



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Διαστασιολόγηση και έλεγχος συστήματος
αφαλάτωσης τροφοδοτούμενου από
ανεμογεννήτρια»*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Καραφυλλάκη Ηλία

Επιβλέπων

Σ. Παπαθανασίου, Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Διαστασιολόγηση και έλεγχος συστήματος
αφαλάτωσης τροφοδοτούμενου από ανεμογεννήτρια»*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Καραφυλλάκη Ηλία

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28η Σεπτεμβρίου
2018.

.....
Σ.Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επ.Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Β.Ριζιώτης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

.....

Ηλίας Α. Καραφυλλάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ηλίας Α. Καραφυλλάκης, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σύνοψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει αντικείμενο την σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης, η εγκατάσταση του οποίου είναι ανεξάρτητη από την ύπαρξη δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας το έτσι ιδανικό για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές. Κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος αποτελεί μια Α/Γ. Ωστόσο για να αντιμετωπιστεί η έντονη μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής και να εξασφαλιστεί η συνεχής παροχή πόσιμου νερού θα εγκατασταθεί επικουρικά συστοιχία μπαταριών και ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος τροφοδοτούμενο με καύσιμο diesel.

Αρχικά πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στις χρησιμοποιούμενες διάταξης αφαλάτωσης ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη για την συγκεκριμένη εφαρμογή και στην συνέχεια επιχειρείται πλήρης μοντελοποίηση της λειτουργίας του. Με χρήση του μοντέλου αυτού γίνεται η σχεδίαση του συστήματος ελέγχου του. Πιο συγκεκριμένα δομείται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ο αλγόριθμος που ορίζει την λειτουργία και διαχείριση του συστήματος, με σκοπό να καθοριστεί η βέλτιστη διαχείριση των επιμέρους συνιστωσών του, ώστε να παράγεται πόσιμο νερό σε όσο το δυνατό χαμηλότερο κόστος, με καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ενεργειακή προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος σε ετήσια βάση με στόχο να διερευνηθεί η επίπτωση της μεταβολής των διαφόρων παραμέτρων του στο κόστος παραγωγής νερού αλλά και γενικά στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Μέσα από αυτή την διαδικασία έγινε απόπειρα βέλτιστης διαστασιολόγησης όλων των συνιστωσών του, δηλαδή της ισχύος της Α/Γ και του Η/Ζ, της δυναμικότητας παραγωγής της μονάδας αφαλάτωσης και της ισχύος και χωρητικότητας των μπαταριών.

Abstract

The object of the present master thesis is to design an autonomic desalination unit. Its installation is independent of the presence of an electric power grid and that makes its use ideal for remoted areas. The main source of power is a wind turbine. But in order to manage the intense variability of wind-energy generation and to ensure the constant supply of drinking water, a battery pack and a generator fueled by diesel will also be installed.

Initially all available desalination technologies are mentioned in order to select the appropriate solution that best applies and subsequently model its operation. The control algorithm is designed by utilizing this model. More specifically the algorithm that defines the function and management of the system is described as an optimization problem in order to define the optimal management of its individual components so that drinking water is produced with the minimum cost and best operating performance of the desalination unit.

Consequently, simulation of the system operation is performed for a whole year in order to analyze the influence of the system's component to the water production cost and to the desalination unit performance. Through this process is attempted to define the optimal selection of the design parameters such as the power of the generator and of the wind turbine, the desalination plant and the batteries.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Παπαθανασίου Σταύρο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την άκρως ενδιαφέρουσα παρούσα εργασία, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωσή της. Ιδιαίτερως ευχαριστώ επίσης την ηλεκτρολόγο μηχανικό Νατούδη Καλλιόπη για τις πολύ χρήσιμες συμβουλές της, κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξή τους.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην αφαλάτωση.....	9
1.1 Το πρόβλημα των υδάτινων πόρων.....	9
1.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης νερού.....	11
1.3 Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης νερού.....	17
1.4 Περιγραφή επιμέρους τμημάτων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.....	19
1.5 Κόστος παραγόμενου νερού από μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης.....	28
1.6 Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	29
1.7 Συστήματα αφαλάτωσης με χρήση Α/Γ.....	30
Κεφάλαιο 2: Μοντελοποίηση συστήματος αφαλάτωσης.....	35
2.1 Γενικά στοιχεία.....	35
2.2 Βασικές αρχές Μαθηματικού Προγραμματισμού.....	36
2.3 Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	37
2.4 Λειτουργικοί περιορισμοί συστήματος.....	39
Κεφάλαιο 3: Προκαταρκτική σχεδίαση.....	45
3.1 Χρονοσειρά ζήτησης νερού.....	45
3.2 Διαστασιολόγηση παραμέτρων συστήματος.....	46
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	56
4.1 Εισαγωγή.....	56
4.2 Στρατηγική ομαλών μεταβολών της ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης.....	56
4.3 Διαστασιολόγηση μονάδας αφαλάτωσης.....	59
4.4 Διαστασιολόγηση μπαταριών.....	60
4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	76
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα.....	79
5.1 Συγκεντρωτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας.....	79
5.2 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.....	80
Βιβλιογραφία.....	82

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην αφαλάτωση

1.1 Το πρόβλημα των υδάτινων πόρων

1.1.1 Γενικά

Η ύπαρξη και η εύκολη πρόσβαση σε καθαρό νερό ήταν από την αρχαιότητα καθοριστικός παράγοντας για την ανάπτυξη ενός οικισμού μιας πόλης και εν γένει ενός ολόκληρου πολιτισμού. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι οι πρώτοι πολιτισμοί αναπτύχθηκαν κοντά σε ποταμούς οι οποίοι κάλυπταν τις ανάγκες σε νερό με χαρακτηριστικά παραδείγματα τους Αιγυπτίους, αλλά και προγενέστερα όλων των μεσοποτάμιων πολιτισμών.

Με την πάροδο των χρόνων ωστόσο και την δημιουργία μεγάλων αστικών κέντρων έχει αυξηθεί δραματικά η ζήτηση σε βιομηχανικό και πόσιμο νερό. Επιπλέον οι κλιματικές αλλαγές έχουν προκαλέσει ελάττωση των βροχοπτώσεων, η χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων στις καλλιέργειες και η χωρίς επεξεργασία διάθεση στο περιβάλλον πάσης φύσεως αποβλήτων έχουν ελαττώσει σημαντικά τα διαθέσιμα αποθέματα πόσιμου νερού.

Συγκεντρωτικά οι κύριες αιτίες αύξησης της ζήτησης σε πόσιμο νερό συνοψίζονται στους παρακάτω άξονες:

1. Αύξηση του μόνιμου πληθυσμού και του βιοτικού του επιπέδου
2. Μεγάλες μετακινήσεις πληθυσμών σε μικρές χρονικές περιόδους (ανάπτυξη τουρισμού)
3. Αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων
4. Μεγάλη κατανάλωση ποσότητας νερού στην βιομηχανία

Επομένως σε αρκετές περιπτώσεις και ειδικά σε μεγάλα αστικά κέντρα οι υδάτινοι πόροι δεν επαρκούν για την κάλυψη της κατανάλωσης. Ακόμα ωστόσο και στις περιπτώσεις που τα αποθέματα επαρκούν πολλές φορές το νερό δεν έχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά και συνεπώς απαιτείται περαιτέρω κατεργασία. Μια λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα η οποία βρίσκει όλο και περισσότερο εφαρμογή είναι η χρησιμοποίηση των τεράστιων αποθεμάτων θαλασσινού νερού, αλλά και των υφάλμυρων υδάτινων πόρων για την παραγωγή πόσιμου νερού.

1.1.2 Το πρόβλημα στην Ελλάδα [5]

Στην Ελλάδα σοβαρό πρόβλημα λειψυδρίας παρουσιάζουν τα νησιά του Αιγαίου και κυρίως οι Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα. Αυτό οφείλεται κυρίως στα χαμηλά μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης καθώς επίσης και στην γεωλογική διαμόρφωση των εδαφών τους που δεν επιτρέπει την δημιουργία υδροφόρων οριζόντων. Το πρόβλημα μάλιστα επιδεινώνεται τα τελευταία χρόνια, αφού οι συγκεκριμένες περιοχές αποτελούν τουριστικά θέρετρα με αποτέλεσμα να αυξάνεται κατακόρυφα

ο πληθυσμός τους κατά την διάρκεια των θερινών μηνών και επομένως και οι ανάγκες σε πόσιμο νερό.

Μέχρι σήμερα η κάλυψη των αναγκών ύδρευσης των νησιών των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων επιτυγχάνεται κυρίως μέσω μεταφοράς νερού με υδροφόρα πλοία. Το Ελληνικό δημόσια, επομένως, αναγκάζεται να καταβάλλει υπέρογκα ποσά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος από τις καθημερινές αυτές μεταφορές και σε καμία περίπτωση δεν εξασφαλίζεται η αντιμετώπιση του προβλήματος σε βάθος χρόνου. Επικουρικά συνήθως μέρος των αναγκών καλύπτονται από τοπικές δημοτικές ή ιδιωτικές γεωτρήσεις, από αφαλάτωση νερού και συμπληρωματικά από συγκέντρωση όμβριων υδάτων.

YEAR	Cyclades islands			Dodecanese islands			Total	
	Quantity	Cost	Specific Cost, €/m ³	Quantity	Cost	Specific Cost, €/m ³	Quantity	Cost
	m ³ /year	€/year		m ³ /year	€/year		m ³ /year	€/year
2000	145.000	1158000	7.99	555000	2,004,000	3.61	700000	3162000
2001	202.000	1625000	8.04	621000	2,722,000	4.38	823000	4347000
2002	329.343	2561178	7.78	617745	3.109.358 65	5.03	947088	5670637
2003	336.777	2772718	8.23	605019	3.214.680 89	5.31	941796	5987398
2004	338.812	2787235	8.23	759737	4.034.203 29	5.31	1098549	6821438
2005	464.562	4006916	8.63	969676	5.082.935 63	5.24	1434238	9089852
2006	567.719	4677686	8.24	1005338	4.905.044 06	4.88	1573057	9582730
2007	697.117	5802509	8.32	1101628	5.403.900 34	4.91	1798745	11206409
2008	687.731	5721921	8.32	1141724	5.765.706 20	5.05	1829455	11487628
2009	429.075	3569904	8.32	826910	4.175.895 50	5.05	1255985	7745799
2010*	429.075	2590291	9.84	340426	3.349.791 84	9.84	603667	5940083
TOTAL	4.627.211	37.273.358		8.544.203	39.041.516		13.005.580	81.040.974

* includes the period from 1-1-2010 to 30-9-2010

[Source: Ministry of Aegean islands]

Σχήμα 1.1: Μεταφερθείσες ποσότητες (m³/year) ετήσια κόστη μεταφοράς (€/year) και ειδικό κόστος νερού(€/m³) κατά την δεκαετία 2000-2010

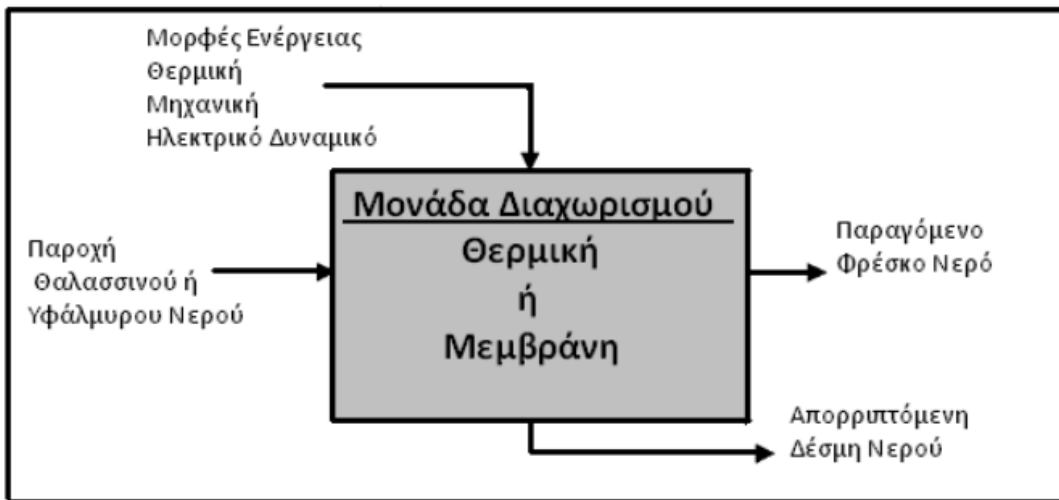
Η επιδείνωση του προβλήματος μπορεί να επιβεβαιωθεί και από τα στοιχεία του σχήματος 1.1, στο οποίο φαίνεται ξεκάθαρα η αύξηση των μεταφερόμενων ποσοτήτων νερού με χρήση υδροφόρων πλοίων. Πιο συγκεκριμένα στις Κυκλάδες από το 2000 έως το 2008 τόσο η μεταφερόμενη ποσότητα νερού όσο και το ετήσιο κόστος πενταπλασιάστηκαν. Αντίστοιχη είναι και η κατάσταση στα Δωδεκάνησα με την αύξηση ωστόσο να είναι περισσότερο περιορισμένη.

Εν κατακλείδι αξίζει να αναφέρουμε ότι το ειδικό κόστος νερού το έτος 2010 κυμάνθηκε στα 9,84 τιμή που όπως θα αποδειχτεί στην συνέχεια είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με χρήση μονάδων αφαλάτωσης.

1.2 Τεχνολογίες αφαλάτωσης νερού

Οι διαθέσιμες εμπορικά μέθοδοι αφαλάτωσης μπορεί να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σε μεθόδους που περιλαμβάνουν αλλαγή φάσης του νερού, με χρήση θερμικών διεργασιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η απόσταξη και η κρυστάλλωση. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι απόσταξης είναι η πολυβάθμια εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF), η πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation, MED), η εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression, VC) και η ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation). Από την άλλη πλευρά δεν χρησιμοποιείται ευρέως.
- Σε μεθόδους που το νερό δεν αλλάζει φάση αλλά παραμένει στην υγρή κατάσταση καθ' όλη την διάρκεια της αφαλάτωσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι η αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis, RO) και η ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED), οι οποίες χρησιμοποιούν μεμβράνες για την απομάκρυνση των αλάτων.



Σχήμα 1.2: Σχηματική περιγραφή μονάδας αφαλάτωσης

Στην συνέχεια θα γίνει αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας και στα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τις μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

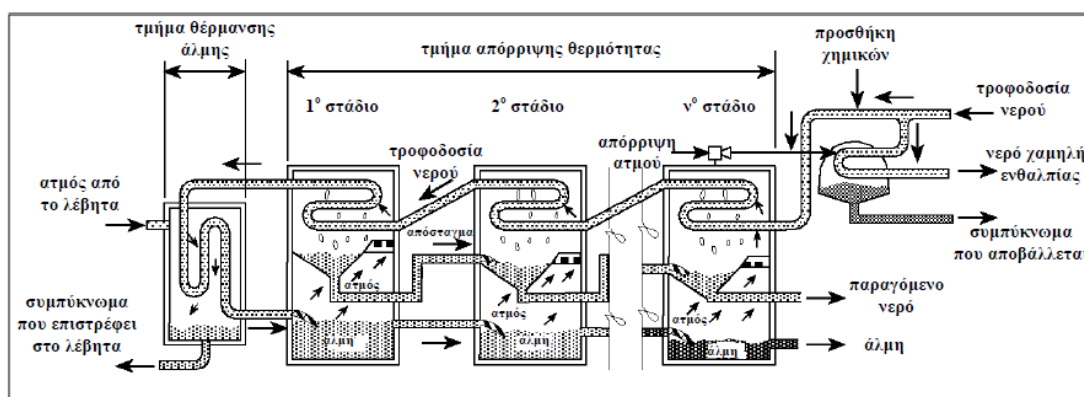
Πολυβάθμια εκτόνωση (Multiple Stage Flashing, MSF)

Η πολυβάθμια εκτόνωση αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο αφαλάτωσης με κριτήριο την συνολική ικανότητα παραγωγής νερού των

εγκαταστημένων μονάδων ανά τον κόσμο. Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται μεγάλη παραγωγή νερού συνήθως μεγαλύτερη από 5000 m³/day.

Στο *σχήμα 1.3* πραγματοποιείται συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας. Αρχικά το θαλασσινό νερό θερμαίνεται λίγο χαμηλότερα από το σημείο ζέσεως του και στη συνέχεια εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο που υπάρχει πίεση χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού και ατμοποιείται. Στην συνέχεια ο ατμός υγροποιείται αφού έρθει σε επαφή με τους σωλήνες που μεταφέρουν το κρύο θαλασσινό νερό και έπειτα συλλέγεται ως καθαρό νερό. Η άλμη προωθείται στους επόμενους θαλάμους όπου το φαινόμενο επαναλαμβάνεται με συνεχώς μειούμενη πίεση ώστε να ακολουθηθεί η αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας της άλμης μέχρι που τελικά απορρίπτεται.

Οι εγκαταστάσεις MSF αποτελούνται συνήθως από 4-40 τέτοια στάδια και βρίσκουν συχνή εφαρμογή συνδυαστικά με μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα ο ατμός υψηλής πίεσης που χρησιμοποιείται στους ΑΗΣ, αφού εκτονωθεί στον αμοστρόβιλο, χρησιμοποιείται στην αφαλάτωση.



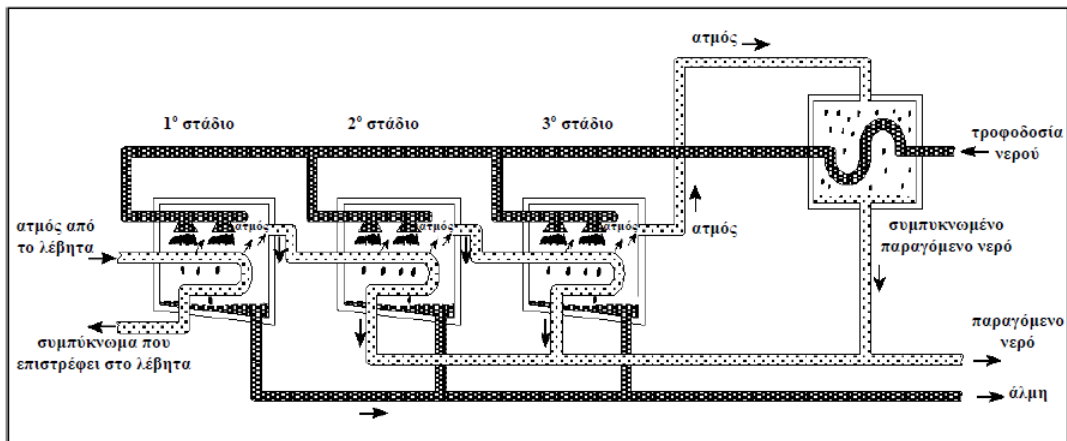
Σχήμα 1.3: Σχηματική περιγραφή της πολυβάθμιας εκτόνωσης [4]

Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation, MED)

Η πολυβάθμια εξάτμιση αποτελεί την πρώτη ιστορικά μέθοδο που αναπτύχθηκε για αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Αρχικά αναπτύχθηκε για την κάλυψη των αναγκών της χημικής βιομηχανίας, όπου και συνεχίζει μέχρι σήμερα να βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Η μέθοδοι MED και MSF, που παρουσιάστηκε προηγουμένως, είναι παρόμοιες με την βασική διαφορά ωστόσο ότι στη μέθοδο MED, η πλειοψηφία του αποστάγματος παράγεται με βρασμό.

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα ο ατμός διέρχεται μέσα από σωλήνες, ενώ το ψυχρό θαλασσινό νερό ψεκάζεται από πάνω τους, δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα και εξασφαλίζοντας αποτελεσματικότερη εξάτμιση. Έτσι το μέρος του

ατμού που συμπυκνώθηκε συλλέγεται ως καθαρό νερό, ενώ ο υπόλοιπος ατμός, μαζί με το μέρος του θαλασσινού νερού που ατμοποιήθηκε συνεχίζουν στο επόμενο στάδιο. Σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού για να βοηθάει στην εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε θάλαμο, ίση με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει την λειτουργία σε υψηλή (>90° C) ή χαμηλή θερμοκρασία (<90° C) και μάλιστα η μέγιστη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι έως και 55° C, πράγμα που λειτουργεί ανασταλτικά στην διάβρωση και επιτρέπει την απόρριψη χαμηλότερου επιπέδου ενέργειας σε σχέση με άλλες θερμικές διεργασίες. Στη μέθοδο αυτή συχνά χρησιμοποιούνται και συμπιεστές (μηχανικοί ή θερμικοί), ενώ οι διάφορες παραλλαγές προκύπτουν από την οριζόντια ή κάθετη διάταξη των σωληνώσεων ατμού και τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομορροή, αντιρροή ή παράλληλη).



