 4.13: Κατακόρυφη τομή της HMP-3000 φυγοκεντρικής αντλίας

Επίσης στο σχήμα 4.14 παρατίθεται το διάγραμμα εύρους λειτουργίας της αντλίας καθώς και το επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας στο σημείο λειτουργίας είναι $n_{\Sigma A}=3300RPM$ ενώ ο βαθμός απόδοσης αυτής είναι $\eta=0.8$. Η σχέση μετάδοσης θεωρείται ότι είναι $i_{pA}=50$.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα εύρους λειτουργίας της αντλίας HMP-3000

Με βάση τα προαναφερθέντα δύναται να υπολογιστεί η συνολική παραγωγή αλλά και η ποσότητα του πόσιμου νερού όπως απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα το οποίο και συνακολούθως θα εξηγηθεί.



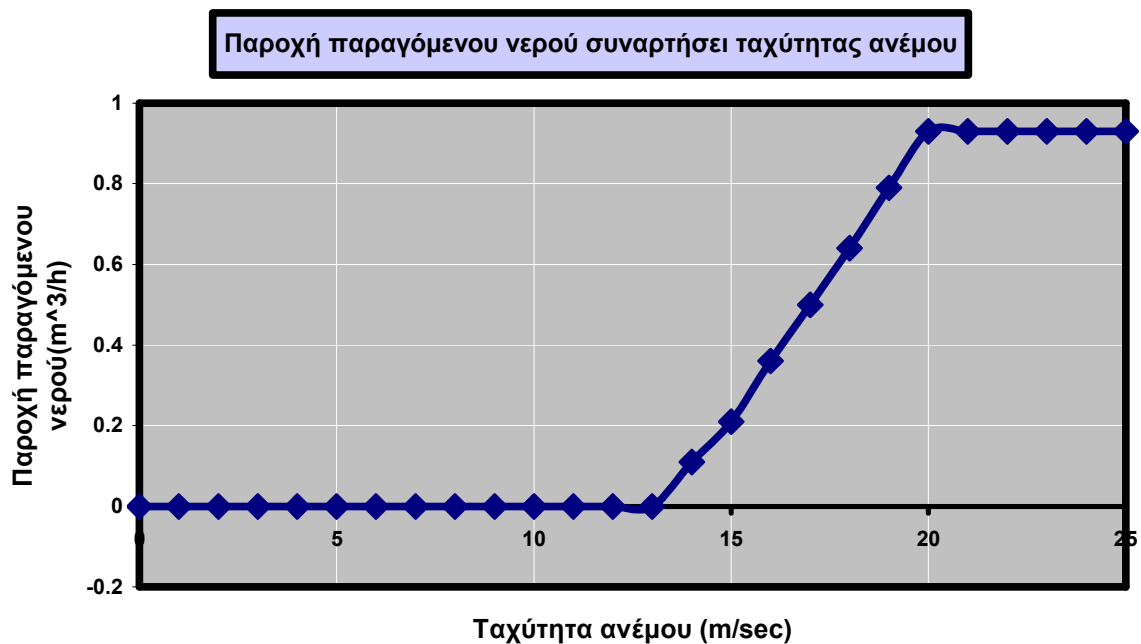
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ροής υπολογισμού βασικών χαρακτηριστικών παραγωγής της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15 για διάφορες ταχύτητες ανέμου και για ποσοστό συμμετοχής αυτών όπως υπαγορεύεται από την κατανομή Weibull, υπολογίζεται η ισχύς που αποδίδεται από την Α/Γ με τη βοήθεια της καμπύλης ισχύος της. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει διακύμανση όπως φαίνεται και από την κατανομή Weibull θα πρέπει να υπολογιστεί η παροχή Q και το ολικό ύψος H της αντλίας εκτός του σημείου λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό με τα δεδομένα που υπολογίστηκαν καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των διαφόρων βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών της μεμβράνης αντίστροφης ώσμωσης αξιοποιώντας το λογισμικό **ROSA**. Τα αποτελέσματα της περιγραφείσας διαδικασίας συνοψίζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν όπου φαίνονται τα διάφορα μεγέθη που έχουν υπολογιστεί συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου. Από τα διαγράμματα αυτά θα καταστεί δυνατός ο υπολογισμός της μέσης τιμής αυτών.

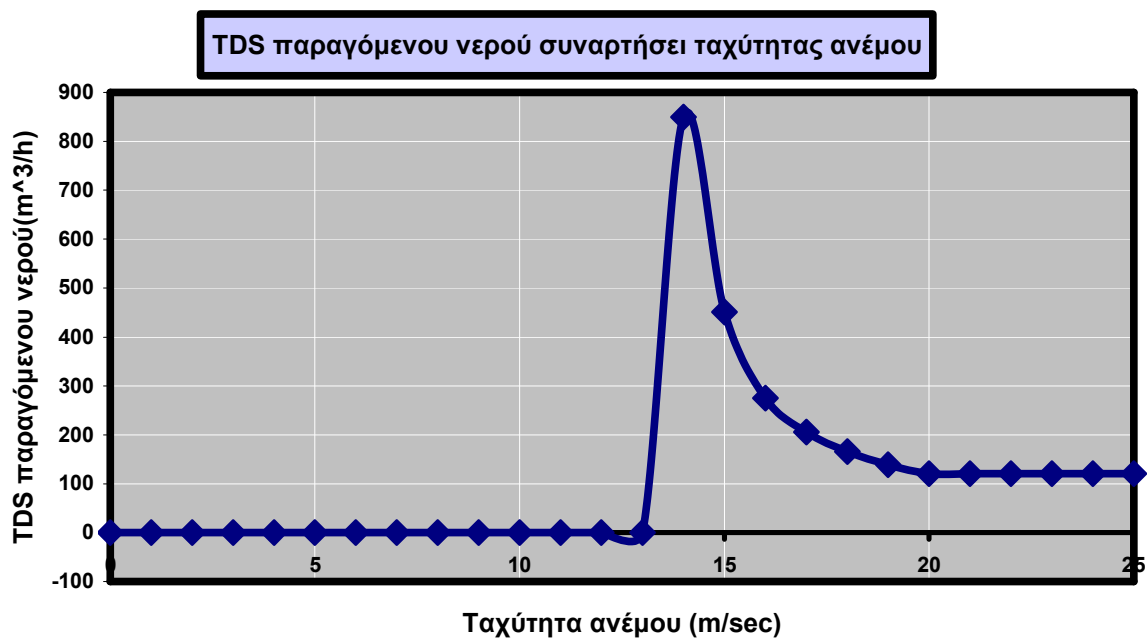
Στα σχήματα 4.16-4.21 είναι έκδηλο ότι η λειτουργία των μεμβρανών ξεκινά για ταχύτητα ανέμου $U_{\text{ανέμου}}=14\text{m/sec}$ ενώ η διεργασία της αφαλάτωσης διακόπτεται για ταχύτητες ανέμου $U_{\text{ανέμου}}>25\text{m/sec}$. Όμως, σύμφωνα με την κατανομή Weibull το εύρος των ταχυτήτων ανέμου που παρουσιάζουν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης στην περιοχή της Νισύρου κυμαίνονται μεταξύ $2\text{m/sec}-9\text{m/sec}$ το οποίο δεν αξιοποιείται κατάλληλα από την εγκατάσταση.

Στο σχήμα 4.16 η παροχή του προϊόντος ύδατος Q_{pi} (κάθε μεμβράνης) μεταβάλλεται γραμμικά για ταχύτητες ανέμου $13\text{m/sec}-20\text{m/sec}$ λαμβάνοντας τιμές $0.11-0.93 \text{ m}^3/\text{h}$ ενώ για ταχύτητες ανέμου $20\text{m/sec}-25\text{m/sec}$ παραμένει σταθερή και ίση με $0.93 \text{ m}^3/\text{h}$. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί πως για ταχύτητες ανέμου $20\text{m/sec}-25\text{m/sec}$ η πίεση και η παροχή του νερού τροφοδοσίας υπερβαίνουν τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές λειτουργίας της μεμβράνης. Για το λόγο αυτό με την εισαγωγή στο υδραυλικό κύκλωμα μίας βαλβίδας ελέγχου ροής και μίας βαλβίδας ρύθμισης πίεσης ρυθμίζεται η ροή με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπεται η υπέρβαση των ανώτατων ορίων λειτουργίας της μεμβράνης.

Στο σχήμα 4.17 η περιεκτικότητα του παραγόμενου νερού σε Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS) C_{pi} κατά την έναρξη λειτουργίας που αντιστοιχεί σε $U_{\text{ανέμου}}=14\text{m/sec}$ είναι αρκετά υψηλή και ανέρχεται σε 850.01mg/l ενώ με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μειώνεται και σταθεροποιείται στην τιμή 121.05mg/l για $20\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$. Η σταθεροποίηση που παρατηρείται και στην περίπτωση της περιεκτικότητας οφείλεται στις βαλβίδες ελέγχου ροής και ρύθμισης πίεσης ο ρόλος των οποίων επεξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το χαρακτηριστικό της σταθεροποίησης για ταχύτητες ανέμου $20\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$ παρατηρείται σε όλα τα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη (πίεση υποπροϊόντος, καταναλισκόμενη ισχύς, ειδική καταναλισκόμενη ισχύς και συντελεστής ανάκτησης).

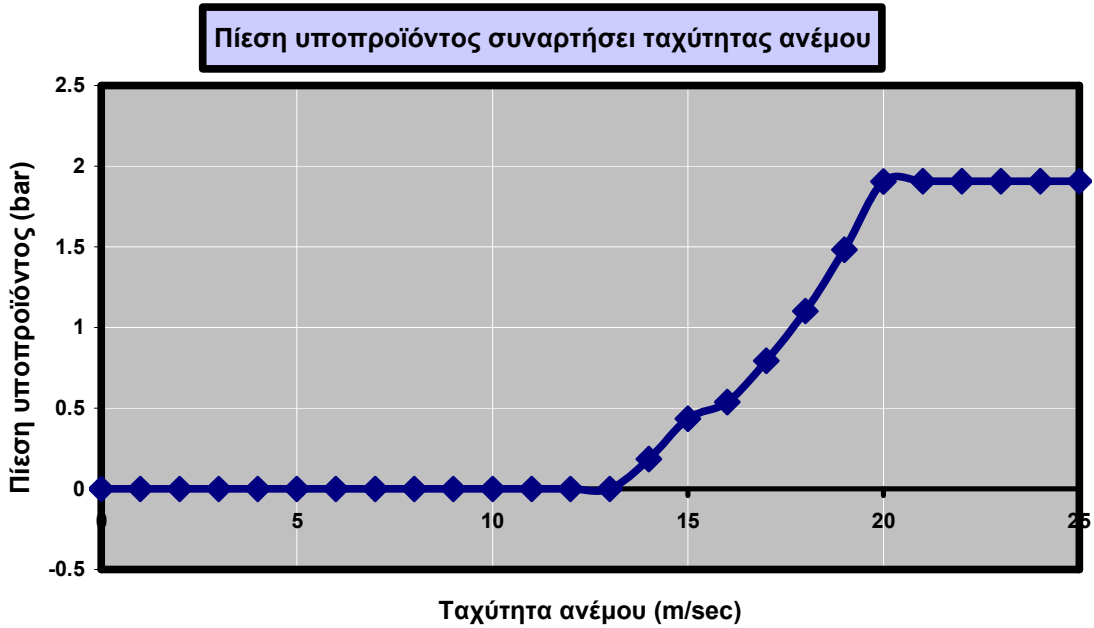


Σχήμα 4.16: Καμπύλη παροχής παραγόμενου νερού-ταχύτητας ανέμου



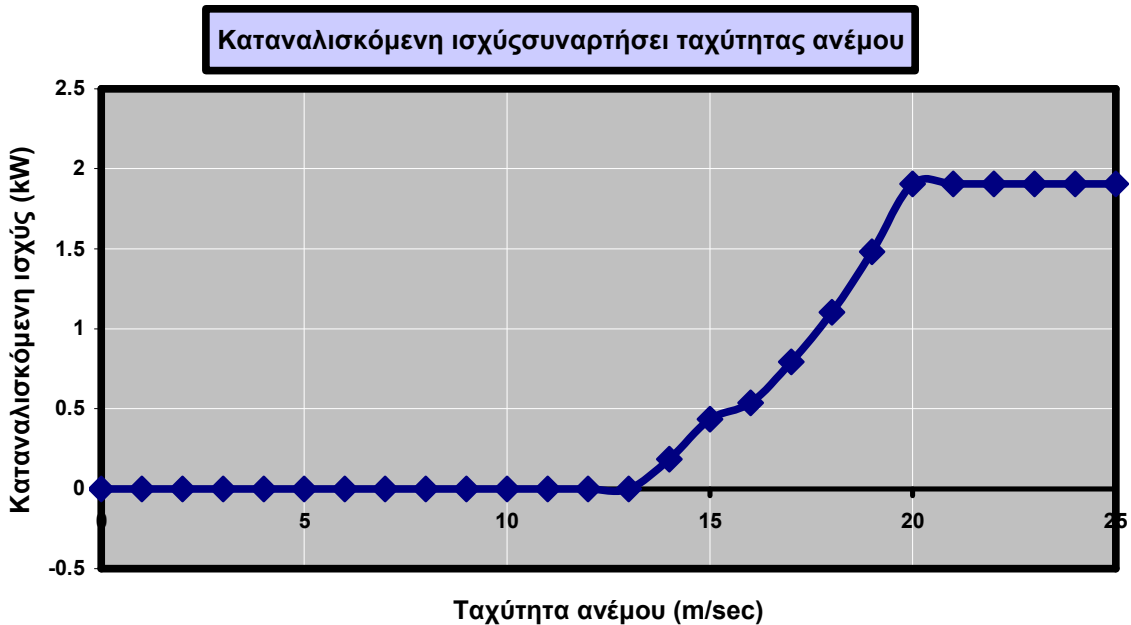
Σχήμα 4.17: Καμπύλη TDS παραγόμενου νερού-ταχύτητας ανέμου

Στο σχήμα 4.18 η πίεση εξόδου P_{ci} του υποπροϊόντος αποτελεί γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς την ταχύτητα του ανέμου και λαμβάνει τιμή 33.28 bar για $U_{\text{ανέμου}}=14\text{m/sec}$ ενώ για $20\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$ σταθεροποιείται στην τιμή 68.39 bar.



Σχήμα 4.18: Καμπύλη πίεσης εξόδου υποπροϊόντος-ταχύτητας ανέμου

Η ισχύς που καταναλώνεται από την κάθε μεμβράνη φαίνεται στο σχήμα 4.19 σύμφωνα με το οποίο κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης η καταναλισκόμενη ισχύς ανέρχεται σε 0.19 kW και αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου σταθεροποιείται στην τιμή 1.91 kW.



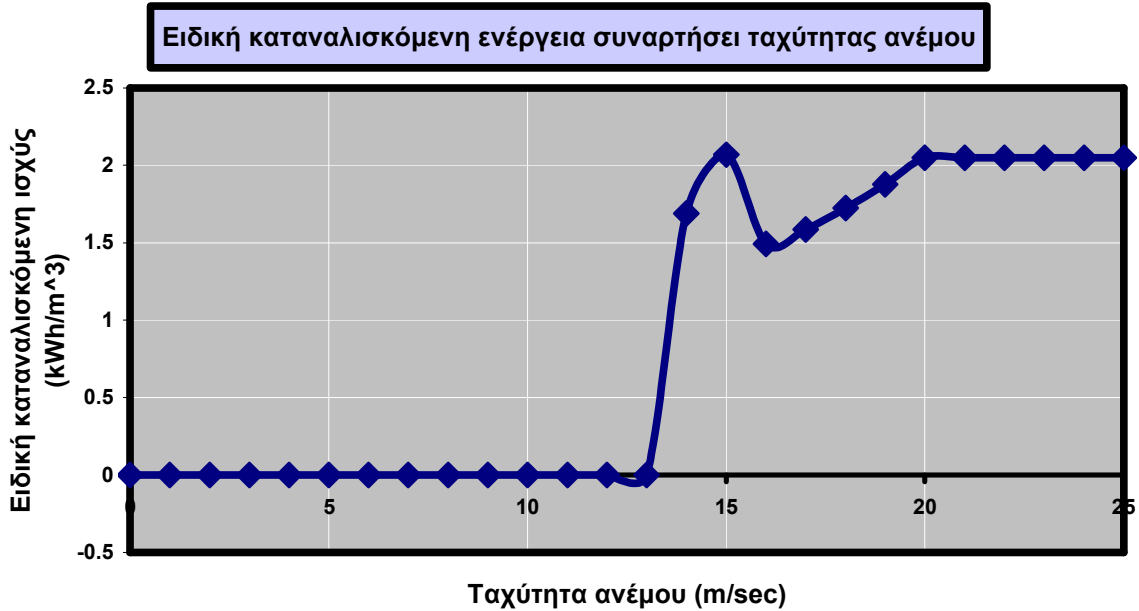
Σχήμα 4.19: Καμπύλη καταναλισκόμενης ισχύος-ταχύτητας ανέμου

Συγκριτικά με την καταναλισκόμενη ισχύ η ειδική καταναλισκόμενη ισχύς παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς την καμπύλη μεταβολής συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Για

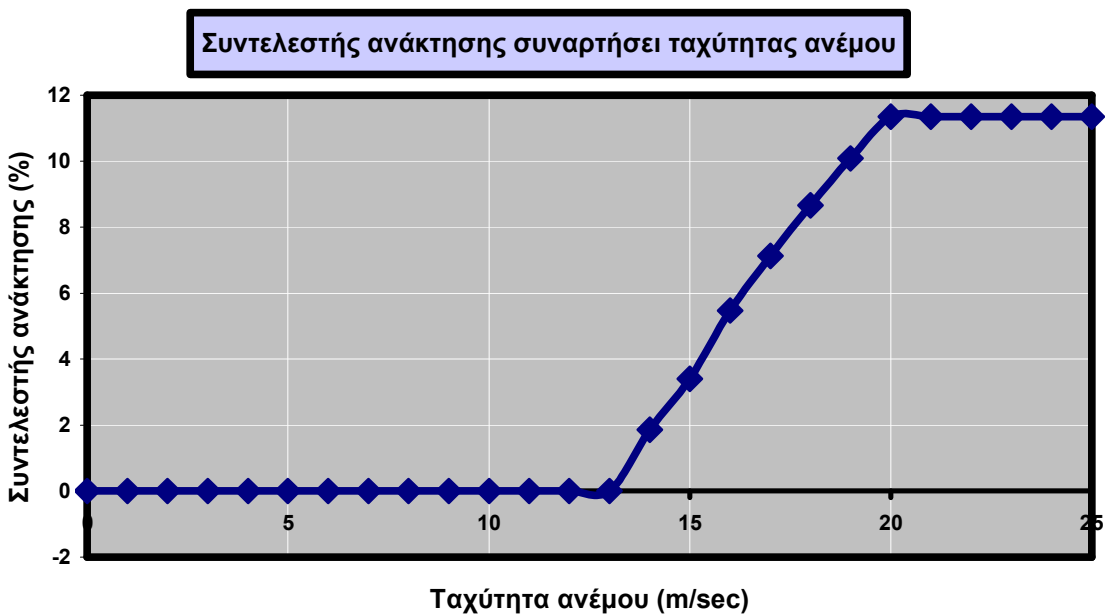
$U_{\text{ανέμου}}=15\text{m/sec}$ παρουσιάζει τοπικό μέγιστο $\frac{N_i}{Q_{pi}} = 2.07 \text{ kWh/m}^3$, για $U_{\text{ανέμου}}=16\text{m/sec}$

παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο $\frac{N_i}{Q_{pi}} = 1.49 \text{ kWh/m}^3$ ενώ σταθεροποιείται στην τιμή 2.05

kWh/m^3 για $20\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$.



Σχήμα 4.20: Καμπύλη ειδικής καταναλισκόμενης ενέργειας-ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 4.21: Καμπύλη συντελεστή ανάκτησης-ταχύτητας ανέμου

Στο σχήμα 4.21 ο συντελεστής ανάκτησης αυξάνεται με την ταχύτητα του ανέμου. Κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης ($U_{\text{ανέμου}}=14\text{m/sec}$) ο συντελεστής ανάκτησης λαμβάνει την τιμή 1.86 % ενώ για $20\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$ σταθεροποιείται στην τιμή 11.35 %.

Με βάση τα σχήματα 4.16-4.21 οι μέσες τιμές των μεγεθών δύνανται να υπολογιστούν από τα ολοκληρώματα των σχέσεων που ακολουθούν:

$$\bar{Q}_{pi} = \int_0^{\infty} Q_{pi}(U)f(U)dU \quad (4.13): \text{Μέση τιμή παροχής παραγόμενου νερού}$$

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\int_0^{\infty} Q_{pi}(U)C_{pi}(U)f(U)dU}{\bar{Q}_{pi}} \quad (4.14): \text{Μέση τιμή περιεκτικότητας παραγόμενου νερού σε TDS}$$

$$\bar{N}_i = \int_0^{\infty} N_i(U)f(U)dU \quad (4.15): \text{Μέση τιμή καταναλισκόμενης ισχύος}$$

$$\left(\frac{\bar{N}_i}{\bar{Q}_{pi}} \right) = \frac{\int_0^{\infty} N_i(U)f(U)dU}{\int_0^{\infty} Q_{pi}(U)f(U)dU} \quad (4.16): \text{Μέση τιμή ειδικής καταναλισκόμενης ισχύος}$$

$$\bar{R} = \int_0^{\infty} R(U)f(U)dU \quad (4.17): \text{Μέση τιμή συντελεστή ανάκτησης}$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρατίθενται παρακάτω:

$$\bar{Q}_{pi} = 0.006\text{m}^3/\text{h} \Rightarrow \bar{Q}_p = 15 \cdot \bar{Q}_{pi} = 0.09\text{m}^3/\text{h} \text{ ή } 2.16\text{m}^3/\text{d}$$

$$\bar{C}_{pi} = 381.75\text{mg/l}$$

$$\bar{N}_i = 0.0106\text{kW} \Rightarrow \bar{N} = 15 \cdot \bar{N}_i = 0.159\text{kW}$$

$$\left(\frac{\bar{N}_p}{\bar{Q}_p} \right) = 1.75\text{kWh/m}^3$$

Συνοψίζοντας, όπως φαίνεται από τα ανωτέρω αποτελέσματα η παραγωγή πόσιμου νερού αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες του πληθυσμού σε νερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι στροφές του σημείου λειτουργίας των αντλιών ήταν $n_{pump}=3300RPM$ γεγονός που επηρέασε το εύρος αξιοποίησης του ανέμου για την τροφοδότηση των στοιχείων αφαλάτωσης (αξιοποιήσιμη ταχύτητα ανέμου $>12m/sec$). Για το λόγο αυτό και με βάση το σχήμα 4.5 θα πραγματοποιηθεί επαναπροσδιορισμός των στοιχείων που συναποτελούν την εγκατάσταση. Συγκεκριμένα, θα αντικατασταθεί η μία Α/Γ με 5 μικρότερης ονομαστικής ισχύος οι οποίες θα τροφοδοτούν αντίστοιχα 5 αντλίες μικρότερης δυναμικότητας.

4.2.2.3 Δεύτερη Επιλογή Α/Γ-Αντλίας

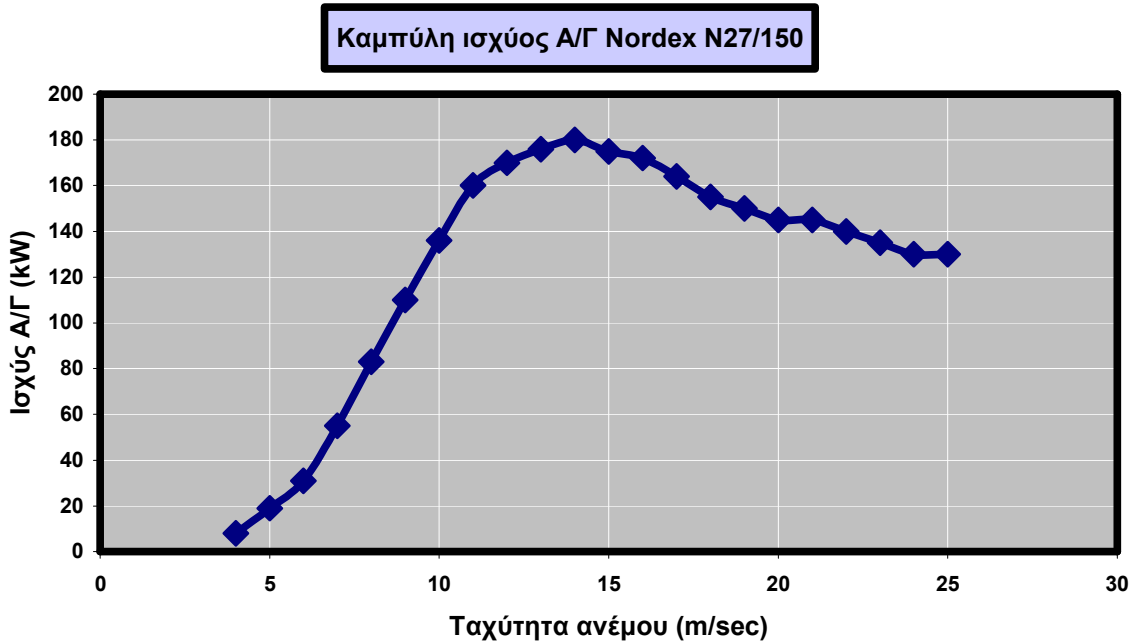
Οι νέες Α/Γ που επιλέχθηκαν φέρουν την κωδική ονομασία **N27/150** της εταιρείας **Nordex** τα χαρακτηριστικά στοιχεία των οποίων παρατίθενται στον πίνακα 4.9.

Διάμετρος δρομέα(m)	27
Ύψος δρομέα (m)	30
Ονομαστική ισχύς (kW)	150
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (u_{cut-in} , m/sec)	4
Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ($u_{cut-out}$, m/sec)	25
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/sec)	10.5
Αριθμός πτερυγίων	3

Πίνακας 4.9 Γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας Nordex N27/ 150

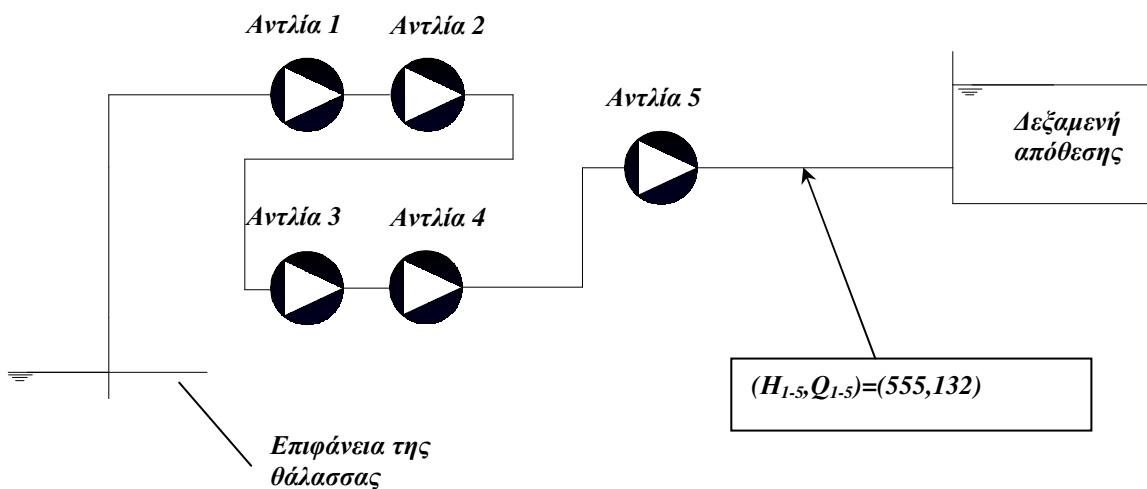
Οι καμπύλη ισχύος των Α/Γ αυτών φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 4.22. Θεωρείται ότι η σχέση μετάδοσης είναι $i_{pA}=50$, $\lambda_{\Sigma A}=6$, $\rho_a=1.193kg/m^3$, $C_p=0.25$, $CF=0.35$ και η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας $U_{\Sigma A}=10.5m/sec$.

Οι αντλίες που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι παρόμοιου μοντέλου με αυτό που διατίθεται από την εταιρεία **POH-ROVATI** (τύπου **S4 K125-150/3**) κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα ή ορείχαλκο προκειμένου να μη διαβρώνονται από το θαλασσινό νερό. Οι αντλίες αυτές δίνουν παροχή $Q_{\Sigma A}=132m^3/h$ η καθεμία και ολικό ύψος $H_{\Sigma A}=111m\Sigma Y$. Επιπλέον η ταχύτητα περιστροφής της κάθε αντλίας στο σημείο λειτουργίας είναι $n_{\Sigma A}=1450RPM$ ενώ ο βαθμός απόδοσης αυτής είναι $\eta=0.8$.



Σχήμα 4.22: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας N27/150 της εταιρείας Nordex

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος σύνδεσης των πέντε αυτών αντλιών προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό ολικό ύψος καθώς και η παροχή στην είσοδο της μονάδας αφαλάτωσης. Η διάταξή τους παρατίθεται στο σχήμα 4.23 σύμφωνα με το οποίο οι 5 αντλίες συνδέονται σε σειρά. Με τον τρόπο αυτό οι 5 εν σειρά συνδεδεμένες αντλίες δίνουν στην έξοδό τους συνολική ονομαστική παροχή $Q_{1-5} = 132 \text{ m}^3/\text{h}$ και συνολικό ολικό ύψος $H_{1-5} = 5 \cdot 111 = 555 \text{ mSY}$.