Σχήμα 1.4: Σχηματική περιγραφή της πολυβάθμιας εξάτμισης [4]

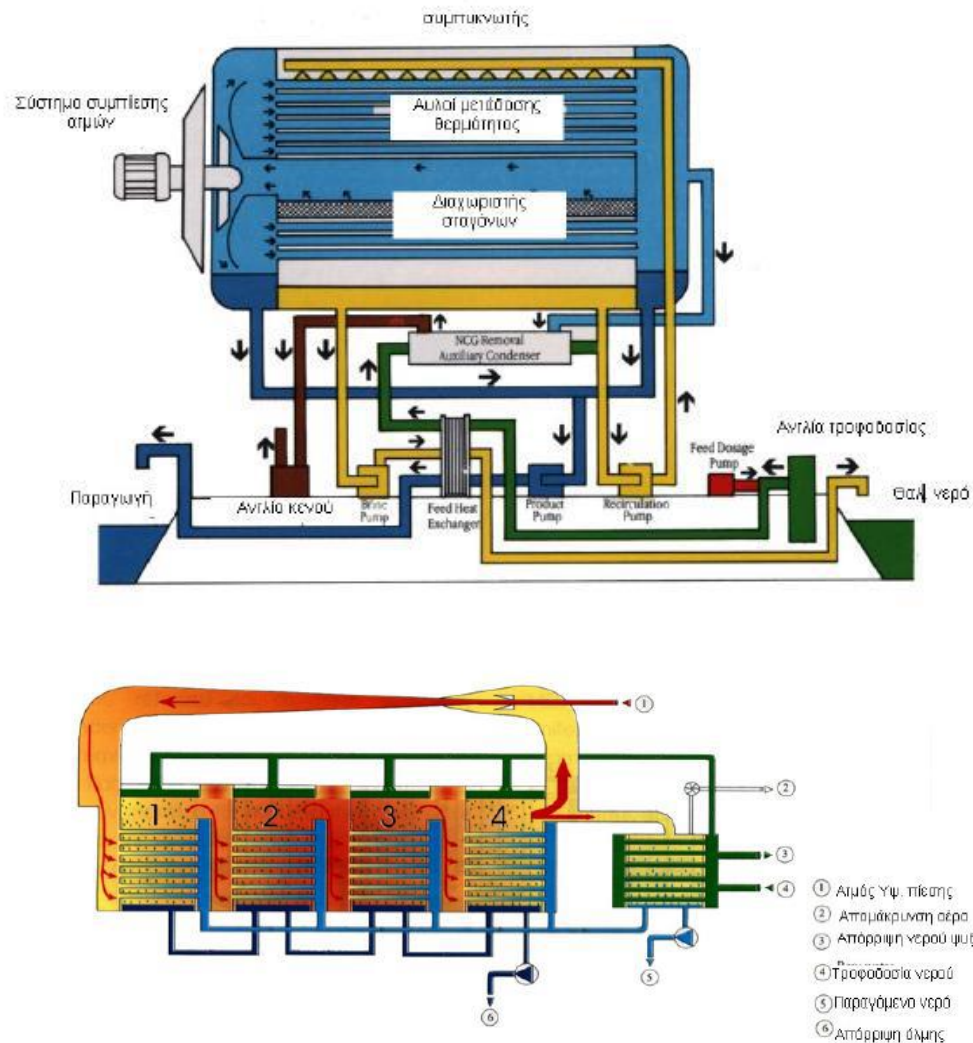
Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression, VC)

Η μέθοδος της εξάτμισης με επανασυμπίεση ατμών αποτελεί την πιο αποδοτική και απλή στην κατασκευή μέθοδο, καθώς δεν περιέχει πολλαπλά στάδια. Το θαλασσινό νερό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5, ψεκάζεται πάνω σε μια σειρά σωλήνων από τους οποίους διέρχεται ατμός. Έτσι θερμαίνεται και στη συνέχεια εξατμίζεται με την βοήθεια αεροσυμπιεστή που δημιουργεί υποπίεση. Ο συμπιεστής αυτός συλλέγει τους ατμούς του καθαρού νερού και τους εκτοξεύει με πίεση μέσα στους σωλήνες. Έπειτα οι ατμοί συμπυκνώνονται και λαμβάνονται ως προϊόν, αφού πρώτα γίνει ψύξη τους με την βοήθεια του θαλασσινού νερού.

Η βασική διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που έχουν παρουσιαστεί ως τώρα είναι η απουσία πηγής θερμότητας αφού η εξάτμιση λαμβάνει χώρα σε συνθήκες περιβάλλοντος. Κύριος παράγοντας της αποτελεσματικότητας της μεθόδου αυτής είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος γύρω από τους σωλήνες

όπου όπως και στην μέθοδο MED, βελτιώνει την εξάτμιση και επομένως και την απόδοση της εγκατάστασης.

Η μέθοδος VC χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις και παράγει μέχρι και 3000 m³/day. Οι μονάδες αυτές είναι πολύ απλούστερες από τις αντίστοιχες MSF και MED και εξαιτίας του μικρότερου χώρου που απαιτούν καθώς επίσης και της δυνατότητας μεταφοράς τους χρησιμοποιούνται και από τον στρατό.



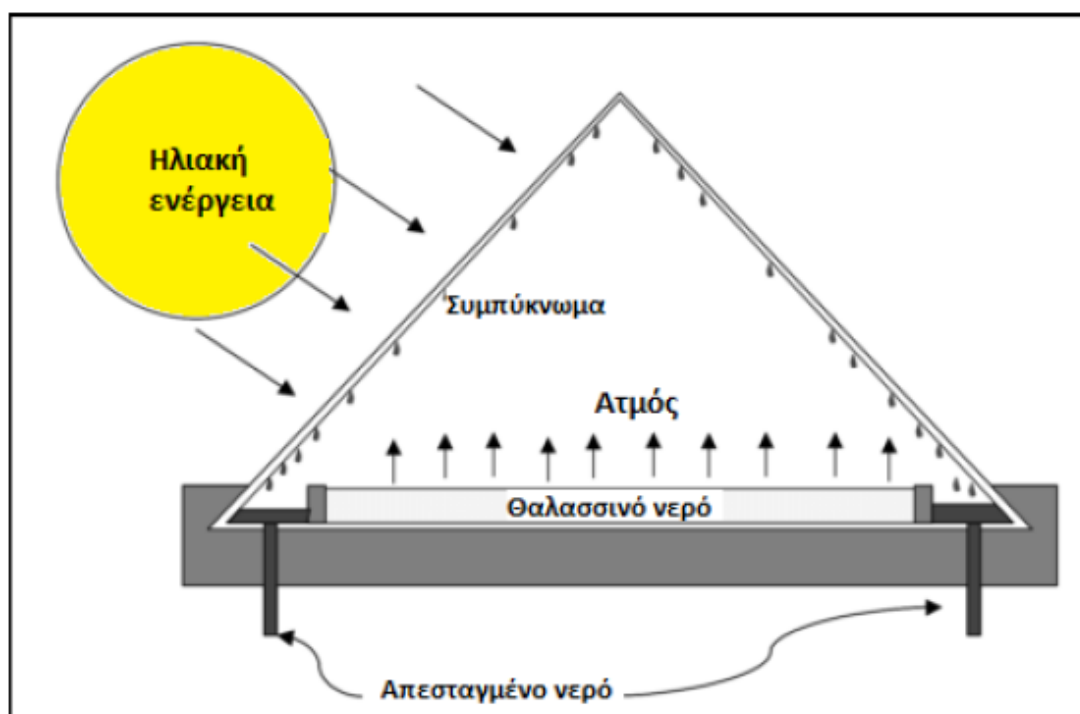
Σχήμα 1.5: Σχηματική περιγραφή της εξάτμισης με συμπύεση ατμών.[1]

Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)

Με την μέθοδο της ηλιακής απόσταξης ουσιαστικά γίνεται αναπαραγωγή του υδρολογικού κύκλου σε μικρότερη κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα οι ακτίνες του ηλίου περνούν από μια διάφανη οροφή και θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται

στον πάτο. Στην συνέχεια αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην κεκλιμένη οροφή συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως προϊόν με την χρήση κατάλληλων διατάξεων.

Οι διατάξεις αυτές έχουν πολύ χαμηλή απόδοση, περίπου 4 λίτρα καθαρού νερού την ημέρα ανά ένα m^2 εδάφους, αφού χρησιμοποιούν λιγότερο από το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται φθηνά σχετικά υλικά για να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης το οποίο αποτελεί και το μοναδικό ουσιαστικό έξοδο αφού τα λειτουργικά κόστη είναι από μηδαμινά έως ελάχιστα. Επί προσθέτως πρέπει να αναφερθεί ότι το νερό που παράγεται δεν είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς διότι δεν βράζει σε μεγάλη θερμοκρασία και γι' αυτό τον λόγο απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία. Επομένως τέτοια μέθοδος βρίσκει εφαρμογή μόνο σε μικρές εγκαταστάσεις ή σε οικιακή χρήση.



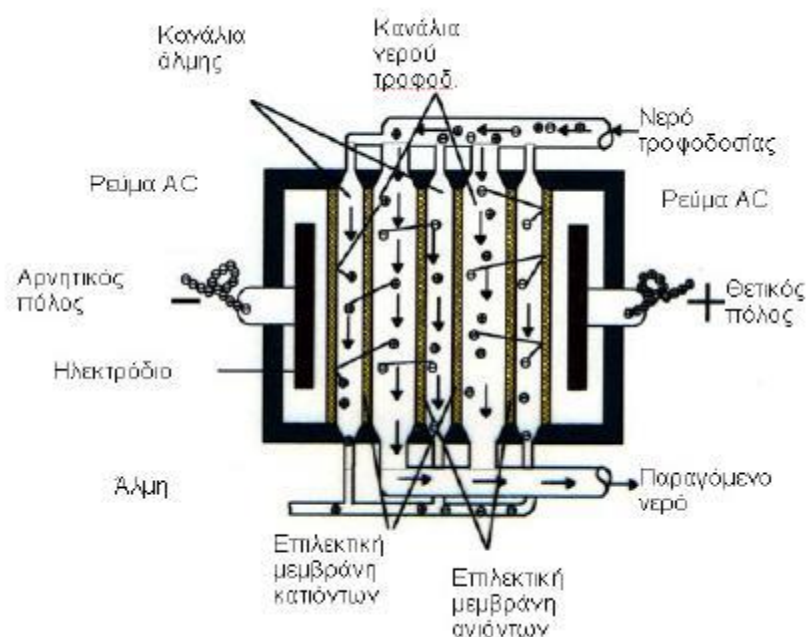
Σχήμα 1.6: Σχηματική περιγραφή της ηλιακής απόσταξης.

Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis , ED)

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ο ηλεκτρισμός για να επιτευχθεί η αφαλάτωση του νερού. Το νερό διέρχεται ανάμεσα από φορτισμένες μεμβράνες η οποίες είναι διαδοχικά φορτισμένες θετικά ή αρνητικά. Τα ιόντα επομένως που βρίσκονται στο νερό προσκολλώνται στις μεμβράνες, οι οποίες επιτρέπουν μόνο την δική τους διέλευση. Με αυτόν τον τρόπο επομένως δημιουργούνται διαμερίσματα μικρότερης και μεγαλύτερης συγκέντρωσης, τα οποία με την σειρά τους δίνουν το προϊόν και την άλμη αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι με την μέθοδο αυτή δεν μπορεί να απομακρυνθούν μη ιοντικά στερεά, αλλά και για τα ιοντικά όσο αυξάνεται η

συγκέντρωση τους αυξάνεται και η απαιτούμενη ενέργεια για τις μεμβράνες. Επομένως η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε νερά χαμηλής συγκέντρωσης αλάτων όπως τα υφάλμυρα.

Ένα ακόμα λειτουργικό χαρακτηριστικό των μονάδων αυτών είναι ότι για να επιτευχθεί καθαρισμός και γενικότερα καλύτερη λειτουργία των μεμβρανών εφαρμόζεται αντιστροφή των πεδίων, αλλάζοντας θέση στα κανάλια του προϊόντος με αυτά της άλμης. Με αυτόν το τρόπο τα τμήματα των μεμβρανών που είχαν μαζέψει πολλά άλατα καθαρίζονται από την ροή καθαρού νερού.



Σχήμα 1.7: Σχηματική περιγραφή της ηλεκτροδιάλυσης.

Αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis, RO)

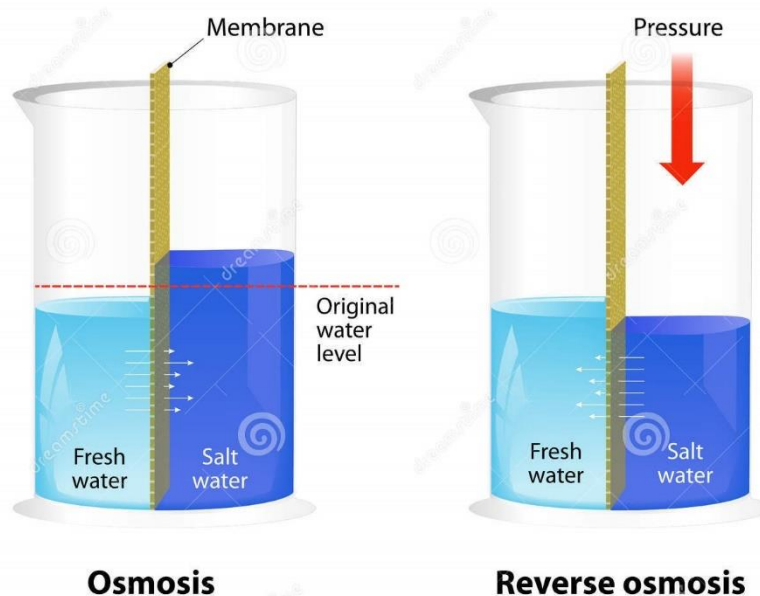
Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο αφαλάτωσης καθώς παρέχει ιδιαίτερα μεγάλη ευελιξία. Επιτρέπει την κατασκευή διατάξεων για την τροφοδοσία για την ύδρευση μια κοινότητας ή μιας πόλης έως και την κατασκευή μιας μικρής συσκευής για να καλύψει τις ανάγκες μιας οικογένειας.

Για να επιτευχθεί η αφαλάτωση του νερού με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται το φαινόμενο της όσμωσης, κατά το οποίο όταν δυο διαλλείματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις (πυκνότητες) χωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη, δηλαδή μεμβράνη που δεν επιτρέπει την διέλευση κάποιων ουσιών μέσα από αυτήν όπως πχ άλατα, τότε το διάλυμα με την μικρότερη συγκέντρωση θα περάσει μέσα από την μεμβράνη μέσα από την μεμβράνη προς το πυκνότερο διάλυμα μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις τους. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εντοπίζεται πολύ συχνά στην φύση και κυρίως σε ζωντανούς οργανισμούς όπως ο άνθρωπος καθώς πολλές

κυτταρικές λειτουργίες βασίζονται σε αυτό, όπως για παράδειγμα το δέρμα τα νεφρά οι πνεύμονες και τα ίδια τα κύτταρα λειτουργούν λίγο πολύ ως μεμβράνες.

Η όσμωση ουσιαστικά αποτελεί μια ειδική περίπτωση της διάχυσης, στην οποία τα μόρια είναι το νερό και η αλλαγή συγκέντρωσης εμφανίζεται στα άκρα μιας ημιπερατής μεμβράνης. Η ημιπερατή αυτή μεμβράνη επιτρέπει την διέλευση του νερού, όχι όμως των ιόντων όπως Na^{2+} , Ca^{2+} , Cl^{2-} , ή των μεγαλύτερων μορίων όπως η γλυκόζη, η ουρία, ή γενικά βακτηρίων.

Η διάχυση και η όσμωση ευνοούνται θερμοδυναμικά και συνεχίζονται μέχρι να επέλθει ισορροπία. Ωστόσο υπάρχει περίπτωση η όσμωση να επιβραδυνθεί να σταματήσει ή ακόμα και να αναστραφεί εάν εφαρμοστεί ικανοποιητικού μεγέθους πίεση από την πλευρά στην οποία βρίσκεται το διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης. Τόσο το φαινόμενο της όσμωσης όσο και αυτό της αντίστροφης όσμωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.8: Σχηματική περιγραφή της όσμωσης και της αντίστροφης όσμωσης.

1.3 Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης νερού

Με βάση την περιγραφή των διαφορετικών τεχνικών αφαλάτωσης η οποία έγινε στην προηγούμενη ενότητα φαίνεται ότι δεν υπάρχει μια μέθοδος που είναι ξεκάθαρα καλύτερη από τις υπόλοιπες καθώς όλες έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Επομένως η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου αφαλάτωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

- Η απαιτούμενη ποσότητα παραγόμενου νερού
- Η απαιτούμενη ποιότητα του παραγόμενου νερού, η οποία σχετίζεται με την χρήση του, δηλαδή αν προορίζεται για πόσιμο για αρδευτικό ή για βιομηχανικούς σκοπούς
- Η ποιότητα του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού
- Η διαθεσιμότητα και το κόστος είτε της ηλεκτρικής είτε τις θερμικής ενέργειας
- Τα χαρακτηριστικά του χερσαίου και του θαλάσσιου περιβάλλοντα χώρου
- Περιβαλλοντικοί περιορισμοί
- Προϋπολογισμός

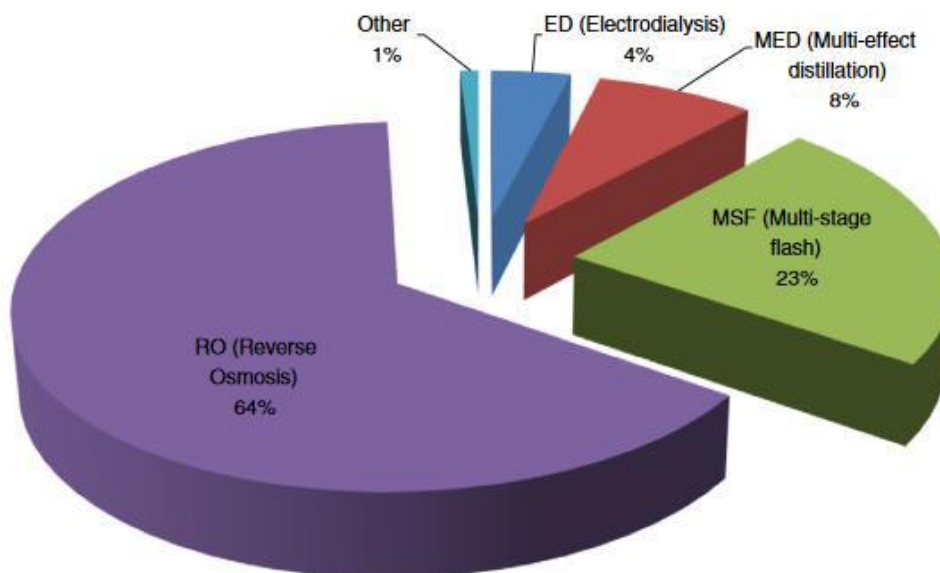
Έτσι για παράδειγμα σε περιοχές όπου το κόστος ενέργειας είναι χαμηλότερο καθώς και σε βιομηχανίες με περίσσεια θερμικών φορτίων (όπως διυλιστήρια και ατμοηλεκτρικοί σταθμοί) έχουν επικρατήσει οι θερμικές μέθοδοι αφαλάτωσης. Επιπλέον το νερό που παράγεται με τις θερμικές μεθόδους έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άλατα σε σχέση με αυτό που παράγεται με χρήση μεμβρανών. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό για την κάλυψη των βιομηχανικών αναγκών, ως νερό που προορίζεται για πόσιμο καθώς είναι δύσκολη η προσθήκη των αναγκαίων αλάτων με παράλληλη ρύθμιση του PH.

Από την άλλη πλευρά μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιούν μεμβράνες όπως η αντίστροφη όσμωση υπερτερούν σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει περίσσεια ενέργειας και όπου απαιτείται παραγωγή πόσιμου νερού. Επιπλέον σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους όπου συνήθως είναι οικονομικά συμφέρουσες για παραγωγή άνω των 1000 m³ την ημέρα, οι αντίστοιχες μέθοδοι μεμβρανών βρίσκουν εφαρμογή για μεγάλο εύρος δυναμικότητας παραγωγής νερού, από οικιακά συστήματα δυναμικότητας μερικών κυβικών την ημέρα, μέχρι μεγάλες μονάδες δυναμικότητας 300000 m³/ ημέρα για τις ανάγκες ύδρευσης ολόκληρων πόλεων.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας της αντίστροφης όσμωσης συνοπτικά είναι τα εξής:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης
- Απλή λειτουργία και συντήρηση
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης συστημάτων ανάκτησης ενέργειας για την περαιτέρω μείωση του ενεργειακού κόστους
- Απομακρύνονται από το νερό εκτός από το αλάτι και άλλα ανεπιθύμητα συστατικά όπως τα βακτήρια
- Χαμηλό κόστος εγκατάστασης, με μεγάλο εύρος λειτουργίας με ταυτόχρονη αξιοπιστία σε όλο το εύρος μεγεθών.
- Μικρός όγκος εγκατάστασης
- Δυνατότητα επέκτασης της μονάδας για αύξηση του παραγόμενου νερού (modularity).

Οι παραπάνω λόγοι είναι αυτοί για τους οποίους η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλη για την παραγωγή νερού. Με βάση το *σχήμα 1.9* επιπλέον φαίνεται ότι η τεχνολογία αφαλάτωσης RO αποτελεί το 62% όλων των εγκαταστημένων αφαλατώσεων



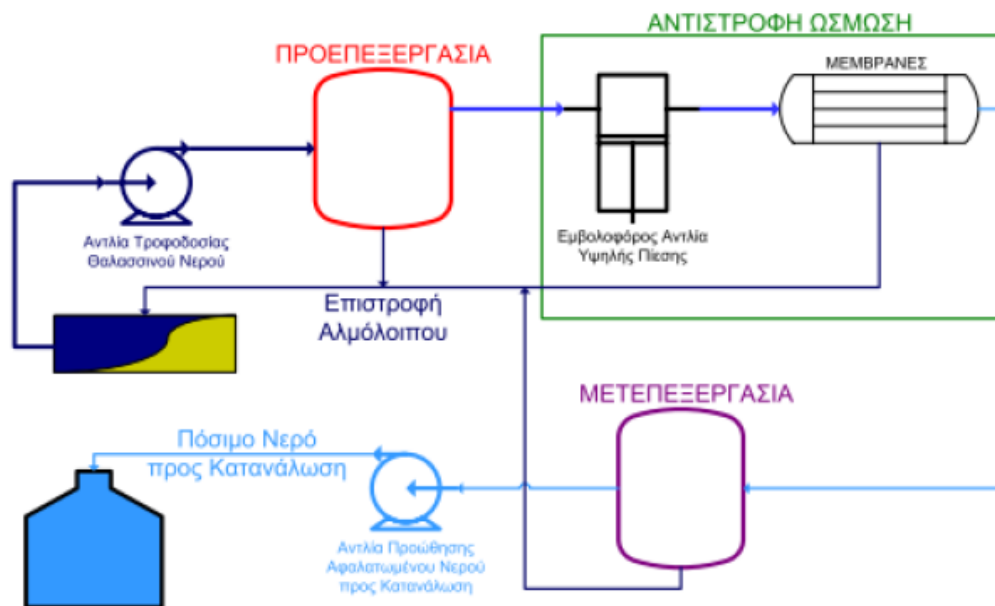
Σχήμα 1.9: Ποσοστά συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας ανά τεχνολογία αφαλάτωσης, σε παγκόσμιο επίπεδο [6]

1.4 Περιγραφή επιμέρους τμημάτων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση

Τα κύρια τμήματα από τα οποία αποτελείται μια σύγχρονη μονάδα αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί την μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης είναι τα εξής:

1. Το αντλιοστάσιο παροχής θαλασσινού νερού μαζί με τους σωλήνες προσαγωγής και απόρριψης νερού.
2. Την διάταξη προεπεξεργασίας του θαλασσινού νερού.
3. Το κυρίως σύστημα αφαλάτωσης, δηλαδή τις μεμβράνες
4. Το σύστημα μετεπεξεργασίας του νερού, αν αυτό προορίζεται για παραγωγή πόσιμου νερού, και την δεξαμενή γλυκού νερού.

Τα επιμέρους αυτά τμήματα παρουσιάζονται και σχηματικά στο απλοποιημένο διάγραμμα ροής ενός τέτοιου συστήματος στο *σχήμα 1.10*



Σχήμα 1.10: Τυπικό σύστημα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, με χρήση αντίστροφης όσμωσης

Στις επόμενες ενότητες θα γίνει αναλυτική περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος αφαλάτωσης και θα παρουσιαστούν και οι πιθανές διαφοροποιήσεις που υπάρχουν ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

Παροχή θαλασσινού νερού προς αφαλάτωση

Το πρώτο στάδιο σε οποιαδήποτε μονάδα αφαλάτωσης, ανεξαρτήτως του μεγέθους της, είναι το σύστημα πρόσληψης νερού το οποίο πρέπει να είναι ικανό την απαιτούμενη παροχή ακατέργαστου νερού με σχετικά σταθερή ποιότητα και παράλληλα με τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Το είδος της πρόσληψης που θα χρησιμοποιηθεί επηρεάζει καθορίζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του ακατέργαστου νερού καθώς επίσης καθώς επίσης και τον σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος προεπεξεργασίας αλλά και γενικότερα το σχεδιασμό της διεργασίας της αφαλάτωσης.

Ο σχεδιασμός της πρόσληψης του ακατέργαστου νερού εξειδικεύεται ανάλογα με το σημείο εγκατάστασης σε βαθμό πολύ μεγαλύτερο από οποιοδήποτε άλλο τμήμα της. Ένα σύστημα αναρρόφησης το οποίο έχει σχεδιαστεί σωστά είναι ικανό όχι μόνο να προστατεύει τον κατάντη εξοπλισμό αλλά και να μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή και γενικά να αναβαθμίζει την απόδοση ολόκληρης της διεργασίας μειώνοντας τόσο το κόστος εγκατάστασης του συστήματος προεπεξεργασίας όσο και το λειτουργικό κόστος ολόκληρης της μονάδας αφαλάτωσης.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένοι τρόποι αναρρόφησης του θαλασσινού νερού είναι γενικά οι εξής:

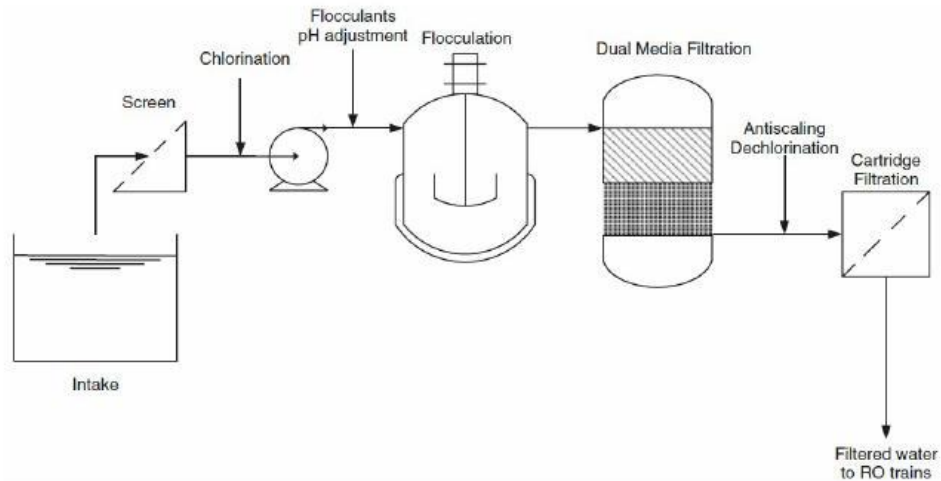
- Με γεωτρήσεις
- Με πηγάδια
- Με κατασκευή υποθαλάσσιου αγωγού

Από τις παραπάνω μεθόδους αυτή που βρίσκει μεγαλύτερη εφαρμογή είναι η χρήση γεωτρήσεων καθώς παρέχει καλύτερη ποιότητα νερού με αυτή της ανοιχτής θαλάσσης. Ένα ακόμα πλεονέκτημά τους είναι ότι οι παράκτιες γεωτρήσεις απαιτούν μικρότερες επεμβάσεις και παρουσιάζουν γενικά λιγότερες κατασκευαστικές δυσκολίες σε σχέση με τα παράκτια πηγάδια. Συμπερασματικά η οριστική επιλογή του τρόπου αναρρόφησης γίνεται κατά περίπτωση για κάθε μονάδα σύμφωνα με τις επικρατούσες τοπικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη και άλλους παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα της άλμης.

Προεπεξεργασία θαλασσινού νερού

Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη λειτουργία των μεμβρανών στα συστήματα αντίστροφης όσμωσης καθώς επίσης και για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής τους, καθοριστικό ρόλο έχει η προεπεξεργασία του προς αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Πιο συγκεκριμένα στο στάδιο αυτό καταστρέφονται οι περιεχόμενοι στο νερό μικροοργανισμοί και αφαιρούνται αιωρούμενα στερεά με σκοπό να αποφευχθεί η ανάπτυξη μικροοργανισμών και η εναπόθεση αλάτων στις μεμβράνες. Η διαδικασία αυτή απαρτίζεται από τα παρακάτω συστήματα:

1. Φίλτρο εισόδου στην αναρρόφηση, για να αποφευχθεί η είσοδος φερτών υλικών και ψαριών
2. Προ χλωρίωση του θαλασσινού νερού με παράλληλη προσθήκης οξέων, όπως το θειικό για να γίνει αποφυγή εναπόθεσης αλάτων στα φίλτρα.
3. Συσσωμάτωση των κολλοειδών/ οργανικών ουσιών με χρήση χλωριούχου σιδήρου και πολυηλεκτρολύτη
4. Φίλτρο άμμου το οποίο αποτελείται από άμμο χαλίκια και ανθρακίτη και βοηθάει στην κατακράτηση ακόμα μικρότερων στερεών σωματιδίων
5. Φίλτρα πολυπροπυλενίου, σκοπός των οποίων είναι η συγκράτηση ουσιών με μέγεθος 1μm.
6. Από χλωρίωση με χρήση θειούχου νατρίου ή με την βοήθεια φίλτρων ενεργού άνθρακα, καθώς το ελεύθερο χλώριο καταστρέφει τις μεμβράνες.
7. Αποστείρωση με υπεριώδη ακτινοβολία



Σχήμα 1.11: Διάγραμμα ροής προεπεξεργασίας θαλασσινού νερού

Αφαλάτωση νερού (αντίστροφη όσμωση)

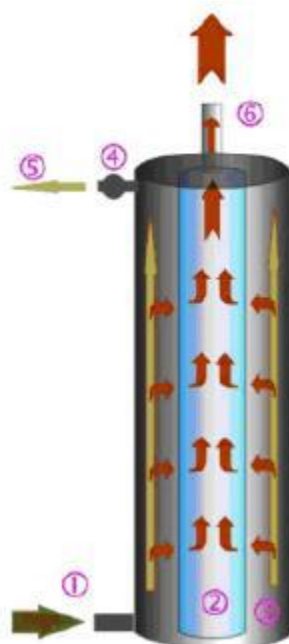
Αφού το νερό εξέλθει από το στάδιο της προεπεξεργασίας, με την χρήση κατάλληλων αντλιών υψηλής πίεσης αυξάνεται η πίεση του σε τέτοια τιμή ώστε να μπορεί να διέλθει από τις μεμβράνες και να επιτευχθεί κατακράτηση των αλάτων του. Η πίεση αυτή κυμαίνεται για το θαλασινό νερό συνήθως στα 55-85 bar και εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα σε άλατα του νερού τροφοδοσίας.

Ωστόσο μόνο ένα μέρος της αρχικής ποσότητας του νερού διέρχεται από τις μεμβράνες, καθώς το υπόλοιπο μαζί με τα άλατα που αφαιρέθηκαν εξέρχονται από τις μονάδες υψηλής πίεσης ως διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης σε άλατα (άλμη). Χωρίς αυτή την ελεγχόμενη απόρριψη η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό θα συνέχιζε να αυξάνει με αποτέλεσμα την εναπόθεση των υπερκορεσμένων αλάτων και την αύξηση της οσμωτικής πίεσης κατά μήκος των μεμβρανών. Η ποσότητα αυτής της άλμης συνήθως αποτελεί το 20% με 70% της συνολικής ροής τροφοδοσίας και εξαρτάται από την συγκέντρωση αλάτων στο προς αφαλάτωση νερό.

Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης

Στο σχήμα παρουσιάζεται μια πολύ συνηθισμένη διάταξη μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Το προς αφαλάτωση νερό εισέρχεται από την είσοδο (1) και καταλαμβάνει τον χώρο (3), ο οποίος βρίσκεται υπό πίεση. Εξαιτίας αυτής της πίεσης ένα ποσοστό του νερού (περίπου 25%) αναγκάζεται να περάσει μέσα από τις μεμβράνες και να εξέλθει από την έξοδο (6) καθαρισμένο από άλατα ως προϊόν. Ωστόσο όταν πίεση στον χώρο (3) ξεπεράσει το όριο της βαλβίδας (4) αυτή ανοίγει με αποτέλεσμα ένα ποσοστό του εισερχόμενου στην διάταξη νερού να εξέλθει

παρασύροντας μαζί του τα άλατα που έχουν επικαθίσει στην μεμβράνη. Το νερό αυτό αποτελεί την άλμη, η οποία απορρίπτεται.



Σχήμα 1.12: Παράδειγμα λειτουργίας συσκευής αντίστροφης όσμωσης

Τα κύρια χαρακτηριστικά τα οποία θα πρέπει να διαθέτει μια μεμβράνη για να είναι κατάλληλη για την διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης είναι τα εξής:

- Μεγάλη απόρριψη αλάτων με υψηλή διαπερατότητα διαλύτη, εκτός αν λόγω εφαρμογής είναι επιθυμητή η μειωμένη απόρριψη αλάτων, ή αναγκαία η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας
- Ικανότητα να σχηματίζει λεπτά διαχωριστικά στρώματα μεγάλης αντοχής, ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία πολλαπλών στρώσεων, όπως στις μεμβράνες σπειροειδούς διαμόρφωσης
- Ικανότητα κατασκευής με μεγάλο λόγο επιφάνειας προς όγκο
- Μεγάλο εύρος λειτουργικών παραμέτρων πίεσης θερμοκρασίας και είδους διαλύματος τροφοδοσίας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής των μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης κυμαίνεται από 3-5 έτη και εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του προς επεξεργασία νερού.
- Μεγάλη αντοχή στην προσβολή από χημικές ενώσεις και μικροοργανισμούς
- Ικανότητα λειτουργίας και ιδιαίτερα διενέργειας χημικού καθαρισμού της σε μεγάλο εύρος PH
- Χαμηλό κόστος

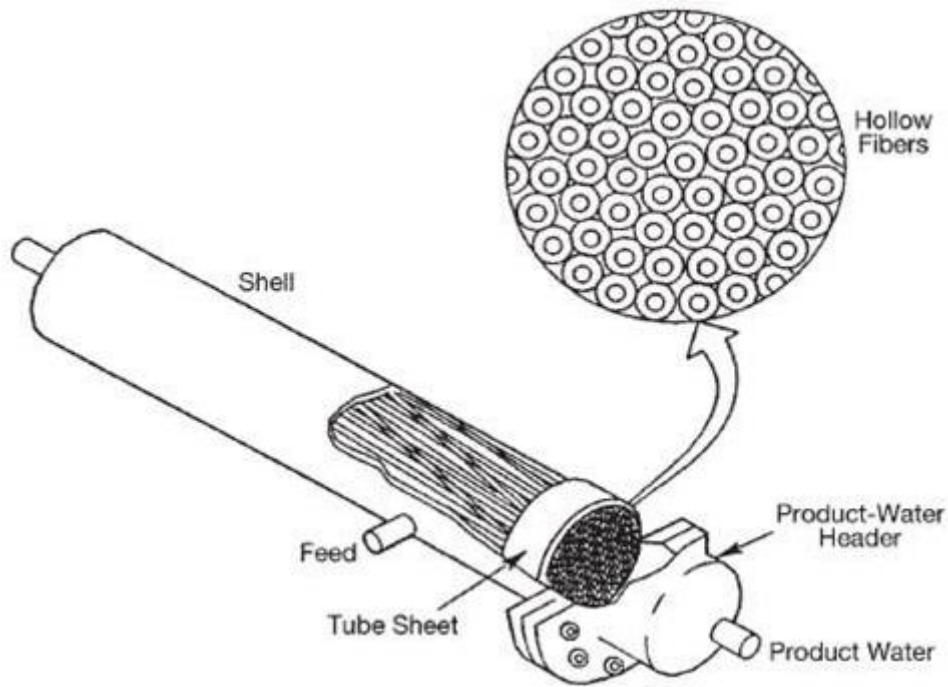
Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, κρίσιμος παράγοντας για την απόδοση των μεμβρανών είναι η επιφάνειά τους ή αλλιώς ο λόγος επιφάνειας προς όγκο. Από την δεκαετία του 1960 μέχρι σήμερα έχουν δοκιμαστεί διάφορες διαμορφώσεις για την βελτιστοποίησή του με τις κυριότερες να είναι οι εξής:

1. Σωληνοειδή στοιχεία μεμβρανών (tubular membrane module).
2. Δισκοειδή στοιχεία μεμβρανών (plate and frame membrane modules)
3. Στοιχεία μεμβρανών κοίλων ινών (hollow fiber modules)
4. Στοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης ή σπειροειδούς διαμόρφωσης (spiral wound membrane modules)

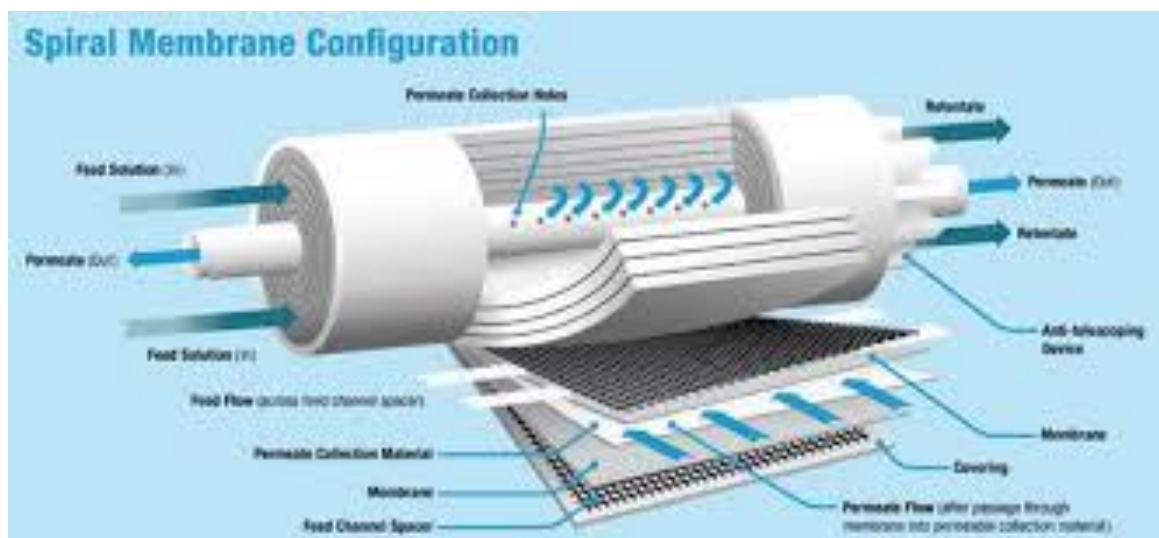
Οι πρώτες εμπορικές μονάδες αφαλάτωσης υιοθέτησαν στοιχεία υπό μορφή κοίλων ινών. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι εξαιτίας του μεγάλου πάχους τοιχωμάτων τους επιτυγχάνεται μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας μεμβράνης ανά όγκο επιτρέποντας τη χρήση υλικών για την μεμβράνη ακόμη και με σχετικά μικρό συντελεστή διαπερατότητας σε νερό. Από την άλλη πλευρά η διαμόρφωσή τους αυτή επιτρέπει την εύκολη συσσώρευση των αιωρούμενων συστατικών του διαλύματος τροφοδοσίας με αποτέλεσμα να είναι ευάλωτες σε μόλυνση και έμφραξή τους. Αυτό αποτελεί και το βασικό μειονέκτημά τους.