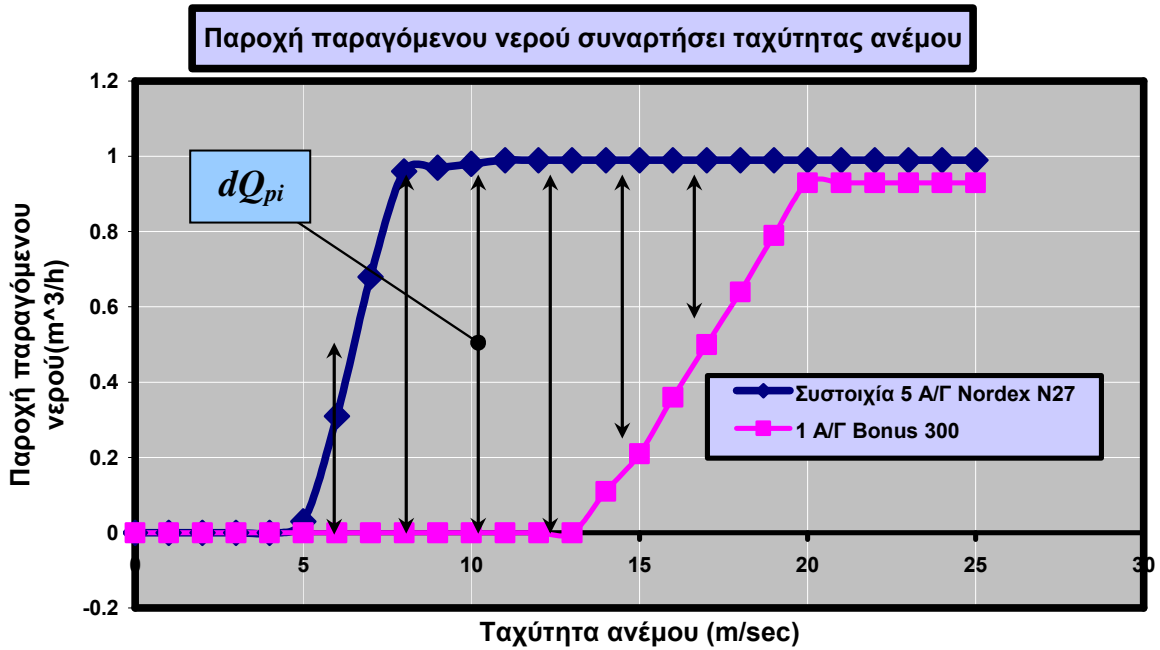
Σχήμα 4.23: Σύνδεση εν σειρά των 5 αντλιών

Εν συνεχεία θα προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κάθε στοιχείου αφαλάτωσης με τη μέθοδο που περιγράφηκε στο σχήμα 4.15 και θα παρατεθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα συναρτήσεως της ταχύτητας ανέμου. Στα σχήματα αυτά αντιπαραβάλλονται τα αντίστοιχα διαγράμματα της εγκατάστασης αφαλάτωσης της παραγράφου 4.2.2.2. προκειμένου να αναδειχθεί η διαφοροποίηση που παρουσιάζεται στην απόδοση των δύο συστημάτων αφαλάτωσης. Στα σχήματα που ακολουθούν παρατηρείται μία μετατόπιση των καμπυλών, που αντιστοιχούν στη μονάδα αφαλάτωσης των 5 Α/Γ Nordex N27, προς τα αριστερά με αποτέλεσμα να αξιοποιούνται οι χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου 5-10m/sec. Οι ταχύτητες αυτές σύμφωνα με την κατανομή Weinbull του σχήματος 4.4 παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα εμφάνισης και αποτελεί ένας από τους βασικότερους παράγοντες που η απόδοση του συστήματος της παραγράφου 4.2.2.2 δεν ήταν ικανοποιητική.

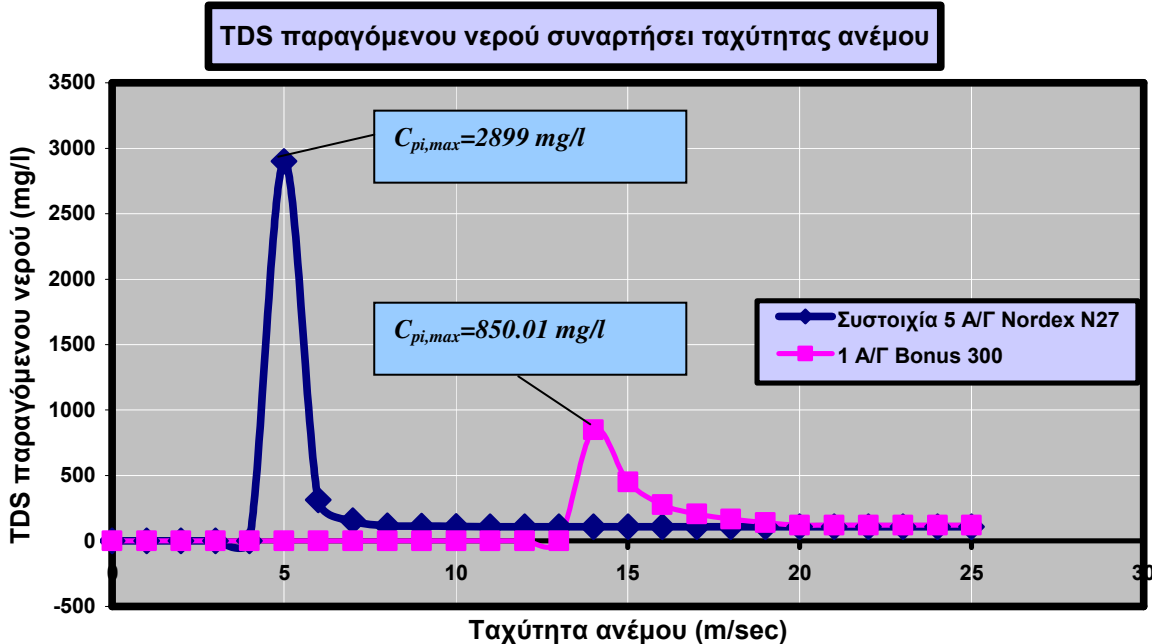
Στο σχήμα 4.24 η παροχή του προϊόντος ύδατος Q_{pi} (κάθε μεμβράνης) μεταβάλλεται γραμμικά για ταχύτητες ανέμου 5m/sec-8m/sec λαμβάνοντας τιμές 0.03-0.96 m³/h ενώ για ταχύτητες ανέμου 11m/sec-25m/sec παραμένει πρακτικά σταθερή και ίση με 0.99 m³/h. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί πως για ταχύτητες ανέμου 11m/sec-25m/sec η πίεση και η παροχή του νερού τροφοδοσίας υπερβαίνουν τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές λειτουργίας της μεμβράνης. Για το λόγο αυτό, όπως και στην περίπτωση που περιγράφεται στην παράγραφο 4.2.2.2, με την εισαγωγή στο υδραυλικό κύκλωμα μίας βαλβίδας ελέγχου ροής και μίας βαλβίδας ρύθμισης πίεσης ρυθμίζεται η ροή με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπεται η υπέρβαση των ανώτατων ορίων λειτουργίας της μεμβράνης. Η κατακόρυφη διαφορά dQ_{pi} που παρατηρείται μεταξύ των δύο καμπυλών προσδίδει μεγάλη απόκλιση στη συνολικά παραγόμενη ποσότητα μεταξύ των δύο συστημάτων αφαλάτωσης.

Στο σχήμα 4.25 η περιεκτικότητα του παραγόμενου νερού σε Ολικά Διαλυμένα Στερεά (TDS) C_{pi} κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης που αντιστοιχεί σε $U_{ανέμου}=5m/sec$ είναι αρκετά υψηλή και ανέρχεται σε 2899 mg/l ενώ με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μειώνεται δραστικά και σταθεροποιείται στην τιμή 107mg/l για $11m/sec \leq U_{ανέμου} \leq 25m/sec$. Η σταθεροποίηση που παρατηρείται και στην περίπτωση της περιεκτικότητας οφείλεται στις βαλβίδες ελέγχου ροής και ρύθμισης πίεσης ο ρόλος των οποίων επεξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η υψηλή τιμή που παρουσιάζει το τοπικό μέγιστο της καμπύλης του συστήματος των 5 Α/Γ ($C_{pi,max}=2899$ mg/l) δεν επηρεάζει την τελική ποσότητα του παραγόμενου νερού. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος της 1 Α/Γ όπου η χαμηλότερη τιμή του τοπικού μεγίστου ($C_{pi,max}=850.01$ mg/l) επηρεάζει την τελική ποιότητα του παραγόμενου νερού. Το χαρακτηριστικό της σταθεροποίησης για ταχύτητες ανέμου $11m/sec \leq U_{ανέμου} \leq 25m/sec$ παρατηρείται σε όλα τα

υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη (πίεση υποπροϊόντος, καταναλισκόμενη ισχύς, ειδική καταναλισκόμενη ισχύς και συντελεστής ανάκτησης).



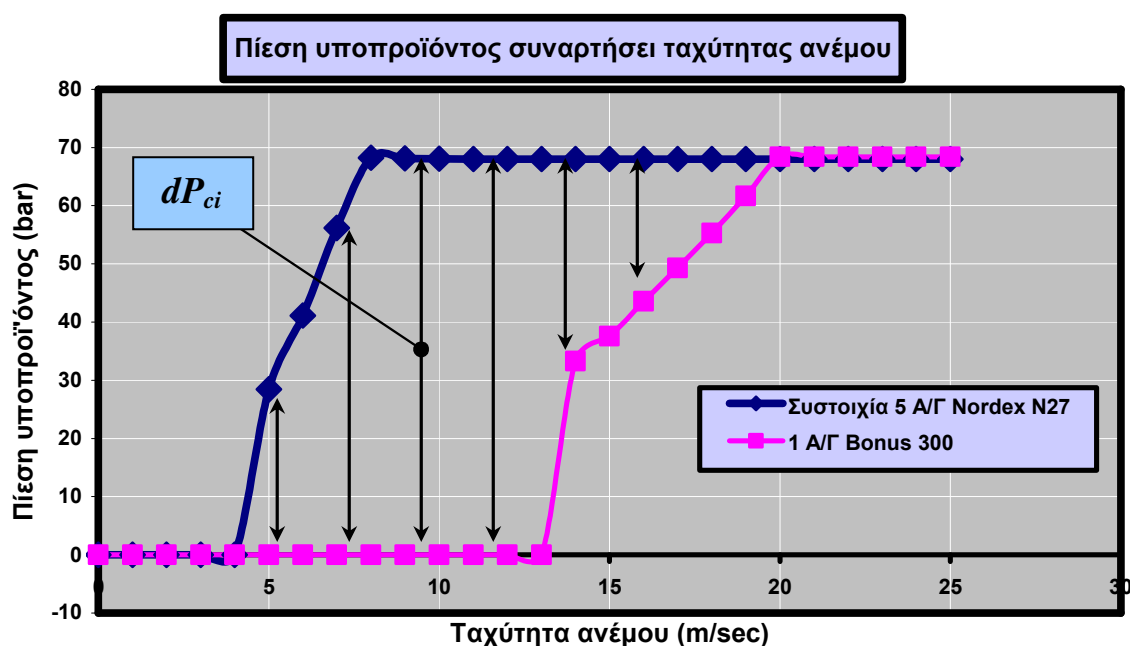
Σχήμα 4.24: Καμπύλη παροχής παραγόμενου νερού-ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 4.25: Καμπύλη TDS παραγόμενου νερού-ταχύτητας ανέμου

Στο σχήμα 4.26 η πίεση εξόδου P_{ci} του υποπροϊόντος αποτελεί γνησίως αύξουσα συνάρτηση ως προς την ταχύτητα του ανέμου και λαμβάνει τιμή 28.44 bar για $U_{\text{ανέμου}}=5\text{m/sec}$ ενώ για $11\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$ σταθεροποιείται στην τιμή 68.01 bar. Η διαφορά dP_{ci} που

παρουσιάζεται σε ταχύτητες ανέμου 5m/sec-10 m/sec συνεισφέρει στην αύξηση του παραγόμενου νερού και στη μείωση της περιεκτικότητάς του σε TDS διότι αυξανόμενη πίεση υποπροϊόντος συνεπάγεται και αυξανόμενη πίεση του νερού τροφοδοσίας. Η αύξηση στην πίεση τροφοδοσίας σύμφωνα με το σχήμα 4.6 προκαλεί αύξηση στην παροχή του καθαρού νερού καθώς και αύξηση του συντελεστή απόρριψης.



Σχήμα 4.26: Καμπύλη πίεσης εξόδου υποπροϊόντος-ταχύτητας ανέμου

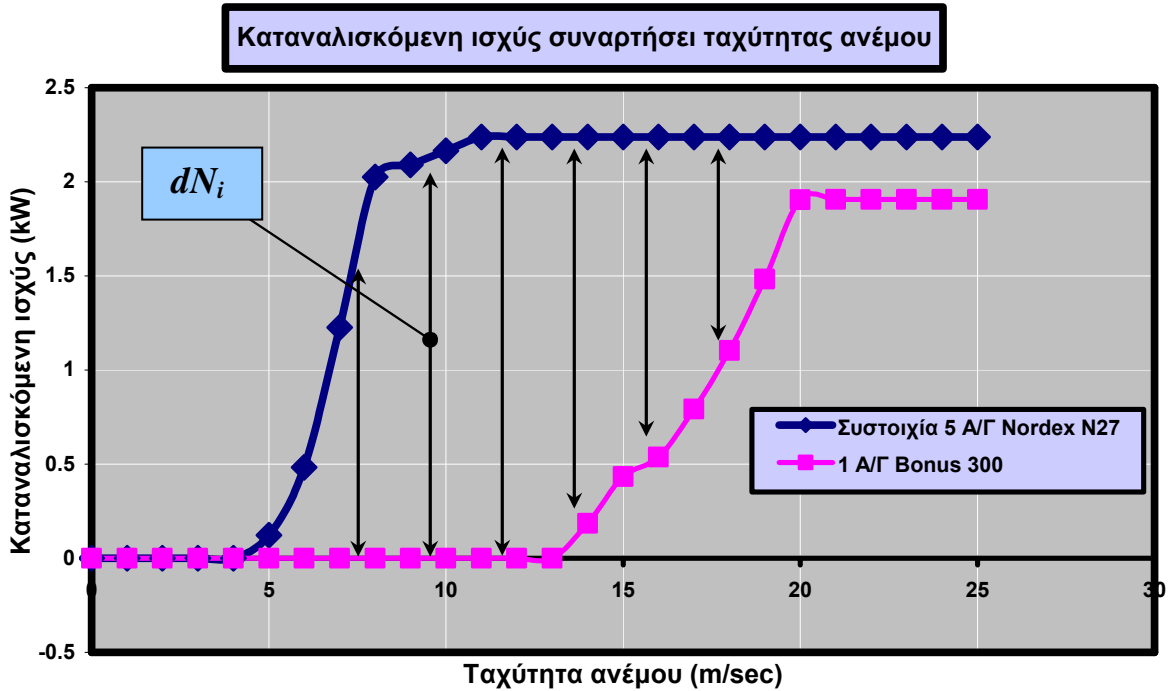
Η ισχύς που καταναλώνεται από την κάθε μεμβράνη φαίνεται στο σχήμα 4.27 σύμφωνα με το οποίο κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης η καταναλισκόμενη ισχύς ανέρχεται σε 0.12 kW και αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου σταθεροποιείται στην τιμή 2.23 kW. Η κατακόρυφη διαφορά dN_i που παρατηρείται μεταξύ των δύο καμπυλών είναι αναμενόμενη λαμβάνοντας υπόψη ότι η πίεση του νερού τροφοδοσίας καθώς και η παροχή του παραγόμενου νερού στην περίπτωση των 5 Α/Γ είναι ιδιαίτερα αυξημένες για χαμηλές ταχύτητες ανέμου 5m/sec-10m/sec.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σχήμα 4.28 σύμφωνα με το οποίο για $U_{\text{ανέμου}}=5\text{m/sec}$ παρουσιάζει τοπικό μέγιστο, για $U_{\text{ανέμου}}=6\text{m/sec}$ παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο

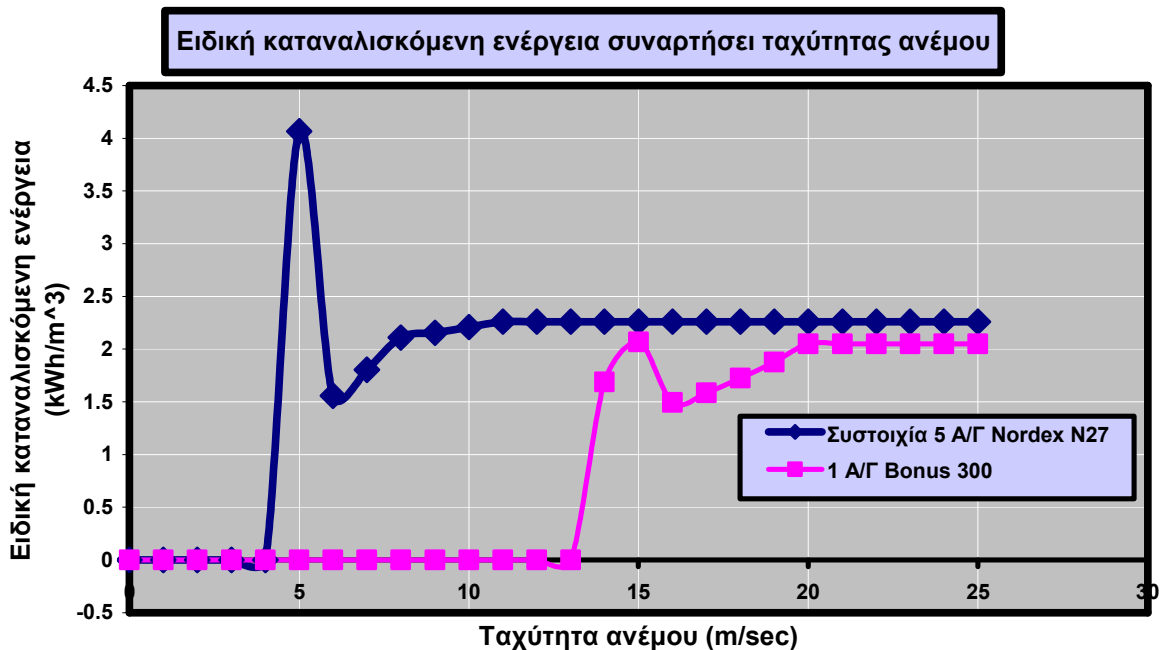
$$\frac{N_i}{Q_{pi}} = 1.56 \text{ kWh/m}^3 \text{ ενώ σταθεροποιείται στην τιμή } 2.26 \text{ kWh/m}^3 \text{ για}$$

$11\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια στην περίπτωση του συστήματος των 5 Α/Γ παρουσιάζει εύρος τιμών (1.56kWh/m^3 -

2.26kWh/m³) που προσεγγίζουν αυτό που αντιστοιχεί στο σύστημα της 1 Α/Γ (1.49 kWh/m³-2.05 kWh/m³).



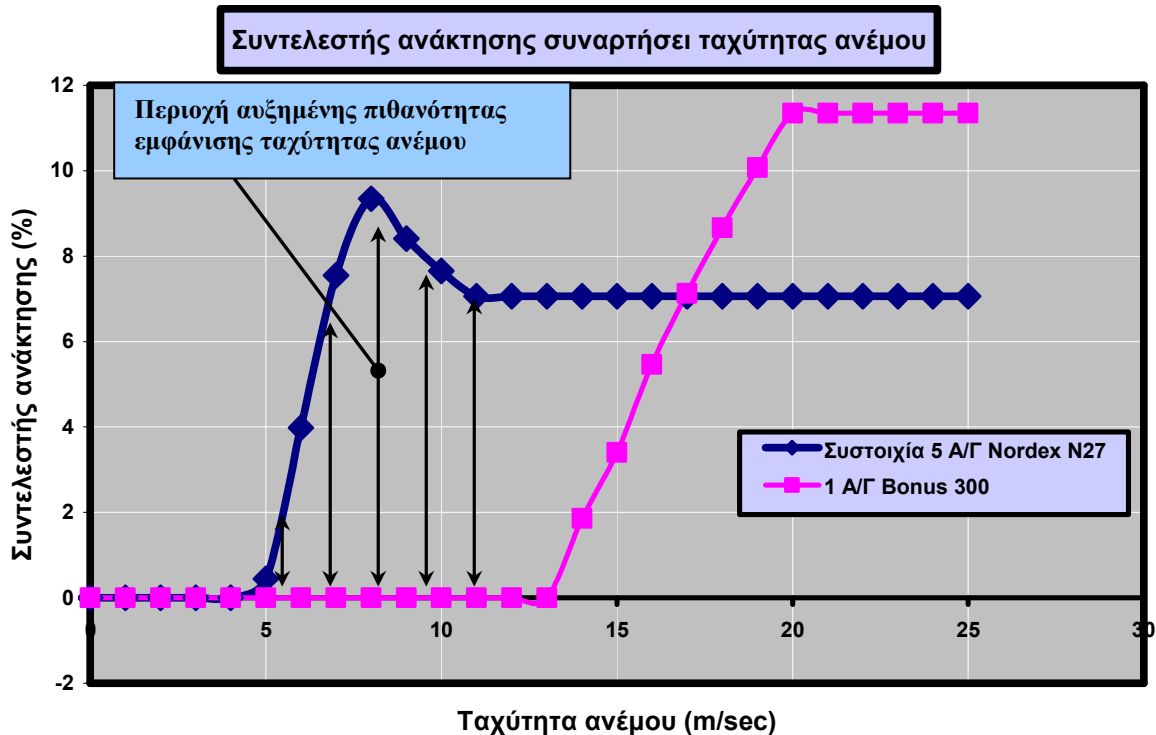
Σχήμα 4.27: Καμπύλη καταναλισκόμενης ισχύος-ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 4.28: Καμπύλη ειδικής καταναλισκόμενης ενέργειας-ταχύτητας ανέμου

Στο σχήμα 4.29 ο συντελεστής ανάκτησης αυξάνεται με την ταχύτητα του ανέμου και παρουσιάζει τοπικό μέγιστο $RR_{max}=9.34\%$. Κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης

($U_{\text{ανέμου}}=5\text{m/sec}$) ο συντελεστής ανάκτησης λαμβάνει την τιμή 0.45 % ενώ για $11\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$ σταθεροποιείται στην τιμή 7.06 %. Παρόλο που ο συντελεστής ανάκτησης του συστήματος της 1 Α/Γ παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν στο σύστημα των 5 Α/Γ εντούτοις αυτές εντοπίζονται σε ταχύτητες ανέμου $20\text{m/sec} \leq U_{\text{ανέμου}} \leq 25\text{m/sec}$ που παρουσιάζουν περιορισμένη πιθανότητα εμφάνισης. Με τον τρόπο αυτό δεν αξιοποιείται η περιοχή 5m/sec-10m/sec σε αντίθεση με ο,τι συμβαίνει με το σύστημα των 5 Α/Γ .



Σχήμα 4.29: Καμπύλη συντελεστή ανάκτησης-ταχύτητας ανέμου

Έτσι λοιπόν τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρατίθενται ακολούθως:

$$\bar{Q}_{pi} = 0.42 \text{ m}^3 / \text{h} \Rightarrow \bar{Q}_p = 15 \cdot \bar{Q}_{pi} = 6.3 \text{ m}^3 / \text{h} \text{ ή } 151.2 \text{ m}^3 / \text{d}$$

$$\bar{C}_{pi} = 160.07 \text{ mg/l}$$

$$\bar{N}_{pi} = 0.876 \text{ kW} \Rightarrow \bar{N}_p = 15 \cdot \bar{N}_{pi} = 13.14 \text{ kW}$$

$$\left(\frac{\bar{N}_p}{\bar{Q}_p} \right) = 2.08 \text{ kWh/m}^3$$

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω αποτελέσματα η δεύτερη επιλογή Α/Γ-αντλίας παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά συγκρινόμενη με την πρώτη επιλογή. Όμως η παραγωγή του νερού δεν είναι αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες του πληθυσμού σε περιόδους αιχμής.

Σύμφωνα με την παραδοχή που έγινε σε προηγούμενη παράγραφο σχετικά με την εποχικότητα της ζήτησης αλλά και της ζήτησης σε περίοδο αιχμής που είναι το καλοκαίρι η μικρή παροχή του παραγόμενου νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης θα μπορούσε να υπερβληθεί. Η παραδοχή που γίνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι τους μήνες εκτός περιόδου Ιουνίου-Αυγούστου ο πληθυσμός της Νισύρου επανέρχεται στα επίπεδα του μόνιμου πληθυσμού. Οι συνολικές ανάγκες του πληθυσμού σε νερό κατά τη διάρκεια του έτους θα είναι:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ετήσια ζήτηση}} &= Q_{\text{Σεπτέμβριος-Μάιος}} + Q_{\text{Ιούνιος-Αύγουστος}} = \\ 331.8m^3/d \cdot 90d + 948(\text{μόνιμοι κάτοικοι}) \cdot 0.15 m^3/\text{μόνιμο κάτοικο}/d \cdot 275d &\Rightarrow \\ Q_{\text{ετήσια ζήτηση}} &= 68967m^3/\text{έτος} \end{aligned}$$

Επιπλέον, θεωρώντας ότι η μονάδα αφαλάτωσης θα λειτουργεί συνέχεια, η παροχή του παραγόμενου νερού που προκύπτει από αυτή θα είναι:

$$Q_{\text{πόσιμου νερού}} = 151.2m^3/d \times 365d = 55188m^3/\text{έτος}$$

Πρωταρχικά θα μπορούσε να ακολουθηθεί μία πολιτική εξοικονόμησης νερού με βάση την οποία η ποσότητα του νερού (σε m^3/d) που αντιστοιχεί σε ένα κάτοικο (μόνιμο ή παραθεριστή) θα μειωθεί κατά $x\%$ ποσοστό επί του ορίου που ορίστηκε στην παράγραφο 1.2. Το ποσοστό αυτό μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{\text{ετήσια ζήτηση}} \cdot \left(1 - \frac{x}{100}\right) = Q_{\text{πόσιμου νερού}} \Rightarrow x = 20\%$$

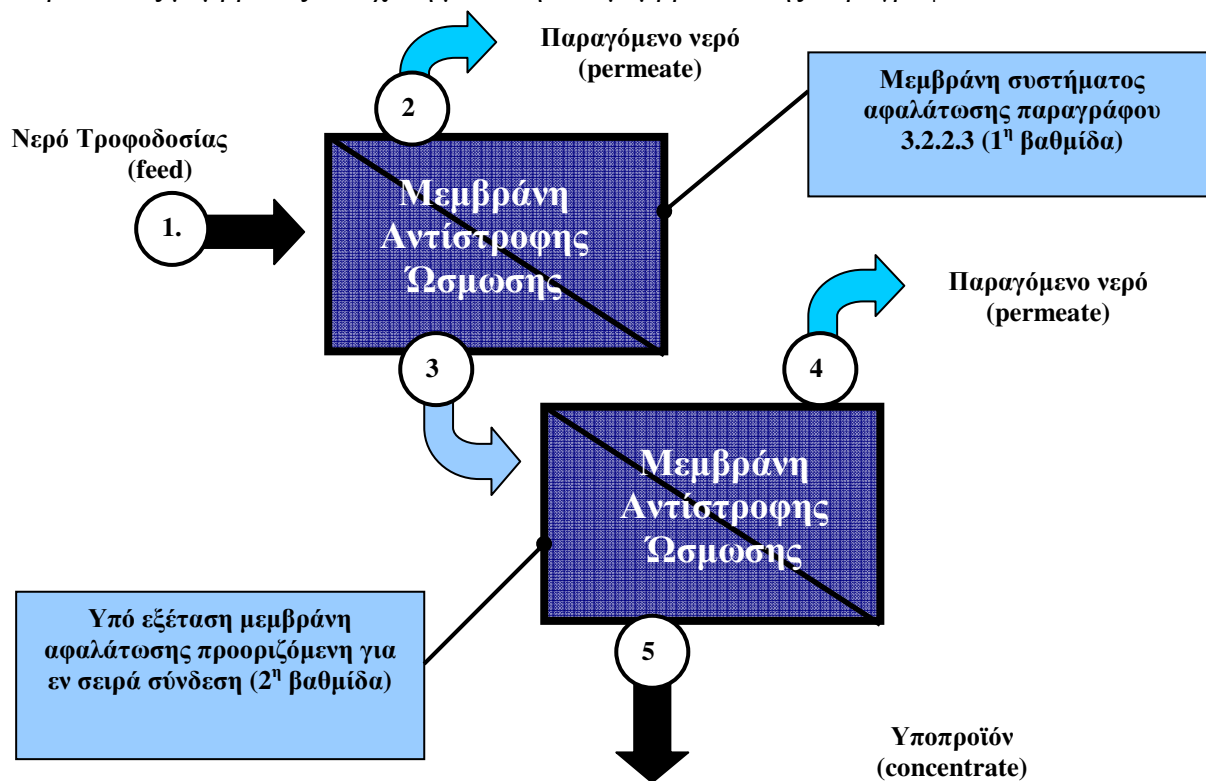
Η τιμή αυτή του ποσοστού που υπολογίστηκε είναι σχετικά μικρή και μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλα μέτρα.

Επίσης η ποσότητα που θα καταναλώνεται εκτός περιόδου αιχμής (ήτοι Σεπτέμβριος-Μάιος) θα είναι μικρότερη από αυτήν που παράγεται από τη μονάδα αφαλάτωσης. Η ποσότητα αυτή η οποία είναι $\Delta Q = 275d \cdot [151.2m^3/d - 0.15m^3/d \cdot (1 - 0.2) \cdot 948\text{κάτοικοι}] \Rightarrow \Delta Q = 10296m^3/\text{έτος}$ θα μπορούσε να αποτίθεται σε κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές διατηρώντας με τον τρόπο αυτό αποθέματα ασφαλείας για περιόδους αυξημένης ζήτησης.

Εναλλακτικά, η ποσότητα του καθαρού νερού που δεν μπορεί να καλυφθεί από τη μονάδα αφαλάτωσης της παραγράφου 4.2.2.3 θα ήταν δυνατό να παραχθεί συνδέοντας επιπρόσθετα και **εν σειρά** μεμβράνες αφαλάτωσης. Το ενδεχόμενο της εν λόγω σύνδεσης καθώς και η απόδοση του νέου συστήματος θα εξεταστεί στην παράγραφο που ακολουθεί.

4.2.2.4 Εν σειρά Σύνδεση Επιπρόσθετων Στοιχείων Αφαλάτωσης

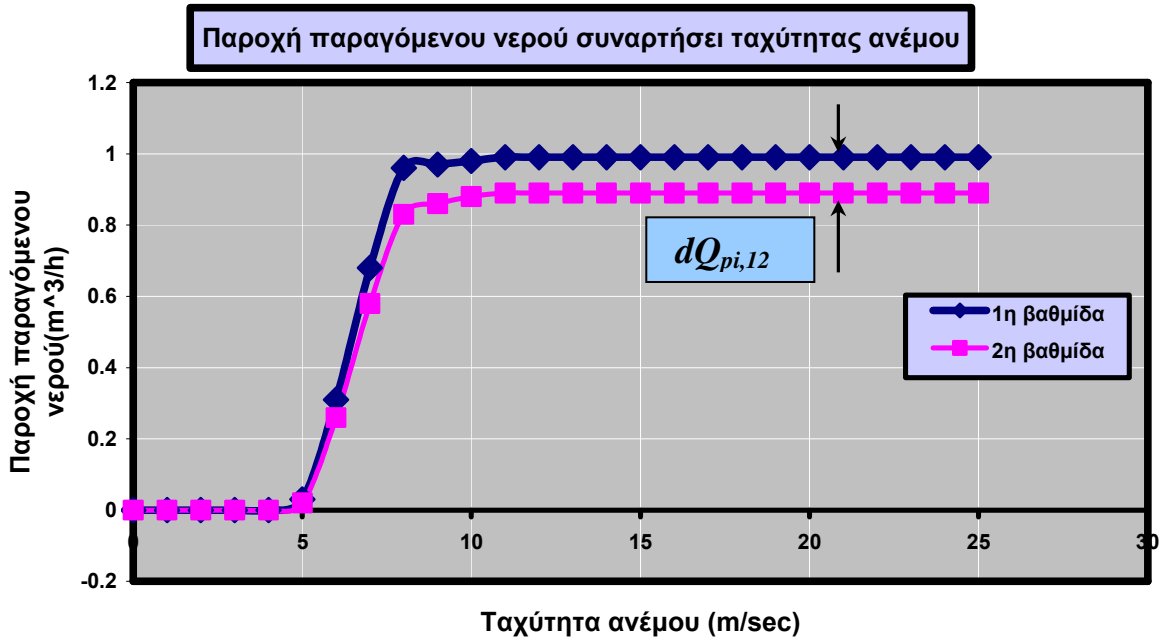
Στην παρούσα παράγραφο θα μελετηθεί η απόδοση των στοιχείων μεμβράνης που θα τοποθετηθούν σε σειρά με τις μεμβράνες του συστήματος αφαλάτωσης της παραγράφου 4.2.2.4. Ο τρόπος σύνδεσης των στοιχείων αυτών φαίνεται στο σχήμα 4.30. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αποδοχή και υλοποίηση της συγκεκριμένης επιλογής θα πρέπει να αποτελέσει η όσο το δυνατόν μικρή απόκλιση στην απόδοση που θα παρουσιάζουν οι επιπρόσθετες μεμβράνες σε σχέση με αυτή των μεμβρανών της παραγράφου 4.2.2.3.



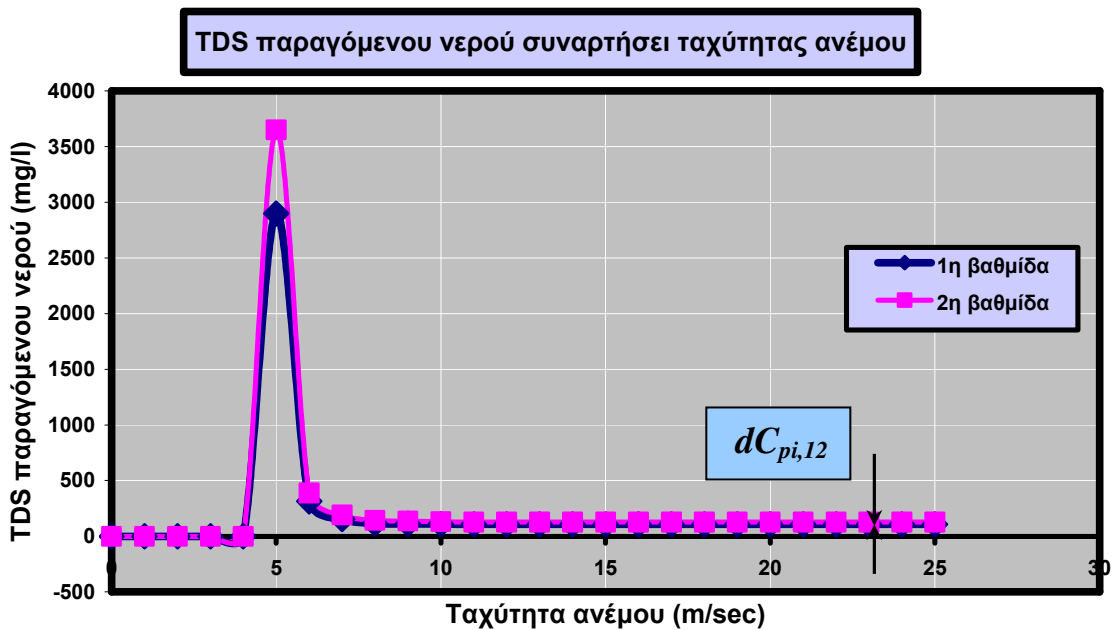
Σχήμα 4.30: Σύνδεση εν σειρά 2 στοιχείων μεμβράνης

Στα σχήματα που ακολουθούν παρατίθενται οι καμπύλες με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των στοιχείων μεμβράνης που θα τοποθετηθούν σε σειρά. Σε αυτά παρατίθενται και οι αντίστοιχες καμπύλες με τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μεμβρανών της παραγράφου 4.2.2.3 προκειμένου να καταστεί εποπτική η σύγκρισή τους. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στις καμπύλες αυτές είναι αμελητέες υποδεικνύοντας ότι η επιλογή των εν σειρά μεμβρανών δύναται να υιοθετηθεί.

Συγκεκριμένα, η διαφορά που παρατηρείται στην παροχή του παραγόμενου νερού είναι $dQ_{pi,12}=Q_{pi,1}-Q_{pi,2}=0.1m^3/h$ (σχήμα 4.31) ενώ η περιεκτικότητα σε TDS παρουσιάζει διαφορά $dC_{pi,12}=C_{pi,1}-C_{pi,2}=-20.15mg/l$. Οι δείκτες 1 και 2 αντιστοιχούν στην 1^η και 2^η βαθμίδα αντίστοιχα.

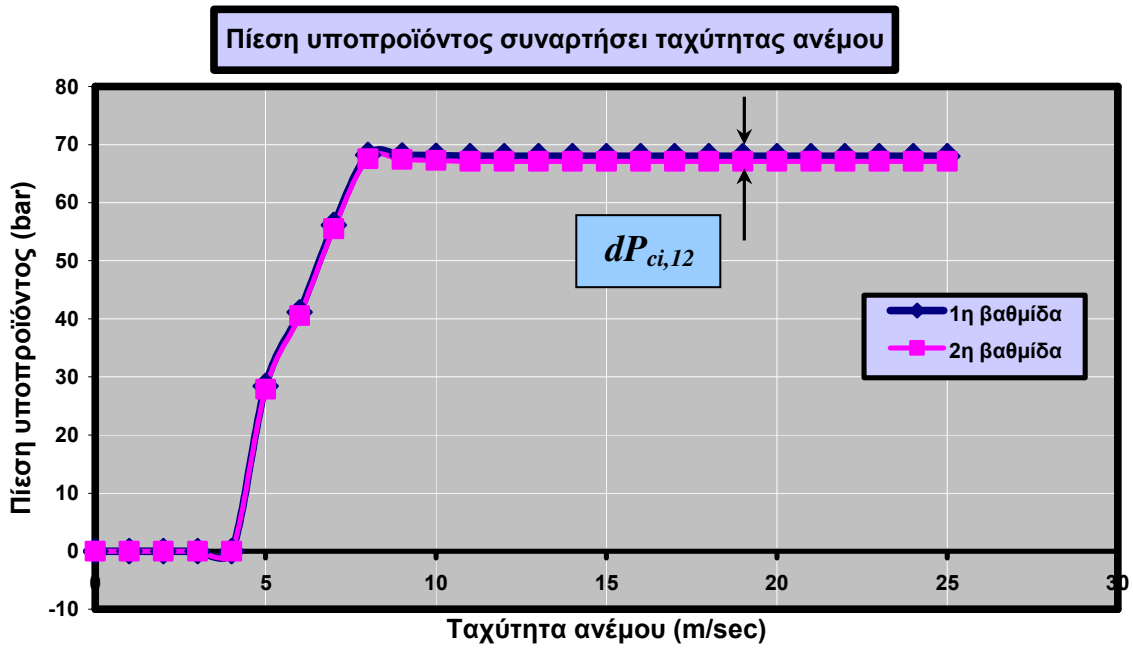


Σχήμα 4.31: Καμπύλη παροχής παραγόμενου νερού-ταχύτητας ανέμου

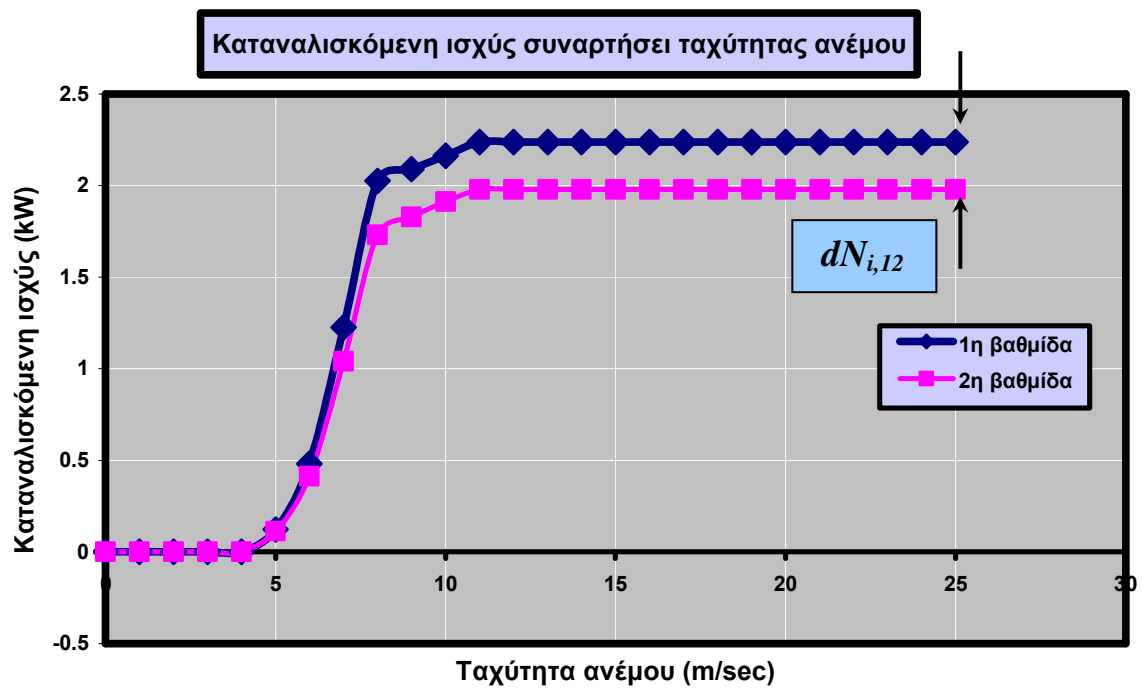


Σχήμα 4.32: Καμπύλη TDS παραγόμενου νερού-ταχύτητας ανέμου

Επιπρόσθετα η πίεση υποπροϊόντος και η καταναλισκόμενη ισχύς παρουσιάζουν απόκλιση $dP_{ci,12}=0.88bar$ (σχήμα 4.33) και $dN_{i,12}=0.25kW$ (σχήμα 4.34).

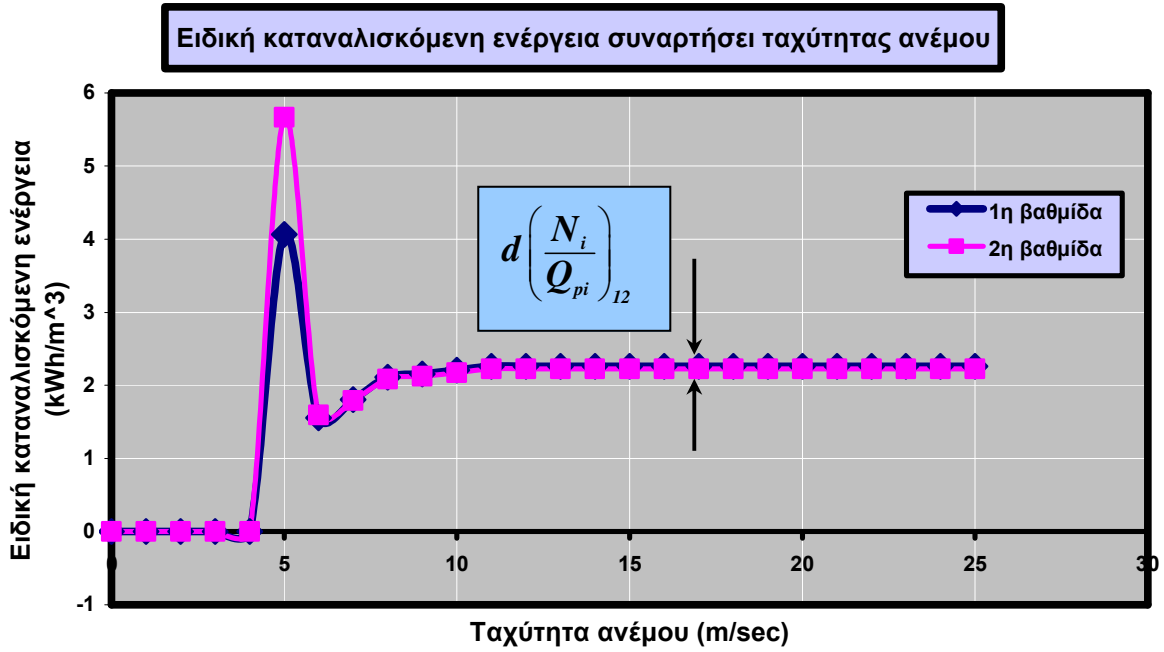


Σχήμα 4.33: Καμπύλη πίεσης εξόδου υποπροϊόντος-ταχύτητας ανέμου

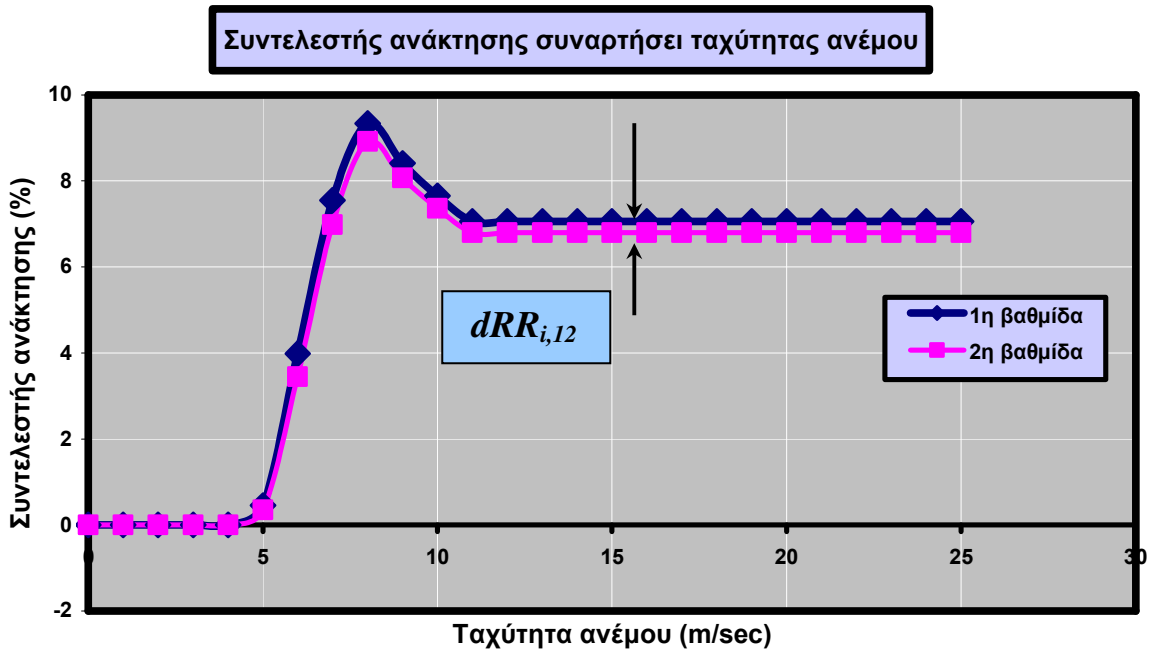


Σχήμα 4.34: Καμπύλη καταναλισκόμενης ισχύος-ταχύτητας ανέμου

Η ειδική καταναλισκόμενη ενέργεια παρουσιάζει διαφορά $d\left(\frac{N_i}{Q_{pi}}\right)_{12} = 0.04 \text{ kWh/m}^3$ (σχήμα 4.35) ενώ ο συντελεστής ανάκτησης $dRR_{i,12} = 0.26\%$ (σχήμα 4.36).



Σχήμα 4.35: Καμπύλη ειδικής καταναλισκόμενης ενέργειας-ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 4.36: Καμπύλη συντελεστή ανάκτησης-ταχύτητας ανέμου

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών παρατίθενται ακόλουθα:

$$\bar{Q}_{pi} = 0.37m^3/h \text{ ή } 8.88m^3/d \text{ ή } 3241m^3/ \text{έτος}$$

$$\bar{C}_{pi} = 188.55mg/l$$

$$\bar{N}_{pi} = 0.762kW$$

$$\left(\frac{\bar{N}_{pi}}{\bar{Q}_{pi}} \right) = 2.07kWh/m^3$$

Με βάση τα υπολογισθέντα στοιχεία είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ο αριθμός των μεμβρανών που θα συνδεθούν εν σειρά με την 1^η βαθμίδα του συστήματος αφαλάτωσης. Η ποσότητα καθαρού νερού που επιθυμείται να καλυφθεί είναι $Q_{ετήσια ζήτηση} - Q_{πόσιμον νερού} = 68967m^3 / έτος - 55188m^3 / έτος = 13779m^3 / έτος$. Επομένως ο αριθμός των στοιχείων που θα τοποθετηθούν εν σειρά είναι :

$$n = \frac{Q_{ετήσια ζήτηση} - Q_{πόσιμον νερού}}{\bar{Q}_{pi}} = \frac{13779}{3241} = 4.25 \Rightarrow n = 5μεμβράνες .$$

Η τελικά διαμορφωμένη εγκατάσταση αφαλάτωσης θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

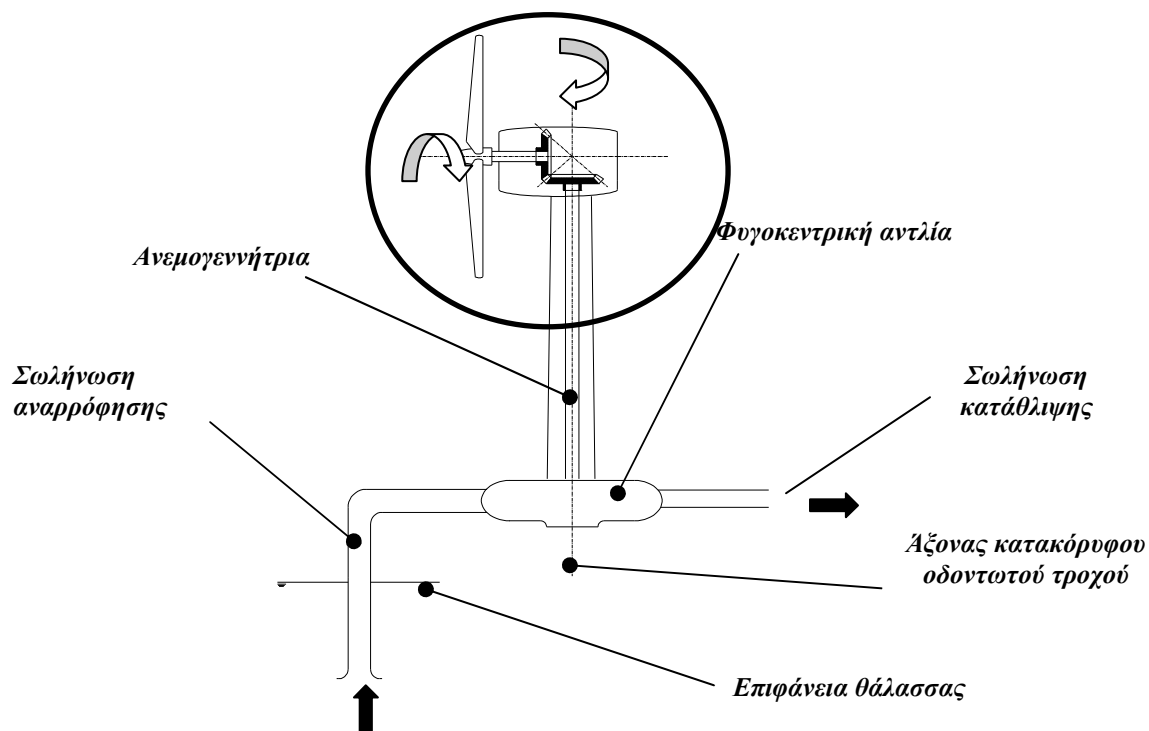
$$\bar{Q}_p = 15 \cdot \bar{Q}_{pi,1} + 5 \cdot \bar{Q}_{pi,2} = 8.15m^3 / h \text{ ή } 195.6m^3 / d$$

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\bar{C}_{pi,1} \cdot \bar{Q}_{p,1} + \bar{C}_{pi,2} \cdot \bar{Q}_{p,2}}{\bar{Q}_{p,1} + \bar{Q}_{p,2}} = 166.53mg / l$$

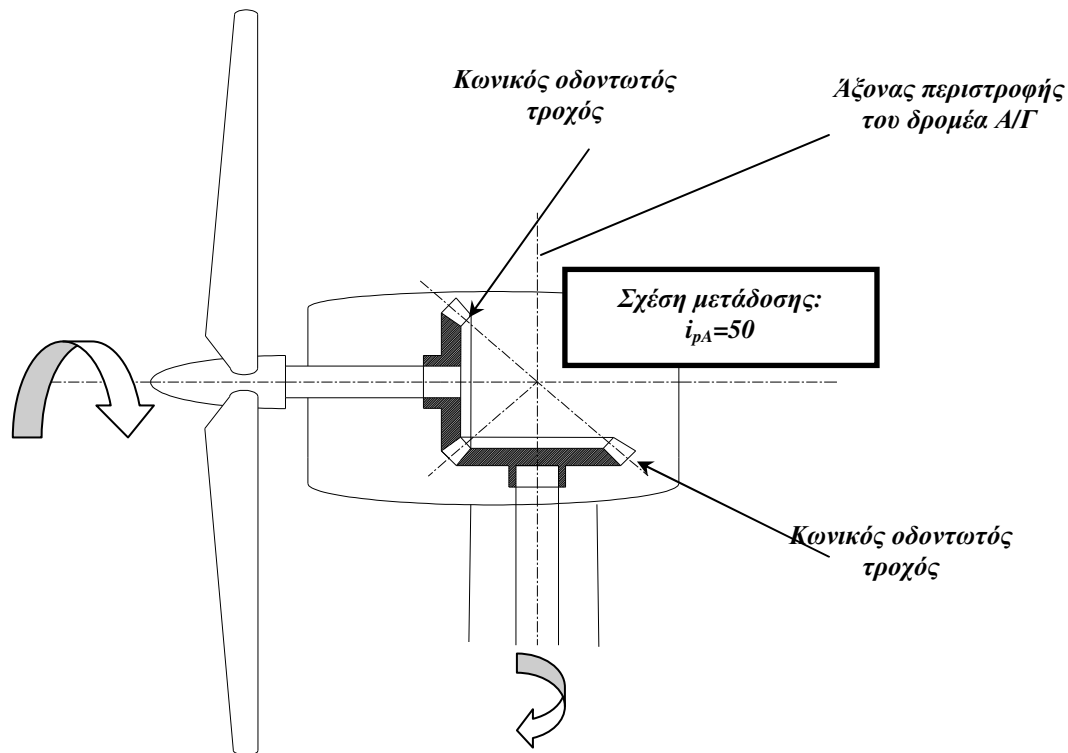
$$\bar{N}_p = 15 \cdot \bar{N}_{pi,1} + 5 \cdot \bar{N}_{pi,2} = 16.95kW$$

$$\left(\frac{\bar{N}_p}{\bar{Q}_p} \right) = 2.08kWh/m^3$$

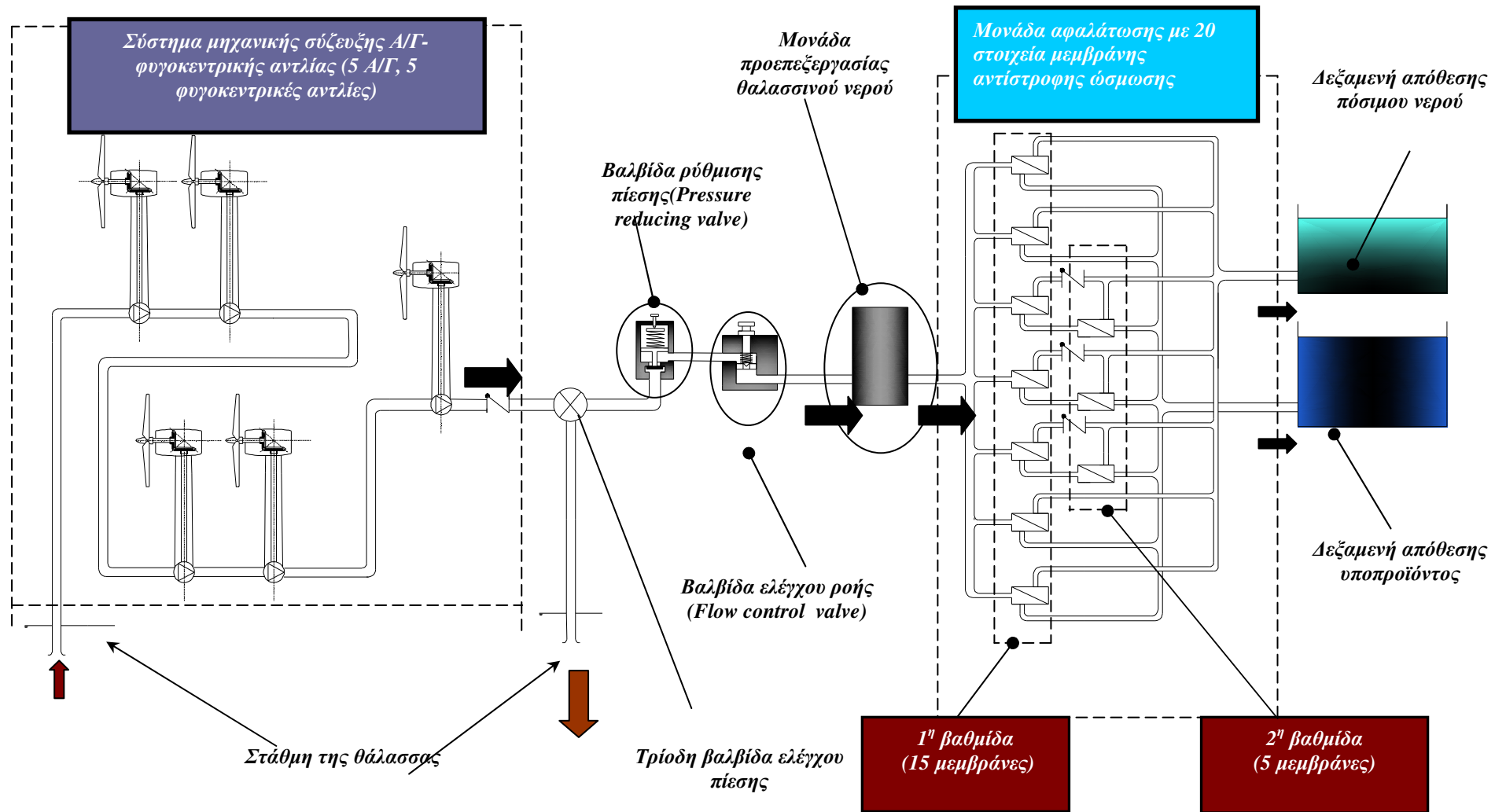
Στα σχήματα 4.37 και 4.38 παρατίθεται μία απεικόνιση της σύζευξης Α/Γ-φυγοκεντρικής αντλίας. Όπως φαίνεται σε αυτά, δεδομένου ότι απαιτείται μετάδοση κίνησης και μεταφορά ισχύος μεταξύ τεμνομένων ατράκτων, θα χρησιμοποιηθεί ζεύγος οδοντωτών τροχών με σχέση μετάδοσης $i_{pA}=50$. Επιπλέον ο άξονας του κατακόρυφου οδοντωτού τροχού είναι και άξονας περιστροφής του δρομέα προκειμένου να εξασφαλίζεται βέλτιστη αξιοποίηση της μεταβαλλόμενης σε διεύθυνση ταχύτητας του ανέμου. Στο σχήμα 4.39 παρατίθεται η απεικόνιση της εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης. Σε αυτό φαίνονται ορισμένες επιπρόσθετες συνιστώσες οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του συστήματος. Οι συνιστώσες αυτές καθώς και η λειτουργία που η καθεμία επιτελεί θα αναλυθούν στην παράγραφο που ακολουθεί.



Σχήμα 4.37: Σχηματική παράσταση σύζευξης ανεμογεννήτριας-φυγοκεντρικής αντλίας



Σχήμα 4.38: Μεγέθυνση μέρους του κιβωτίου ταχυτήτων της Α/Γ

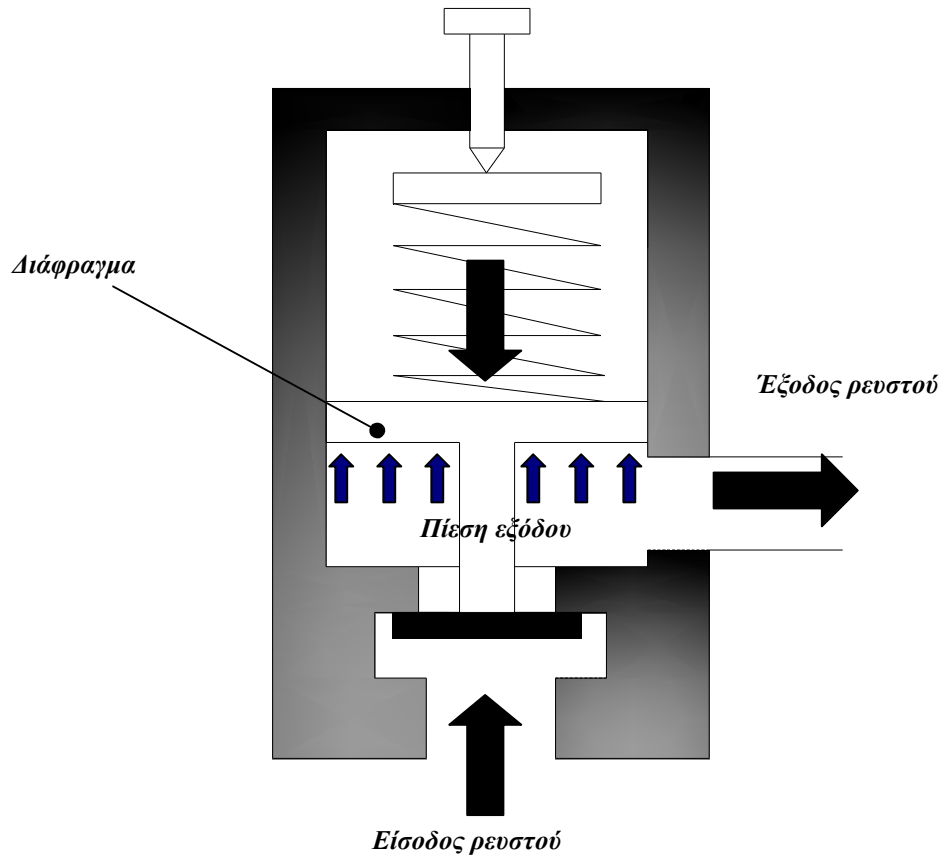


Σχήμα 4.39: Ολοκληρωμένη εγκατάσταση αφαλάτωσης

4.2.3 Επιμέρους Συνιστώσες της Εγκατάστασης Αφαλάτωσης

4.2.3.1 Βαλβίδα Ρύθμισης Πίεσης

Η βαλβίδα ρύθμισης πίεσης απεικονίζεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 4.40.