Τα στοιχεία που έχουν επικρατήσει στις σύγχρονες εφαρμογές αφαλάτωσης είναι αυτά της ελικοειδούς περιέλιξης, καθώς παρουσιάζουν υψηλή επιφάνεια ανά μονάδα όγκου με υψηλό ρυθμό μεταφοράς μάζας και εξαιτίας της τύρβης που δημιουργείται στην επιφάνεια της μεμβράνης περιορίζονται οι επικαθίσεις σωματιδίων και αλάτων. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή παροχή αφαλατωμένου νερού συνήθως συνδέονται περισσότερα από ένα τέτοιου είδους στοιχεία μεμβράνης σε σειρά εντός των δοχείων πίεσης σχηματίζοντας έτσι ένα σύστημα ή μια συστοιχία μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Η πίεση λειτουργίας αυτών των συστημάτων κυμαίνεται κοντά στα 84 bar αν πραγματοποιείται αφαλάτωση θαλασσινού νερού και κοντά στα 41 bar για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.

Τέλος από τις εναπομείναντες διαμορφώσεις, οι μεμβράνες με δισκοειδή στοιχεία χρησιμοποιούνται κυρίως για εργαστηριακούς λόγους και τα σωληνοειδή στοιχεία εξαιτίας του αυξημένου κόστους τους δεν χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση αλλά σε εφαρμογές επεξεργασίας τροφίμων και διαχωρισμού χημικών ενώσεων.



Σχήμα 1.13: Παράδειγμα διαμόρφωσης στοιχείου μεμβράνης κοίλων ινών



Σχήμα 1.14: Παράδειγμα διαμόρφωσης στοιχείου σπειροειδούς μεμβράνης

Αντλίες παροχής νερού

Από την μέχρι τώρα περιγραφή του συστήματος αφαλάτωσης γίνεται εύκολα κατανοητό ότι τα αντλητικά συγκροτήματα έχουν πολύ σημαντικό ρόλο καθώς είναι αυτά που παρέχουν την απαιτούμενη πίεση για την διακίνηση του νερού τροφοδοσίας εντός των αγωγών και μέσα από τις μεμβράνες. Η επιλογή του θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ειδικά στις περιπτώσεις θαλασσινού νερού

καθώς από την μια πλευρά θα πρέπει να εξασφαλίζεται υψηλή πίεση κοντά στα 70 bar, αλλά και μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.

Επιπλέον οι αντλίες υψηλής πίεσης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση σε ενέργεια του συστήματος αφαλάτωσης. Ωστόσο οι απαιτήσεις σε ισχύ δεν περιορίζονται μόνο σε αυτές καθώς πρέπει να συνυπολογιστούν η άντληση και τροφοδοσία του νερού στη μονάδα από την θάλασσα και η κατανάλωση των δοσομετρικών αντλιών για τα διάφορα χημικά που προστίθενται κατά την διάρκεια της προεπεξεργασίας, επεξεργασίας και μετεπεξεργασίας. Σε όλα τα παραπάνω θα πρέπει να προστεθεί και η ενέργεια που απαιτείται κατά την διάρκεια της αντίστροφης πλύσης των πολυστρωματικών φίλτρων.

Για να επιτευχθεί πιο αποτελεσματική προσαρμογή στις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης χρησιμοποιούνται αντλίες μεταβλητών στροφών των οποίων οι ασύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες διαθέτουν ρυθμιστές στροφών. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται γρήγορα και αποτελεσματικά η μεταβολή της ταχύτητας σύμφωνα με το αντίστοιχο φορτίο μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή κατανάλωση.

Συστήματα ανάκτησης ενέργειας

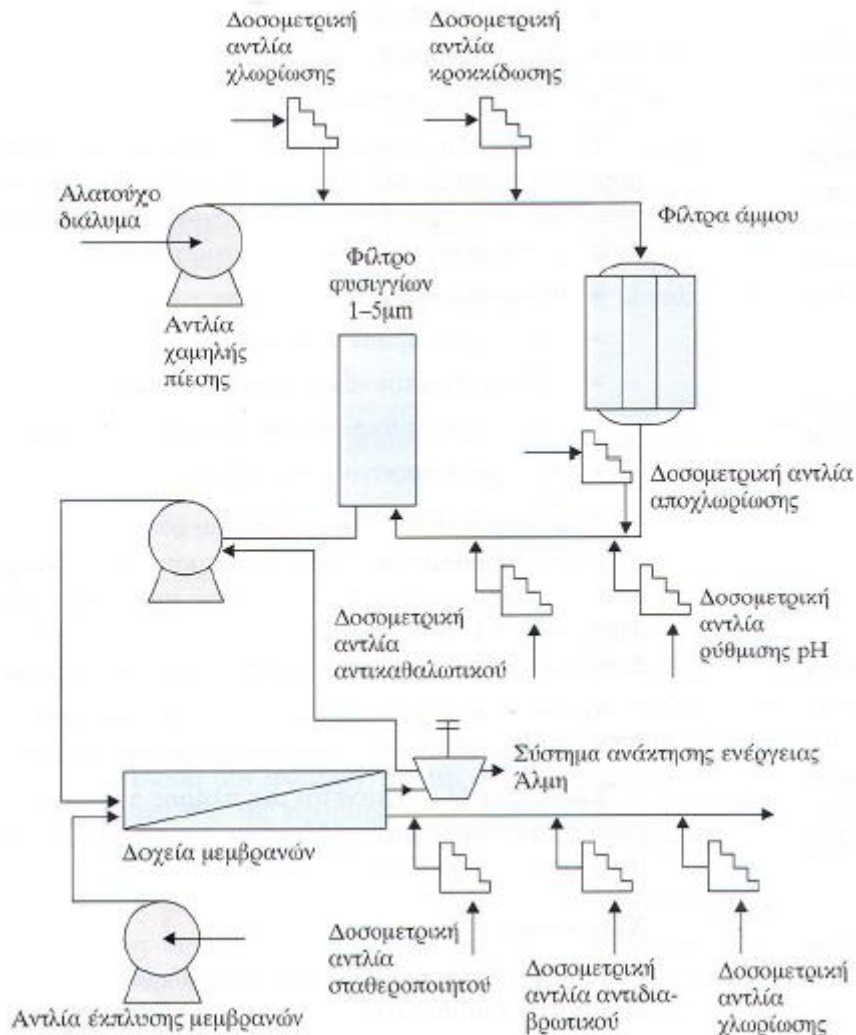
Οι συγκεκριμένες διατάξεις έχουν στόχο να μειώσουν τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης, αξιοποιώντας την υψηλή πίεση της απορριπτόμενης άλμης. Τα κυριότερα συστήματα ανάκτησης ενέργειας είναι τα εξής:

- Αντίστροφη υδραυλική άντληση (reverse running pump)
- Υδροστρόβιλος Πέλτον (Pelton wheel)
- Hydraulic Turbo Charger
- Εναλλάκτης Πίεσης (Pressure Exchanger)

Ανάλογα με το ποια από τις διατάξεις χρησιμοποιείται και το πόσο εξοικονόμηση επιτυγχάνεται πραγματοποιείται ένας εμπορικός διαχωρισμός. Πιο συγκεκριμένα 1^{ης} γενιάς συστήματα αφαλάτωσης είναι αυτά που δεν έχουν κανένα σύστημα ανάκτησης ενέργειας και είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα, ενώ αυτά που περιέχουν διατάξεις υδροστρόβιλων Pelton ή Hydraulic Turbo Charger και επιτυγχάνουν μέτρια εξοικονόμηση καλούνται 2^{ης} γενιάς. Τέλος τρίτης γενιάς είναι τα συστήματα που υιοθετούν σύγχρονες διατάξεις όπως ο εναλλάκτης πίεσης και επιτυγχάνουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Τα συστήματα τρίτης γενιάς κάνουν ανάκτηση της πίεσης της άλμης σε ποσοστό που φτάνει 95-98% γεγονός που συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 30-40%.

Ένας εναλλάκτης πίεσης παρουσιάζεται στο *σχήμα 1.15*. Αποτελείται από έναν κυλινδρικό περιστροφέα με αυλούς τοποθετημένο σε κυλινδρικό περίβλημα ανάμεσα σε δυο καπάκια με συνδέσεις για χαμηλή και υψηλή πίεση. Η πλευρά χαμηλής πίεσης του περιστροφέα γεμίζει με θαλασσινό νερό και η πλευρά υψηλής πίεσης εκτονώνει θαλασσινό νερό. Ανάμεσα στο ακριανό καπάκι και τον περιστροφέα υπάρχει μια στεγανή περιοχή που απομονώνει και διαχωρίζει τον

περιστροφέα σε χαμηλής και υψηλής περιοχής. Με την περιστροφή του οι αυλοί του εκτίθενται πρώτα στο χαμηλής πίεσης νερό τροφοδοσίας που γεμίζει της σπές και εκτοπίζει την άλμη. Στην συνέχεια ο περιστροφέας περνάει την περιοχή στεγάνωσης και εκτίθεται στην άλμη υψηλής πίεσης, η οποία γεμίζει της σπές και εκτοπίζει το εισερχόμενο θαλασσινό νερό σε υψηλή πίεση.



Σχήμα 1.15: Διάγραμμα ροής συστήματος αφαλάτωσης με διάταξη εναλλάκτη πίεσης [2]

Μετεπεργασία νερού

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αφαίρεσης των αλάτων από το νερό ακολουθεί ένα τελευταίο στάδιο επεξεργασίας ώστε το νερό να σταθεροποιηθεί και να γίνει κατάλληλο για κατανάλωση. Η διαδικασία αυτή αποτελείται από τα εξής στάδια:

- Απομάκρυνση αερίων, όπως το υδρόθειο
- Ρύθμιση του PH και αύξηση της σκληρότητας, συνήθως με προσθήκη επεξεργασμένου ασβέστη ή διοξειδίου του άνθρακα
- Χλωρίωση

1.5 Κόστος παραγόμενου νερού από μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης

Όπως συμβαίνει σε όλες τις παραγωγικές μονάδες, έτσι και στην περίπτωση των μονάδων αφαλάτωσης μπορεί να χωριστεί στις ακόλουθες δύο βασικές κατηγορίες:

- Κόστος αρχικής επένδυσης
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Στο αρχικό κόστος επένδυσης περιλαμβάνεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης της μονάδας και περιλαμβάνει κατά σειρά το κόστος μελέτης, κατασκευής και αδειοδότησης. Από τα παραπάνω μεγέθη αυτό που επιφέρει την μεγαλύτερη επιβάρυνση είναι το κόστος κατασκευής και ανέρχεται συνήθως σε ένα ποσοστό 70-80% του αρχικού κόστους επένδυσης. Το ποσοστό αυτό είναι τόσο μεγάλο καθώς στην δαπάνη της κατασκευής ενσωματώνονται και μια σειρά από πολυδάπανα έργα που προορίζονται για την μεταφορά του νερού στην μονάδα αφαλάτωσης, όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Το υπόλοιπο 20%-30% περιλαμβάνει την κάλυψη του κόστους μελέτης, σχεδιασμού και αδειοδότησης.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αναφέρεται στις ενεργειακές δαπάνες που απαιτούνται για την λειτουργία της εγκατάστασης, το κόστος του εργατοτεχνικού προσωπικού, αναλώσιμα, ανταλλακτικά κλπ. Με την σειρά του το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες το σταθερό και το μεταβλητό κόστος.

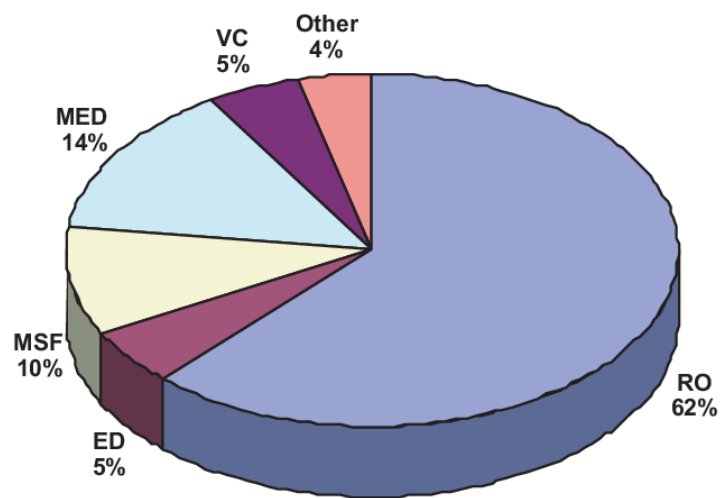
Το σταθερό κόστος αναφέρεται σε όλα τα κόστη τα οποία δεν επηρεάζονται από την ποσότητα του παραγόμενου νερού και περιλαμβάνει τα εργατικά, τη συντήρηση του εξοπλισμού, τον τεχνικό έλεγχο και όλα τα κόστη για την προστασία του περιβάλλοντος από την δράση της μονάδας. Συνήθως ανέρχεται σε 15%-50% του κόστους λειτουργίας και συντήρησης. Από την άλλη πλευρά το μεταβλητό κόστος εξαρτάται από την παραγόμενη ποσότητα νερού, αφού περιλαμβάνει την καταλισκόμενη ενέργεια, το κόστος των χημικών διεργασιών και το κόστος συντήρησης. Αποτελεί συνήθως το 50% με 85% του συνολικού κόστους λειτουργίας και συντήρησης με κυριότερη συνιστώσα του να είναι το ενεργειακό κόστος.

Τέλος οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό κόστος παραγωγής συνοπτικά είναι οι εξής:

- Η αλατότητα του νερού, δηλαδή αν είναι υφάλμυρο ή θαλασσινό
- Η τεχνολογία και το δυναμικό ΑΠΕ της περιοχής
- Η δυναμικότητα της μονάδας
- Τοπικά χαρακτηριστικά, όπως το κόστος γης ή το εργατικό κόστος

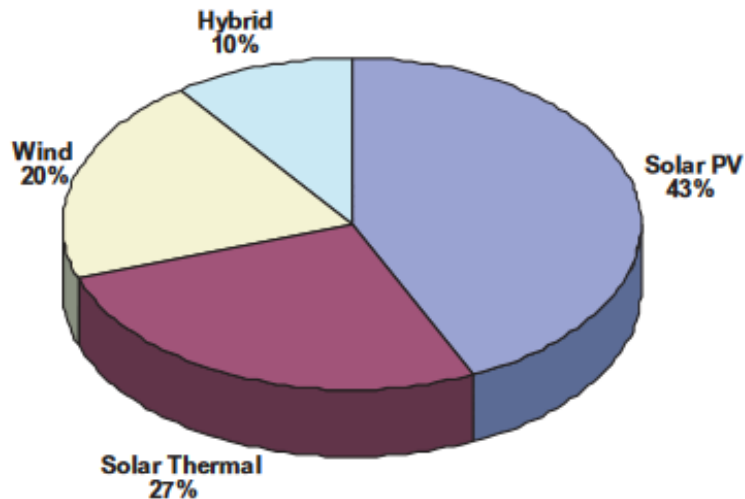
1.6 Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Σε περιπτώσεις όπου η διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας είναι περιορισμένη, όπως σε απομακρυσμένα χωριά ή νησιά, οι ενεργειακές ανάγκες μιας μονάδας αφαλάτωσης μπορούν να καλυφθούν με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μέθοδος της αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ βρίσκει πλέον αρκετές εφαρμογές παγκοσμίως. Μάλιστα από το σχήμα 1.6 παρατηρούμε ότι η τεχνολογία της αντίστροφης όσμωσης έχει επικρατήσει σε τέτοιου είδους συστήματα εξαιτίας κυρίως της χαμηλότερης ενεργειακής τους κατανάλωσης.



Σχήμα 1.16: Τεχνολογίες αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ [1]

Για την τροφοδοσία τέτοιου είδους αυτόνομων συστημάτων η πιο διαδεδομένη τεχνολογία ΑΠΕ είναι τα φωτοβολταϊκά πάρκα, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 1.17. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ ωστόσο είναι κατάλληλα για μικρές μονάδες. Ο βασικός λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι η φωτοβολταϊκή παραγωγή περιορίζεται μόνο κατά την διάρκεια της ηλιοφάνειας. Επομένως η εγκατεστημένη ισχύ των πάρκων θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ της μονάδας αφαλάτωσης, για να αντισταθμίσει την έλλειψη παραγωγής τις βραδινές ώρες. Έτσι σε μεγάλης δυναμικότητας μονάδων αφαλάτωσης η χρησιμοποίησή τους καθίσταται ασύμφορη.



Σχήμα 1.17: Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με αφαλάτωση [1]

Αντιθέτως για μεγάλης κλίμακας συστήματα ιδανική λύση αποτελούν οι ανεμογεννήτριες. Οι Α/Γ μπορούν να χωριστούν με βάση την ισχύ τους σε:

1. Σε Α/Γ πολύ μικρού μεγέθους με ονομαστική ισχύ <math><10\text{ kW}</math>
2. Σε Α/Γ μικρού μεγέθους με ονομαστική ισχύ <math><100\text{ kW}</math>
3. Σε Α/Γ μεσαίου μεγέθους με ονομαστική ισχύ <math><500\text{ kW}</math>
4. Σε Α/Γ μεγάλου μεγέθους με ονομαστική ισχύ $>500\text{ kW}$

Η τεχνολογία των Α/Γ είναι αρκετά ώριμη και συνεπώς αξιόπιστη και οικονομικά ανταγωνιστική. Οι νέες στρατηγικές ελέγχου και οι νέοι τρόποι αποθήκευσης βελτιώνουν την δυναμικότητα παραγωγής των Α/Γ. Η χρησιμοποίηση της για την τροφοδοσία αυτόνομων μονάδων αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά θα μπορούσε να προσφέρει μια οικονομική λύση στο πρόβλημα υδροδότησής τους καθώς από την μια πλευρά τα περισσότερα από αυτά δεν είναι διασυνδεδεμένα περιορίζοντας έτσι την διαθεσιμότητα σε ισχύ και από την άλλη διαθέτουν μεγάλα αιολικά αποθέματα. Με δεδομένο, μάλιστα, ότι η αντίστροφη όσμωση έχει την μικρότερη κατανάλωση από όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες αφαλάτωσης ο συνδυασμός με την αιολική ενέργεια καθίσταται ιδανικός.

1.7 Συστήματα αφαλάτωσης με χρήση Α/Γ

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί περιγραφή των βασικών στοιχείων που απαρτίζουν τις μονάδες αφαλάτωσης που τροφοτούνται από Α.Γ και την λογικής με την οποία λειτουργούν και σχεδιάζονται.

Μέχρι σήμερα συναντώνται δυο τρόποι συνδυασμού της μονάδας αφαλάτωσης με την Α/Γ:

1. Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
2. Πλήρως αυτόνομα συστήματα

Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Σε τέτοιου είδους συστήματα τόσο η μονάδα αφαλάτωσης όσο και η ανεμογεννήτρια συνδέονται στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία του γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολική απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία της αφαλάτωσης να καλύπτεται από την Α/Γ.

Η σύνδεση στο δίκτυο ωστόσο δίνει την ευελιξία να μην τηρείται αυτό το ισοζύγιο ενέργειας συνεχώς, αλλά τυχόν έλλειψη να καλύπτεται από το δίκτυο ή τυχόν περίσσεια να διοχετεύεται σε αυτό. Πρόκειται, δηλαδή, για ένα σύστημα που οι συνιστώσες του λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Από την μια πλευρά η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτει την ζήτηση σε νερό, ενώ από την άλλη πλευρά στην Α/Γ εφαρμόζεται κατάλληλος έλεγχος ώστε να μεγιστοποιείται η διεύθυνση της αιολικής παραγωγής.

Τέλος σημαντικό ρόλο έχει η σωστή διαστασιολόγηση της Α/Γ ώστε συνολικά η παραγόμενη από αυτήν ενέργεια να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την καταναλισκόμενη από την μονάδα αφαλάτωσης.