Σχήμα 4.40: Βαλβίδα ρύθμισης πίεσης

Οι βαλβίδες ρύθμισης πίεσης χρησιμοποιούνται σε θέσεις των κυκλωμάτων όπου επιθυμείται συγκεκριμένη τιμή πίεσης – (μικρότερη από κάποιο καθοριζόμενο όριο). Η αρχή λειτουργίας του ρυθμιστή επεξηγείται στη συνέχεια.

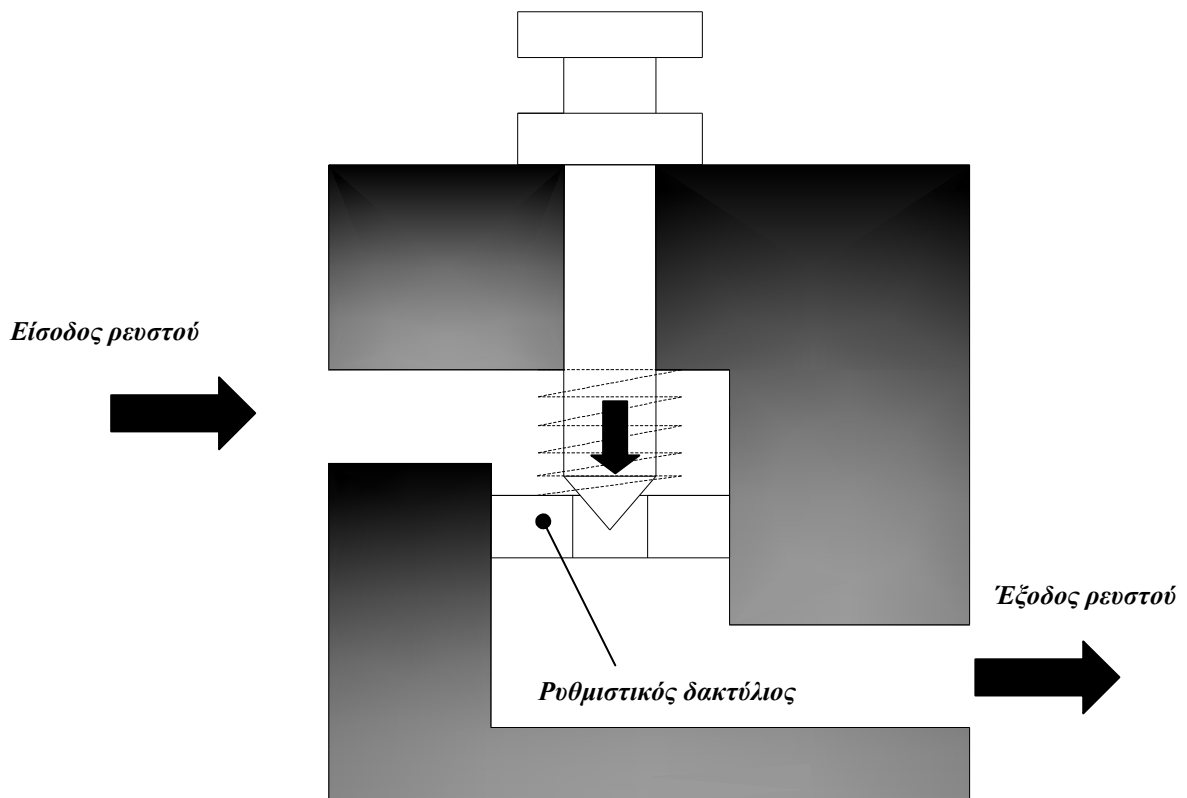
Το ελατήριο πιέζει το διάφραγμα που με τη σειρά του ανοίγει την παροχή του ρευστού προς την έξοδο. Από την άλλη μεριά του το διάφραγμα δέχεται την πίεση εξόδου του ρευστού. Όταν η τελευταία περάσει κάποιο όριο, η δύναμη γίνεται μεγαλύτερη αυτής του ελατηρίου οπότε το διάφραγμα κινείται προς τα άνω και διακόπτει την παροχή οπότε η πίεση στην έξοδο δεν αυξάνει άλλο. Με τη βοήθεια του κοχλία ρυθμίζεται η τάνυση του ελατηρίου και συνεπώς η πίεση εξόδου. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι ρυθμιστικές βαλβίδες ρυθμίζουν και

κατά την αντίστροφη φορά : Αν δηλαδή αυξηθεί για κάποιο λόγο η πίεση από την μεριά της εξόδου, τότε με κατάλληλη ανακούφιση την επαναφέρεται στα επίπεδα ρύθμισης.

Από την ανάλυση απόδοσης του κάθε στοιχείου της μεμβράνης προέκυψε ότι η μέγιστη πίεση λειτουργίας του είναι $P_{max}=69bar$ και για το λόγο αυτό θα πρέπει η εν λόγω βαλβίδα να ρυθμιστεί στο συγκεκριμένο όριο.

4.2.3.2 Βαλβίδα ελέγχου ροής

Η βαλβίδα ελέγχου ροής απεικονίζεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 4.41.



Σχήμα 4.41: Βαλβίδα ελέγχου ροής

Κατά την διεύθυνση των βελών, η ροή αναγκάζεται να περάσει μέσα από τη ρυθμιζόμενη στένωση, με αποτέλεσμα να πετυχαίνεται ρύθμιση της παροχής. Σε περίπτωση που η ροή έχει αντίθετη κατεύθυνση, τότε δεν λαμβάνει χώρα στραγγαλισμός της ροής αφού ο ρυθμιστικός δακτύλιος - που συγκρατείται στη θέση ρύθμισης με μαλακό ελατήριο - ανέρχεται και η ροή διέρχεται ανεμπόδιστα. Αντίστοιχα με όσα προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.2.3.1, η μέγιστη παροχή (νερού τροφοδοσίας) λειτουργίας του κάθε στοιχείου μεμβράνης είναι

$Q_{max}=8.38m^3/h$ και για το λόγο αυτό θα πρέπει η εν λόγω βαλβίδα να ρυθμιστεί στο συγκεκριμένο όριο.

4.2.3.3 Μονάδα Προεπεξεργασίας Θαλασσινού Νερού

Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση αλλά και η διάρκεια ζωής του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης απαιτείται προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προεπεξεργασίας βελτιώνει την απόδοση της μεμβράνης με τον περιορισμό των παρακάτω φαινομένων:

- ☉ Fouling
- ☉ Σχηματισμός στρωμάτων επικάλυψης (Scaling Formation)
- ☉ Αλλοίωση της μεμβράνης

Έτσι με τον τρόπο αυτό βελτιστοποιούνται:

- ☉ Η ροή του προϊόντος
- ☉ Η ποιότητα του προϊόντος
- ☉ Η ανάκτηση
- ☉ Λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης

Με τον όρο fouling εννοείται η συσσώρευση ξένων σωματιδίων από το νερό τροφοδοσίας στην ενεργή επιφάνεια της μεμβράνης σε βαθμό που επηρεάζει τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Συγκεκριμένα η κολλοειδής συσσώρευση (colloidal fouling) αναφέρεται στον εγκλωβισμό ιλύος ή σκουριάς, η βιολογική συσσώρευση (biological fouling) είναι η ανάπτυξη βιοφίλμ ενώ οργανική συσσώρευση (organic fouling) είναι η απορρόφηση ειδικών οργανικών στοιχείων όπως είναι ύλη από απσύνθεση φυτών και διαφόρων ελαίων στη μεμβράνη αντίστροφης ώσμωσης. Ο όρος scaling formation αναφέρεται στο σχηματισμό κατακρημνισμάτων και στην απόθεση εντός του συστήματος ελαφρώς διαλυτών αλάτων όπως είναι ανθρακικό ασβέστιο, θειικό βάριο, θειικό μαγνήσιο, θειικό στρόντιο και χλωριούχο μαγνήσιο.

Έτσι λοιπόν στο στάδιο της προεπεξεργασίας πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες:

- ☉ Προχλωρίωση θαλασσινού νερού για την αποφυγή ανάπτυξης μικροοργανισμών
- ☉ Συσσωμάτωση κολλοειδών σωματιδίων με την προσθήκη κατάλληλων χημικών ουσιών
- ☉ Καθαρισμός μέσω φίλτρων άμμου
- ☉ Προσθήκη οξέων (ρύθμιση οξύτητας και αποφυγή εναπόθεσης αλάτων)

4.2.3.4 Τρίοδη Βαλβίδα Ελέγχου Πίεσης

Δεδομένου ότι το νερό τροφοδοσίας έχει περιεκτικότητα σε TDS 38000 mg/l, η πίεση λόγω ώσμωσης που αναπτύσσεται στην είσοδο του κάθε στοιχείου είναι $P_{osmotic}=30.81 \text{ bar}$. Για το λόγο αυτό όταν το νερό τροφοδοσίας εισάγεται στη μεμβράνη με πίεση μικρότερη των 30.81 bar το εν λόγω στοιχείο δε δύναται να λειτουργήσει. Έτσι λοιπόν με τη βοήθεια της τρίοδης βαλβίδας το νερό τροφοδοσίας αποτίθεται και πάλι στη θάλασσα προκειμένου να μη λειτουργήσει η μονάδα αφαλάτωσης και να προστατευθεί.

4.2.3.5 Τελικό Στάδιο Επεξεργασίας

Το στάδιο της μετεπεξεργασίας είναι αρκετά σημαντικό διότι σε αυτό λαμβάνει χώρα σταθεροποίηση του παραγόμενου νερού και προετοιμασία του για τη διανομή του ως πόσιμου νερού.

Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στο στάδιο αυτό είναι οι εξής:

- ☉ Απομάκρυνση αερίων όπως είναι τα σουλφίδια του υδρογόνου
- ☉ Ρύθμιση της οξύτητας (pH) και σκληρότητας

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μία προσεγγιστική ανάλυση εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης και μελετήθηκε για τις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο νησί της Νισύρου. Το τελικό αποτέλεσμα της εν λόγω μελέτης ανέδειξε την ανάγκη εγκατάστασης Α/Γ μικρής ονομαστικής ισχύος οι οποίες αξιοποιούν τις χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου ($U_{ανέμου}<10\text{m/sec}$) σύμφωνα και με τα τοπικά ανεμολογικά στατιστικά δεδομένα (κατανομή Weibull). Επιπλέον οι επιλεγόμενες αντλίες θα πρέπει να λειτουργούν σε ταχύτητες περιστροφής της τάξεως των **2000rpm** προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ενέργεια που παρέχεται στη μονάδα αφαλάτωσης. Προτάθηκε τρόπος αντιμετώπισης ενδεχόμενης λειψυδρίας σε περιόδους αιχμής όπως είναι η θερινή περίοδος. Στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει θα πραγματοποιηθεί οικονομική αξιολόγηση της εν λόγω εγκατάστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στο 5^ο κεφάλαιο θα μελετηθεί και θα αναλυθεί με οικονομικά κριτήρια η μονάδα αφαλάτωσης στοιχεία της οποίας προσδιορίστηκαν στο 4^ο κεφάλαιο. Επιπρόσθετα, θα παρατεθούν και θα περιγραφούν συνοπτικά τα κόστη που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις σημαντικότερες συνιστώσες που συνθέτουν την εν λόγω εγκατάσταση με τη βοήθεια των οποίων θα προσδιοριστεί το συνολικό κόστος της ενδεχόμενης επένδυσης και θα αξιολογηθεί με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Την προκαταρκτική οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης θα ακολουθήσει η ανάλυση ευαισθησίας η οποία θα βασιστεί στη βασική παράμετρο της τιμής διάθεσης του νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης.

5.1 Αρχικό Κόστος Κεφαλαίου και Περιοδικά Κόστη

5.1.1 Κόστος Προκαταρκτικής Μελέτης Επιτευξιμότητας

Η περιοχή που αποτελεί υποψήφια για την υλοποίηση της εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης θα πρέπει να πιστοποιηθεί ότι πληροί τις απαιτούμενες προϋποθέσεις για το σκοπό για τον οποίο προορίζεται. Μετά τον προσδιορισμό της περιοχής στην οποία θα κατασκευαστεί η συγκεκριμένη μονάδα είναι απαραίτητο να επιθεωρηθεί ο συγκεκριμένος

χώρος με επιτόπια έρευνα από εμπειρογνώμονες προκειμένου να προσδιοριστούν τα γενικά και ειδικά χαρακτηριστικά του χώρου εγκατάστασης. Θα πρέπει να συλλεχθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια πληροφορίες οι οποίες, σε συνδυασμό με τα τοπικά ανεμολογικά στοιχεία, θα οδηγήσουν στην ανάδειξη της βέλτιστης θέσης και διάταξης των 5 Α/Γ. Απαραίτητο στοιχείο στη λήψη των αποφάσεων αποτελεί το γεγονός ότι η συστοιχία των 5 Α/Γ δεν θα πρέπει να βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τη θάλασσα δεδομένου ότι η μονάδα αφαλάτωσης πρέπει να τοποθετηθεί πλησίον της πηγής τροφοδοσίας της. Συνήθως απαιτείται μία μέρα για τη διεκπεραίωση της εργασίας αυτής από μία ομάδα έξι ατόμων λόγω του πολυσχιδούς χαρακτήρα της εγκατάστασης. Το κόστος ανά άτομο και ημέρα ανέρχεται σε 580 €/άτομο/d.

Η συλλογή και περαιτέρω επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων προϋποθέτει την εγκατάσταση ειδικών μετρητικών οργάνων που θα πρέπει να προηγούνται της επιτόπιας έρευνας τουλάχιστον κατά 1 έτος δεδομένου ότι αυτό αποτελεί και το ελάχιστο χρονικό διάστημα έτσι ώστε οι ανεμολογικές μετρήσεις να παράσχουν έγκυρα και αξιόπιστα αποτελέσματα. Μεγέθη όπως είναι η τοπική θερμοκρασία, η κατανομή της συχνότητας του ανέμου, η ένταση της τύρβης, το ενδεχόμενο δημιουργίας παγετού, η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου, η εποχική διακύμανση δύνανται να αποτελέσουν το επίκεντρο του ενδιαφέροντος των μελετητών. Εφάμιλλα όσον αφορά τη σημαντικότητά τους αποτελούν και μεγέθη όπως είναι η εποχικότητα στη ζήτηση πόσιμου νερού, η χωρική κατανομή της ζήτησης καθώς και η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό νερό). Το κόστος της συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων συμπεριλαμβανομένου και του αντίστοιχου εξοπλισμού ανέρχεται σε 95000€.

Μία επιπρόσθετη εργασία που θα πρέπει να διενεργηθεί και αποτελεί κεφαλαιώδους σημασίας είναι η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η εν λόγω μελέτη εστιάζεται στις οπτικές επιπτώσεις, στο μηχανικό και αεροδυναμικό θόρυβο που θα παραχθεί από τις Α/Γ, στις επιπτώσεις στη χρήση γης, στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, στις αντανάκλασεις καθώς και στον αντίκτυπο που ενδεχομένως να έχει η συστοιχία Α/Γ στη χλωρίδα και πανίδα της ευρύτερης περιοχής. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να μελετηθούν οι επιπτώσεις στον υδροβιότοπο της περιοχής της απόρριψης του υποπροϊόντος ύδατος (προερχόμενου από τη διεργασία της αφαλάτωσης) στη θάλασσα. Η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων διεξάγεται από μία ομάδα 2 ατόμων και περιλαμβάνει συλλογή και επεξεργασία των απαιτούμενων στοιχείων, επιτόπια έρευνα αλλά και συνάντηση με εκπροσώπους τοπικών κοινωνιών. Η εργασία δύναται να διαρκέσει 4 ημέρες και το κόστος της μελέτης αυτής ανέρχεται σε 580 €/άτομο/d.

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός αποτελεί μία επιπρόσθετη συνιστώσα κόστους και απαιτείται για να προσδιοριστεί η βέλτιστη δυναμικότητα της εγκατάστασης, το μέγεθός της, η διάταξή της, οι υποδομές και ο εξοπλισμός που απαιτείται καθώς και οι εκτιμώμενες ποσότητες απαραίτητες για τη διενέργεια λεπτομερούς εκτίμησης κόστους. Το κόστος της εν λόγω δραστηριότητας υπολογίζεται με βάση το χρόνο που απαιτείται από το μελετητή για να ολοκληρώσει την εργασία του και ανέρχεται σε 580€/άτομο/ημέρα. Ο σχεδιασμός διενεργείται από μία ομάδα 3 ατόμων και διαρκεί 6 ημέρες.

Μετά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ακολουθεί η διεξαγωγή της αναλυτικής εκτίμησης κόστους. Παρόμοια με την περίπτωση του προκαταρκτικού σχεδιασμού η αναλυτική εκτίμηση κόστους δύναται να συνταχθεί από την ίδια ομάδα των 3 ατόμων και το κόστος της δραστηριότητας αυτής υπολογίζεται ανάλογα με το χρόνο που απαιτείται από το μελετητή προκειμένου να ολοκληρωθεί η εν λόγω εργασία. Το κόστος εκτιμάται 580€/άτομο/ημέρα και η διάρκεια είναι 6 ημέρες.

Οι δραστηριότητες που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους συνοψίζονται σε μία σύντομη έκθεση στην οποία παρατίθενται όλα τα ευρήματα και οι σχετικές προτάσεις. Στη γραπτή αυτή έκθεση περιλαμβάνονται εν περιλήψει τα συλλεχθέντα δεδομένα, διαγράμματα, πίνακες και σχήματα με τη βοήθεια των οποίων περιγράφεται το προτεινόμενο σχέδιο. Η έκθεση αυτή θα πρέπει να είναι επαρκώς λεπτομερής σχετικά με τα κόστη, την απόδοση και τους κινδύνους που εγκυμονούν από την υλοποίηση του σχεδίου. Το κόστος της δραστηριότητας αυτής υπολογίζεται ανάλογα με το χρόνο που απαιτείται από τον εμπειρογνώμονα προκειμένου να ολοκληρωθεί η απαιτούμενη εργασία και εκτιμάται σε 580€/άτομο/d. Η έκθεση αυτή δύναται να διενεργηθεί από ομάδα 2 ατόμων με διάρκεια δραστηριότητας 4 ημερών.

Όλες οι προαναφερθείσες δραστηριότητες απαιτούν κατάλληλη διαχείριση δεδομένου ότι αποτελούν φάσεις της μελέτης επιτευξιμότητας του έργου. Το κόστος διαχείρισης της μελέτης επιτευξιμότητας υπολογίζεται συναρτήσει του χρόνου ολοκλήρωσης της μελέτης (από το στάδιο της επιτόπιας έρευνας έως και το τελικό στάδιο της σύνταξης της έκθεσης επιτευξιμότητας). Με βάση τα προαναφερθέντα η μελέτη επιτευξιμότητας εκτιμάται ότι διαρκεί 21 ημέρες διαχειρίζεται από 2 άτομα και το κόστος της δραστηριότητας αυτής ανέρχεται σε 580€/άτομο/d.

Προκειμένου να διεκπεραιωθούν όλα τα στάδια της μελέτης επιτευξιμότητας καθίσταται απαραίτητη η διενέργεια μετακινήσεων, η εκμίσθωση μεταφορικών μέσων και χώρων διαμονής. Το συνολικό κόστος αυτών ανέρχεται σε 12000€. Τα επιμέρους κόστη καθώς το συνολικό κόστος της προκαταρκτικής μελέτης επιτευξιμότητας συνοψίζονται στον πίνακα 5.1

που ακολουθεί. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι το κόστος της μελέτης επιτευξιμότητας αποτελεί μέρος του αρχικού κόστους της εγκατάστασης.

Επιμέρους δραστηριότητα	Ποσότητα	Διάρκεια	Κόστος μονάδας	Ολικό κόστος επιμέρους δραστηριότητας
Επιτόπια επιθεώρηση επιλεχθείσας τοποθεσίας	6 άτομα	1 d	580 €/άτομο/d	3480 €
Συλλογή και αξιολόγηση δεδομένων	-	-	-	95000 €
Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων	2 άτομα	4 d	580 €/άτομο/d	4640 €
Προκαταρκτικός σχεδιασμός	3 άτομα	6 d	580 €/άτομο/d	10440 €
Αναλυτική εκτίμηση κόστους	3 άτομα	6 d	580 €/άτομο/d	10440 €
Σύνταξη συνοπτικής έκθεσης	2 άτομα	4 d	580 €/άτομο/d	4640 €
Διαχείριση μελέτης επιτευξιμότητας	2 άτομα	21 d	580 €/άτομο/d	24360 €
Έξοδα μεταφοράς και διαμονής	-	-	-	12000
			Συνολικό κόστος	165000 €

Πίνακας 5.1 Κόστη επιμέρους δραστηριοτήτων μελέτης επιτευξιμότητας

5.1.2 Κόστος Ανάπτυξης Προτεινόμενου Έργου

Με την προϋπόθεση ότι η μελέτη επιτευξιμότητας θα αναδείξει την ορθότητα της επιλογής ακολουθούν δραστηριότητες ανάπτυξης του προτεινόμενου έργου. Η διαπραγμάτευση της τιμής διάθεσης του νερού και η τελική Συμφωνία Αγοράς Νερού (**Water Purchase Agreement, WPA**) είναι ένα από τα πρώτα στάδια ανάπτυξης για την περίπτωση ιδιωτικής πρωτοβουλίας. Η εν λόγω διαπραγμάτευση περιλαμβάνει επιπρόσθετα νομικές και άλλες

συμβουλές οικονομικού και λογιστικού χαρακτήρα και εξαρτάται από την προϋπαρξη ενδεχόμενου καθεστώτος διάθεσης πόσιμου νερού. Θα πρέπει να διευκρινιστεί πως στην περίπτωση που η εγκατάσταση αφαλάτωσης θα διαχειρίζεται από επιχείρηση δημόσιας ωφέλειας η WPA δεν υφίσταται. Το κόστος που αντιστοιχεί στη δραστηριότητα αυτή ανέρχεται σε 900€/άτομο/d διενεργείται από 3 άτομα και διαρκεί 7 ημέρες.

Προκειμένου να λειτουργήσει η εγκατάσταση αφαλάτωσης ένας αριθμός εγκρίσεων και αδειών θα πρέπει να υλοποιηθούν και να ληφθούν αντίστοιχα. Πρόκειται για μία αρκετά χρονοβόρα διαδικασία που αφορά κυρίως το τμήμα της συστοιχίας των Α/Γ και περιλαμβάνει περιβαλλοντικές εγκρίσεις, δικαιοδοσία σχετικά με τη χρήση της γης και την εναέρια κυκλοφορία, άδειες κτιριακών εγκαταστάσεων και συμφωνίες λειτουργίας της εγκατάστασης. Στην περίπτωση αυτή τόσο η τοπική αυτοδιοίκηση και η τοπική κοινωνία αλλά και άλλες δημόσιες υπηρεσίες διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Το κόστος της εν λόγω δραστηριότητας ανέρχεται σε 580€/άτομο/d διενεργείται από 1 άτομο και διαρκεί 250 ημέρες.

Για την εύρυθμη λειτουργία της εγκατάστασης ζωτικής σημασίας αποτελεί και η περιοδική επιθεώρηση της χρησιμοποιούμενης γης. Η δραστηριότητα αυτή δύναται να διεκπεραιωθεί από 1 άτομο και διαρκεί 50 μέρες το χρόνο που ισοδυναμεί με επιθεώρηση κάθε εβδομάδα. Το κόστος της επιθεώρησης εκτιμάται 450€/άτομο/d.

Η εγκατάσταση που έχει σχεδιαστεί έχει υψηλό κόστος κεφαλαίου και αποτελεί επένδυση μακροπρόθεσμης κλίμακας. Ο χρόνος που απαιτείται για την αναζήτηση χρηματοδότησης είναι υπολογίσιμος ακόμα και στην περίπτωση έργων μικρής κλίμακας. Το αντίστοιχο κόστος υπολογίζεται σε συνάρτηση με το χρόνο που απαιτείται για τον εντοπισμό επενδυτών και την πραγματοποίηση σχετικών χρηματοδοτικών συμφωνιών. Η εν λόγω δραστηριότητα δύναται να διαρκέσει 100 ημέρες, διενεργείται από 1 άτομο και κοστίζει 1100€/άτομο/d.

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 5.1 απαιτείται κατάλληλη διαχείριση όλων των φάσεων ανάπτυξης του έργου. Στη διαχείριση της ανάπτυξης του έργου περιλαμβάνονται και οι δημόσιες σχέσεις ένα σημαντικό στοιχείο για τη διεκπεραίωση εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση ανάπτυξης του έργου εκτιμάται ότι είναι 2 έτη. Το κόστος της διαχείρισης ανέρχεται σε 95000 €/άτομο/y και διενεργείται από 2 άτομα.

Απαραίτητες για την ολοκλήρωση κάθε σταδίου ανάπτυξης του έργου αποτελούν οι μετακινήσεις, οι εκμισθώσεις μεταφορικών μέσων και χώρων διαμονής. Το συνολικό κόστος αυτών ανέρχεται σε 54000€. Τα επιμέρους κόστη καθώς το συνολικό κόστος ανάπτυξης του προτεινόμενου έργου συνοψίζονται στον πίνακα 5.2 που ακολουθεί.

Επιμέρους δραστηριότητα	Ποσότητα	Διάρκεια	Κόστος μονάδας	Ολικό κόστος επιμέρους δραστηριότητας
Επίτευξη συμφωνίας διάθεσης νερού	3 άτομα	7 d	900 €/άτομο/d	18900 €
Άδειες και εγκρίσεις	1 άτομο	250 d	580 €/άτομο/d	145000 €
Επιθεώρηση εκμισθωμένης γης	1 άτομο	50 d	450 €/άτομο/d	22500 €
Αναζήτηση και εξασφάλιση χρηματοδοτικών πόρων	1 άτομο	100 d	1100 €/άτομο/d	110000 €
Διαχείριση ανάπτυξης προτεινόμενου έργου	2 άτομα	2 y	95000 €/άτομο/y	380000 €
Έξοδα μεταφοράς και διαμονής	-	-	-	54000 €
			Συνολικό κόστος	730400 €

Πίνακας 5.2 Κόστη επιμέρους δραστηριοτήτων ανάπτυξης προτεινόμενου έργου

5.1.3 Κόστος Μηχανικού Σχεδιασμού

Ο μηχανικός σχεδιασμός αποτελεί ένα βασικό βήμα για την υλοποίηση της κατασκευής και λειτουργίας της εγκατάστασης αφαλάτωσης και περιλαμβάνει μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές μελέτες καθώς και μελέτες χημικού μηχανικού και πολιτικού μηχανικού.

Τα κυριότερα καθήκοντα του μηχανολόγου μηχανικού σχετίζονται με το σχεδιασμό της συναρμολόγησης και ανέγερσης των μηχανικών τμημάτων της συστοιχίας των Α/Γ. Το κόστος της δραστηριότητας αυτής ανέρχεται σε 580€/άτομο/d, εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της επιλεγμένης περιοχής, διενεργείται από 1 μηχανολόγο μηχανικό και εκτιμάται ότι διαρκεί 100 ημέρες. Επιπρόσθετα απαιτείται ένας μηχανολόγος μηχανικός ο οποίος θα σχεδιάσει τη συναρμολόγηση του τμήματος που περιλαμβάνει τις αντλίες και τις σωληνώσεις μεταφοράς νερού. Το κόστος της δραστηριότητας αυτής ανέρχεται σε 580€/άτομο/d και εκτιμάται ότι διαρκεί 80 ημέρες. Μετά την εγκατάσταση του μηχανικού και

υδραυλικού εξοπλισμού απαιτούνται εργασίες για τη σύζευξη της κάθε Α/Γ με το υδραυλικό κύκλωμα. Συγκεκριμένα η κάθε αντλία συνδέεται μηχανικά μέσω συστήματος μετάδοσης με μία Α/Γ. Το συνολικό κόστος της σύζευξης εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 35000€ (κόστος 580€/άτομο/d, διάρκεια 35 ημέρες)

Απαραίτητη αποτελεί και η παρουσία του χημικού μηχανικού ο οποίος θα αναλάβει το σχεδιασμό της συναρμολόγησης των μεμβρανών αφαλάτωσης, της μονάδας προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας του νερού καθώς και του υπόλοιπου απαιτούμενου εξοπλισμού όπως είναι οι σωληνώσεις σύνδεσης των μεμβρανών και τα συστήματα ελέγχου ποιότητας. Το κόστος της δραστηριότητας αυτής ανέρχεται σε 580€/άτομο/d και εκτιμάται ότι διαρκεί 100 ημέρες.

Η διενέργεια ηλεκτρολογικής μελέτης της εγκατάστασης είναι εξίσου σημαντική δεδομένου ότι ο έλεγχος της εγκατάστασης θα πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τα καθήκοντα όμως του ηλεκτρολόγου μηχανικού περιορίζονται σε αυτό τον τομέα δεδομένου ότι, λόγω του χαρακτήρα της εγκατάστασης, δεν απαιτείται ηλεκτρική σύζευξη των Α/Γ με το δίκτυο της περιοχής. Το κόστος της δραστηριότητας αυτής ανέρχεται σε 580€/άτομο/d και εκτιμάται ότι διαρκεί 20 ημέρες.

Η παρουσία 2 πολιτικών μηχανικών κρίνεται εξίσου κεφαλαιώδους σημασίας δεδομένου ότι τα καθήκοντά τους σχετίζονται με το σχεδιασμό και την ανοικοδόμηση των απαιτούμενων κτιριακών εγκαταστάσεων (γραφεία προσωπικού, στέγαση των μεμβρανών αφαλάτωσης και του κέντρου ελέγχου), τη θεμελίωση των Α/Γ καθώς και την κατασκευή και θεμελίωση της δεξαμενής απόθεσης του καθαρού νερού. Το κόστος της δραστηριότητας αυτής ανέρχεται σε 580€/άτομο/d και εκτιμάται ότι διαρκεί 90 ημέρες.

Η επίβλεψη εργοταξίου συνοψίζει τα κόστη που σχετίζονται με την εξασφάλιση ότι η εγκατάσταση θα κατασκευαστεί σύμφωνα με το σχεδιασμό που έχει πραγματοποιηθεί και περιλαμβάνει συχνές επισκέψεις στο εργοτάξιο και επιθεώρηση της εγκατάστασης. Η δραστηριότητα αναλαμβάνεται από το διευθυντή έργου, διαρκεί 1 έτος και το κόστος του εκτιμάται ότι είναι 95000€/άτομο/y.

Τα επιμέρους κόστη καθώς το συνολικό κόστος μηχανικού σχεδιασμού συνοψίζονται στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί.