Πλήρως αυτόνομα συστήματα

Τα αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από Α/Γ παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή η εφαρμογή τους δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη ή την ποιότητα του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ανάγκες σε πόσιμο νερό σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως απομονωμένα χωριά, ενώ παρουσιάζουν ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον για εφαρμογή στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα του Αιγαίου, δεδομένου του υψηλού διαθέσιμου αιολικού τους δυναμικού και των κορεσμένων στην πλειονότητα ηλεκτρικών συστημάτων τους.

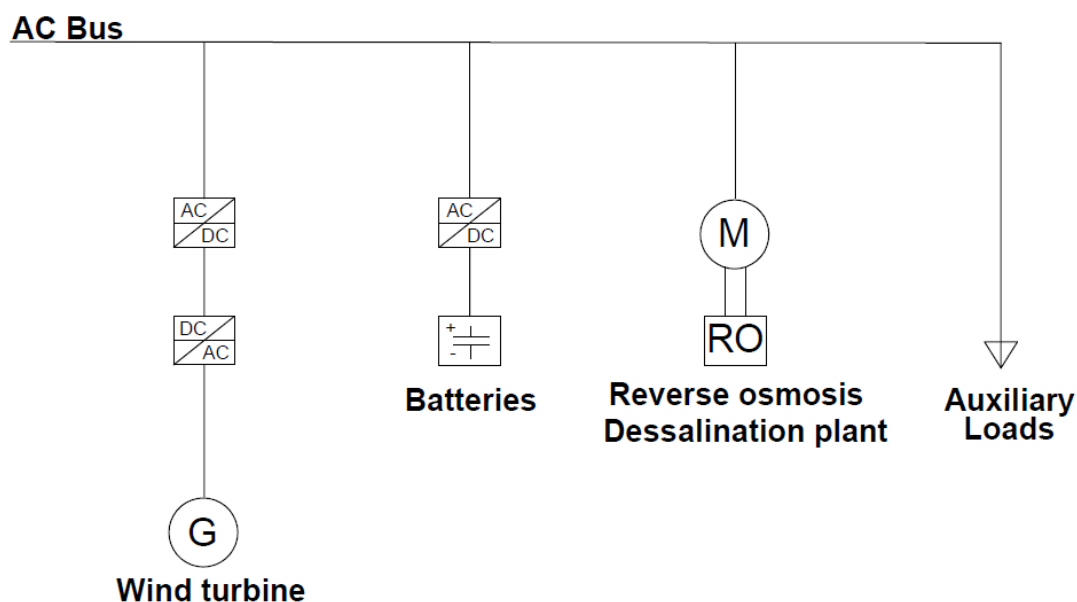
Βασικές συνιστώσες ενός τέτοιου συστήματος είναι

- Η Α/Γ ή κάποια άλλη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας
- Η μονάδα αφαλάτωσης, με επικρατέστερη τεχνολογία αυτή της αντίστροφης όσμωσης
- Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας
- Η διάταξη αποθήκευσης πόσιμου νερού (δεξαμενή)

Ένα τυπικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο *σχήμα 1.18*, όπου εκτός από τις κύριες συνιστώσες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, για την

ορθή λειτουργία του απαιτούνται μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ και ΣΡ/ΕΡ για την σύζευξη της Α/Γ με την μονάδα RO καθώς επίσης και μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ και ΣΡ/ΣΡ για την διακίνηση της ενέργειας από και προς τις μπαταρίες. Τέλος τον «εγκέφαλος» ολόκληρου του συστήματος αποτελεί το κεντρικό σύστημα ελέγχου το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και την διαχείριση της λειτουργίας του.

Μέχρι στιγμής σε πρακτικό επίπεδο υπάρχουν μικρής έως μεσαίας κλίμακας (μέχρι 1000 m³ νερού/ημέρα) αυτόνομα συστήματα όπως αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως, εξαιτίας της έλλειψης βιομηχανικής εμπειρίας και τεχνογνωσίας στο συγκεκριμένο πεδίο. Ωστόσο είναι κάτι το οποίο αναμένεται να αλλάξει λόγω της αυξανόμενης ζήτησης σε καθαρό πόσιμο νερό αλλά και του όλο και μειούμενου κόστους της τεχνολογίας τόσο των μπαταριών όσο και της Α/Γ.



Σχήμα 1.18: Τυπική διάταξη αυτόνομου συστήματος τροφοδοτούμενο από Α/Γ

Τέλος η κυριότερη πρόκληση κατά την διάρκεια της σχεδίασης είναι η σωστή διαστασιολόγηση του συστήματος ώστε να παρέχει αδιάληπτα την απαιτούμενη ποσότητα νερού σε σχετικά χαμηλό κόστος. Οι βασικότερες δυσκολίες είναι η έντονη μεταβλητότητα της παραγωγής ΑΠΕ και επομένως η υπερδιαστασιολόγηση που αυτή επιφέρει.

Μεταβλητότητα της παραγωγής ΑΠΕ

Η παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ, είτε αυτή προέρχεται από αιολική είτε από ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα, λόγω της στοχαστικότητας των

φαινομένων που εκμεταλλεύεται με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ποιότητα ισχύος της (έντονες διαταραχές τάσης και συχνότητας, απότομες διακύμανσης παραγωγής) και να δυσχεραίνεται η αυτόνομη λειτουργία του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμα μεγαλύτερο αν αναλογιστεί κανείς ότι οι μονάδες αφαλάτωσης RO που θα τροφοδοτηθούν από την παραγωγή ΑΠΕ, είναι κατασκευασμένες να λειτουργούν σε σταθερή ισχύ ή σε μικρό εύρος ισχύος.

Ο λειτουργικός αυτός περιορισμός των μονάδων RO υφίσταται για τους παρακάτω δύο λόγους:

1. Σε οποιαδήποτε αυξομείωση της ηλεκτρικής ισχύος, θα πρέπει αρχικά να αναπροσαρμόζονται οι παροχές του νερού. Αυτό με την σειρά του απαιτεί να γίνεται και αντίστοιχη ρύθμιση της απόρριψης για να διατηρείται το ποσοστό ανάκτησης καθαρού νερού. Επιπλέον στην περίπτωση που απαιτηθεί να μειωθεί πάρα πολύ η παραγωγή λόγω μειωμένης ισχύος θα πρέπει να τεθούν εκτός λειτουργίας από το σύστημα κάποιες μεμβρανοθήκες και οι αντίστοιχες αντλίες που τις τροφοδοτούν. Σε μια τέτοια περίπτωση το σύστημα ξεφεύγει σε επίπεδο προγραμματισμού και ο αλγόριθμος ελέγχου θα πρέπει να τοποθετεί την μονάδα σε κατάσταση stand by, έχοντας εξασφαλίσει τα αντίστοιχα αποθέματα ενέργειας στις μπαταρίες ώστε να πραγματοποιηθεί η πλήυση των φίλτρων με καθαρό νερό.
2. Ο εναλλάκτης πίεσης που χρησιμοποιείται ως διάταξη ανάκτησης ενέργειας στις σύγχρονες μονάδες αφαλάτωσης τρίτης γενιάς, έχει περιορισμένο εύρος λειτουργίας ως προς την παροχή νερού. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν απαιτηθεί η λειτουργία εκτός των ορίων της διάταξης όλη η μονάδα θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας, καθώς στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει η δυνατότητα να βγούν εκτός κάποιες μεμβράνες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια έχουν μελετηθεί ερευνητικά και σιγά σιγά γίνονται εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα μονάδων αφαλάτωσης τα οποία έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν σε μεταβλητή ισχύ. Η λειτουργία τους βασίζεται στην χρησιμοποίηση πολλών μικρών υπομονάδων RO (modules) μικρού εύρους ισχύος και δυναμικότητας παραγωγής τα οποία συνδυαστικά επιτυγχάνουν μεγάλο εύρος ισχύος λειτουργίας. Έτσι γίνεται δυνατή η ρύθμιση στα επιθυμητά επίπεδα ισχύος με την σβέση ή την έναυση των κατάλληλων υπομονάδων.

Επομένως η ευελιξία τέτοιων συστημάτων τα καθιστά ιδανικά για συνδυασμό με την τεχνολογία των ΑΠΕ. Ωστόσο ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση η παρουσία των μπαταριών είναι απαραίτητη καθώς η μεταβλητότητα της παραγωγής των ΑΠΕ είναι ιδιαίτερος μεγάλη και ακόμα και αν μπορεί να γίνει προσαρμογή της μονάδας αφαλάτωσης σε αυτήν, θα υπάρξει έντονη κόπωση του μηχανολογικού εξοπλισμού και μείωση της διάρκειας ζωής του.

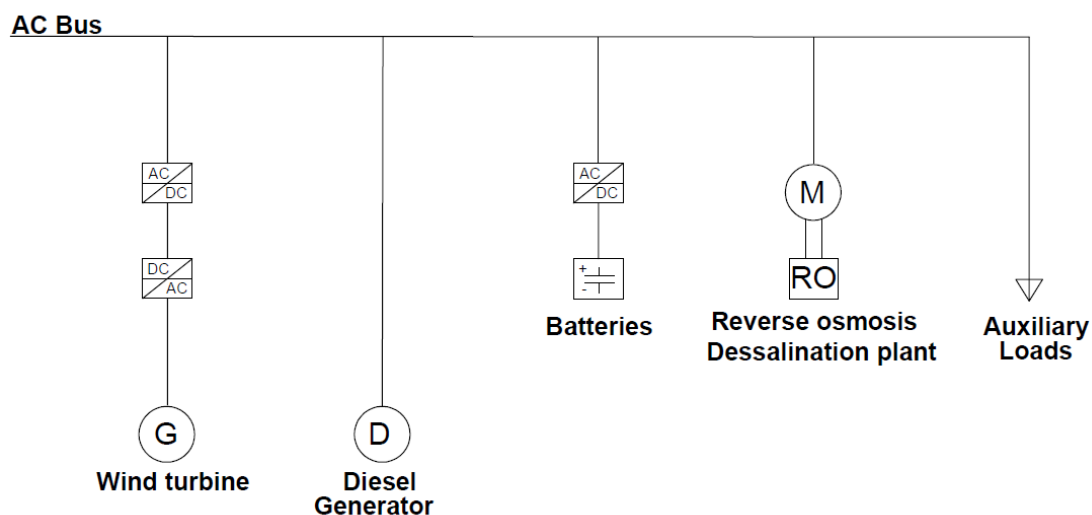
Υπερδιαστασιολόγηση συστήματος

Κατά την διάρκεια σχεδίασης ενός αυτόνομου συστήματος τροφοδοτούμενο από ΑΠΕ η υπερδιαστασιολόγησή του καθίσταται αναπόφευκτη για τους εξής λόγους:

1. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων για τα ελληνικά νησιά οι μονάδες αφαλάτωσης θα πρέπει να καλύπτουν το σύνολο των αναγκών σε πόσιμο νερό και όχι απλά να λειτουργούν επικουρικά σε κάποια άλλη πηγή. Επί προσθέτως θα πρέπει να είναι ικανές όχι μόνο να καλύπτουν την ζήτηση σε ετήσια βάση αλλά να ανταπεξέλθονται και στην ημερήσια διακύμανση της ζήτησης, η οποία ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες παρουσιάζει έντονη αύξηση.
2. Η έντονη μεταβλητότητα της παραγωγής των ΑΠΕ σε συνδυασμό με την απαίτηση για αδιάληπτη παροχή νερού οδηγεί είτε σε πολύ μεγάλες διατάξεις μπαταριών είτε σε μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενές

Με σκοπό να μετριαστεί η υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος θα εξεταστεί μια παραλλαγή της διάταξης που παρουσιάστηκε στο *σχήμα 1.18* και φαίνεται στο *σχήμα 1.19*, όπου γίνεται προσθήκη ενός ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους.

Ένα από τα αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων της χρήσης του Η/Ζ στην διαστασιολόγηση όλου του συστήματος και οι επιπτώσεις του στο κόστος παραγωγής νερού.



Σχήμα 1.19: Αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενο από Α/Γ και Η/Ζ

Κεφάλαιο 2: Μοντελοποίηση συστήματος αφαλάτωσης

2.1 Γενικά στοιχεία

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης μπορεί να κωδικοποιηθεί στα παρακάτω βήματα:

- Πλήρης μαθηματική περιγραφή, υπό μορφή εξισώσεων, όλων των συνιστωσών του συστήματος
- Κατάστρωση του αλγορίθμου ελέγχου του αυτόνομου συστήματος
- Παραμετρική διερεύνηση ως προς τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου
- Εκτέλεση ετήσιων προσομοιώσεων με σκοπό από την μια να βρεθεί η ιδανικότερη στρατηγική διαχείρισης των πόρων του συστήματος και από την άλλη να γίνει και η βέλτιστη διαστασιολόγηση του.

Η δημιουργία του αλγορίθμου ελέγχου του συστήματος αποτελεί ένα από τα βασικότερα αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής και περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο. Για να γίνει αντιληπτή η σημασία του, αρκεί να αναφέρουμε ότι ουσιαστικά ο έλεγχος είναι υπεύθυνος για τον προγραμματισμό και την σειρά ένταξης όλων των συνιστωσών του συστήματος, ώστε να ικανοποιείται συνεχώς η ζήτηση σε νερό, υπό χαμηλό κόστος, με καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Στην ουσία δομείται ο αλγόριθμος ελέγχου ο οποίος επικοινωνεί με τους ελεγκτές των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος και είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό τους. Για λόγους πολυπλοκότητας ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε κλίμακα λίγων λεπτών της ώρας και όταν το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας χωρίς να λαμβάνει υπόψιν του δηλαδή δυναμικά και μεταβατικά φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται σε μικρότερες κλίμακες χρόνου.

Μέχρι στιγμής, βιβλιογραφικά, έχουν γίνει απόπειρες δημιουργίας διαφόρων στρατηγικών ελέγχου, οι οποίες όμως κατά κύριο λόγο αφορούν εφαρμογές μικρής κλίμακας. Σε τέτοιου είδους συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν απλές λογικές ελέγχου που θα αρκούνται απλώς στην ικανοποίηση του ενεργειακού ισοζυγίου και στην κάλυψη της ζήτησης σε νερό. Ωστόσο αν απαιτηθεί η ενσωμάτωση σύνθετων λειτουργικών περιορισμών αυξάνεται η πιθανότητα σφαλμάτων και καταστάσεων αδυναμίας επίλυσης του αλγορίθμου, αφού δεν μπορούν να προβλεφθούν όλες οι πιθανές καταστάσεις λειτουργίας. Επιπλέον σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές το τελευταίο μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της τιμής του παραγόμενου προϊόντος. Για να αντιμετωπιστούν όλα τα παραπάνω μια εναλλακτική επιλογή είναι η διατύπωση του αλγορίθμου ελέγχου ως πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού. Στην παρακάτω ενότητα γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών του μαθηματικού προγραμματισμού.

2.2 Βασικές αρχές Μαθηματικού Προγραμματισμού

Γενικά στοιχεία

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η καλύτερη ή η βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα που απαιτεί μια απόφαση ή ένα σύνολο αποφάσεων σχετικά με την χρησιμοποίηση του συνόλου των περιορισμένων πόρων για την επίτευξη ενός αντικειμενικού σκοπού. Σε ένα αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης, σαν αυτό που παρουσιάστηκε παραπάνω, πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου το οποίο να αποφασίζει κάθε χρονική στιγμή, την βέλτιστη λειτουργία των συνιστωσών του, ώστε να παράγεται η απαιτούμενη ποσότητα νερού, για να ικανοποιείται η ζήτησή του, με παράλληλη ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής του. Συστήματα τα οποία μοντελοποιούνται με την παραπάνω μέθοδο εξασφαλίζουν ότι θα λαμβάνονται οι βέλτιστες αποφάσεις με ακριβή και επιστημονικό τρόπο.

Τα βήματα που απαρτίζουν το μαθηματικό προγραμματισμό είναι τα ακόλουθα:

- Μετατροπή ενός στατικού προβλήματος σε μαθηματικό μοντέλο που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία του συστήματος, μέσω μιας σειράς εξισώσεων, που το περιγράφουν πλήρως.
- Διερεύνηση των διαφορετικών λύσεων του προβλήματος.
- Εύρεση της πιο κατάλληλης ή αν είναι δυνατό της βέλτιστης λύσης.

Ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού μοντελοποιείται ως εξής:

Αναζητούνται οι τιμές των μεταβλητών x_1, \dots, x_n , οι οποίες καλούνται μεταβλητές απόφασης, ώστε να ικανοποιούνται μια σειρά από m συνθήκες της μορφής

$$g_i(x_1, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_i \quad \forall i = 1, \dots, m$$

Οι οποίες με τη σειρά τους καλούνται περιορισμοί (constraints) με τελικό σκοπό να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται μια συνάρτηση της μορφής:

$$z = f(x_1, \dots, x_n)$$

Επομένως, το πρόβλημα του Μαθηματικού Προγραμματισμού ανάγεται στην μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης και τόσο η μορφή των περιορισμών των περιορισμών, όσο και της αντικειμενικής συνάρτησης χαρακτηρίζουν το πρόβλημα ως γραμμικό, ακέραιο, στοχαστικό, δυναμικό κ.τ.λ.π.

Μικτός ακέραιος προγραμματισμός με τετραγωνικά κόστη

Ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός αποτελεί υποκατηγορία του μαθηματικού προγραμματισμού, στον οποίο όλες οι μεταβλητές είναι είτε ακέραιες είτε δυαδικές. Οι δυαδικές μεταβλητές παίρνουν τιμές 0 ή 1 και χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν μια απόφαση, όπως για παράδειγμα την λειτουργία ή όχι του

ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους μια χρονική στιγμή. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να περιλαμβάνει όρους γραμμικής ή τετραγωνικής μορφής ανάλογα με το επιλεγμένο κριτήριο.

Στις παρακάτω ενότητες μοντελοποιείται η λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης ως πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με τετραγωνικά ή γραμμικά κόστη. Η διαχείριση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης επιλέγεται να δοθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης από την μια πλευρά για να επιτευχθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση και διαχείριση των συνιστωσών του και από την άλλη γιατί ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος στην πράξη είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος ώστε να δομηθεί με απλή λογική ανθρώπινου μυαλού. Επιπροσθέτως μια τέτοια παραμετρική σχεδίαση προσφέρει την δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών σεναρίων.

2.3 Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Δείκτης

T : Χρονικό βήμα 10λέπτου

Σταθερές

NT : Χρονικός ορίζοντας βελτιστοποίησης (αριθμός 10λέπτων)

$F_d(t)$: Ζήτηση νερού το τρέχον δεκάλεπτο t ($m^3/10min$)

$P_{WT}(t)$: Μέγιστη δυνατή αιολική παραγωγή το τρέχον δεκάλεπτο t

$F_{p,max}$: Μέγιστη παραγωγή νερού από μονάδα αφαλάτωσης ($m^3/10min$)

$F_{p,min}$: Ελάχιστη παραγωγή νερού από μονάδα αφαλάτωσης ($m^3/10min$)

$P_{dp,max}$: Μέγιστη ισχύς κατανάλωσης της μονάδας αφαλάτωσης (kW)

$P_{dp,min}$: Ελάχιστη ισχύς κατανάλωσης της μονάδας αφαλάτωσης (kW)

P_{flush} : Ισχύς ανάστροφης πλύσης των φίλτρων της μονάδας RO(kW)

$St_{flush}(t)$: 1 αν η μονάδα RO είναι σε κατάσταση πλύσης, αλλιώς 0

$E_{bat,max}$: Ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)

$P_{bat,max}$: Μέγιστη ισχύς μπαταριών (kW)

$P_{g,max}$: Μέγιστη ισχύς H/Z (kW)

TM : Τεχνικό ελάχιστο H/Z (kW)

m_{run} : Χρόνος σε δεκάλεπτα που πρέπει το H/Z να λειτουργεί

m_{run0} : Συνεχόμενα δεκάλεπτα που είχε μείνει σε λειτουργία η γεννήτρια στο τέλος της προηγούμενης ημέρας μέχρι την έναρξη της επομένης

- m_{stop} : Χρόνος σε δεκάλεπτα που πρέπει το H/Z να μείνει σταματημένο
- m_{stop0} : Συνεχόμενα δεκάλεπτα που είχε μείνει σε κλειστή η γεννήτρια στο τέλος της προηγούμενης ημέρας μέχρι την έναρξη της επομένης
- A_s : Επιφάνεια δεξαμενής νερού (m^3)
- H_{max} : Μέγιστη δυνατή στάθμη νερού στη δεξαμενή
- Dt : Χρονικό διάστημα βήματος σε ώρες (h)

Θετικές μεταβλητές

- $F_p(t)$: Παραγωγή νερού από την μονάδα RO το τρέχον δεκάλεπτο ($m^3/10min$)
- $P_{dt}(t)$: Κατανάλωση ισχύος της μονάδας RO το τρέχον δεκάλεπτο t (kW)
- $P_{out}(t)$: Παραγωγή A/Γ το τρέχον δεκάλεπτο t (kW)
- $E_{bat}(t)$: Χωρητικότητα των μπαταριών το τρέχον δεκάλεπτο t (kWh)
- $Soc(t)$: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας
- $P_g(t)$: Παραγωγή H/Z το τρέχον δεκάλεπτο t (kW)
- $H(t)$: Ύψος δεξαμενής το τρέχον δεκάλεπτο t (m)
- $Sos(t)$: Κατάσταση δεξαμενής

Ελεύθερες μεταβλητές

- $F_s(t)$: Ποσότητα νερού που παρέχει η δεξαμενή το τρέχον δεκάλεπτο (m)
- $P_{bat}(t)$: Ισχύς των μπαταριών το τρέχον δεκάλεπτο t

Διαδικές μεταβλητές

- $St(t)$: Λαμβάνει την τιμή 1 αν το τρέχον δεκάλεπτο t η μονάδα RO είναι σε λειτουργία.
- $St_g(t)$: Λαμβάνει την τιμή 1 αν το τρέχον δεκάλεπτο t το H/Z είναι σε λειτουργία.
- $Su(t)$: Λαμβάνει την τιμή 1 αν το τρέχον δεκάλεπτο t το H/Z ξεκινάει.
- $Sd(t)$: Λαμβάνει την τιμή 1 αν το τρέχον δεκάλεπτο t το H/Z σταματάει.

2.4 Λειτουργικοί περιορισμοί συστήματος

Ισοζύγιο παραγωγής ζήτησης αποθήκευσης νερού

Για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης θα πρέπει να καλύπτεται η απαίτηση σε νερό με άντληση νερού από την δεξαμενή αποθήκευσης σε περίπτωση που η παραγωγή δεν επαρκεί και αποθήκευση νερού, αντίστοιχα, αν αυτή βρίσκεται σε περίσσεια. Ο συγκεκριμένος περιορισμός περιγράφεται από την σχέση:

$$F_p(t) = F_s(t) + F_d(t)$$

Όπου:

$F_s(t) \geq 0$, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση και αποθηκεύεται νερό στην δεξαμενή

$F_s(t) \leq 0$, όταν η παραγωγή είναι μικρότερη από την κατανάλωση και για την κάλυψη της αντλείται νερό από τη δεξαμενή

Ισοζύγιο ισχύος

Για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης θα πρέπει να τηρείται το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της Α/Γ, του Η/Ζ, των μπαταριών και της μονάδας αφαλάτωσης, όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{out_{WT}}(t) + P_g(t) = P_{dp}(t) + P_{flush} * st_{flush}(t) - P_{bat}(t)$$

Όπου:

$P_{bat}(t) \geq 0$, όταν η μπαταρία εκφορτίζεται

$P_{bat}(t) \leq 0$, όταν η μπαταρία φορτίζεται

Στη παραπάνω σχέση έχει ληφθεί υπόψη και η κατάσταση πλύσης των πολυστρωματικών φίλτρων της μονάδας αφαλάτωσης, αφού κατά την διάρκεια της απαιτείται σημαντική ηλεκτρική ισχύ. Επιπροσθέτως, λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες από τους μετατροπείς, μέσω των εσωτερικών βαθμών απόδοσής τους, κάτι που ωστόσο δεν παριστάνεται στην παραπάνω εξίσωση για λόγους απλούστερης διατύπωσης.

Λειτουργικοί περιορισμοί μονάδας αφαλάτωσης

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκε μονάδα αφαλάτωσης, με δυνατότητα λειτουργίας σε μεταβλητή ισχύ και αντιστοίχως ανάλογη δυνατότητα παραγωγής νερού. Η απαίτηση σε ισχύ της μονάδας RO εκφράζεται ως εξής:

$$P_{dp}(t) \leq P_{dp,max} * st(t)$$

$$P_{dp}(t) \geq P_{dp,min} * st(t)$$

Και αντίστοιχα η δυνατότητα παραγωγής νερού:

$$F_p(t) \leq F_{p,max} * st(t)$$

$$F_p(t) \geq F_{p,min} * st(t)$$

Η συσχέτιση μεταξύ παραγωγής νερού και απαίτηση ισχύος θεωρείται γραμμική και επομένως περιγράφεται από την σχέση:

$$\frac{F_p(t)}{F_{p,max}} = \frac{P_{dp}(t)}{P_{dp,max}}$$

Τέλος η παρακάτω σχέση εξασφαλίζει ότι δεν μπορεί η μονάδα αφαλάτωσης να βρεθεί συγχρόνως σε κατάσταση λειτουργίας και πλύσης

$$st(t) + st_{flush}(t) \leq 1$$

Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους

Σε κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης η ισχύς του Η/Ζ περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$P_g(t) \leq P_{g,max} * st_g(t)$$

$$P_g(t) \geq TM * st_g(t)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο περιορισμός του τεχνικού ελαχίστου της γεννήτριας, όπως περιγράφεται στην παραπάνω σχέση, χρησιμοποιείται για να προστατέψει την ίδια την γεννήτρια, αφού σε χαμηλή παραγωγή παρατηρούνται ταλαντώσεις στον άξονα της, που οδηγούν στη μείωση της διάρκειας ζωής της.

Για να γίνει αποφυγή διαδοχικών καταστάσεων ένταξης και σβέσης του Η/Ζ εισάγονται οι περιορισμοί του ελάχιστου χρόνου λειτουργίας και του ελάχιστου χρόνου σβέσης. Ο πρώτος περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\sum_{t=1}^L (1 - st_{g(t)}) = 0$$

$$\sum_{t=1}^{t+mrun-1} (st_{g(k)}) \geq mrun * su(t), \quad \forall t = L + 1 \dots NT - mrun + 1$$

$$\sum_{t=1}^{NT} (st_{g(k)} - su(t)) \geq 0, \quad \forall t = NT - mrun + 2 \dots NT$$

Η πρώτη σχέση αφορά τις ώρες που πρέπει να μείνει η γεννήτρια σε λειτουργία ώστε να παρέλθει ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της, ενώ ήταν σε λειτουργία το τελευταίο 10min της προηγούμενης ημέρας. Η παράμετρος L συμβολίζει τα δεκάλεπτα ελάχιστης λειτουργίας της μονάδας που απομένουν και ορίζεται ως:

$$L = \min\{NT, (mrun - mrun0) * st_g0\}$$

Η δεύτερη σχέση εξαναγκάζει την γεννήτρια να παραμείνει σε λειτουργία για τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας της, από τη στιγμή που αυτή τεθεί σε λειτουργία, για όλα τα πιθανά σύνολα συνεχών 10min μεγέθους $mrun$. Τέλος η τελευταία σχέση εξαναγκάζει την γεννήτρια να παραμείνει σε λειτουργία, εάν το γεγονός έναυσης συμβεί τα τελευταία 10min της μέρας κατανομής, όπου ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας είναι μεγαλύτερος του εναπομείναντος διαστήματος μέχρι τη λήξη της ημέρας κατανομής.

Ο ελάχιστος χρόνος σβέσης του Η/Ζ περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\sum_{t=1}^L (st_{g(t)}) = 0$$

$$\sum_{t=1}^{t+mstop_1} (1 - st_{g(k)}) \geq mstop * sd(t), \quad \forall t = F + 1 \dots NT - mstop + 1$$

$$\sum_{t=1}^{NT} (1 - st_{g(k)} - sd(t)) \geq 0, \quad \forall t = NT - mrun + 2 \dots NT$$

Η πρώτη σχέση αφορά τα 10min που πρέπει να μείνει η γεννήτρια σε σβέση, ώστε να παρέλθει ο χρόνος κράτησής της, ενώ ήταν σε σβέση το τελευταίο 10min της προηγούμενης περιόδου κατανομής. Η παράμετρος F συμβολίζει τα 10min ελάχιστης κράτησης της μονάδας που απομένουν και ορίζεται ως:

$$F = \min\{NT, (mstop - mstop0) * (1 - st_g0)\}$$

Η δεύτερη σχέση εξαναγκάζει την γεννήτρια να παραμείνει σε κράτηση για τον ελάχιστο χρόνο κράτησής της, από τη στιγμή που αυτή σβήνει, για όλα τα πιθανά σύνολα συνεχών 10min μεγέθους $mstop$. Η τρίτη σχέση εξαναγκάζει την μονάδα να παραμείνει σε κράτηση, εάν η σβέση της συμβεί τα τελευταία 10min της μέρας κατανομής, όπου ο ελάχιστος χρόνος κράτησης είναι μεγαλύτερος του εναπομείνοντος διαστήματος μέχρι τη λήξη της ημέρας κατανομής.

Εξισώσεις δεξαμενής

Σε κάθε δεκάλεπτο υπολογίζεται η στάθμη του νερού στην δεξαμενή αποθήκευσης, προσθέτοντας στην υπάρχουσα ποσότητα την περίσσεια παραγωγής, ή αφαιρώντας την απαιτούμενη ποσότητα για να καλυφθεί η ζήτηση, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω σχέση:

$$h(t) = h(t - 1) + \frac{F_s(t)}{A_s}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν τέθηκε κανένας περιορισμός στην παροχή νερού από και προς την δεξαμενή αποθήκευσης, ανά δεκάλεπτο. Επιπλέον για λόγους εποπτείας και καλύτερης αξιολόγησης των αποτελεσμάτων εισάγεται μια μεταβλητή που περιγράφει την κατάσταση της δεξαμενής (state of storage) και ορίζεται ως:

$$sos(t) = \frac{h(t)}{h_{max}}$$

Τέλος κρίθηκε αναγκαίο, να υπάρξει ένα κατώτατο όριο κάτω από το οποίο η στάθμη της δεξαμενής δεν θα μπορεί να βρεθεί. Αυτό συμβαίνει για να διασφαλιστεί η συνεχής τροφοδότηση με νερό του συστήματος, ακόμα και σε περίπτωση βλάβης ή και σφάλματος στην πρόβλεψη.

$$sos(t) \geq sos_{min}$$

Εξισώσεις μπαταριών

Σε κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης η χωρητικότητα των συστοιχιών μπαταριών υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t - 1) - P_{bat}(t) * Dt$$

Όσον αφορά την ισχύ τους, τόσο κατά την φόρτιση, όσο και κατά την εκφόρτιση, δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα κατασκευαστικά τους όρια:

$$|P_{bat}(t)| \leq P_{bat,max}$$

Σε αντιστοιχία με ότι έγινε για την δεξαμενή ορίζεται ένα μέγεθος soc (state of charge), το οποίο περιγράφει το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών ανά δεκάλεπτο και ορίζεται ως:

$$soc(t) = \frac{E_{bat}(t)}{E_{bat,max}}$$

Για να προφυλαχτούν οι μπαταρίες και να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρόνο ζωής εισάγεται περιορισμός στην κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, με:

$$soc(t) \leq soc_{max}$$

$$soc(t) \geq soc_{min}$$

Λειτουργία A/Γ

Κάθε χρονική στιγμή θα πρέπει η παραγωγή της A/Γ να είναι το πολύ ίση με αυτήν που μπορεί να παραχθεί με τα επίπεδα ανέμου που επικρατούν το τρέχον δεκάλεπτο:

$$P_{out,WT}(t) \leq P_{WT}(t)$$

Αντικειμενική συνάρτηση

Η διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί στην ουσία τον σχεδιασμό της στρατηγικής ελέγχου του αυτόνομου συστήματος με βάση την οποία προγραμματίζεται η λειτουργία και ο βέλτιστος συντονισμός των βασικών συνιστωσών του συστήματος, δηλαδή της A/Γ, του H/Z, της μονάδας RO και της μπαταρίας. Οι διαφορετικές πολιτικές διαχείρισης και οι επιθυμητές «συμπεριφορές» μοντελοποιούνται μαθηματικά και ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση υπό μορφή κόστους. Τα κόστη αυτά μπορεί να είναι είτε γραμμικού είτε τετραγωνικού τύπου ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες πολιτικές διαχείρισης και πως αυτές ενσωματώνονται ως κόστη στην αντικειμενική συνάρτηση.

Μεγιστοποίηση της παραγωγής νερού

$$\min[F_{p,max} - F_p(t)]$$

Επιλέγεται ως γραμμικό για να «τιμωρεί» ομοίμορφα την απόκλιση σε όλο τον ορίζοντα της βελτιστοποίησης

Μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την A/Γ

$$\min[P_{out,WT} - P_{WT}(t)]$$

Για τους ίδιους λόγους με το προηγούμενο κριτήριο επιλέγεται και αυτό γραμμικό

Ελαχιστοποίηση της παραγόμενης από το H/Z ισχύος

$$\min[P_g(t)]$$

Αντίστοιχα επιλέγεται ως γραμμικό

Περιορισμός στις μεγάλες μεταβολές της ισχύος της μονάδας RO

$$\min [P_{dp}(t) - P_{dp}(t-1)]^2$$

Το συγκεκριμένο κριτήριο επιλέγεται να είναι τετραγωνικού βαθμού ώστε να περιορίζει τις απότομες μεταβολές στην ισχύ της μονάδας αφαλάτωσης που καταπονούν τον μηχανολογικό εξοπλισμό.

Κεφάλαιο 3: Προκαταρκτική σχεδίαση

3.1 Χρονοσειρά ζήτησης νερού

Για τις ανάγκες τις παρούσας διπλωματικής είναι απαραίτητη η ύπαρξη στοιχείων περί των υδρευτικών απαιτήσεων των νησιών σε κλίμακα μικρότερης της μηνιαίας. Από την στιγμή που δεν υπάρχουν τέτοια πραγματικά στοιχεία, κατασκευάστηκε μια χρονοσειρά ζήτησης νερού με βήμα δεκαλέπτου. Αρχικά έγινε η παραδοχή ότι η ζήτηση νερού σχετίζεται άμεσα με την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και δεδομένης μιας ετήσιας χρονοσειράς πρόβλεψης φορτίου για το έτος 2018 για το νησί της Πάτμου και των απολογιστικών μηνιαίων καταναλώσεων πόσιμου νερού για το 2006 του ίδιου νησιού κατασκευάστηκε η ετήσια χρονοσειρά ζήτησης νερού. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε συνοψίζεται στα εξής βήματα:

- Ορίζεται η αδιάστατη ζήτηση νερού-ηλεκτρικής ενέργειας(n_a) ως:

$$n_a = \frac{\text{ωριαία ζήτηση ηλ. ενέργειας}}{\text{αιχμή ζήτησης ηλ ενέργειας}}$$

- Υπολογίζεται η ωριαία ζήτηση νερού (ΩZN) χρησιμοποιώντας την ετήσια υδρευτική απαίτηση και την αδιάστατη ζήτηση νερού ηλεκτρικής ενέργειας ως εξής:

$$\text{Μέση } \Omega ZN = \frac{\text{Ετήσια υδρευτική απαίτηση}}{8760}$$

$$\Omega ZN = \frac{\text{Μέση } \Omega ZN * n_a}{\text{Μέση αδιάστατη ζήτηση νερού – ηλ. ενέργειας}}$$

- Τέλος στην ωριαία ζήτηση που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα εισάγουμε μεγαλύτερη προσαύξηση στις ώρες με μεγάλη ζήτηση και μικρότερη σε αυτές με μικρή ως εξής:

$$\text{Προσαυξημένη } \Omega ZN = (\Omega ZN - \min[\Omega ZN]) * 1.5 + \min[\Omega ZN]$$

ΜΗΝΑΣ	1 ^{ΟΣ}	2 ^{ΟΣ}	3 ^{ΟΣ}	4 ^{ΟΣ}	5 ^{ΟΣ}	6 ^{ΟΣ}	7 ^{ΟΣ}	8 ^{ΟΣ}	9 ^{ΟΣ}	10 ^{ΟΣ}	11 ^{ΟΣ}	12 ^{ΟΣ}	ΣΥΝΟΛΟ
ΠΑΤΜΟΣ	7500	5600	17500	17600	25200	33000	25700	35000	29400	27000	17600	12500	253600

Πίνακας 3.1: Μεταφερόμενη ποσότητα νερού για το έτος 2006 στην Πάτμο. Πηγή υπουργείο ανάπτυξης 2008.

3.2 Διαστασιολόγηση παραμέτρων συστήματος

Το μαθηματικό μοντέλο όπως αυτό που δομήθηκε και περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο, εφαρμόζεται για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης αποτελούμενο από την μονάδα RO, την Α/Γ, το Η/Ζ, τις μπαταρίες και την δεξαμενή αποθήκευσης νερού με σκοπό την εφαρμογή του σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα του Αιγαίου. Αρχικώς σκοπός της εργασίας είναι μέσω της επίτευξης ετήσιας προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος, να σχεδιαστεί ο κατάλληλος αλγόριθμος ελέγχου που απαιτείται για τον συντονισμό των επιμέρους συνιστωσών του έργου. Στη συνέχεια με την βοήθεια του παραπάνω αλγόριθμου, θα πραγματοποιηθεί διερεύνηση ως προς το μέγεθος των επί μέρους συνιστωσών του συστήματος αφαλάτωσης, με σκοπό να βρεθεί ο συνδυασμός αυτός που θα προσφέρει μια ρεαλιστική και οικονομικά βιώσιμη επιλογή προς πρακτική εφαρμογή με δυνατότητα πλήρους κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό ενός νησιού με χαμηλό κόστος παραγωγής.

Στις ενότητες που ακολουθούν, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους, που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί η προσομοίωση του υποσχεδίαση συστήματος και επιχειρείται μια πρώτη διαστασιολόγηση τους.

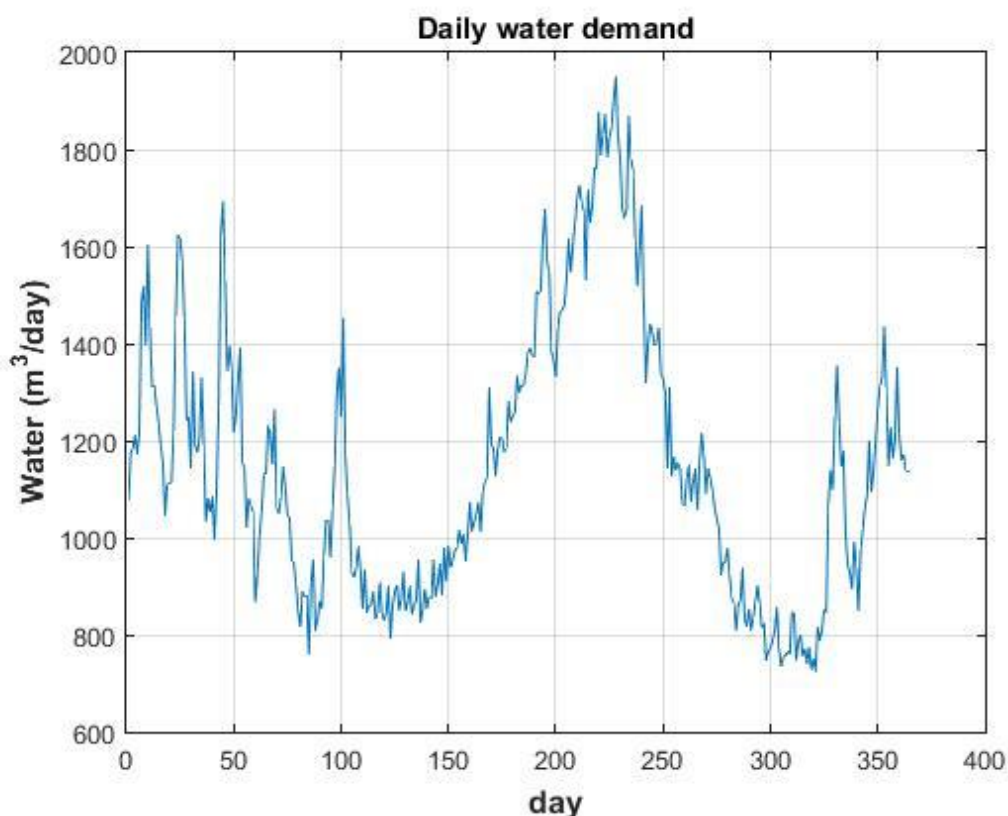
Μονάδα αφαλάτωσης

Η μέθοδος αφαλάτωσης που επιλέγεται είναι η αντίστροφη ώσμωση (RO). Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, θεωρήθηκε ότι η μονάδα αφαλάτωσης έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ισχύος, η ρύθμιση της οποίας μπορεί να πραγματοποιείται ανά δεκάλεπτο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα η ισχύς της θεωρείται σταθερή.