Επιμέρους δραστηριότητα	Ποσότητα	Διάρκεια	Κόστος μονάδας	Ολικό κόστος επιμέρους δραστηριότητας
Έργο μηχανολόγου μηχανικού				
α) Συστοιχία Α/Γ	1 άτομο	100 d	580 €/άτομο/d	58000 €
β) Υδραυλικό κύκλωμα	1 άτομο	80 d	580 €/άτομο/d	46400 €
γ) Σύζευξη Α/Γ-αντλίας	2 άτομα	35 d	500 €/άτομο/d	35000 €
Έργο χημικού μηχανικού	1 άτομο	100 d	580 €/άτομο/d	58000 €
Έργο ηλεκτρολόγου μηχανικού	1 άτομο	20 d	580 €/άτομο/d	11600 €
Έργο πολιτικού μηχανικού	2 άτομα	90 d	580 €/άτομο/d	104400 €
Επίβλεψη εργοταξίου	1 άτομο	1 y	95000 €/άτομο/y	95000 €
			Συνολικό κόστος	408400 €

Πίνακας 5.3 Κόστη επιμέρους δραστηριοτήτων μηχανικού σχεδιασμού

5.1.4 Κόστος Εξοπλισμού

5.1.4.1 Κόστος Εξοπλισμού Παραγωγής Ενέργειας (Συστοιχία Α/Γ)

Μία εκτίμηση του κόστους των Α/Γ παρέχει την ανηγμένη τιμή των 1000€/kW και επομένως το συνολικό κόστος των 5 Α/Γ ανέρχεται σε $5 \cdot 150 \text{ kW} \cdot 1000 \text{ €/kW} = 750000 \text{ €}$. Στο κόστος αυτό εμπεριέχονται όλα τα εξαρτήματα από τα οποία απαρτίζεται μία Α/Γ:

- ⊗ Ο σωληνοειδής πύργος ύψους 30 m
- ⊗ Τα πτερύγια που αντιστοιχούν 3 σε κάθε Α/Γ
- ⊗ Το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα μετάδοσης ισχύος στη φυγοκεντρική αντλία
- ⊗ Τα μηχανικά συστήματα πέδησης
- ⊗ Το σύστημα ελέγχου της Α/Γ
- ⊗ Το κάλυμμα
- ⊗ Ο κύριος άξονας και τα συστήματα κίνησης

Τα ανταλλακτικά συνήθως συνοδεύουν τις Α/Γ και εμπεριέχονται στο αρχικό κόστος αγοράς. Η αγορά των ανταλλακτικών συγχρόνως με την αγορά των Α/Γ προτιμάται λόγω της ακριβότερης διάθεσης των πρώτων σε κάποια μεταγενέστερη χρονική περίοδο. Η έκταση του καταλόγου των ανταλλακτικών εξαρτάται κυρίως από την αξιοπιστία των Α/Γ, την εγγύηση που τις συνοδεύει, τη δυσκολία μεταφοράς στον τόπο εγκατάστασης καθώς και τη διαθεσιμότητα ορισμένων ανταλλακτικών. Το κόστος των ανταλλακτικών καταλαμβάνει το 3% της αξίας των 5 Α/Γ δηλαδή $3\% \cdot 750000\text{€} = 22500\text{€}$.

Η θεμελίωση κάθε Α/Γ αποτελεί βασικό στοιχείο για την επίτευξη επαρκούς στατικότητας αυτής. Το κόστος της περιλαμβάνει το κόστος διεκπεραίωσης από το εργατικό δυναμικό και το κόστος των χρησιμοποιούμενων υλικών όπως το σκυρόδεμα και τα μεταλλικά πλέγματα. Εκτιμάται ότι το κόστος θεμελίωσης για κάθε Α/Γ ανέρχεται σε 56000€.

Το κόστος ανέγερσης κάθε Α/Γ που ακολουθεί της θεμελίωσης περιλαμβάνει το κόστος διεκπεραίωσης από το εργατικό δυναμικό καθώς και την εκμίσθωση του απαραίτητου εξοπλισμού. Στον ειδικό εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί εμπεριέχονται γερανοφόρο οχήμα και βαρούλκα. Το κόστος της εκμίσθωσης του εξοπλισμού δύναται να επιβαρυνθεί σημαντικά σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας του απαραίτητου εξοπλισμού στην τοποθεσία εγκατάστασης. Στην περίπτωση αυτή ο ειδικός εξοπλισμός θα πρέπει να μεταφερθεί στην εν λόγω περιοχή και αυτό συνεπάγεται επιπρόσθετο κόστος μεταφοράς και μεγαλύτερη χρονική διάρκεια εκμίσθωσης αυτού. Για την περίπτωση της Νισύρου το κόστος αυτό ανέρχεται σε 45000€ για κάθε Α/Γ.

Η πρόσβαση σε κάθε μία Α/Γ βρίσκεται σε συνάρτηση με την ποιότητα και τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής εγκατάστασης. Στην περίπτωση όπου η τοποθεσία επιλογής είναι δύσβατη και δεν επιτρέπει την απρόσκοπτη προσέγγιση σε κάθε Α/Γ απαιτείται έργο οδοποιίας. Το κόστος αυτού υπολογίζεται σε 36000€/km και το συνολικό μήκος του οδοστρώματος εκτιμάται 8.5 km.

Επιπρόσθετα, δε θα πρέπει να αγνοηθεί και ο εξοπλισμός με τον οποίο θα υλοποιηθεί η σύζευξη Α/Γ-αντλίας. Καταλαμβάνει σημαντικό μέρος του κόστους και εκτιμάται ότι ανέρχεται στα 700000 €/Α/Γ.

Δεδομένου ότι οι επιλεχθείσες Α/Γ διατίθενται από αγορά του εξωτερικού έπεται ότι θα απαιτείται μεταφορά αυτών στον τόπο όπου θα κατασκευαστεί το αιολικό πάρκο. Τα έξοδα αποστολής ανέρχονται σε 40000€/Α/Γ λαμβάνοντας υπόψη ότι η τοποθεσία εγκατάστασης βρίσκεται σε νησί. Μεταφορά απαιτείται για τον υπόλοιπο εξοπλισμό (πλην του εξοπλισμού ανέγερσης) και τα υλικά κατασκευής και εκτιμάται ότι είναι 50000€.

Τα προαναφερθέντα κόστη συνοψίζονται στον πίνακα 5.4 που ακολουθεί. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται τα επιμέρους και ολικά κόστη που αναφέρονται σε 2 περιπτώσεις οι οποίες σχετίζονται με τη βέλτιστη (200000 €/Α/Γ) και τη χειρίστη (700000 €/Α/Γ) εκτίμηση του κόστους εξοπλισμού σύζευξης.

Επιμέρους δραστηριότητα-εξοπλισμός	Ποσότητα	Κόστος μονάδας	Ολικό κόστος επιμέρους δραστηριότητας-εξοπλισμού
A/Γ N27/150 (Nordex)	750 kW	1000/kW	750000 €
Ανταλλακτικά	-	-	22500 €
Θεμελίωση A/Γ	-	-	56000 €
Ανέγερση A/Γ	-	-	45000 €
Έργα οδοποιίας	8.5 km	36000 €/km	306000 €
Εξοπλισμός σύζευξης	5 A/Γ	i)	700000 €/Α/Γ
		ii)	200000 €/Α/Γ
Έξοδα μεταφοράς A/Γ και λοιπού εξοπλισμού			
α) Μεταφορά A/Γ	5 A/Γ	40000 €/Α/Γ	200000 €
β) Μεταφορά λοιπού εξοπλισμού και υλικών κατασκευής	-	-	50000 €
		Συνολικό κόστος	i) 4929500 €
			ii) 2429500 €

Πίνακας 5.4 Κόστη εξοπλισμού και επιμέρους δραστηριοτήτων

5.1.4.2 Κόστος Εξοπλισμού Αφαλάτωσης Θαλασσινού Νερού

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4 ο αριθμός των μεμβρανών αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιηθούν είναι 20 και το κόστος αυτών μεμβρανών ανέρχεται σε 614€/μεμβράνη. Εκτός του κυρίου σταδίου αφαλάτωσης απαιτείται και ένα στάδιο προεπεξεργασίας του νερού τροφοδοσίας κυρίως για την προστασία των μεμβρανών που έχει ως συνεπακόλουθο την επιμήκυνση του χρόνου ζωής αυτών. Μία εκτίμηση του κόστους προεπεξεργασίας του

θαλασσινού νερού σύμφωνα και με τη διεθνή βιβλιογραφία παρέχει ένα ποσοστό της τάξεως του 5% επί του κόστους κεφαλαίου της μονάδας αφαλάτωσης. Στην προκειμένη περίπτωση το κόστος αυτό ανέρχεται σε 10000€.

Στο κόστος εξοπλισμού αφαλάτωσης συμπεριλαμβάνεται το κόστος των αντλιών που θα συζευχθούν με τις ανεμογεννήτριες με τη βοήθεια των οποίων θα τροφοδοτηθούν οι μεμβράνες αφαλάτωσης με θαλασσινό νερό. Το υλικό κατασκευής των αντλιών αυτών δεν πρέπει να προσβάλλεται από το θαλασσινό νερό και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ορείχαλκος ή ανοξείδωτος χάλυβας. Τα υλικά αυτά επιβαρύνουν ιδιαίτερα το συνολικό κόστος εξοπλισμού αφαλάτωσης. Μία τυπική τιμή διάθεσης αντλιών θαλασσινού νερού και της δυναμικότητας που αναφέρεται στο 3^ο κεφάλαιο ανέρχεται σε 20000€/αντλία.

Η διασύνδεση μεταξύ αντλιών και μεμβρανών αφαλάτωσης υλοποιείται με τη βοήθεια σωληνώσεων η μέση διάμετρος των οποίων εκτιμάται ακολούθως. Η διαστασιολόγηση των αγωγών θα γίνει με βάση την απαίτηση η μέγιστη μέση ταχύτητα του θαλασσινού νερού να μην υπερβαίνει το 1m/sec (για την αποφυγή ηχορρύπανσης) και λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέγιστη παροχή λειτουργίας της μονάδας ανέρχεται σε 110m³/h. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να συνυπολογιστεί η χωροθέτηση των Α/Γ και συγκεκριμένα η μεταξύ τους απόσταση. Η διάμετρος του αγωγού δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_f = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_{max} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_f}{\pi \cdot V_{max}}} \Rightarrow D = 200mm$$

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία η απόσταση μεταξύ δύο Α/Γ δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5~6 διαμέτρους δρομέα. Έχοντας ως δεδομένο ότι οι αντλίες συνδέονται εν σειρά και ότι η διάμετρος του δρομέα των χρησιμοποιούμενων Α/Γ είναι 27m έπεται ότι το μήκος του θα πρέπει να είναι τουλάχιστον

$$S_{min,αγωγού} = [(Αριθμός Α/Γ) - 1] \cdot (Απόσταση μεταξύ 2 Α/Γ) = 4 \cdot (5 \cdot 27) = 540m$$

Επιπρόσθετα, απαιτείται αγωγός που θα συνδέει την πρώτη αντλία με την πηγή τροφοδοσίας (θάλασσα) καθώς και την τελευταία αντλία με τις μεμβράνες αφαλάτωσης. Το μήκος αυτό εκτιμάται ότι είναι 300m. Το συνολικό μήκος του αγωγού διαμέτρου 200mm είναι 840m και το κόστος αυτού εκτιμάται ότι είναι 55€/m. Το μήκος του αγωγού που συνδέει τις μεμβράνες μεταξύ τους θεωρείται αμελητέο ενώ ο αγωγός απόρριψης του υποπροϊόντος (από τις

μεμβράνες αφαλάτωσης έως τη θάλασσα) και ο αγωγός απόθεσης του πόσιμου νερού (από τις μεμβράνες αφαλάτωσης έως τη δεξαμενή απόθεσης) εκτιμώνται ότι έχουν μήκος 500m και 200 μέτρα αντίστοιχα. Η διάμετρος του αγωγού απόρριψης είναι 200mm ενώ η διαστασιολόγηση του αγωγού απόθεσης με βάση την απαίτηση η μέγιστη μέση ταχύτητα του θαλασσινού να μην υπερβαίνει το 1m/sec και ότι η μέγιστη παροχή καθαρού νερού είναι 20m³/h.

$$Q_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_{max} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot V_{max}}} \Rightarrow D = 100mm$$

Το κόστος του αγωγού διαμέτρου 100mm ανέρχεται σε 45€/m. Συνοψίζοντας, απαιτείται αγωγός διαμέτρου 200mm, συνολικού μήκους 1340m και αγωγός διαμέτρου 100mm, συνολικού μήκους 200m.

Για την αποθήκευση του καθαρού νερού απαιτείται η κατασκευή κατάλληλης δεξαμενής απόθεσης. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 3 η ζήτηση σε καθαρό νερό κατά την περίοδο Σεπτέμβριος-Μάιος είναι

$$V_{\text{Σεπτέμβριος-Μάιος}} = 948(\text{μόνιμοι κάτοικοι}) \cdot 0.15 \text{ m}^3 / \text{μόνιμο κάτοικο/d} \cdot 275d = 39105 \text{ m}^3$$

ενώ το παραγόμενο καθαρό νερό θα είναι

$$V_p = 195.6 \text{ m}^3 / d \cdot 275d = 53790 \text{ m}^3 .$$

Επομένως η ποσότητα του νερού που δεν καταναλώνεται θα ανέλθει στο τέλος Μαΐου στα

$$\Delta V = V_p - V_{\text{Σεπτέμβριος-Μάιος}} = 53790 \text{ m}^3 - 39105 \text{ m}^3 = 14685 \text{ m}^3 .$$

Με βάση τα ανωτέρω στοιχεία η δεξαμενή που θα κατασκευαστεί επιλέγεται να είναι χωρητικότητας 17000m³ και το κόστος κατασκευής της υπολογίζεται 3000000€.

Τέλος τα έξοδα μεταφοράς των υλικών κατασκευής και του εξοπλισμού ανέρχονται σε 40000€. Τα κόστη της παραγράφου αυτής συνοψίζονται στον πίνακα 5.5. Παρόμοια με τον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται οι δύο περιπτώσεις βέλτιστης και χειρίστης εκτίμησης του κόστους εξοπλισμού αφαλάτωσης και αντιστοιχούν στην παραδοχή ήδη υπάρχουσας δεξαμενής (ήτοι Κόστος δεξαμενής=0 €) ή στην ανάγκη απόθεσης σε δεξαμενή που πρέπει να κατασκευαστεί (ήτοι Κόστος δεξαμενής=3000000 €).

Επιμέρους δραστηριότητα-εξοπλισμός	Ποσότητα	Κόστος μονάδας	Ολικό κόστος επιμέρους δραστηριότητας-εξοπλισμού
SW30HR-380	20	614€/μεμβράνη	12280 €
Αντλίες θαλασσινού νερού	5	20000€/αντλία	100000 €
Σωληνώσεις			
α) Διαμέτρου 200mm	1340m	55€/m	73700 €
β) Διαμέτρου 100mm	200 m	45€/m	9000 €
Δεξαμενή	i)	-	3000000€
	ii)	-	0 €
Μεταφορά εξοπλισμού και υλικών κατασκευής	-	-	40000 €
		Συνολικό κόστος	i) 3234980 € ii) 234980 €

Πίνακας 5.5 Κόστη εξοπλισμού και επιμέρους δραστηριοτήτων

5.1.5 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας

Όλα τα προαναφερόμενα κόστη εμπεριέχονται στο αρχικό κόστος κεφαλαίου σε αντίθεση με το κόστος συντήρησης και λειτουργίας τα οποία είναι περιοδικό (με χρονική περίοδο 1 έτος).

Στο πρόβλημα που μελετάται θεωρείται ότι η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται ολόκληρη η μονάδα αφαλάτωσης εκμισθώνεται και για το λόγο αυτό το αντίστοιχο κόστος εμπεριέχεται στα περιοδικά έξοδα λειτουργίας. Επιπρόσθετα, η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου περιορίζει τις δυνατότητες εκμετάλλευσης της γης και πολλές φορές καθιστά απαγορευτικές διαφόρων ειδών δραστηριότητες εντός μίας συγκεκριμένης περιοχής. Για το λόγο αυτό απαιτείται καταβολή σχετικής αποζημίωσης στους ιδιοκτήτες τμημάτων γης πλησίον της εγκατάστασης κατόπιν επίτευξης κάποιας μορφής συμφωνίας. Το συνολικό ετήσιο κόστος της εκμίσθωσης εκτιμάται ότι είναι 3600€.

Η ασφάλιση της εγκατάστασης είναι απαραίτητη και καλύπτει ενδεχόμενη δυσλειτουργία του εξοπλισμού, διακοπή εργασιών της εγκατάστασης, καταστροφή ιδιοκτησίας και αποτελεί

δημόσια υποχρέωση απέναντι στο κοινωνικό σύνολο. Το κόστος ασφάλισης ανέρχεται σε 6000€.

Η έκτακτη και τακτική συντήρηση ολόκληρης της εγκατάστασης περιλαμβάνει την παρακολούθηση και τακτική επιθεώρηση του εξοπλισμού (τακτική λίπανση και ρύθμιση των Α/Γ και αντλιών, ενδεχόμενη αντικατάσταση και επισκευή τμημάτων του υδραυλικού κυκλώματος, καθαρισμός των μεμβρανών), απομάκρυνση πάγου κι διαφόρων ακαθαρσιών και προγραμματισμένος έλεγχος (όπως εσωτερικός έλεγχος των μηχανικών τμημάτων των Α/Γ και των αντλιών). Το κόστος αυτό εκτιμάται ότι ανέρχεται στα 95000€.

Ένα επιπρόσθετο κόστος αποτελεί και το κόστος των χημικών ουσιών και άλλων αναλώσιμων υλικών που πρέπει να προστεθούν στο νερό που προκύπτει από τις μεμβράνες κατά το στάδιο της μετεπεξεργασίας του. Το κόστος αυτό εκτιμάται σε 0.02€/m³ παραγόμενου νερού.

Επιμέρους δραστηριότητα	Ποσότητα	Κόστος μονάδας	Ολικό κόστος επιμέρους δραστηριότητας
Χρήση γης (εκμίσθωση, αποζμίωση)	-	3600€	3600 €
Ασφάλιση εγκατάστασης	-	6000€	6000 €
Έκτακτη και τακτική συντήρηση εγκατάστασης	-	95000€	95000 €
Στάδιο μετεπεξεργασίας (χημικές ουσίες και αναλώσιμα υλικά)	71394	0.02€/m ³	1428 €
		Μερικό σύνολο	106028 €
Αστάθμητοι παράγοντες	-	20% Μερικό σύνολο	21206€
		Συνολικό κόστος	127234 €

Πίνακας 5.6 Κόστη επιμέρους δραστηριοτήτων

Σε περίπτωση που συμβεί κάποιο απρόοπτο που ενδεχομένως να αποτελέσει ανασταλτικός παράγοντας για τη λειτουργία της εγκατάστασης θα έχει ως αποτέλεσμα να επιβαρυνθεί οικονομικά ο ιδιώτης που θα πραγματοποιήσει την επένδυση. Για το λόγο αυτό η εμφάνιση κάποιου αστάθμητου παράγοντα ποσοτικοποιείται με το κόστος απροόπτου το οποίο καταλαμβάνει το 20% του συνολικού υπολοίπου κόστους της παραγράφου αυτής. Τα ανωτέρω κόστη συνοψίζονται στον πίνακα 5.6.

Συνοψίζοντας το συνολικό αρχικό κόστος κεφαλαίου ανέρχεται σε **9468280 €** ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας εκτιμάται σε **127234 €**. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο χρόνος ζωής των αντλιών και Α/Γ είναι **21 έτη** ενώ των μεμβρανών **3 έτη** γεγονός που σημαίνει ότι οι μεμβράνες θα πρέπει να αντικαθίστανται κάθε 3 έτη.

Στην παράγραφο που ακολουθεί θα γίνει αναφορά στην αξιολόγηση των επενδύσεων και θα περιγραφούν τα κριτήρια αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθούν.

5.2 Αξιολόγηση Επενδύσεων

Η εγκατάσταση και εκμετάλλευση ενός συστήματος αφαλάτωσης με αιολική ενέργεια αποτελεί μία επένδυση. Επένδυση σημαίνει μία πολυσύνθετη δραστηριότητα κατά την οποία δεσμεύονται οικονομικοί πόροι σε μια παραγωγική δραστηριότητα με την προσδοκία κάποιων ωφελειών στο μέλλον. Οι ωφέλειες δύναται να είναι χρηματικές με έσοδα από την πώληση του προϊόντος που στην προκειμένη περίπτωση είναι νερό ή κοινωνικού χαρακτήρα (αναβάθμιση της ποιότητας ζωής και προστασία του περιβάλλοντος με περιορισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου). Οι επενδύσεις σε αιολική ενέργεια χαρακτηρίζονται από σημαντικό αρχικό κόστος κεφαλαίου, σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας ενώ τα οφέλη προκύπτουν από την παραγωγή ή εξοικονόμηση ενέργειας.

5.2.1 Βασικές Έννοιες Επενδύσεων

5.2.1.1 Χρηματοροή

Ο όρος χρηματοροή ή ταμειακή ροή αναφέρεται στο χρηματικό ποσό που εισέρχεται ή εξέρχεται σε μία δεδομένη στιγμή από την επιχείρηση. Η αξία μίας χρηματοροής εξαρτάται από τη χρονική στιγμή αναφοράς δεδομένου ότι η αξία του χρήματος μεταβάλλεται με ρυθμό που ονομάζεται επιτόκιο ή επιτόκιο αναγωγής και το οποίο θεωρείται σταθερό με το χρόνο. Θετικές χρηματοροές (ταμειακές εισροές) θεωρούνται όλες οι εισροές μετρητών από τους χρηματοδοτικούς πόρους (ίδια κεφάλαια, δανεισμός, πιστώσεις) και τα έσοδα πωλήσεων της

μονάδας (εισπράξεις). Αρνητικές χρηματοροές (ταμειακές εκροές) θεωρούνται οι συνολικές επενδύσεις και εγκαταστάσεις, το λειτουργικό κόστος, η εξυπηρέτηση των δανείων και η καταβολή φόρων. Η διαφορά των 2 μεγεθών ([εισροές]-[εκροές]) παρέχει την καθαρή χρηματοροή (πλεόνασμα ή άλειμμα). Για την οικονομική αξιολόγηση ενός έργου απαιτείται ομοιογένεια των χρηματοροών η οποία επιτυγχάνεται με την αναγωγή όλων των χρηματοροών σε κοινή χρονική βάση.

5.2.1.2 Χρονική Αξία Χρήματος

Ο όρος της χρηματικής αξίας του χρήματος εκφράζει τη διαπίστωση ότι ένα χρηματικό ποσό που είναι διαθέσιμο σήμερα είναι περισσότερο χρήσιμο από ένα ίσο που διατίθεται κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον. Ποσοτικοποιείται με ένα επιτόκιο που εκφράζει την αμοιβή δανειζόμενου κεφαλαίου και υπολογίζεται συνήθως σε ετήσια βάση ως ποσοστό του κεφαλαίου αυτού. Η αναγκαία ομοιογένεια για την οικονομική αξιολόγηση του σχεδίου επένδυσης επιτυγχάνεται με την αναγωγή όλων των χρηματοροών, που έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετική χρονική στιγμή, σε κοινή χρονική βάση. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για να πραγματοποιηθεί η αναγωγή αυτή είναι ο ανατοκισμός και η προεξόφληση. Με τον ανατοκισμό οι σημερινές αξίες μετατρέπονται σε ισοδύναμες μελλοντικές με βάση ένα επιτόκιο i που εκφράζει τη χρονική αξία του χρήματος. Αν P είναι η αξία της χρηματοροής σήμερα, n ο αριθμός των ετών και S_t η μελλοντική αξία της παρούσας χρηματοροής μετά από περίοδο n ετών τότε ισχύει η σχέση:

$$S_t = P \cdot (1+i)^n \quad (5.1)$$

Με την προεξόφληση, οι αξίες που αναφέρονται σε κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον ανάγονται σε σημερινές τιμές και η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της παρούσας αξίας μίας μελλοντικής χρηματοροής P_t . Έστω P_t η αξία της χρηματοροής που θα πραγματοποιηθεί μετά από n έτη και S η παρούσα αξία της χρηματοροής P , τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$P_t = S \cdot (1+i)^{-n} \quad (5.2)$$

5.2.1.3 Πληθωρισμός

Ο πληθωρισμός αποτελεί μία άλλη ανεξάρτητη παράμετρο διαχρονικής μείωσης της αξίας του χρήματος. Σε συνθήκες πληθωρισμού με την πάροδο του χρόνου, με το ίδιο χρηματικό ποσό αποκτώνται λιγότερα αγαθά και υπηρεσίες. Με τη χρήση ενός δείκτη που εκφράζει την

ετήσια ποσοστιαία μεταβολή του, ο πληθωρισμός δύναται να ποσοτικοποιηθεί. Όταν παρουσιάζονται έντονα πληθωριστικά φαινόμενα η αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός σχεδίου επένδυσης, μεταβάλλεται ανάλογα με την επίδραση του πληθωρισμού στις αξίες των χρηματορροών. Αν για μια εργασία απαιτείται σήμερα κεφάλαιο A τότε για την ίδια εργασία μετά από n έτη και για σταθερό πληθωρισμό λ θα απαιτείται κεφάλαιο $(1+\lambda)^n \cdot A$.

Έτσι για την αναγωγή μίας χρηματορροής, που λαμβάνει χώρα σε n έτη, σε σημερινές τιμές χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση στην οποία εμπεριέχεται και ο πληθωρισμός:

$$P_t = S \cdot \frac{(1+\lambda)^n}{(1+i)^n} \quad (5.3)$$

Αποδεικνύεται ότι υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα ισοδύναμο επιτόκιο i_o το οποίο ονομάζεται αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής και για το οποίο ισχύει:

$$i_o = \frac{i - \lambda}{1 + \lambda} \quad (5.4)$$

Κατά συνέπεια μπορεί να αγνοηθεί ο πληθωρισμός όταν εξετάζονται οι χρηματορροές μίας επένδυσης και να χρησιμοποιηθούν οι αποπληθωρισμένες τιμές τους αρκεί να μεταβληθεί κατάλληλα το περιθώριο αναγωγής σε παρούσα αξία δηλαδή να αποπληθωριστεί και αυτό.

5.2.1.4 Αποσβέσεις

Οι αποσβέσεις αντιπροσωπεύουν τη σταδιακή μείωση της αξίας των πάγιων περιουσιακών στοιχείων μίας επένδυσης (μηχανές, κτίρια) λόγω φθοράς και τεχνολογικής απαξίωσης και θεωρητικά επιτρέπει την αντικατάστασή τους μετά από το τέλος του χρήσιμου χρόνου ζωής τους. Με τη μέθοδο των αποσβέσεων επιδιώκεται η κατανομή του κόστους πάγιων στοιχείων σε όλο το χρόνο ζωής τους με αποτέλεσμα και την αντίστοιχη φορολογική ελάφρυνση. Η κατανομή του κόστους των πάγιων στοιχείων δεν αποτελεί πραγματική ταμειακή εκροή κατά τα έτη της παραγωγικής λειτουργίας αφού η δαπάνη για την απόκτηση του περιουσιακού στοιχείου σημειώθηκε κατά τη χρονική στιγμή απόκτησής του. Για τον υπολογισμό των αποσβέσεων ενός πάγιου περιουσιακού στοιχείου πρέπει να είναι γνωστά το αρχικό κόστος επένδυσης, ο χρήσιμος χρόνος ζωής του και υπολειμματική αξία. Στην πράξη χρησιμοποιείται ένας σταθερός συντελεστής απόσβεσης στη θέση του χρήσιμου χρόνου ζωής του.

5.2.2 Κριτήρια Οικονομικής Αξιολόγησης

5.2.2.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV)

Η NPV εκφράζει την αξία σε χρηματικές μονάδες, που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των καθαρών χρηματοροών κάθε έτους (διαφορά των μελλοντικών ταμειακών εισροών και εκροών) για ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης. Με την προϋπόθεση ύπαρξης ιδανικής αγοράς, χωρίς χρηματοδοτικούς περιορισμούς και φορολογία ο NPV υπολογίζεται από τη σχέση:

$$NPV = -I + \sum_{j=1}^n \frac{R_j - C_j}{(1+i)^j} + \frac{S_n}{(1+i)^j} \quad (5.5)$$

όπου **i** το επιτόκιο (προεξόφλησης) αναγωγής σε παρούσα αξία, **j** η περίοδος προεξόφλησης, **n** το σύνολο των χρηματοροών βάσει της διάρκειας ζωής του σχεδίου επένδυσης, **R_j** τα έσοδα που αποφέρει η επένδυση κατά το έτος **j** θεωρούμενα ότι λαμβάνονται στο τέλος του έτους (**j=1, 2, 3 ... n**), **C_j** είναι οι δαπάνες ή το κόστος εκμετάλλευσης της επένδυσης κατά το έτος **j** θεωρούμενες ότι καταβάλλονται στο τέλος του έτους **j**, **I** το κεφάλαιο της αρχικής επένδυσης πραγματοποιούμενη στο χρόνο και **S_n** η απομένουσα αξία της επένδυσης στο τέλος της ζωής της (πραγματική εκροή και είναι η τιμή εκποίησης της).

Το επιτόκιο προεξόφλησης επιλέγεται με βάση τις τρέχουσες συνθήκες της τραπεζικής αγοράς, εφόσον αυτή λειτουργεί ομαλά και αντισταθμίζει τις πραγματικές συνθήκες προσφοράς και ζήτησης κεφαλαίων. Συνήθως είναι το τραπεζικό επιτόκιο, προσθέτοντας ένα επιπλέον ποσοστό, το λεγόμενο περιθώριο κέρδους που έχει ως σκοπό να αντισταθμίσει τον κίνδυνο αποτυχίας του εγχειρήματος και κυμαίνεται μεταξύ 1%~4% ανάλογα με το βαθμό αβεβαιότητας του σχεδίου επένδυσης.

Η καθαρή παρούσα αξία είναι αξιόπιστη μέθοδος αξιολόγησης γιατί μετατρέπει τις μελλοντικές ροές αξιών του σχεδίου απόσβεσης σε παρούσες αξίες, δηλαδή αυτές που ισχύουν τη στιγμή που λαμβάνεται η απόφαση. **Αν η τιμή της NPV είναι θετική σημαίνει ότι η αποδοτικότητα είναι μεγαλύτερη από το επιτόκιο προεξόφλησης και το σχέδιο επένδυσης είναι αποδεκτό. Στην περίπτωση που η NPV είναι αρνητική σημαίνει ότι η αποδοτικότητα είναι μικρότερη από το επιτόκιο προεξόφλησης και το σχέδιο απορρίπτεται. Αν η NPV είναι μηδέν η αποδοτικότητα είναι οριακή και η αποδοχή του σχεδίου εξαρτάται από άλλους παράγοντες.** Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής θα πρέπει να επιδοθεί προσοχή στα εξής:

- Ⓜ Οι εκροές-κόστος (έξοδα) και οι εισροές-ωφέλειες (έσοδα) υπολογίζονται στο έτος που πραγματοποιούνται
- Ⓜ Οι αποσβέσεις αν και εμφανίζονται στον πίνακα ταμειακών ροών δεν είναι πραγματική εκροή (εκταμίευση) και για αυτό το λόγο δε συμπεριλαμβάνονται στις ταμειακές εκροές
- Ⓜ Η αποπληρωμή των δανείων υπολογίζεται στις εκταμιεύσεις γιατί αποτελεί ταμειακή εκροή
- Ⓜ Το έτος προεξόφλησης των ροών πρέπει να αναφέρεται σε ολόκληρη τη ζωή του σχεδίου επένδυσης (φάση κατασκευής-λειτουργίας) και να εφαρμόζεται ορισμένη χρονική βάση για όλες τις ροές (ομοιογενής χρονική βάση)
- Ⓜ Η υπολειμματική αξία του σχεδίου επένδυσης υπολογίζεται σαν θετική ροή
- Ⓜ Μπορεί να συγκριθεί με άλλα εναλλακτικά σχέδια επενδύσεων μόνο αν έχουν την ίδια οικονομική διάρκεια ζωής. Σε περίπτωση που έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής τότε πρέπει να γίνουν υποθέσεις για το τι θα συμβεί μετά τη λήξη του συντομότερου σχεδίου επενδύσεως και μέχρι τη λήξη του σχεδίου με τη μεγαλύτερη οικονομική διάρκεια ζωής.