Η δυνατότητα ρύθμισης της παραγωγής νερού και κατά συνέπεια της καταναλισκόμενης ισχύος, όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, επιτυγχάνεται με συνδυαστική χρήση μικρότερων υπομονάδων RO και κατάλληλου συστήματος ελέγχου που υποδεικνύει την έναυση και την σβέση τους ανάλογα με την τρέχουσα ζήτηση νερού. Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων, ως τέτοια βασική υπομονάδα θεωρήθηκε ένα στοιχείο (module) RO με εύρος λειτουργίας από 18.75-37.5kW και αντίστοιχη παραγωγή νερού 175-350 m³/day ή 1.22-2.43 m³/10min.

Η πρώτη εκτίμηση για τον κατάλληλο αριθμό modules RO που θα χρησιμοποιηθούν, γίνεται παρατηρώντας την ετήσια καμπύλη ημερήσιας κατανάλωσης νερού, σχήμα

3.1, όπου φαίνεται πως η μέγιστη απαίτηση νερού πλησιάζει τα 2000 m³/day. Για να καλυφθεί η συγκεκριμένη ποσότητα απαιτούνται τουλάχιστον έξι στοιχεία RO των 350 m³/day. Επομένως στα σενάρια που θα παρουσιαστούν σε παρακάτω κεφάλαια θα χρησιμοποιηθούν συστήματα των έξι και των επτά στοιχείων, με στοιχεία που παρουσιάζονται στον πίνακα.



Σχήμα 3.1 : Ετήσια καμπύλη ημερήσιας ζήτησης νερού

Αριθμός στοιχείων	Ικανότητα παραγωγής νερού (m ³ /day)/(m ³ /10min)	Ισχύς λειτουργίας (kW)
1	175-350 / 1.22-2.43	18.75-37.5
6	175-2100/1.22-14.58	18.75-225
7	175-2450 / 1.22-17	18.75-262.5

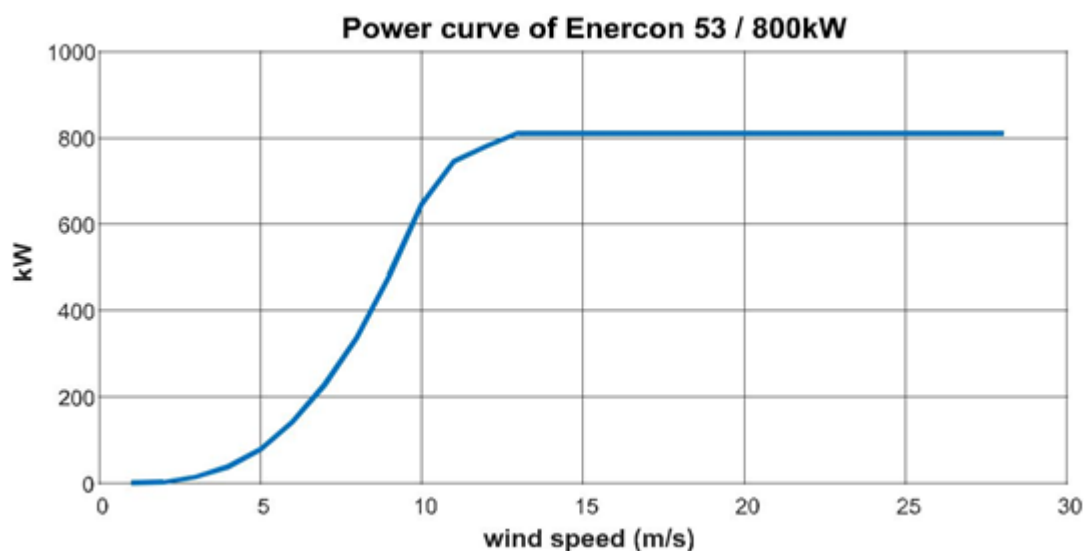
Πίνακας 3.2: Συνοπτικά χαρακτηριστικά μονάδων αφαλάτωσης προς διερεύνηση

Επιπλέον μια φορά την ημέρα η μονάδα αφαλάτωσης θα πρέπει να σταματά για να πραγματοποιούνται ανάστροφες πλύσεις στα πολυστρωματικά φίλτρα κατά το στάδιο της επεξεργασίας του νερού. Αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνεται κάθε μέρα καθώς, στο θαλασσινό νερό του Αιγαίου υπάρχουν υψηλές συγκεντρώσεις μπετονίτη που πολύ συχνά δημιουργούν έμφραξη στα φίλτρα. Μια τέτοια διαδικασία διαρκεί κατά προσέγγιση 60 λεπτά (6 10λεπτα) και η απαιτούμενη ισχύς

κυμαίνεται γύρω στα 60 kW. Θεωρήθηκε ότι η πλέον κατάλληλη περίοδος για να γίνει η πλύση και κατά συνέπεια να σταματήσει η παραγωγή νερού είναι η χρονική στιγμή που παρουσιάζεται η ελάχιστη ζήτηση νερού. Επομένως για κάθε μέρα ο αλγόριθμος προαποφασίζει με βάση το παραπάνω κριτήριο πότε η μονάδα αφαλάτωσης θα εισέλθει σε κατάσταση πλύσης.

Ανεμογεννήτρια

Με βάση την διαστασιολόγηση της μονάδας αφαλάτωσης που έγινε στην προηγούμενη παράγραφο, η μέγιστη απαίτηση σε ισχύ του συστήματος θα είναι 225 kW ή 262,5 kW για μονάδα RO έξι ή επτά στοιχείων αντίστοιχα. Η πιο κοντινή σε ισχύ και παράλληλα αρκετά διαδεδομένη σε τέτοιου είδους συστήματα ανεμογεννήτρια, είναι η E55/800 kW με καμπύλη ισχύος που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



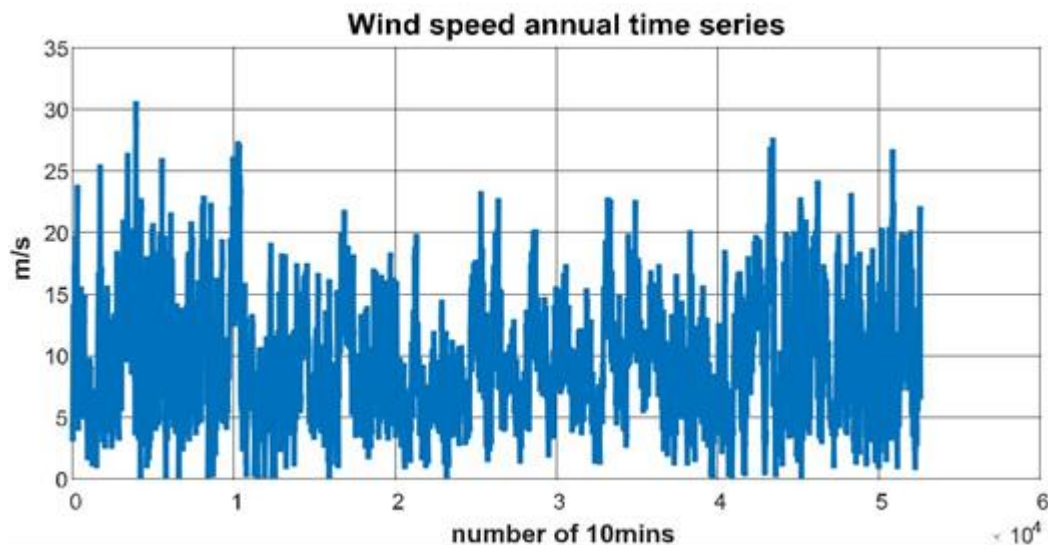
Σχήμα 3.2: Καμπύλη ισχύος Α/Γ E55/800 kW

Με βάση την καμπύλη ισχύος της Α/Γ και την διαθέσιμη χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου υπολογίζεται για κάθε δεκάλεπτο του έτους η παραγόμενη ισχύς από την Α/Γ με χρήση γραμμικής παρεμβολής στην καμπύλη ισχύος της. Η συσχέτιση της ταχύτητας που επικρατεί στο ύψος του δρομέα της Α/Γ σε σχέση με την δεδομένη χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου γίνεται χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a$$

Όπου u_1 , u_2 οι ταχύτητες του ανέμου σε δύο διαφορετικά ύψη h_1 , h_2 αντίστοιχα εντός του οριακού στρώματος και a ένας συντελεστής που εξαρτάται από την

τραχύτητα του εδάφους. Η χρονοσειρά που χρησιμοποιήθηκε στις προσομιώσεις παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3.

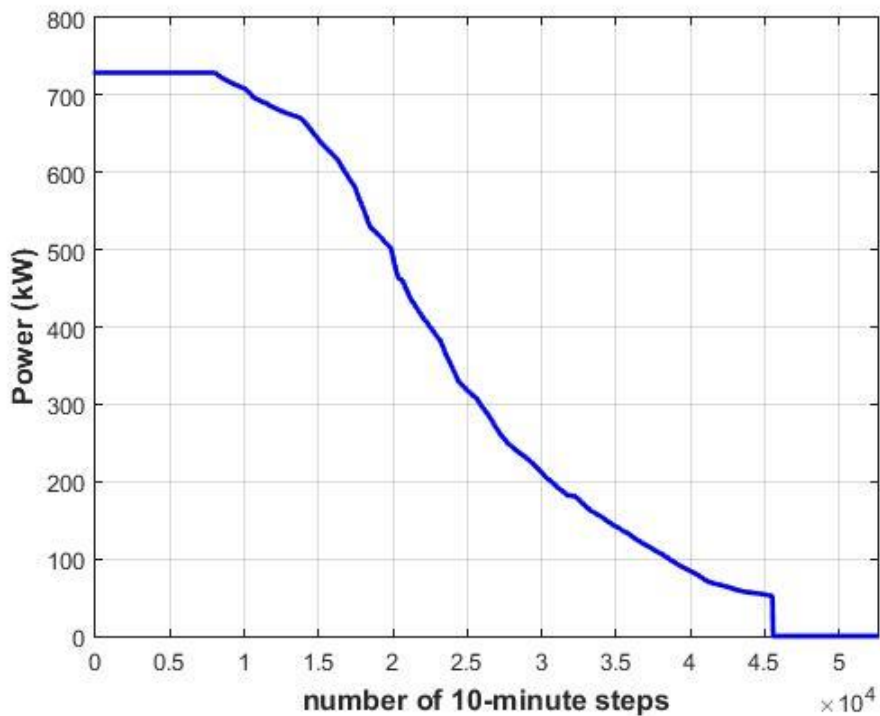


Σχήμα 3.3: Ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου

Ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος

Κύρια πηγή ενέργειας για το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης είναι η παραγόμενη ενέργεια από την Α/Γ. Ωστόσο όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.4 υπάρχει μια μικρή περίοδος του έτους κατά την οποία δεν υπάρχει καθόλου αιολική παραγωγή. Επιπλέον αν γίνει η παραδοχή ότι το φορτίο της μονάδας αφαλάτωσης κυμαίνεται κοντά στα 200 kW, φαίνεται ότι εν δυνάμει μπορεί να παρουσιαστεί έλλειμμα ενέργειας για 25000 δεκάλεπτα, ή αλλιώς σχεδόν 174 μέρες.

Η συγκεκριμένη αδυναμία του συστήματος θα γίνει απόπειρα να περιοριστεί αρχικά με την πολιτική διαχείρισης της μονάδας RO και στην συνέχεια με την βοήθεια του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο για να αποφευχθεί υπερδιαστασιολόγηση των μπαταριών αλλά και για να διασφαλιστεί η αδιάληπτη κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό κρίνεται απαραίτητη η παρουσία μιας εφεδρικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το ρόλο αυτό θα τον έχει στο υποσχεδίαση σύστημα το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος.



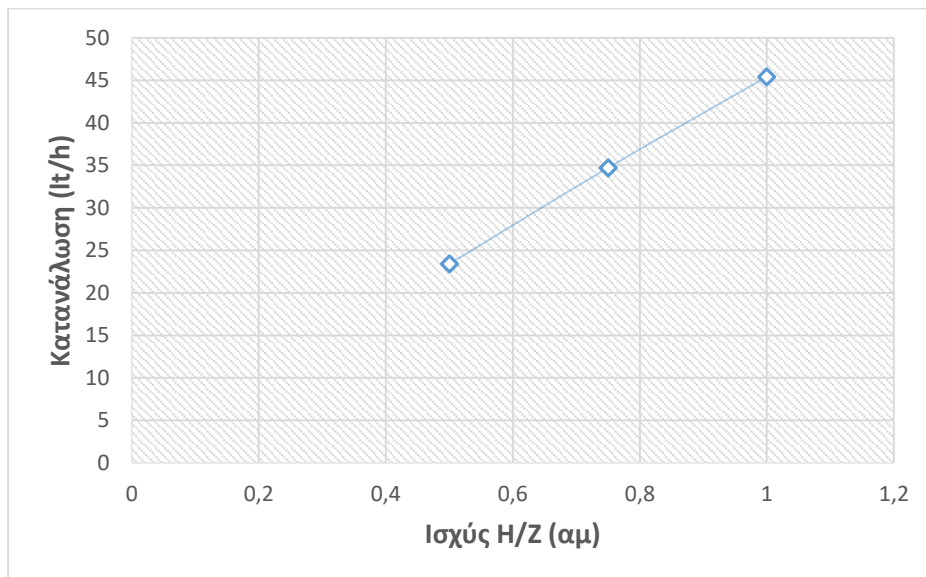
Σχήμα 3.4: Καμπύλη διάρκειας παραγωγής Α/Γ Ε55/800 kW για την χρονοσειρά του διαγράμματος 3.3.

Οι μονάδες αυτές αποτελούνται κατά κύριο λόγο από σύγχρονους κινητήρες. Κύρια χαρακτηριστικά τους πέρα από την ονομαστική τους ισχύ είναι το τεχνικό ελάχιστο και η ικανότητα μεταβολής της ισχύος τους. Το πρώτο αναφέρεται στο ελάχιστο ποσοστό της ονομαστικής ισχύος κατά το οποίο μπορεί να λειτουργεί το σύστημα για αρκετή ώρα, χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής του. Για τέτοιου είδους συστήματα ένα ασφαλές τεχνικό ελάχιστο κυμαίνεται στο 30%.

Η ικανότητα μεταβολής ισχύος από την άλλη πλευρά αναφέρεται στο μέγιστο ρυθμό αύξησης ή και μείωσης της ισχύος του ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους. Στα πλαίσια της ανάλυσης που θα ακολουθήσει η παράμετρος αυτή δεν βάζει κάποιον περιορισμό καθώς το βήμα της βελτιστοποίησης είναι ένα δεκάλεπτο, χρόνος που επαρκεί για τέτοιου είδους μονάδες να ξεκινήσουν και να φτάσουν την μέγιστη ισχύ τους.

Όσον αφορά την ισχύ του μια καλή προσέγγιση είναι να έχει την δυνατότητα να καλύπτει την μέση ημερήσια απαίτηση σε ισχύ της μονάδας ασφαλάτωσης. Με βάση την χρονοσειρά που κατασκευάστηκε στην προηγούμενη ενότητα η μέση ημερήσια κατανάλωση σε νερό ανέρχεται σε 1148 m³/day. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του πίνακα 3.2 υπολογίστηκε ότι η αντίστοιχη ισχύς ανέρχεται σε 130 kW. Η πιο κοντινή εμπορικά διαθέσιμη μονάδα ανέρχεται σε 160 kW.

Τέλος για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου του ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους κατασκευάστηκε το παρακάτω διάγραμμα, με στοιχεία που δίνονται από τον κατασκευαστή του.



Σχήμα 3.5: Ειδική κατανάλωση καυσίμου Η/Ζ/ DE220E0/ ELTRAK

Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας-μπαταρίες

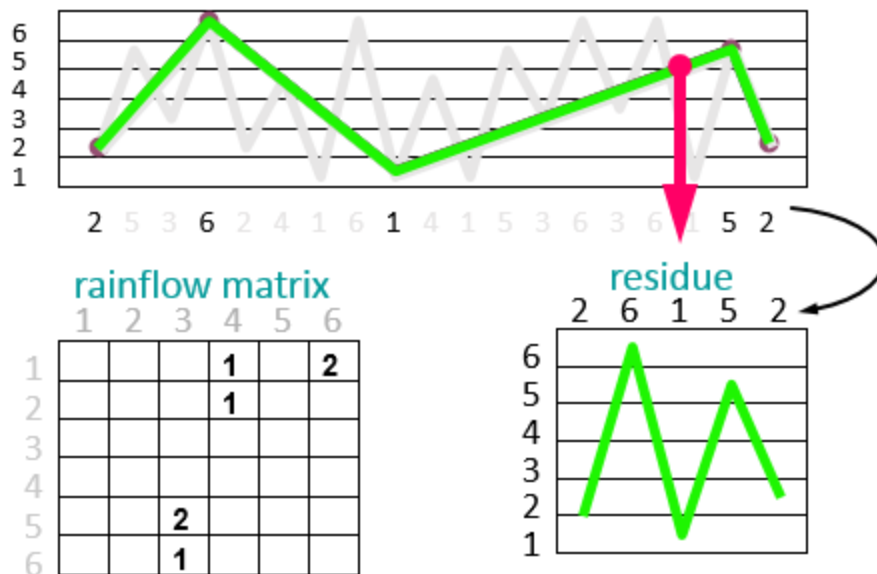
Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας συνήθως επιλέγονται μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες συνδέονται σε σειρά ή και παράλληλα με σκοπό να επιτευχθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές. Στο υποσχεδίαση σύστημα ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης είναι απαραίτητο για τους εξής λόγους:

- Εξομαλύνει την μεγάλη μεταβλητότητα της παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ και συνδράμει στην ομαλότερη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, δηλαδή λιγότερες σβέσεις και εκκινήσεις, καθώς επίσης και μικρότερες μεταβολές στην ισχύ της.
- Σε συνδυασμό με το Η/Ζ και ανάλογα με το μέγεθος του, παρέχει στο σύστημα αυτονομία λειτουργίας με σκοπό να εξασφαλίζεται η πλήση των πολυστρωματικών φίλτρων και η αμερόληπτη κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό, όταν δεν επαρκεί η παραγόμενη αιολική ενέργεια.

Βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μπαταριών είναι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσής τους η_{bat} και ο βαθμός απόδοσης του DC-AC μετατροπέα η_{AC-DC} , όπου στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρούνται ίσοι με 0.9 και 0.95 αντίστοιχα. Ένα επιπλέον στοιχείο τους είναι το ανώτερο και το κατώτερο επιτρεπτό επίπεδο φόρτισής τους, με $SOC_{min}=30\%$ και $SOC_{max}=100\%$. Επιπλέον σημαντικό ρόλο έχει και ο μέγιστος αριθμός κυκλικών φορτίσεων εκφορτίσεων που μπορεί να υποστεί η

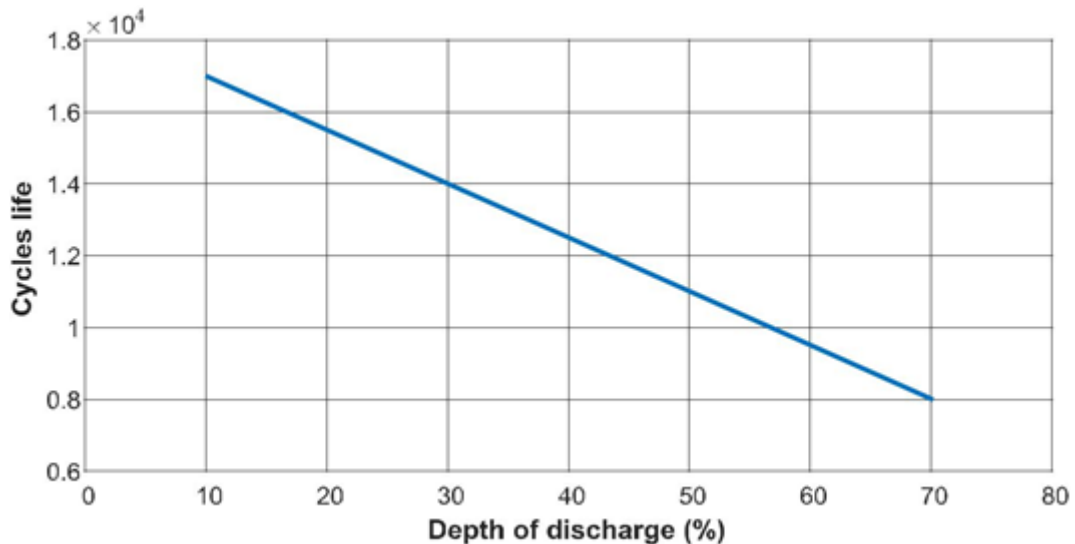
μπαταρία μέχρι να χάσει την ονομαστική της χωρητικότητα. Στον αριθμό αυτό καταλυτικό ρόλο έχει το βάθος εκφόρτισης στον οποίο αυτοί πραγματοποιούνται. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο μειώνεται ο αριθμός των κύκλων που μπορεί να δεχτεί η μπαταρία.