Στην περίπτωση της ύπαρξης φορολογίας και ελάφρυνσης αυτής λόγω της ύπαρξης αποσβέσεων η σχέση (5.5) λαμβάνει τη μορφή της σχέσης (5.6) που παρατίθεται ακόλουθα.

$$NPV = -I + \sum_{j=1}^n \frac{R_j - C_j - t \cdot (R_j - C_j - D_j)}{(1+i)^j} + \frac{S_n}{(1+i)^j} \quad (5.6)$$

όπου D_j οι ετήσιες αναλήψεις κεφαλαίου για αποσβέσεις, t ο συντελεστής φορολογίας, $R_j - C_j$ τα καθαρά πραγματικά έσοδα ή ακαθάριστα πραγματικά κέρδη, $R_j - C_j - D_j$ τα καθαρά λογιστικά έσοδα ή ακαθάριστα λογιστικά κέρδη, $t \cdot (R_j - C_j - D_j)$ φορολογία και $R_j - C_j - t \cdot (R_j - C_j - D_j)$ τα καθαρά πραγματικά κέρδη.

5.2.2.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR)

Ο IRR είναι το υπολογιζόμενο επιτόκιο (εσωτερικής οικονομικής αποδοτικότητας) για το οποίο η παρούσα αξία των ταμειακών ροών είναι ίση με την παρούσα αξία των ταμειακών εκροών. Δηλαδή η άθροιση των καθαρών χρηματοροών όλου του χρονικού ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης είναι ίση με μηδέν. Το κριτήριο αυτό διατυπώνεται μαθηματικά (για $S_n=0$) ως εξής:

$$NPV(IRR) = -I + \sum_{j=1}^n \frac{R_j - C_j - t \cdot (R_j - C_j - D_j)}{(1 + IRR)^j} + \frac{S_n}{(1 + IRR)^j} = 0 \quad (5.7)$$

Στην περίπτωση που η λύση της εξίσωσης (4.7) παράσχει πολλά IRR τότε επιλέγεται το πλησιέστερο στο επιτόκιο αναγωγής και με αρνητική παράγωγο. Από τη σύγκριση της τιμής του IRR με το επίσημο επιτόκιο της αγοράς i συμπεραίνεται η αποδοτικότητα του σχεδίου επένδυσης. Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- ⊗ **IRR > i** (ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης): Η επένδυση θεωρείται συμφέρουσα
- ⊗ **IRR = i** (ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης): Η επένδυση θεωρείται οριακή και εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει καλύτερη εναλλακτική λύση
- ⊗ **IRR < i** (ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο προεξόφλησης): Η επένδυση απορρίπτεται

Ο IRR εκφράζει το υψηλότερο επιτόκιο που θα μπορούσε να πληρώσει ο επενδυτικός φορέας ή επιχειρηματίας χωρίς να διακινδυνεύσει να απολέσει όλα τα χρήματα που διέθεσε στην επένδυση ακόμα και αν υποθεθεί ότι έχει δανειστεί όλα τα χρήματα για τη χρηματοδότηση της επένδυσης. Ο IRR ως επιτόκιο δείχνει την πραγματική αποδοτικότητα της συνολικής επένδυσης και έτσι μπορεί να προσδιορίσει τους όρους δανεισμού, δεδομένου ότι καθορίζει το μέγιστο επιτόκιο που θα δύναται να πληρωθεί από την επένδυση χωρίς τον κίνδυνο απώλειας των κεφαλαίων.

5.2.2.3 Περίοδος Ανάκτησης Κεφαλαίου

Είναι σχετικά απλό κριτήριο επιλογής των επενδύσεων που εξετάζει πιο από τα εναλλακτικά σχέδια επένδυσης εξασφαλίζει την ταχύτερη επιστροφή των κεφαλαίων που επενδύθηκαν. Ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να καλυφθεί η δαπάνη της αρχικής επένδυσης από τις ετήσιες ταμειακές ροές μετά φόρων. Το κριτήριο εφαρμόστηκε και εφαρμόζεται ευρέως, καθώς κατά μία έννοια εκφράζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το επενδυμένο κεφάλαιο βρίσκεται υπό κίνδυνο. Όσο μικρότερη είναι η περίοδος ανάκτησης του κεφαλαίου τόσο ασφαλέστερη θεωρείται η επένδυση. Γενικά, επενδυτικά σχέδια με περίοδο ανάκτησης μεγαλύτερη από 7~8 έτη θεωρούνται από τους επενδυτές ριψοκίνδυνα ή χαμηλής απόδοσης.

5.3 Μελέτη Ευαισθησίας Επενδυτικού Σχεδίου

Πριν πραγματοποιηθεί η μελέτη ευαισθησίας απαραίτητος είναι ο καθορισμός ορισμένων βασικών μεταβλητών. Δεδομένου ότι πρόκειται για εγκατάσταση αφαλάτωσης θαλασσινού νερού τροφοδοτούμενη με αιολική ενέργεια, υπάρχει δυνατότητα κρατικής επιχορήγησης σε ποσοστό 35% επί του αρχικού κόστους επένδυσης. Η ίδια συμμετοχή είναι 30% ενώ το υπόλοιπο 35% δύναται να ληφθεί ως δάνειο. Το επιτόκιο δανεισμού εκτιμάται ότι είναι $i_\delta=7\%$ με περίοδο χάριτος 6 ετών ενώ το επιτόκιο αναγωγής λαμβάνεται 8.5%. Με βάση τα ανωτέρω και την εξίσωση (5.6) θα ισχύει:

$$I=I_{\text{idia κεφάλαια}}=30\% \cdot (\text{Αρχικό κόστος επένδυσης})$$

ενώ το υπόλοιπο 35% που λαμβάνεται ως δάνειο υπεισέρχεται στις εκροές C_j δεδομένου ότι αποπληρώνεται με τη μέθοδο των ίσων τοκοχρεολυσίων δηλαδή:

$$\text{Τοκοχρεολύσιο} = \frac{35\% \cdot (\text{Αρχικό κόστος επένδυσης}) \cdot i_\delta}{1 - (1 + i_\delta)^{-k}}$$

όπου k η περίοδος αποπληρωμής (σε έτη) του ληφθέντος δανείου.

Υποθέτοντας 15 έτη περίοδο απόσβεσης για το σύνολο της επένδυσης, το συνολικό ετήσιο κόστος απόσβεσης προκύπτει από τον ετήσιο συντελεστή $\frac{I}{15 \text{ έτη}} = 0.0667$ ή 6.67%

λαμβάνοντας υπόψη και την κρατική επιχορήγηση:

$$\text{Ετήσια απόσβεση} = (\text{Αρχικό κόστος επένδυσης}) \cdot (1-35\%) \cdot 6.67\%$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο χρόνος ζωής των μεμβρανών είναι 3 έτη και επομένως θα πρέπει αυτές να αντικαθίστανται στο τέλος κάθε τριετίας από την εγκατάστασή τους. Το περιοδικό αυτό κόστος αντικατάστασης ανέρχεται σε 16000€ και περιλαμβάνει τον νέο εξοπλισμό (12280 €) τα έξοδα μεταφοράς (1720 €) και εγκατάστασης αυτών (2000 €). Επιπρόσθετα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής φορολογίας καθαρών κερδών της επιχείρησης είναι 35%. Όσον αφορά την υπολειμματική αξία του σχεδίου επένδυσης αυτή θα θεωρηθεί μηδενική. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στη μέθοδο **BOT (Build-Operate-Transfer)** σύμφωνα με την οποία το κράτος παραχωρεί το δικαίωμα εκμετάλλευσης μιας περιοχής σε ιδιωτική εταιρεία ή κοινοπραξία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η εν λόγω εταιρεία αναλαμβάνει την ανάπτυξη και κατασκευή του έργου, τη λειτουργία και διαχείρισή του για συγκεκριμένη περίοδο μετά την υλοποίηση αυτού. Παραχωρείται το δικαίωμα στην εταιρεία να αποπληρώσει το κόστος κατασκευής και να αντλήσει κέρδος από τη διαδικασία λειτουργίας και εμπορικής εκμετάλλευσης του έργου. Μετά το τέλος της περιόδου παραχώρησης το έργο μεταβιβάζεται στο κράτος το οποίο αναλαμβάνει τη συνέχιση της

λειτουργίας του έργου ή εναλλακτικά παραχωρεί το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σε άλλη ιδιωτική εταιρεία. Το χρηματοδοτικό σχήμα που θα υιοθετηθεί παρατίθεται στον πίνακα 5.7 που ακολουθεί.

Ίδια κεφάλαια	30%	x	Αρχικό κόστος επένδυσης	i) 2840484 € ii) 1190484 €
Επιχορήγηση	35%	x	Αρχικό κόστος επένδυσης	i) 3313898 € ii) 1388898 €
Δανεισμός (Επιτόκιο δανεισμού $i_{\delta}=7\%$ με περίοδο αποπληρωμής 10 έτη)	35%	x	Αρχικό κόστος επένδυσης	i) 3313898 € ii) 1388898 €
			Σύνολο	i) 9468280 € ii) 3968280 €

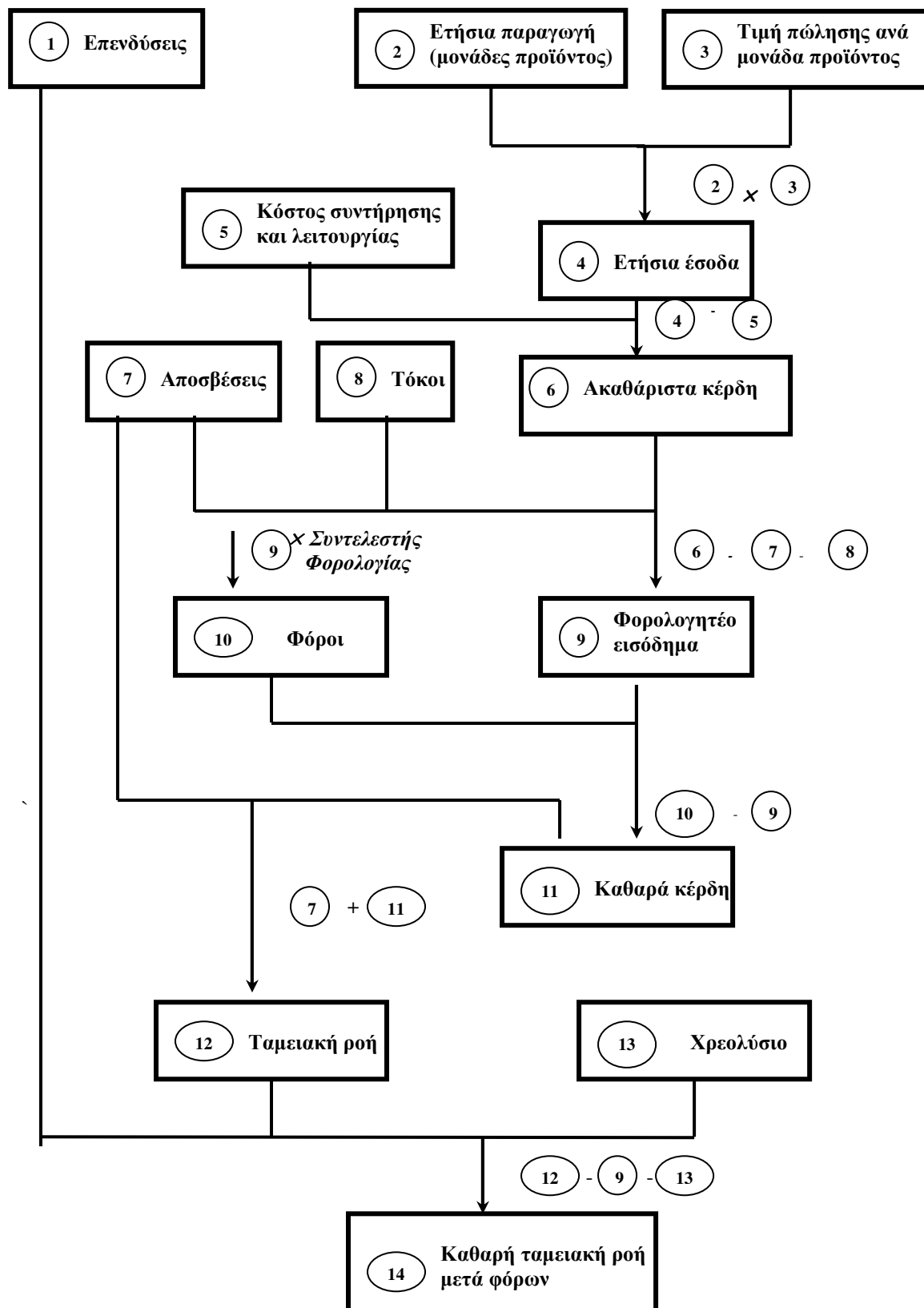
Πίνακας 5.7 Χρηματοδοτικό σχήμα

Τα υπόλοιπα οικονομικά στοιχεία όπως ορίστηκαν προθύστερα αναγράφονται στον πίνακα 5.8.

Τοκοχρεολύσιο (επιτόκιο δανεισμού $i_{\delta}=7\%$)	$\frac{35\% \cdot i_{\delta}}{1 - (1 + i_{\delta})^{-k}}$	x	Αρχικό κόστος επένδυσης	i) 471825 € ii) 197748 €
Αποσβέσεις (περίοδος απόσβεσης 15 έτη, ετήσιος συντελεστής 6.67%)	$(1-35\%) \cdot 6.67\%$	x	Αρχικό κόστος επένδυσης	i) 410497 € ii) 172045 €
Συντελεστής φορολογίας	35%			-
Υπολειμματική αξία (τιμή εκποίησης)	0%	x	Αρχικό κόστος επένδυσης	0 €

Πίνακας 5.8 Λοιπά οικονομικά στοιχεία

Ο πίνακας ταμειακών ροών με βάση τον οποίο θα εφαρμοστούν τα κριτήρια αξιολόγησης παρατίθεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής του σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα ροής ταμειακών ροών

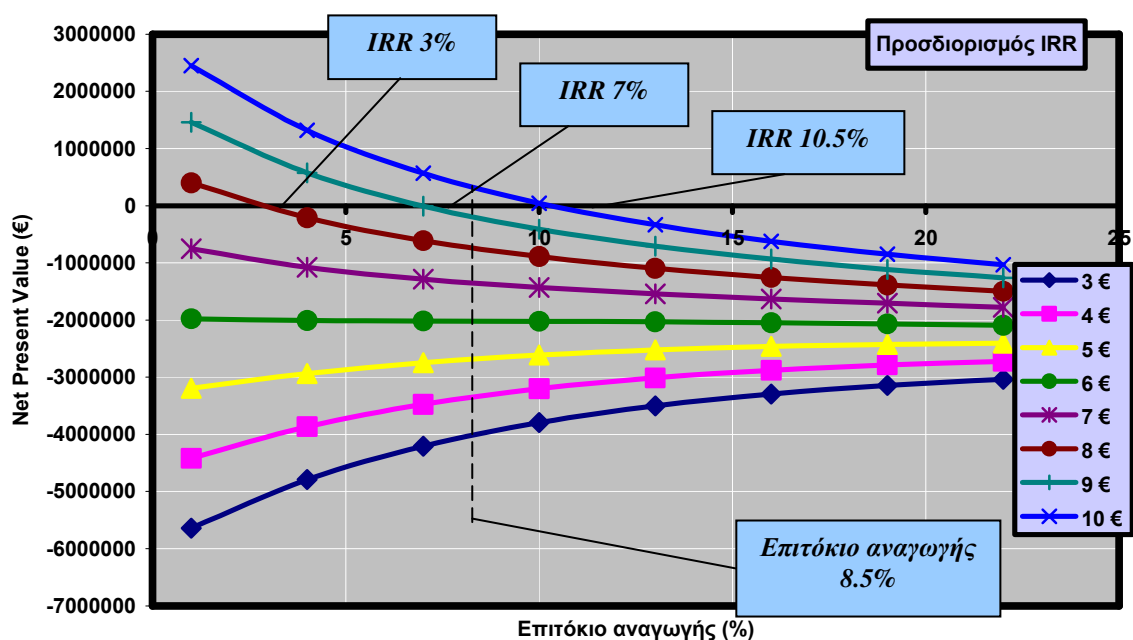
5.3.1 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Χερίστη Εκτίμηση Κόστους

5.3.1.1 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Αποκλειστική Παραγωγή Νερού

Στον πίνακα 5.9 και το σχήμα 5.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την παραμετρική ανάλυση της οικονομικής αξιολόγησης του επενδυτικού σχεδίου (χερίστη περίπτωση).

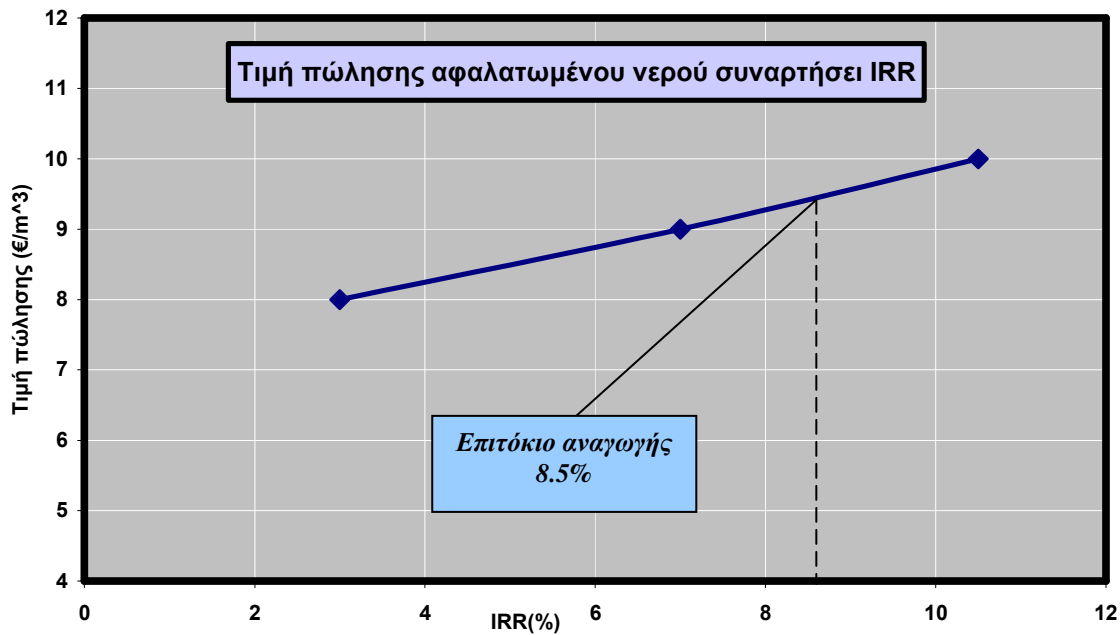
Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού (€/m ³)	Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)	Net Present Value (NPV)	Internal Rate of Return (IRR)
3	>21έτη	-3981795 €	-
4	>21έτη	-3326767 €	-
5	>21 έτη	-2671738 €	-
6	>21 έτη	-2016709 €	-
7	>21 έτη	-1361681 €	-
8	19.5 έτη	-759917 €	3%
9	7έτη	-225342 €	7%
10	5.5 έτη	284737 €	10.5 %

Πίνακας 5.9 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού



Σχήμα 5.2 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού

Στο σχήμα 5.3 παρατίθεται η τιμή διάθεσης του αφαλατωμένου νερού συναρτήσει του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 5.3 Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού συναρτήσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

Από τα σχήματα 5.2, 5.3 και τον πίνακα 5.9 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τιμή πώλησης $3\text{€/m}^3 \sim 7\text{€/m}^3$ αφαλατωμένου νερού δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα δεδομένου ότι $\text{NPV} < 0$, ο IRR δεν υπάρχει καθώς η εξίσωση (5.7) δε μπορεί να ικανοποιηθεί για οποιοδήποτε επιτόκιο αναγωγής και η περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου είναι μεγαλύτερη του χρόνου ζωής του επενδυτικού σχεδίου. Επιπροσθέτως, οι τιμές πώλησης 8€/m^3 και 9€/m^3 με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης IRR και NPV κρίνονται ως οικονομικά ασύμφορες διότι $\text{IRR} < 8.5\%$ (3% και 7% αντίστοιχα) και $\text{NPV} < 0$ (-759917 € και -225342 € αντίστοιχα) παρόλο που η περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου είναι μικρότερη από το χρόνο ζωής της επένδυσης (19.5 έτη και 7 έτη αντίστοιχα). Για το λόγο αυτό η πολιτική διάθεσης του αφαλατωμένου νερού σε τιμές 8€/m^3 και 9€/m^3 θα πρέπει να απορριφθεί. Αντίθετα, η τιμή διάθεσης των 10€/m^3 πληρεί και τα 3 τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Όμως σύμφωνα με το καθεστώς που επικρατεί στο σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων και επομένως στη Νίσυρο, το νερό διατίθεται σε τιμή 5.35€/m^3 που είναι πολύ χαμηλότερη από την προτεινόμενη τιμή πώλησης από τη μονάδα αφαλάτωσης και καθιστά μη ελκυστική την επιλογή κατασκευής του εν λόγω έργου. Θα πρέπει να ληφθεί όμως υπόψη πως η κατανάλωση από τις μεμβράνες αφαλάτωσης

ανέρχεται σε $\bar{N}_p = 16.95kW$ ενώ το αιολικό πάρκο παράγει ισχύ $\bar{N}_{ΑΙΓ,ολ} = 5 \cdot 52.61 = 263.05kW$ και επομένως υπάρχει περίσσεια ισχύος η οποία παραμένει αναξιοποίητη. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση της μονάδας που ενδεχομένως να μειώσει και την τιμή διάθεσης του αφαλατωμένου νερού. Ακολούθως θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση της περίπτωσης διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός βελτίωσης της απόδοσης επενδυτικού σχεδίου.

5.3.1.2 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Συμπαγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Αφαλατωμένου Νερού

Η περίσσεια προς αξιοποίηση ισχύς θα είναι :

$$\Delta \bar{N} = \bar{N}_{ΑΙΓ,ολ} - \bar{N}_p = 263.05 - 16.95 = 246.1kW \quad (5.8)$$

και επομένως η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι:

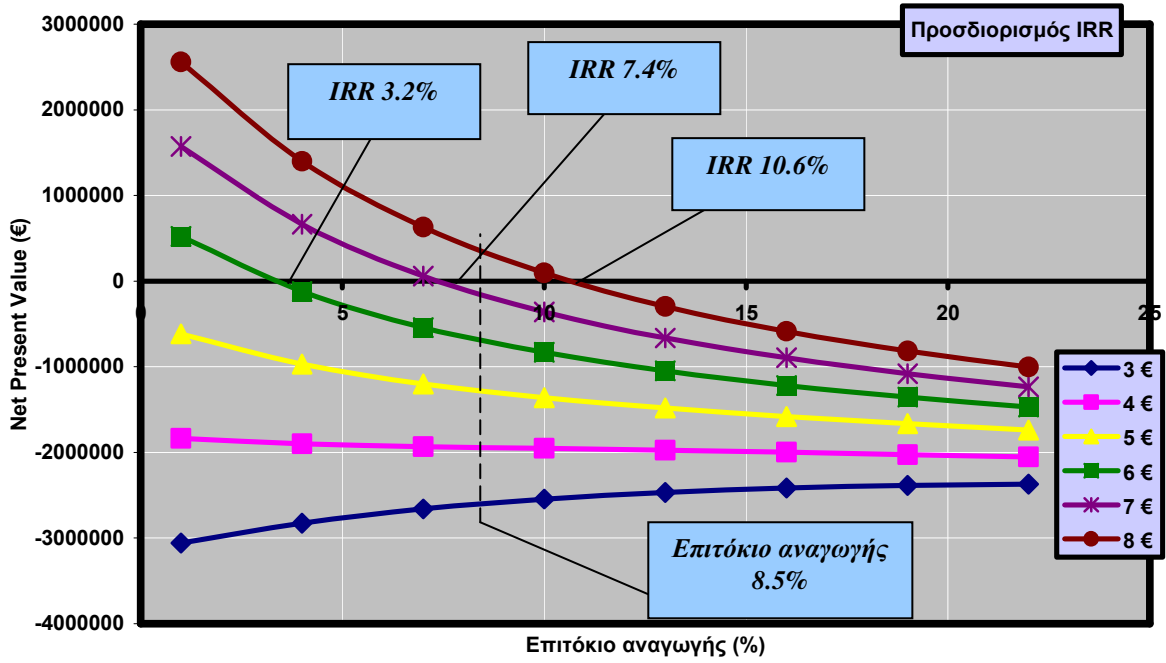
$$E_{el} = \Delta \bar{N} \cdot 8760h/έτος = 246.1 \cdot 8760 = 2155836kWh \quad (5.9)$$

ενώ η τιμή πώλησης της ενέργειας επιλέγεται **0.07 €/kWh**. Με βάση την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την τιμή πώλησης αυτής προκύπτει ότι τα ετήσια έσοδα λόγω της δραστηριότητας αυτής είναι **150908 €/έτος**.

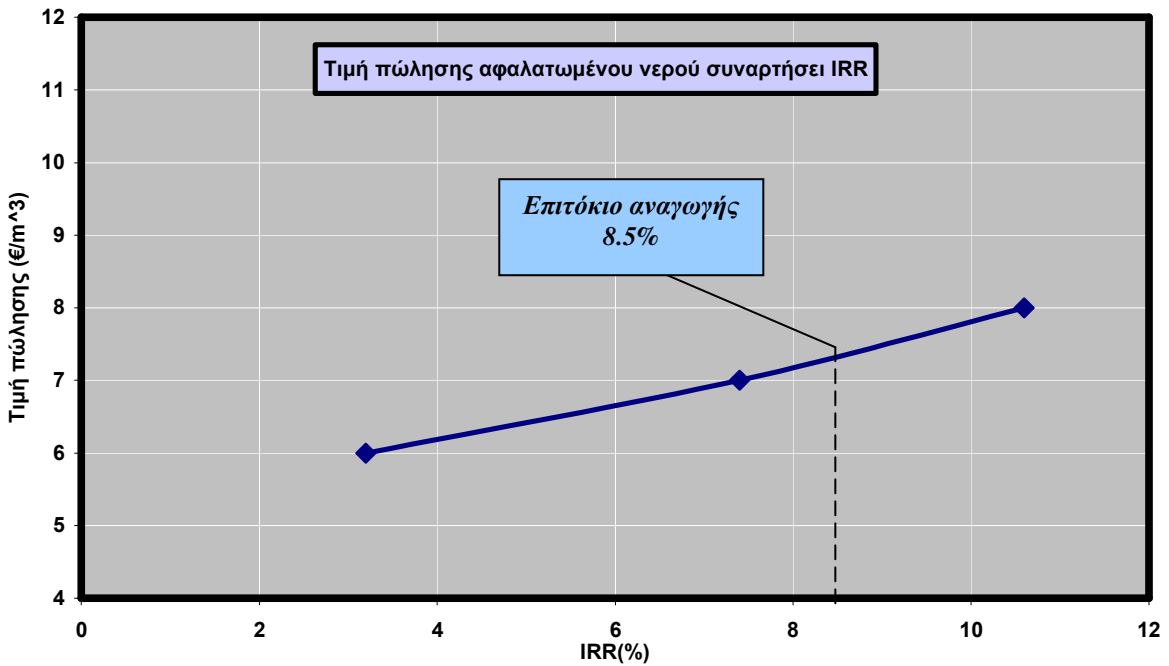
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης συμπαγωγής αφαλατωμένου νερού και ηλεκτρικής ενέργειας παρατίθενται στον πίνακα 5.10 και στα σχήματα 5.4, 5.5.

Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού (€/m ³)	Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)	Net Present Value (NPV)	Internal Rate of Return (IRR)
3	>21έτη	-2597238 €	-
4	>21έτη	-1942210 €	-
5	>21 έτη	-2671738 €	-
6	19.1 έτη	-698359 €	3.2 %
7	6 έτη	-165656 €	7.4 %
8	5.5 έτη	340362 €	10.6 %

Πίνακας 5.10 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού



Σχήμα 5.4 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού



Σχήμα 5.5 Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού συναρτῆσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

Από τα σχήματα 5.4, 5.5 και τον πίνακα 5.10 φαίνεται ότι για τιμές πώλησης του νερού από 3€/m³~7€/m³ το σχέδιο επένδυσης είναι ασύμφορο διότι δεν πληρούνται και τα τρία τιθέμενα

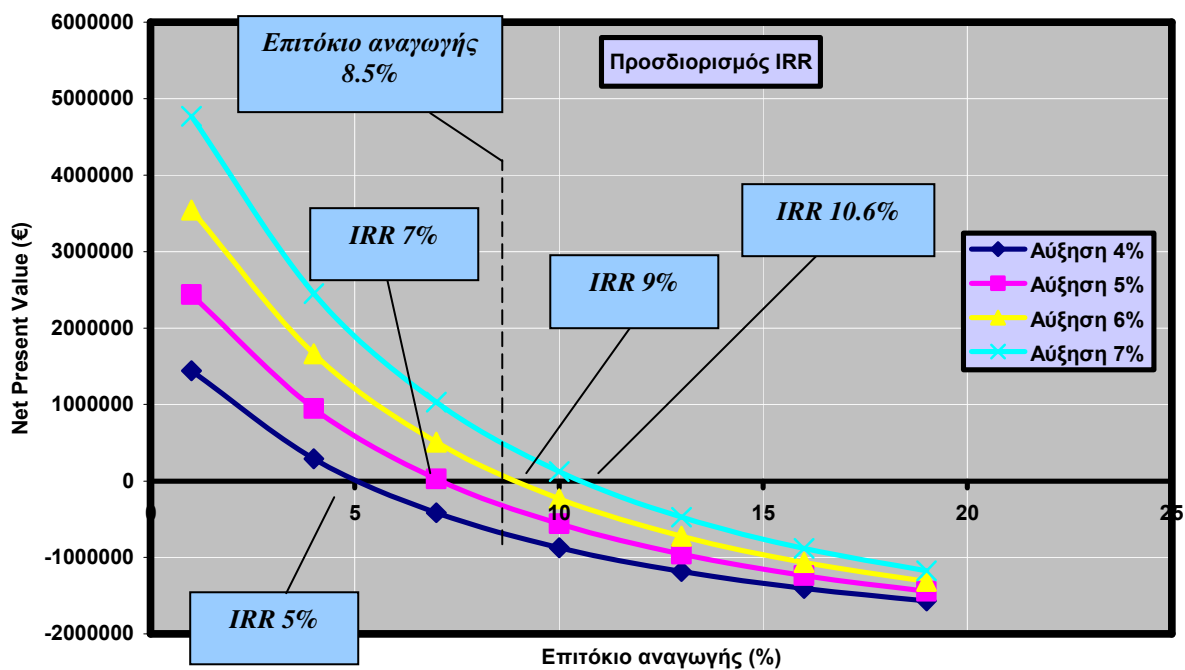
κριτήρια αξιολόγησης. Αντίθετα, για τιμή πώλησης 8€/m^3 το σχέδιο επένδυσης είναι αποδεκτό δεδομένου ότι $NPV > 0$, $IRR > 8.5\%$ και η περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου είναι 5.5 έτη. Με τη συμπαραγωγή αφαλατωμένου νερού και ηλεκτρικής ενέργειας η τιμή πώλησης του νερού δύναται να μειωθεί κατά 2€/m^3 . Όμως δεν είναι αρκετά σημαντική η μείωση της τιμής πώλησης του νερού έτσι ώστε να καταστεί ελκυστική η αγορά του από τους κατοίκους της Νισύρου. Για το λόγο αυτό θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει ενδεχόμενη ετήσια αύξηση της τιμής πώλησης του νερού.

5.3.1.3 Ετήσια Αύξηση της Τιμής Πώλησης του Παραγόμενου Αφαλατωμένου Νερού

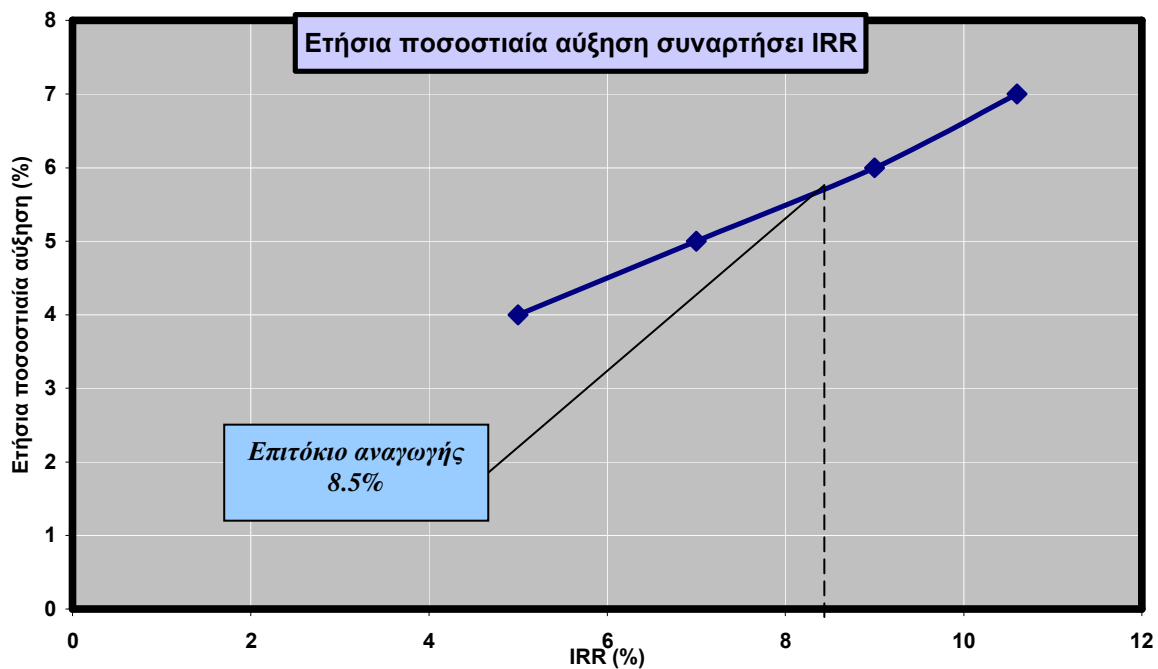
Λόγω της ύπαρξης του πληθωρισμού που συνεπάγεται σταδιακή μείωση της αξίας του χρήματος θα μπορούσε να διενεργείται μία αύξηση της τιμής πώλησης του νερού κατά συγκεκριμένο ποσοστό κάθε έτος. Στη συγκεκριμένη διερεύνηση θα εξεταστεί για αρχική τιμή πώλησης 4€/m^3 και 5€/m^3 ποια θα μπορούσε να είναι η ετήσια ποσοστιαία αύξηση προκειμένου η επένδυση να καταστεί συμφέρουσα και αποδεκτή. Τα αποτελέσματα της εν λόγω διερεύνησης συνοψίζονται στον πίνακα 5.11, στα σχήματα 5.6 και 5.7 για τιμή πώλησης 4€/m^3 και στον πίνακα 5.12, στα σχήματα 5.8 και 5.9 για τιμή πώλησης 5€/m^3 .

<i>Ποσοστιαία αύξηση τιμής πώλησης αφαλατωμένου νερού (%)</i>	<i>Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)</i>	<i>Net Present Value (NPV)</i>	<i>Internal Rate of Return (IRR)</i>
4	17.2 έτη	-669578 €	5%
5	14.3 έτη	-298566 €	7%
6	12.1 έτη	97916 €	9%
7	10.5 έτη	529049 €	10.6%

Πίνακας 5.11 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 4€/m^3)



Σχήμα 5.6 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 4€/m³)

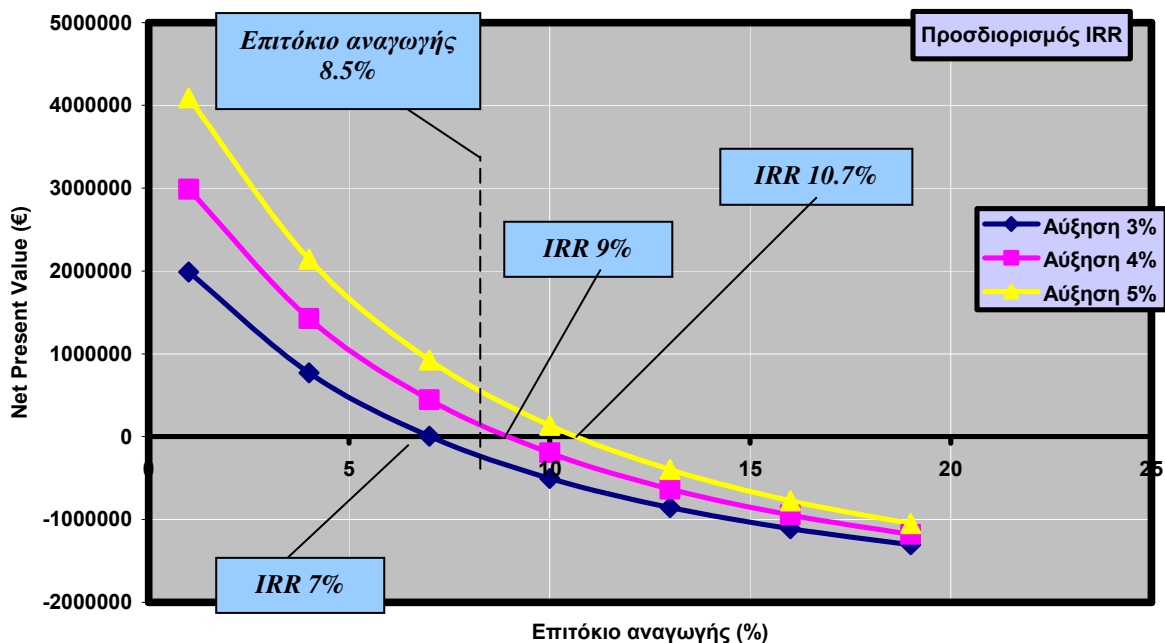


Σχήμα 5.7 Ετήσια ποσοστιαία αύξηση συναρτήσκει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (τιμή πώλησης 4€/m³)

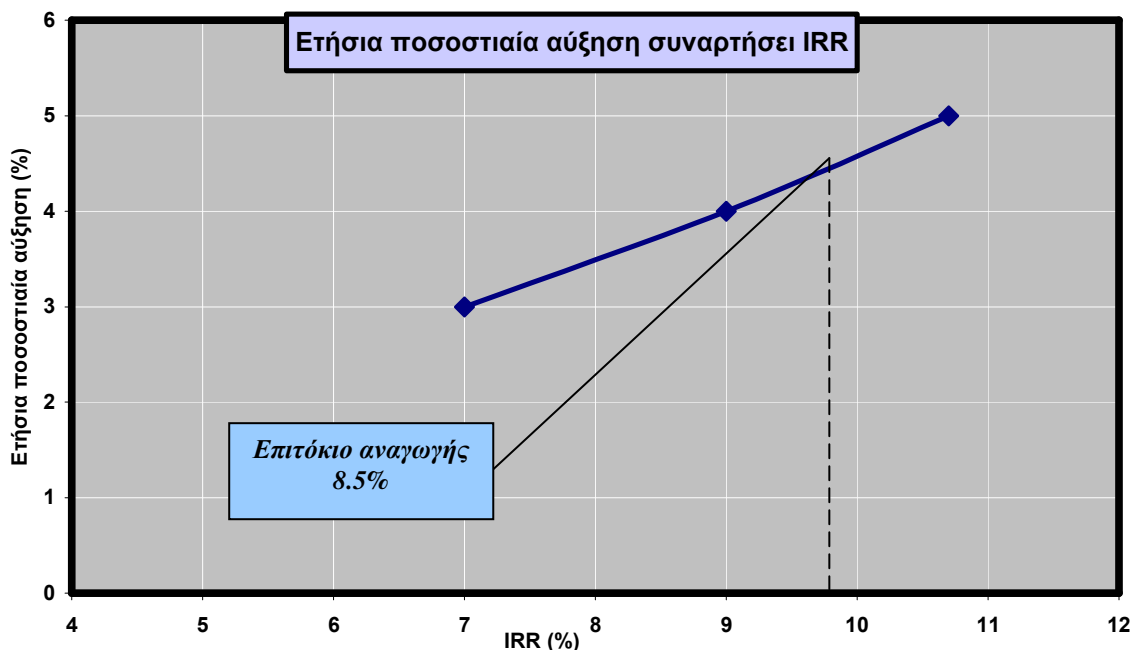
Από τα σχήματα 5.6, 5.7 και τον πίνακα 5.11 εξάγεται το συμπέρασμα ότι με ποσοστιαία αύξηση 4% και 5% η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα διότι δεν ικανοποιούνται και τα τρία τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Επιπρόσθετα, για ποσοστιαία αύξηση 6% και 7% η επένδυση είναι αποδεκτή δεδομένου ότι $IRR > 8.5\%$, $NPV > 0$ με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 12.1έτη και 10.5έτη αντίστοιχα. Είναι έκδηλο ότι θα επιλεγεί η μικρότερη δυνατή ποσοστιαία αύξηση δηλαδή η 6%.

Ποσοστιαία αύξηση τιμής πώλησης αφαλατωμένου νερού (%)	Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)	Net Present Value (NPV)	Internal Rate of Return (IRR)
3	13.1 έτη	-274509 €	7%
4	10.2 έτη	93801 €	9%
5	8.4 έτη	490342 €	10.7%

Πίνακας 5.12 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 5€/m³)



Σχήμα 5.8 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 5€/m³)



Σχήμα 5.9 Ετήσια ποσοστιαία αύξηση συναρτήσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (τιμή πώλησης 5€/m³)

Από τα σχήματα 5.8, 5.9 και τον πίνακα 5.12 εξάγεται το συμπέρασμα ότι με ποσοστιαία αύξηση 3% η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα διότι δεν ικανοποιούνται και τα τρία τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Αντίθετα, για ποσοστιαία αύξηση 4% και 5% η επένδυση είναι αποδεκτή δεδομένου ότι $IRR > 8.5\%$, $NPV > 0$ με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 10.2 έτη και 8.4 έτη αντίστοιχα. Είναι έκδηλο ότι θα επιλεγεί η μικρότερη δυνατή ποσοστιαία αύξηση δηλαδή η 4%.

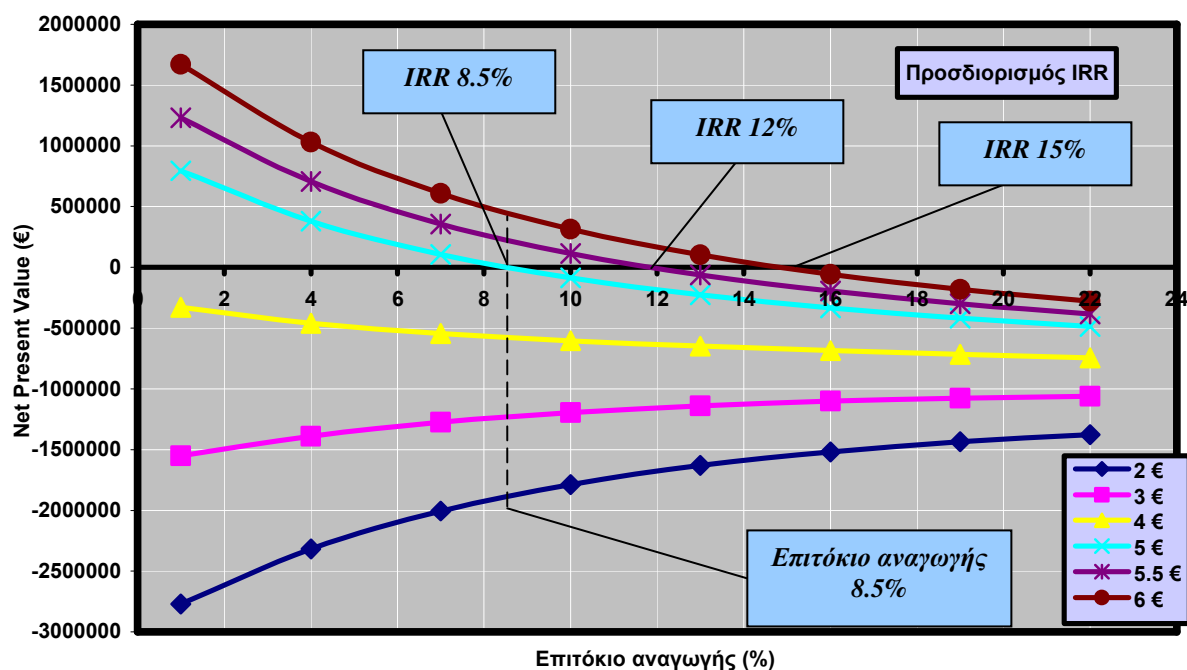
5.3.2 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Βέλτιστη Εκτίμηση Κόστους

5.3.2.1 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Αποκλειστική Παραγωγή Νερού

Στον πίνακα 5.13 και τα σχήματα 5.10 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την παραμετρική ανάλυση της οικονομικής αξιολόγησης του επενδυτικού σχεδίου (βέλτιστη περίπτωση). Σύμφωνα με την περίπτωση της βέλτιστης αξιολόγησης της επένδυσης δε λαμβάνονται υπόψη το κόστος της δεξαμενής ενώ το κόστος σύζευξης ανεμογεννήτριας-φυγοκεντρικής αντλίας εκτιμάται ως 200000 €/Α/Γ.

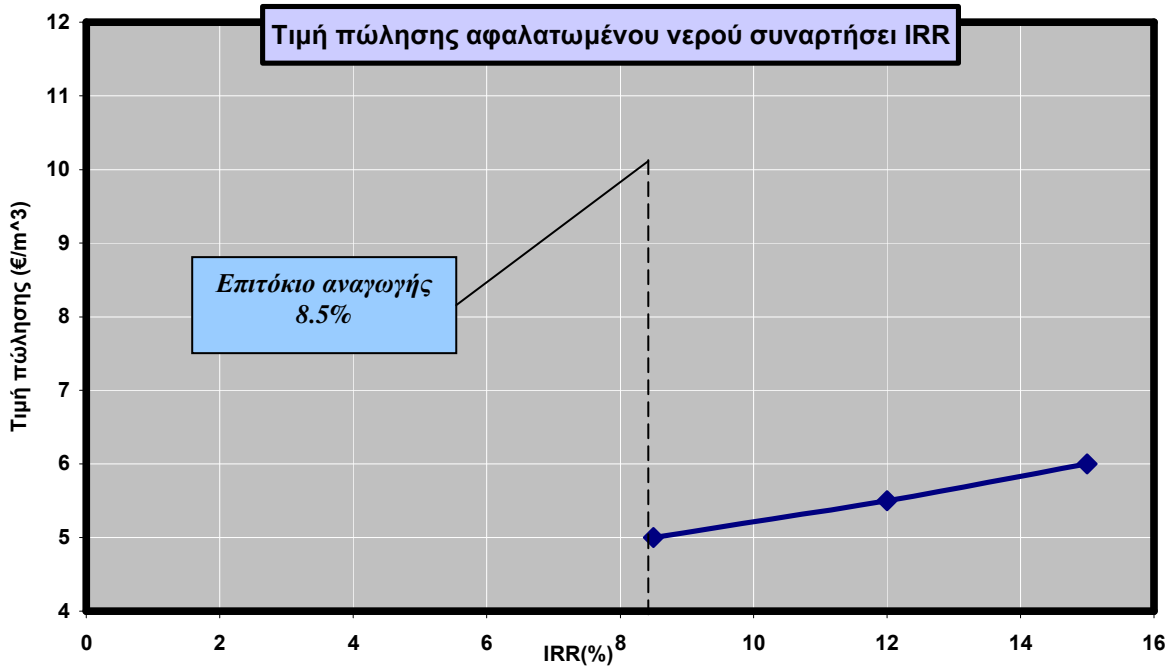
Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού (€/m ³)	Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)	Net Present Value (NPV)	Internal Rate of Return (IRR)
2	>21έτη	-1886257 €	-
3	>21έτη	-1231228 €	-
4	>21 έτη	-576200 €	-
5	5.8 έτη	1434 €	8.5 %
5.5	5.2	225195	12 %
6	4.9 έτη	448957 €	15 %

Πίνακας 5.13 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού



Σχήμα 5.10 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού

Στο σχήμα 5.11 παρατίθεται η τιμή διάθεσης του αφαλατωμένου νερού συναρτήσει του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 5.11 Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού συναρτήσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

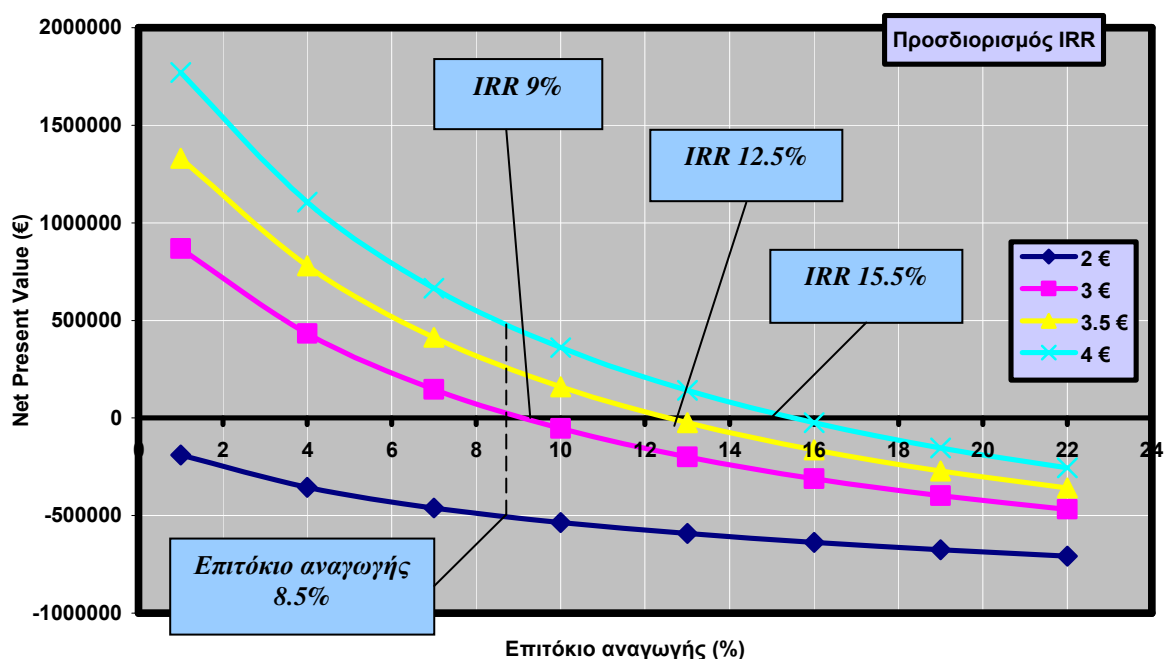
Από τα σχήματα 5.10, 5.11 και τον πίνακα 5.13 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τιμή πώλησης $2\text{€/m}^3 \sim 4\text{€/m}^3$ αφαλατωμένου νερού δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα δεδομένου ότι $NPV < 0$, ο IRR δεν υπάρχει καθώς η εξίσωση (5.7) δε μπορεί να ικανοποιηθεί για οποιοδήποτε επιτόκιο αναγωγής και η περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου είναι μεγαλύτερη του χρόνου ζωής του επενδυτικού σχεδίου. Επιπροσθέτως, η τιμή πώλησης των 5 €/m^3 με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης IRR και NPV καθιστά την επένδυση οριακή ως προς την αποδοτικότητά της διότι $IRR = 8.5\%$ και $NPV = 1434\text{€}$ παρόλο που η περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου είναι μικρότερη από το χρόνο ζωής της επένδυσης (5.8 έτη). Για το λόγο αυτό η πολιτική διάθεσης του αφαλατωμένου νερού στην τιμή των 5€/m^3 θα πρέπει να απορριφθεί. Αντίθετα, για τιμή διάθεσης μεγαλύτερη των 5€/m^3 πληρούνται και τα 3 τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Επομένως υπάρχει δυνατότητα να διατίθεται το νερό σε τιμή παρόμοια με αυτή που διατίθεται το νερό στα Δωδεκάνησα υπό το υπάρχον καθεστώς (5.35 €/m^3). Όπως αναφέρθηκε στις παραγράφους 5.3.1.1 και 5.3.1.2 η εγκατάσταση αφαλάτωσης δύναται να αξιοποιηθεί και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την τιμή διάθεσης του παραγόμενου νερού. Ακολούθως θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση της περίπτωσης διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός βελτίωσης της απόδοσης επενδυτικού σχεδίου.

5.3.2.2 Αξιολόγηση Μονάδας Αφαλάτωσης με Συμπαράγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Αφαλατωμένου Νερού

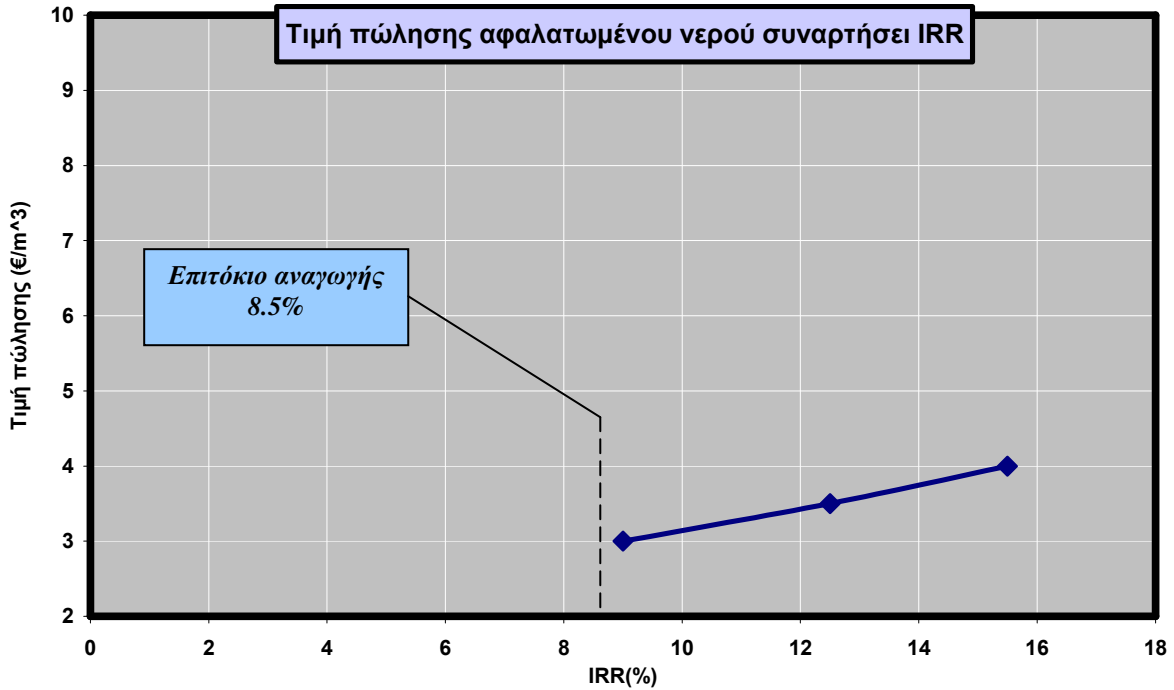
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης συμπαράγωγής αφαλατωμένου νερού και ηλεκτρικής ενέργειας παρατίθενται στον πίνακα 5.14 και στα σχήματα 5.12, 5.13.

Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού (€/m ³)	Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)	Net Present Value (NPV)	Internal Rate of Return (IRR)
2	>21έτη	-501700 €	-
3	5.7 έτη	37466 €	9 %
3.5	5.1 έτη	276095 €	12.5 %
4	4.9 έτη	499856 €	15.5 %

Πίνακας 5.14 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού



Σχήμα 5.12 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές πώλησης αφαλατωμένου νερού



Σχήμα 5.13 Τιμή πώλησης αφαλατωμένου νερού συναρτήσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

Από τα σχήματα 5.12, 5.13 και τον πίνακα 5.14 φαίνεται ότι για τιμή πώλησης του νερού 2€/m^3 το σχέδιο επένδυσης είναι ασύμφορο διότι δεν πληρούνται και τα τρία τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Αντίθετα, για τιμές πώλησης που κυμαίνονται μεταξύ $3\text{€/m}^3 \sim 3.5\text{€/m}^3$ το σχέδιο επένδυσης είναι αποδεκτό δεδομένου ότι $NPV > 0$, $IRR > 8.5\%$ με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου που κυμαίνεται μεταξύ 5.1~4.9έτη αντίστοιχα. Είναι έκδηλο ότι για τιμή διάθεσης νερού 4€/m^3 η επένδυση θεωρείται ιδιαίτερα προσοδοφόρος. Με τη συμπαραγωγή αφαλατωμένου νερού και ηλεκτρικής ενέργειας η τιμή πώλησης του νερού δύναται να μειωθεί κατά 2€/m^3 συγκρινόμενη με αυτήν της παραγράφου 5.3.1.1 γεγονός που καθιστά ελκυστική την αγορά του από τους κατοίκους της Νισύρου. Η τιμή πώλησης του νερού δύναται να μειωθεί επιπρόσθετα με τη διενέργεια περιοδικής αύξησης στην τιμή διάθεσης λόγω της ύπαρξης του φαινομένου του πληθωρισμού. Στην παράγραφο που ακολουθεί θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει ενδεχόμενη περιοδική αύξηση της τιμής πώλησης του νερού.

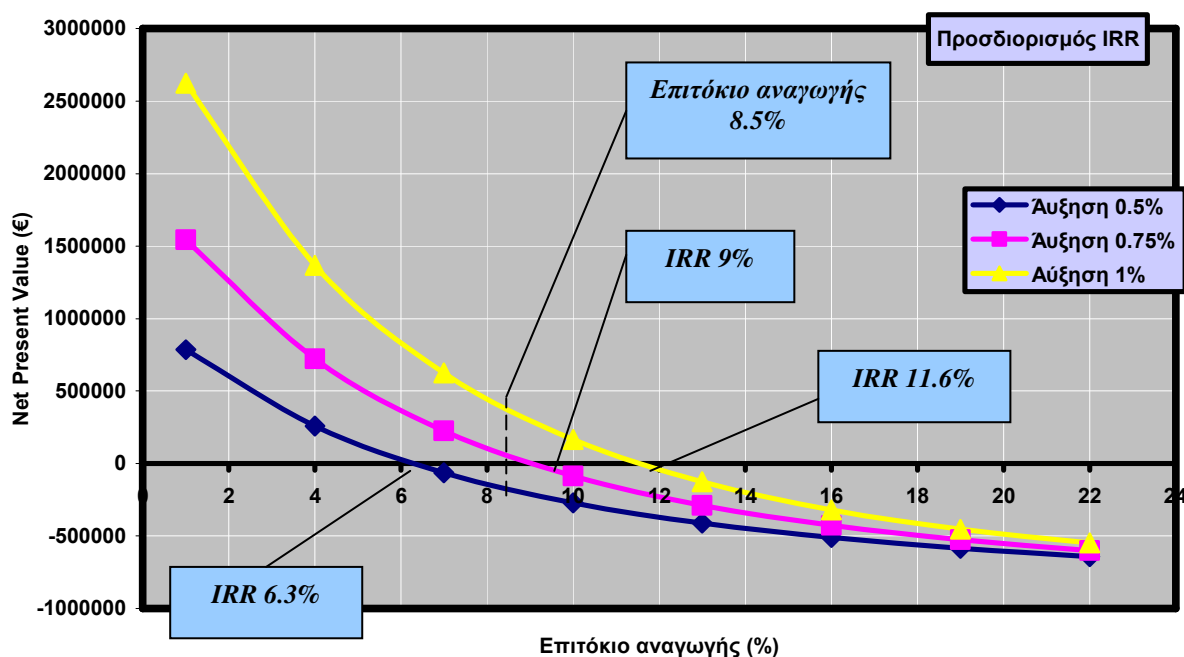
5.3.2.3 Ετήσια Αύξηση της Τιμής Πώλησης του Παραγόμενου Αφαλατωμένου Νερού

Στη συγκεκριμένη διερεύνηση θα εξεταστεί για αρχική τιμή πώλησης 1.5€/m^3 και 2€/m^3 ποια θα μπορούσε να είναι η περιοδική ποσοστιαία αύξηση προκειμένου η επένδυση να καταστεί

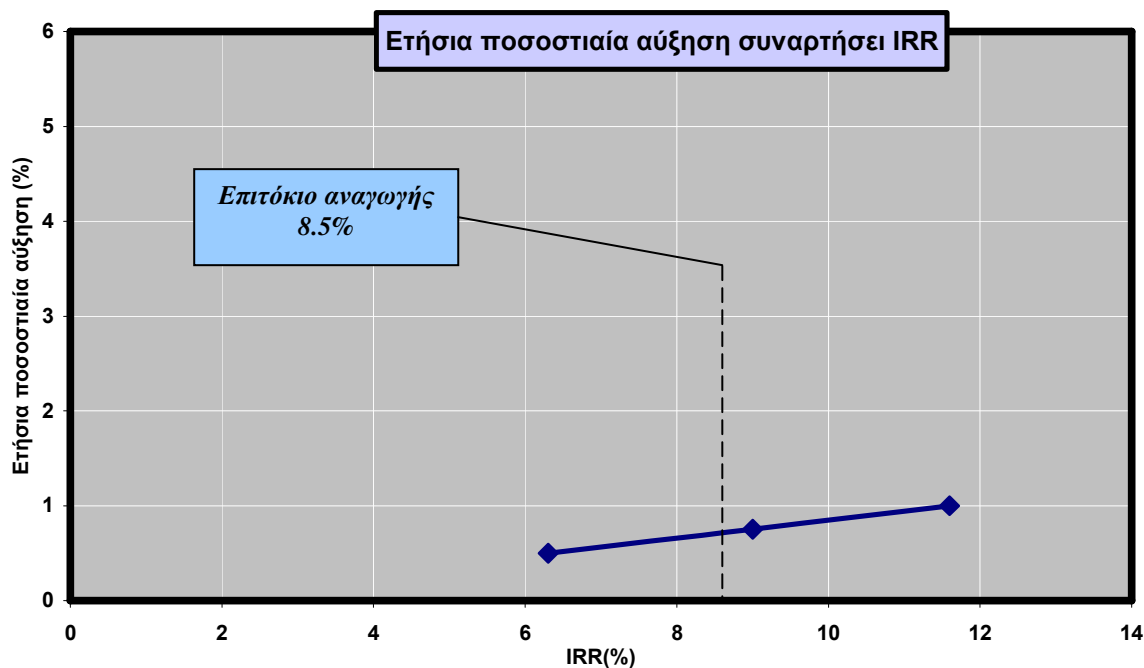
συμφέρουσα και αποδεκτή. Τα αποτελέσματα της εν λόγω διερεύνησης συνοψίζονται στον πίνακα 5.15, στα σχήματα 5.14, 5.15 για τιμή πώλησης 1€/m³ και στον πίνακα 5.16, στα σχήματα 5.16, 5.17 για τιμή πώλησης 2€/m³.

Ποσοστιαία αύξηση τιμής πώλησης αφαλατωμένου νερού (%)	Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)	Net Present Value (NPV)	Internal Rate of Return (IRR)
0.5	17.7 έτη	-178474 €	6.3 %
0.75	13.5 έτη	53117 €	9 %
1	11.7 έτη	368367 €	11.6 %

Πίνακας 5.15 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 2€/m³)



Σχήμα 5.14 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 2€/m³)

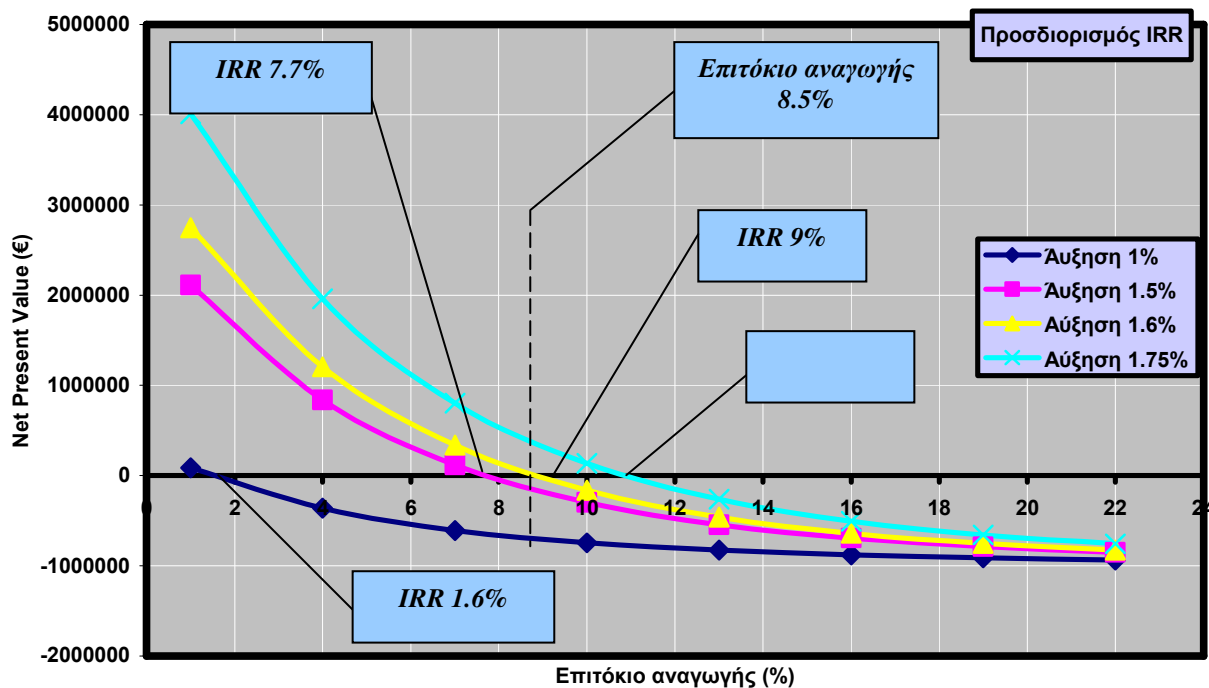


Σχήμα 5.15 Ετήσια ποσοστιαία αύξηση συναρτήσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (τιμή πώλησης 2€/m³)

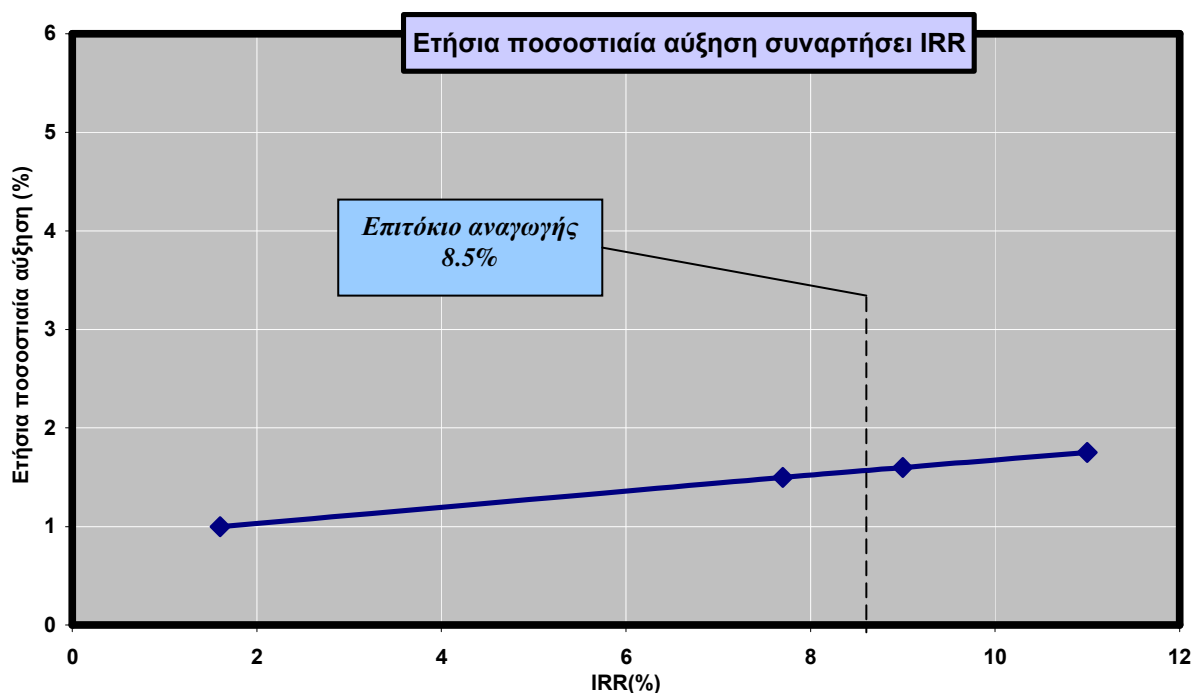
Από τα σχήματα 5.14, 5.15 και τον πίνακα 5.15 εξάγεται το συμπέρασμα ότι με ποσοστιαία αύξηση 0.5% η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα διότι δεν ικανοποιούνται και τα τρία τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Επιπρόσθετα, για ποσοστιαία αύξηση 0.75% και 1% η επένδυση είναι αποδεκτή δεδομένου ότι $IRR > 8.5\%$, $NPV > 0$ με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 13.5έτη και 11.7έτη αντίστοιχα. Είναι έκδηλο ότι θα επιλεγεί η μικρότερη δυνατή ποσοστιαία αύξηση δηλαδή η 0.75%.

<i>Ποσοστιαία αύξηση τιμής πώλησης αφαλατωμένου νερού (%)</i>	<i>Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου (έτη)</i>	<i>Net Present Value (NPV)</i>	<i>Internal Rate of Return (IRR)</i>
1	20.2 έτη	-686064 €	1.6 %
1.5	17.4 έτη	-117089 €	7.7 %
1.6	17 έτη	54970 €	9 %
1.75	16.3 έτη	424792 €	11 %

Πίνακας 5.15 Οικονομική απόδοση επενδυτικού σχεδίου για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 1€/m³)



Σχήμα 5.16 Προσδιορισμός του IRR για διάφορες τιμές ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης (τιμή πώλησης 1€/m³)



Σχήμα 5.17 Ετήσια ποσοστιαία αύξηση συναρτήσει εσωτερικού βαθμού απόδοσης (τιμή πώλησης 1€/m³)

Από τα σχήματα 5.16, 5.17 και τον πίνακα 5.15 εξάγεται το συμπέρασμα ότι με ποσοστιαία αύξηση 1.5% και 1.6% η επένδυση δεν είναι συμφέρουσα διότι δεν ικανοποιούνται και τα τρία τιθέμενα κριτήρια αξιολόγησης. Αντίθετα, για ποσοστιαία αύξηση 9% και 11% η επένδυση είναι αποδεκτή δεδομένου ότι $IRR > 8.5\%$, $NPV > 0$ με περίοδο ανάκτησης κεφαλαίου 17 έτη και 16.3 έτη αντίστοιχα. Είναι έκδηλο ότι θα επιλεγεί η μικρότερη δυνατή ποσοστιαία αύξηση δηλαδή η 1.6%.

5.4 Περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη

Ένα από τα βασικότερα οφέλη που αποκομίζεται από την εγκατάσταση αφαλάτωσης είναι η εξοικονόμηση καυσίμου καθώς και ο περιορισμός εκπομπής αερίων θερμοκηπίου. Θα υπολογιστεί ποια θα ήταν η κατανάλωση καυσίμου από ένα συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας ο οποίος θα τροφοδοτεί το σύστημα αφαλάτωσης του νερού και ακόλουθα θα προσδιοριστεί η ποσότητα των ρύπων που εκπέμπεται από αυτόν. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.3.1 η συνολική ισχύς που αξιοποιείται για αφαλάτωση θαλασσινού νερού και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι $\bar{N}_{ΑΓ,ολ} = 5 \cdot 52.61 = 263.05 kW$ ενώ η ετήσια παραγόμενη ενέργεια θα είναι

$$E_{el,ολ} = \bar{N}_{ΑΓ,ολ} \cdot 8760h/έτος = 263.05 \cdot 8760 = 2304318 kWh \quad (5.10)$$

Ο συμβατικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί ως καύσιμο μαζούτ το οποίο έχει **ειδική κατανάλωση 0.263 kg/kWh** και το κόστος αγοράς του είναι **0.148€/kg καυσίμου**. Επιπρόσθετα θεωρείται ότι ο βαθμός απόδοσης μετατροπής της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου είναι **30%**. Το ποσοστό αυτό υποδηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που τελικά είναι αξιοποιήσιμο από τη μονάδα αφαλάτωσης. Με βάση το βαθμό απόδοσης μετατροπής της θερμογόνου δύναμης του χρησιμοποιούμενου καυσίμου η ενέργεια που θα πρέπει να παραχθεί ετησίως από το συμβατικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι:

$$E = \frac{E_{el,ολ}}{30\%} = \frac{2304318 kWh}{30\%} = 7681060 kWh \text{ ή } 7681.06 MWh \quad (5.11)$$

και επομένως το καύσιμο που θα καταναλωθεί θα είναι:

$$m_{μαζούτ} = E \cdot \left(\begin{array}{c} \text{ειδική} \\ \text{κατανάλωση} \\ \text{καυσίμου} \end{array} \right) = 0.263 kg/kWh \cdot 7681060 kWh = 2020.119t \text{ μαζούτ} \quad (5.12)$$

Το ποσό που θα δαπανηθεί για την αγορά του μαζούτ θα είναι:

$$K = m_{\text{μαζούτ}} \cdot \left(\begin{array}{c} \text{τιμή} \\ \text{αγοράς} \\ \text{μαζούτ} \end{array} \right) = 2020119 \text{kg} \cdot 0.148 \text{€} / \text{kg} = 298978 \text{€} \quad (5.13)$$

Η ποσότητα των εκπεμπόμενων αερίων θερμοκηπίου θα υπολογιστούν σε ισοδύναμους τόνους CO₂. Η μονάδα που χρησιμοποιείται για τι σκοπό αυτό καλείται **GWP (Global Warming Potential)** και σχετίζεται με το βαθμό κατά τον οποίο τα διάφορα αέρια θερμοκηπίου συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ως μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιείται το CO₂ για το οποίο ισχύει **GWP=1**. Ο προσδιορισμός της ισοδύναμης ποσότητας CO₂ θα προέλθει από τον επιμέρους υπολογισμό της ποσότητας CO₂, CH₄ και N₂O που εκπέμπονται από το συμβατικό σταθμό παραγωγής ενέργειας. Για το CH₄ και N₂O ισχύει **GWP=21** και **GWP=310** αντίστοιχα.

Ο συντελεστής εκπομπής των τριών αερίων θερμοκηπίου είναι $\varepsilon_{CO_2} = 278.4 \text{kg} / \text{MWh}$, $\varepsilon_{CH_4} = 0.0108 \text{kg} / \text{MWh}$ και $\varepsilon_{N_2O} = 0.0072 \text{kg} / \text{MWh}$ και επομένως η συνολική ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων είναι:

$$m_{eq,CO_2} = \varepsilon_{CO_2} \cdot GWP_{CO_2} + \varepsilon_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} + \varepsilon_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O} = 0.281 \text{t}_{CO_2} / \text{MWh} \quad (5.14)$$

Η ετήσια ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων εκπεφρασμένη σε ισοδύναμους τόνους CO₂ υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$M_{eq,CO_2} = m_{eq,CO_2} \cdot E = 2158.4 \text{t}_{CO_2} / \text{έτος} \quad (5.15)$$

Συνοψίζοντας, η ποσότητα καυσίμου που εξοικονομείται είναι 2020.119t μαζούτ/έτος ενώ αποφεύγεται η εκπομπή 2158.4t_{CO₂}/έτος. Η συνολική ποσότητα που εξοικονομείται σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας της εγκατάστασης είναι 42422.499 t μαζούτ και 45326.4t_{CO₂}.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πλειονότητα των μελετών που έχουν δημοσιευθεί στο παρελθόν αναφέρεται σε συστήματα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης τα οποία αξιοποιούν ως πηγή τροφοδοσίας την αιολική ενέργεια εφόσον προηγηθεί μετατροπή της σε ηλεκτρική. Στο σύστημα αυτό που προτείνεται από τη συγκεκριμένη εργασία μονάδα αφαλάτωσης βασίζεται στη μηχανική σύζευξη της ανεμογεννήτριας με την αντλία η οποία τροφοδοτεί με θαλασσινό νερό υπό πίεση τις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Η σύζευξη αυτή περιλαμβάνει περιορισμό των ενεργειακών μετατροπών που συνεπάγεται υψηλότερο βαθμό απόδοσης και απλότητα στην κατασκευή της εγκατάστασης.

Η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση απαιτεί χαμηλή ειδική ενέργεια συγκρινόμενη με αυτή που απαιτείται από τις υπόλοιπες μεθόδους. Το γεγονός αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο ιδανική για εφαρμογή με τροφοδότηση από αιολική ενέργεια δεδομένου ότι ο βαθμός αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού μέσω Α/Γ είναι σχετικά μικρός. Η χαμηλή ειδική ενέργεια δύναται να μειωθεί περαιτέρω με τη χρησιμοποίηση διατάξεων ανάκτησης ενέργειας.

Οι μεμβράνες αφαλάτωσης παρουσιάζουν πολυπαραμετρική συμπεριφορά λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη εργασία αναλύθηκε η συμπεριφορά της μεμβράνης θεωρώντας ως εξαρτημένες μεταβλητές την παροχή προϊόντος και το συντελεστή απόρριψης, ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν η πίεση του νερού τροφοδοσίας, η θερμοκρασία λειτουργίας, ο συντελεστής ανάκτησης και η αλατότητα του νερού τροφοδοσίας. Η μελέτη έδειξε ότι υψηλές τιμές της πίεσης τροφοδοσίας και του συντελεστή ανάκτησης οδηγούν σε υψηλές τιμές της παροχής προϊόντος και του συντελεστή απόρριψης που συνεπάγεται καλύτερη απόδοση του συστήματος. Αντίθετα, χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας

λειτουργίας βελτιώνουν την απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης (υψηλές τιμές συντελεστή ανάκτησης και παροχής προϊόντος). Οι χαμηλές τιμές θερμοκρασίας μπορούν να επιτευχθούν με τη χρησιμοποίηση απλών διατάξεων και την αποφυγή πολύπλοκων μηχανισμών με την εμβάπτιση σωληνώσεων αναρρόφησης θαλασσινού νερού σε μεγαλύτερο βάθος όπου και η θερμοκρασία θα είναι χαμηλότερη συγκριτικά με αυτήν που επικρατεί στην επιφάνειά της. Η αλατότητα του νερού τροφοδοσίας επηρεάζει την απόδοση του συστήματος και συγκεκριμένα χαμηλότερες περιεκτικότητες σε άλατα οδηγούν σε υψηλές τιμές του συντελεστή απόρριψης και της παροχής προϊόντος. Δεδομένου ότι το νερό τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται είναι θαλασσινό νερό (35000 TDS) μία μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος θα ήταν η ανάμειξή του με ποσότητα από το παραγόμενο νερό.

Ένα από τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη του προβλήματος αφορά τη συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή μορφής c της κατανομής Weinbull και της ονομαστικής ταχύτητας της χρησιμοποιούμενης Α/Γ. Θα πρέπει τόσο ο συντελεστής μορφής όσο και η ονομαστική ταχύτητα της Α/Γ να παρουσιάζουν όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση προκειμένου να επιτραπεί η βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Ένα μέγεθος με το οποίο δύναται να εκτιμηθεί ο βαθμός αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας είναι ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας. Στην περίπτωση της μονάδας αφαλάτωσης με μία Α/Γ ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας έλαβε τιμή $CF=0.24$ ενώ στην περίπτωση των 5 Α/Γ ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας έλαβε τιμή $CF=0.35$. Μία παράμετρος στην οποία πρέπει να επιδοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι το μέγεθος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου που θα τροφοδοτήσει τις μεμβράνες αφαλάτωσης προκειμένου να μην υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα. Το μέγεθος αυτό εκτιμάται με βάση το πηλίκο του συντελεστή ισχύος της Α/Γ και της συνολικής ενέργειας που απαιτεί η μονάδα αφαλάτωσης:

$$\text{Εγκατεστημένη Ισχύς Αιολικού Πάρκου} = \frac{\text{Συνολικά Καταναλισκόμενη Ισχύς}}{\text{Συντελεστής Ισχύος Α/Γ}}$$

Το σύστημα αφαλάτωσης παρέχει τη δυνατότητα αύξησης της παροχής αφαλατωμένου νερού προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ενδεχόμενο αύξησης της ζήτησης στο μέλλον. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με τη σύνδεση εν σειρά 10 επιπλέον μεμβρανών. Διαπιστώθηκε ότι η σύνδεση μεμβρανών εν σειρά δεν επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα του αφαλατωμένου νερού δεδομένου ότι η περιεκτικότητα σε TDS δύναται να αυξηθεί έως και 5mg/l ενώ η παροχή μπορεί να ανέλθει από $8.15\text{m}^3/\text{h}$ σε $11.85\text{m}^3/\text{h}$.

Για την τεχνοοικονομική μελέτη της μονάδας αφαλάτωσης χρησιμοποιήθηκαν 3 κριτήρια αξιολόγησης ήτοι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR), η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value, NPV) η περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου και

διερευνήθηκαν η χειρίστη και η βέλτιστη περίπτωση εκτίμησης του κόστους εγκατάστασης. Στην πρώτη περίπτωση το κόστος της δεξαμενής απόθεσης του καθαρού νερού συνυπολογίστηκε στο αρχικό κεφάλαιο και ο εξοπλισμός σύζευξης εκτιμήθηκε 3500000 €. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση δε συμπεριλήφθηκε στο αρχικό κόστος η δεξαμενή απόθεσης του καθαρού νερού ενώ ο εξοπλισμός σύζευξης εκτιμήθηκε σε 1000000 €.

Στη χειρίστη περίπτωση ευρέθηκε ότι η επένδυση είναι συμφέρουσα για τιμή πώλησης του νερού **10€/m³** όταν η μονάδα αφαλάτωσης παράγει αποκλειστικά καθαρό νερό. Η τιμή αυτή διάθεσης δεν είναι ελκυστική για τους κατοίκους της Νισύρου δεδομένου ότι το νερό υπό το υπάρχον καθεστώς μεταφοράς του διατίθεται προς **5.35€/m³**. Με τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το κόστος διάθεσης κατέρχεται στην τιμή των **8€/m³** η οποία εξακολουθεί να αποτελεί μη ελκυστική λύση για το νησί της Νισύρου. Η τιμή διάθεσης δύναται να κατέλθει κάτω από το όριο των **5.35€/m³** και συγκεκριμένα στα **5€/m³** στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα ετήσια αύξηση αυτής κατά **4%** και **4€/m³** στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα ετήσια αύξηση **7%**. Τα δύο προαναφερθέντα ποσοστά αύξησης είναι αρκετά υψηλά με αποτέλεσμα να καθιστούν δυσβάσταχτο το κόστος του νερού μετά την παρέλευση κάποιων ετών.

Στη βέλτιστη περίπτωση ευρέθηκε ότι η επένδυση είναι συμφέρουσα για τιμή πώλησης του νερού μεγαλύτερη των **5€/m³** όταν η μονάδα αφαλάτωσης παράγει αποκλειστικά καθαρό νερό. Η τιμή αυτή διάθεσης μπορεί να θεωρηθεί οριακά αποδεκτή για τους κατοίκους της Νισύρου δεδομένου ότι το νερό υπό το υπάρχον καθεστώς μεταφοράς του, όπως προαναφέρθηκε, διατίθεται προς **5.35€/m³**. Με τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το κόστος διάθεσης κατέρχεται στην τιμή των **3€/m³** η οποία δύναται να θεωρηθεί ως μία ελκυστική λύση για το νησί της Νισύρου. Όμως με την υιοθέτηση πολιτικής ετήσιας επαύξησης της τιμής διάθεσης του νερού, δύναται η πώλησή της να κατέλθει στην τιμή των **2€/m³** στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα ετήσια αύξηση αυτής κατά **0.75%** και **1€/m³** στην περίπτωση που λαμβάνει χώρα ετήσια αύξηση **1.6%**. Δεδομένου ότι μετά την παρέλευση του χρόνου ζωής της επένδυσης το νερό θα διατίθεται προς **2.3€/m³** (που αντιστοιχεί στην ετήσια αύξηση 0.75%) και **1.39€/m³** (που αντιστοιχεί στην ετήσια αύξηση 1.6%) έπεται ότι η τελευταία τιμή πώλησης είναι η πιο ελκυστική.

Εκτός από τη συμφέρουσα τιμή διάθεσης του αφαλατωμένου νερού ιδιαίτερα σημαντική είναι η εξοικονόμηση καυσίμου καθώς και η αποφυγή αέριων ρύπων. Η ποσότητα του μαζούτ που εξοικονομείται ανέρχεται σε **2020.119t/έτος** ενώ η ποσότητα των αέριων ρύπων σε ισοδύναμους τόνους CO₂ που αποφεύγεται να εκλυθεί είναι **2158.4t/έτος**. Θα πρέπει να

τονιστεί πως εξασφαλίζεται ως ένα βαθμό ενεργειακή αυτοτέλεια της Νισύρου που μπορεί να ανακουφίσει την τοπική οικονομία του νησιού.

Βιβλιογραφία

- [1] Al-Enezi Ghazi, Fawzi Nagla (2002): *Design consideration of RO units: case studies*. Desaliantion, 153:281-286.
- [2] Avlonitis A.S., Kouroumbas K., Vlachakis N. (2003): *Energy consumption and membrane replacement cost for seawater RO desalination plants*. Desalination 157: 151-158.
- [3] Darwish A.M., Al Asfour F., Al-Najem N. (2002): *Energy consumption in equivalent work by different desalting methods: case study for Kuwait*. Desaliantion 152: 83-92.
- [4] Cherkassky V.M. (1980): *Pumps fans compressors* (translated from the Russian by B.A. Nikolaev). Mir Publishers, Moscow.
- [5] Filteau Gerry, Moss Peter (1997): *Ultra-low pressure RO membranes:an analysis of performance and cost*. Desaliantion, 113: 147-152.
- [6] Gilau M. Amserom, Small J. Mitchell (2006): *Designing Cost-Effective Sea Water Reverse Osmosis System under Optimal Energy Options for Developing Countries*. Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries, 2006.
- [7] Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Kondili E. (2004): *Renewable energy desalination plants for the Greek islands-technical and economic considerations*. Desalination 170: 187-203.
- [8] Karagiannis C. Ioannis, Soldatos G. Petros (2007): *Current status of water desalination in the Aegean Islands*. Desalination 203: 56-51.
- [9] Kreith Frank (1999): *Mechanical Engineering Handbook*. CRC Press LLC.
- [10] Kurihara Masaru, Yamamura Hiroyuki, Nakanishi Takayuki, Jinno Synichirou (2001): *Operation and reliability of very high-recovery seawater desalination technologies by brine conversion two-stage RO desalination system*. Desaliantion 138: 191-199.
- [11] Liu K.C. Clark, Park Jae-Woo, Migita Reef, Qin Gang (2002): *Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system with feedback control*. Desalination 150: 277-287.
- [12] Loupasis Stylianos (2002): *Renewable Energy Driven Desalination Systems–REDDES: Technical analysis of existing RES desalination schemes*. Altener Programme.
- [13] Mathew Sathayajith, K.P. Pandey (2003): *Modelling the integrated output of wind-driven roto-dynamic pumps*. Renewable Energy 28: 1143-1155

- [14] Mathew Sathayajith (2006): *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Heidelberg, Springer.
- [15] Miranda S.M., Infield D. (2002): *A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries*. *Desalination*, 153:9-16.
- [16] Mohamed Essam Sh., Papadakis G., Mathioulakis E., Belessiotis V. (2006): *An experimental comparative study of the technical and economic performance of a small reverse osmosis desalination system equipped with a hydraulic energy recovery unit*. *Desalination*, 194: 239-250.
- [17] Pestana I., Lattore F., Espinoza C., Gotor A. (2004): *Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind Energ.* *Desalination*, 160: 293-299.
- [18] Redondo A.J., Casanas A. (2001): *Designing seawater RO for clean and fouling RO feed. Desalination experiences with the FilmTec SW30HR-380 and SW30HR-320 elements Technical--economic review*. *Desalination* 134: 83-92.
- [19] Robinson Rod, Ho Goen, Mathew Kuruvilla (1992): *Development of a Reliable Low-Cost Reverse Osmosis Desalination Unit for Remote Communities*. *Desalination* 86: 9-26.
- [20] Rotta J., Pinilla A., (2007): *Performance evaluation of a commercial positive displacement pump for wind-water pumping*. *Renewable Energy* 32: 1790-1804.
- [21] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi (2001): *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- [22] Vogiatzis N., Kotti K., Spanomitsios S., Stoukides M. (2004): *Analysis of wind potential and characteristics in North Aegean, Greece*. *Renewable Energy* 29:1193-1208.
- [23] Voivontas D., Misirlis K., Manoli E., Arampatzis G., Assimacopoulos D., Zervos A. (2001): *A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies*. *Desalination* 133: 175-198.
- [24] Αλεξιάκης Αλέξανδρος (1993): *Αφαλάτωση*. Εκδόσεις Μιχ. Σιδέρη, Αθήνα.
- [25] Ανδρίτσος Ν.: *Βιομηχανικό Νερό: Ποιότητα και Επεξεργασία*. Παρουσίαση στο πλαίσιο του μαθήματος 'Χημεία Περιβάλλοντος' του Τμήματος Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Κοζάνη.
- [26] Δήμας Στ. (2006): *Εισαγωγική Ομιλία*. Πρακτικά Συνεδρίου για την Αειφόρο Ανάπτυξη των Νήσων, 9 Σεπτεμβρίου.
- [27] Κορωναίος Χριστοφής (2006): *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις του Δ.Π.Μ.Σ.–Ε.Μ.Π. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη».

- [28] Μιμίκου Μ.Α., Φωτόπουλος Φ.Σ. (2005): *Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις του Δ.Π.Μ.Σ. –Ε.Μ.Π. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη».
- [29] Μπεργελές Γεώργιος (1995): *Ανεμοκινητήρες*. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [30] Ξηροκόστας Δ.Α. (1990): *Σημειώσεις Αναλύσεως Επενδύσεων και Αναλύσεως Κόστους-Ωφέλους*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις για τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.
- [31] Παπαντώνης Δημήτριος (2002): *Υδροδυναμικές μηχανές αντλίες-υδροστρόβιλοι*. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [32] Ρόκος Δ. (2001): *από τη 'βιώσιμη' ή 'αιφόρο' στην αξιοβίωτη ολοκληρωμένη ανάπτυξη*. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις του Δ.Π.Μ.Σ.-Ε.Μ.Π. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη».
- [33] Συμπόσιο Αιγαίο-Νερό-Βιώσιμη-Ανάπτυξη: *Ανασκόπηση εργασιών και συμπεράσματα*, Πάρος 6-7 Ιουλίου.
- [34] Ταβέλης Φρίζος (2004): *Προοπτικές Αφαλάτωσης με Αιολική Ενέργεια στην Κύπρο*. Διπλωματική εργασία για τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π..
- [35] Τσαγγάρης Σωκράτης (1993): *Μηχανική των Ρευστών*. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- [36] Τσακίρης Γιώργος (2007) : *Διαχείριση Υδατικών Πόρων για την Ειρήνη την Ανάπτυξη και το Περιβάλλον*. Πρακτικά 6^ο Εθνικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Χανιά 13-16 Ιουνίου.
- [37] Τσακίρης Γιώργος : *Το νερό στον 21^ο αιώνα: Υπάρχει ελπίς; Κείμενα για την Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη*, Δ.Π.Μ.Σ. «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», www.survey.ntua.gr/main/studies/environ/envir-g.html.
- [38] Υπουργείο Αιγαίου.
- [39] Χαντζιάρας Βασίλειος (2000): *Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μονάδες αφαλάτωσης: προοπτικές ένταξης στο ν. Δωδεκανήσων*. Διπλωματική εργασία για τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π..
- [40] www.dow.com/liquidseps/
- [41] www.enercon.de
- [42] www.retscreen.net
- [43] www.roi.gr
- [44] www.sundyne.com
- [45] www.tm.teiher.gr