Η διάρκεια ζωής των μπαταριών αποτελεί σημαντική παράμετρο καθώς πιθανή ανάγκη αντικατάστασης οδηγεί σε επιπλέον κόστος και επομένως είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της, έστω και κατά προσέγγιση. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να γίνει υπολογισμός του αριθμού και το βάθος εκφόρτισης των κύκλων των μπαταριών καθ' όλη την διάρκεια της ζωής του συστήματος. Ο αριθμός των κύκλων προσδιορίστηκε με την χρήση του αλγόριθμου Rainflow Counting ο οποίος ορίζει ως κύκλο δύο διαδοχικά περιστατικά φόρτισης εκφόρτισης με το ίδιο πλάτος εκφόρτισης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί μια καλή μεθοδολογία για τον υπολογισμό των κύκλων σε μη ομοιόμορφα περιστατικά φόρτισης-εκφόρτισης, ωστόσο παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι προσμετρά ως κύκλους ακόμα και τις πολύ μικρές μεταβολές. Συνοπτικό παράδειγμα της εφαρμογής του παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα εφαρμογής αλγορίθμου Rainflow Counting

Στη συνέχεια η τελική εκτίμηση για την διάρκεια ζωής της μπαταρίας γίνεται με βάση ένα διάγραμμα όπως αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7, το οποίο συσχετίζει τους κύκλους που μπορεί να κάνει μια μπαταρία σε σχέση με το βάθος εκφόρτισής τους. Το συγκεκριμένο διάγραμμα κατασκευάστηκε με στοιχεία από εμπορικό μοντέλο μπαταρίας για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε συνεργασία με ΑΠΕ.



Σχήμα 3.7: Συνολικοί κύκλοι μπαταρίας συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης τους

Οι εναπομείναντες παράμετροι των μπαταριών, ισχύς φόρτισης/εκφόρτισης και χωρητικότητα αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης καθώς η διαστασιολόγηση τους επηρεάζεται σημαντικά από την στρατηγική διαχείρισης του συστήματος, το οποίο με την σειρά του σχετίζεται άμεσα με την ευελιξία της μονάδας (εύρος ισχύος λειτουργίας, ρυθμός μεταβολής ισχύος). Ωστόσο κρίνεται απαραίτητο η χωρητικότητα και η μέγιστη ισχύς των μπαταριών να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να καλύπτεται τουλάχιστον η ενεργοβόρα διαδικασία της πλύσης, μια την ημέρα, για μια ώρα. Επομένως, αν συνυπολογίσουμε τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης των μπαταριών τις απώλειες στον μετατροπέα αλλά και τα επιτρεπτά όρια φόρτισης εκφόρτισης που ορίστηκαν προηγουμένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ελάχιστη ισχύς των μπαταριών θα πρέπει να είναι 200 kW και η ελάχιστη χωρητικότητα 100 kWh.

Δεξαμενή αποθήκευσης νερού

Οι δεξαμενές που προορίζονται για τέτοιου είδους συστήματα συνήθως αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα και το σχήματος είναι είτε κυλινδρικό είτε κυβικό. Ο ρόλος των δεξαμενών είναι σημαντικός για δύο λόγους:

1. Διασφαλίζουν την παροχή πόσιμου νερού όταν η μονάδα αφαλάτωσης τεθεί εκτός λειτουργίας, είτε γιατί βρίσκεται σε κατάσταση πλύσης, είτε γιατί υπήρξε κάποιο τεχνικό πρόβλημα.
2. Καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ευελιξία του συστήματος, δηλαδή δίνουν την δυνατότητα στην μονάδα RO να λειτουργεί ακολουθώντας την αιολική παραγωγή και όχι την κατανάλωση νερού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, να μειώνεται η χρήση

των μπαταριών και του Η/Ζ και κατά συνέπεια το τελικό προϊόν να παράγεται σε χαμηλότερο κόστος.

Είναι προφανές λοιπόν ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι δεξαμενές τόσο περισσότερα οφέλη έχουμε για το σύστημά. Ωστόσο η μορφολογία του εδάφους στα περισσότερα νησιά δεν επιτρέπει την εγκατάσταση μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενών.

Ελλείψει κάποιου άλλου στοιχείου, η διαστασιολόγηση τους έγινε με κριτήριο της κάλυψης της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης σε πόσιμο νερό, δηλαδή περίπου 1150 m³. Επομένως επιλέγονται τα 1500 m³ ως η μέγιστη χωρητικότητα των δεξαμενών.

Οικονομικά στοιχεία

Το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για όλη την διάρκεια της ζωής της επένδυσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\text{Ισοδύναμο ετήσιο κόστος} = \frac{k(1+k)^n}{(1+k)^n - 1} * \left[K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{\Lambda\Delta_t}{(1+k)^t} \right]$$

Όπου:

k: το επιτόκιο αναγωγής

n: Η διάρκεια ζωής της επένδυσης

K₀ : Το αρχικό κόστος της επένδυσης

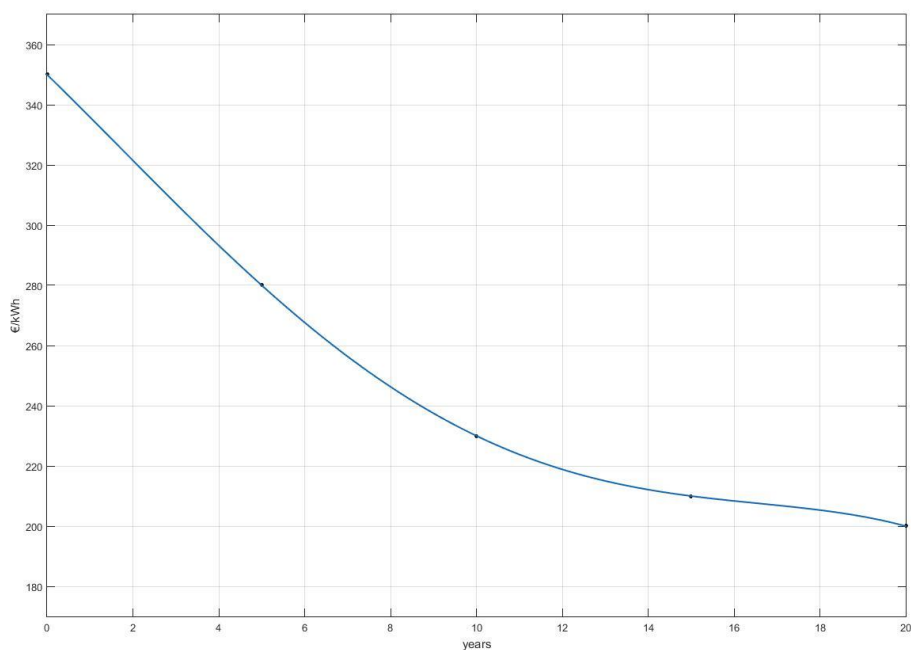
ΛΔ_t: Οι ετήσιες λειτουργικές δαπάνες του συστήματος

Στον πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα επιμέρους στοιχεία κόστους του συστήματος.

Επιμέρους κόστη	
Κόστος Α/Γ (€/kW):	1300
Κόστος μπαταριών (€/kWh):	350
Κόστος συστήματος ελέγχου (€):	100000
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος (€/kW):	200
Κόστος Η/Ζ (€/kW):	300
Κόστος καυσίμου ((€/l):	1,2
Κόστος Μ.Α. (€/m ³ /day):	1000
Σταθερό ετήσιο κόστος Μ.Α	30000
Μεταβλητό ετήσιο κόστος Μ.Α.(χημικά καθαρισμού) (€/m ³):	0,3
Άλλα κόστη εγκατάστασης (€):	65000
Επιτόκιο αναγωγής	8%
Οικονομική διάρκεια ζωής εγκατάστασης (έτη)	20

Πίνακας 3.3: Επιμέρους κόστη των συνιστωσών του συστήματος

Επιπλέον θεωρήθηκε ότι το κόστος αγοράς των μπαταριών δεν μπορεί να είναι ίδιο καθ' όλη την διάρκεια της επένδυσης, δηλαδή αν απαιτηθεί αντικατάστασή τους μετά από δέκα χρόνια, η τιμή αγοράς τους θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν που έγινε στην αρχή. Επομένως κατασκευάστηκε μια συνάρτηση (σχήμα 3.8) που συσχετίζει την τιμή των μπαταριών με τον χρόνο αγοράς τους. Το βασικό της χαρακτηριστικό είναι ότι λαμβάνει υπόψιν της ότι η τεχνολογία των μπαταριών εξελίσσεται ραγδαία με αποτέλεσμα η τιμή τους να αναμένεται να πέφτει με μεγάλο ρυθμό την πρώτη δεκαετία, και στην συνέχεια να σταθεροποιείται.



Σχήμα 3.8: Πρόβλεψη κόστους μπαταριών σε συνάρτηση με τον χρόνο

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

4.1 Εισαγωγή

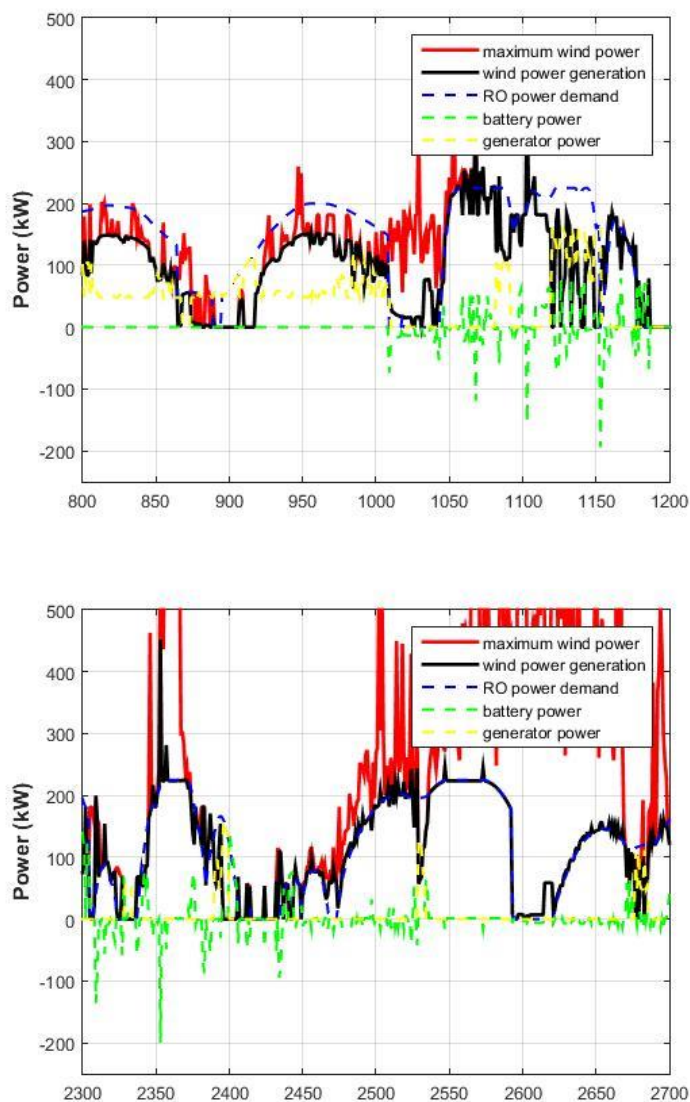
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις ετήσιες προσομοιώσεις για διάφορα σενάρια λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης όπως αυτό περιγράφηκε στα κεφάλαια 2 και 3. Μέσω των προσομοιώσεων περιγράφεται η στρατηγική ελέγχου του συστήματος, η λειτουργία του από ενεργειακή σκοπιά, αναλύονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του και κυρίως εξετάζεται η επίδραση των διαφόρων σεναρίων διαστασιολόγηση στο κόστος παραγωγής του παραγόμενου νερού.

Η ενεργειακή προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιείται μέσω της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 με την βοήθεια του λογισμικού βελτιστοποίησης Gams. Ο χρονικός ορίζοντας βελτιστοποίησης λαμβάνεται ίσος με πέντε ημέρες και το χρονικό βήμα βελτιστοποίησης ίσο με δέκα λεπτά. Η επιλογή του βήματος έγινε σε επίπεδο πολύ μικρότερο της ώρας ώστε να ληφθεί υπόψιν η επίδραση της στοχαστικής φύσης της πρωτογενούς πηγής ενέργειας, δηλαδή του ανέμου. Ωστόσο εντός του συγκεκριμένου διαστήματος δεν εξετάζονται δυναμικά φαινόμενα. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται κυλιόμενα ανά μέρα, δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών οριζόντων βελτιστοποίησης παρουσιάζεται επικάλυψη. Πιο συγκεκριμένα αρχικά επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης για πέντε μέρες αλλά επιστρέφεται ως αποτέλεσμα μόνο η λύση της πρώτης. Στη συνέχεια για να βρεθεί η λύση της δεύτερης ημέρας επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης από την δεύτερη μέχρι την έκτη μέρα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί το έτος. Η συγκεκριμένη τεχνική πλεονεκτεί σε σχέση με την απλή κυλιόμενη επίλυση στο ότι επιτρέπει την βελτιστοποίηση της τρέχουσας χρονικής περιόδου έχοντας λάβει υπόψιν μελλοντικές δυσμενείς καταστάσεις, όπως χαμηλό αιολικό δυναμικό μαζί με υψηλή ζήτηση.

4.2 Στρατηγική ομαλών μεταβολών της ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης

Σύμφωνα με αυτήν την στρατηγική διαχείρισης η μονάδα αφαλάτωσης έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε όλο το δυνατό εύρος ισχύος της, ωστόσο γίνεται απόπειρα να προσαρμόζεται η ισχύς της μονάδας στην διαθέσιμη ισχύ της ανεμογεννήτριας με ομαλό τρόπο, αποφεύγοντας δηλαδή της απότομες μεταβολές από δεκάλεπτο σε δεκάλεπτο. Καθοριστικό ρόλο στην συγκεκριμένη λειτουργία

έχουν πρωτίστως οι μπαταρίες και δευτερεύοντος το Η/Ζ καθώς είναι αυτοί οι παράγοντες που θα εξισορροπούν την έντονη μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής, Στα δυο διαγράμματα του σχήματος 4.1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της συγκεκριμένης στρατηγικής.



Σχήμα 4.1: Παραδειγμα εφαρμογής στρατηγικής ομαλών μεταβολών

Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η λειτουργία του συστήματος και παρατηρώντας τα παραδείγματα του σχήματος 4.1, μπορούμε να κάνουμε ένα διαχωρισμό σε τρία διαφορετικά στάδια «λειτουργίας»

1. Περίσσεια παραγωγής από την Α/Γ: Σε αυτήν την περίπτωση η μονάδα αφαλάτωσης απορροφά όσο χρειάζεται από την διαθέσιμη ισχύ (2550-2650 του σχήματος).
2. Η διαθέσιμη παραγωγή από την Α/Γ είναι λίγο μικρότερη από την απαίτηση σε ισχύ της μονάδας αφαλάτωσης: Σε αυτήν την περίπτωση η έντονη

μεταβλητότητα που εισάγεται από την Α/Γ αντισταθμίζεται με την βοήθεια των μπαταριών(2300-2400 του σχήματος).

3. Η παραγωγή από την Α/Γ δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες της μονάδας RO: Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος (800-1000 του σχήματος).

Επομένως η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου παρόλο που προστατεύει την μονάδα αφαλάτωσης από απότομες μεταβολές, αποτελεί μια πιο ενεργοβόρα λύση σε σχέση με μια λογική ελέγχου όπου θα δεν θα περιόριζε καθόλου την μεταβολή ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρώτη περίπτωση αναγκάζονται οι μπαταρίες να έχουν ρόλο buffer στο σύστημα, ενώ στην δεύτερη την μεταβλητότητα του ανέμου την δέχεται η ίδια η μονάδα RO.

Όστόσο με βάση τα τεχνικά και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης τα οποία παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια, είναι αδύνατο να απαιτηθεί από την μονάδα RO να λειτουργεί με έντονα μεταβαλλόμενη ισχύ. Κατά συνέπεια σε όλες τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν θα χρησιμοποιηθεί η στρατηγική ομαλών μεταβολών, καθώς αποτελεί την πιο ρεαλιστική στρατηγική ελέγχου ενός τέτοιου συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο στο μοντέλο που κατασκευάστηκε, υπεύθυνη για τον καθορισμό της στρατηγικής ελέγχου της μονάδας αφαλάτωσης είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Η ακριβής μορφή της, η οποία περιλαμβάνει όλους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί παρουσιάζεται στην παρακάτω σχέση:

$$\alpha * \min[P_g(t)] + \beta * \min[P_{out,WT} - P_{WT}(t)] + \gamma * \min[P_{dp}(t) - P_{dp}(t - 1)]^2 + \delta * \min[P_b(t)] + \zeta * \min[st_g(t)] + \eta * \min[st(t) - st(t - 1)]$$

Με $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \zeta, \eta \in \mathbb{R}$ και η σύμβαση των συμβόλων να είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε στο 2^ο κεφάλαιο. Το H/Z περιορίζεται από δυο όρους, τον πρώτο ο οποίος περιορίζει την παραγόμενη ισχύ και τον πέμπτο ο οποίος ελαχιστοποιεί τα δεκάλεπτα λειτουργίας του. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την μεγιστοποίηση της αιολικής παραγωγής και ο τέταρτος περιορίζει την μεταφερόμενη ενέργεια από τις μπαταρίες με σκοπό να τις προφυλάξει. Τέλος ο τρίτος όρος εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης και ο τελευταίος ότι δεν θα υπάρχουν διαδοχικές σβέσεις και εναύσεις της μονάδας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μορφή της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης προήλθε από εκτενή διερεύνηση στο μοντέλο και ενσωματώνει όλους τους λειτουργικούς περιορισμούς. Επιπλέον οι τιμές των παραμέτρων $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \zeta, \eta$ δεν είναι σταθερές αλλά εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος που τελεί υπό διερεύνηση (π.χ. χωρητικότητα και ισχύ μπαταριών). Επομένως τα κόστη αυτά της αντικειμενικής συνάρτησης καθορίζονται ύστερα από διαδοχικές

δοκιμές με κριτήριο την αδιάληπτη λειτουργία, την διατήρηση των λειτουργικών περιορισμών και την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής.

4.3 Διαστασιολόγηση μονάδας αφαλάτωσης

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε εκτίμηση του πιθανού μεγέθους της μονάδας αφαλάτωσης με βάση την μέση ημερήσια ζήτηση νερού. Ωστόσο για να υπάρξουν πιο ασφαλή συμπεράσματα θα χρησιμοποιηθεί ένα βοηθητικό μοντέλο στο οποίο η μονάδα αφαλάτωσης δεν θα τροφοδοτείται από την Α/Γ αλλά απευθείας από το δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα το σύστημα αυτό θα αποτελείται από:

- Την μονάδα αφαλάτωσης
- Την δεξαμενή αποθήκευσης νερού
- Τον υποσταθμό μέσης τάσης
- Ένα εφεδρικό ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος

Ο υποσταθμός στο συγκεκριμένο σύστημα είναι απαραίτητος καθώς η μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί σίγουρα να παρέχει το δίκτυο είναι τα 135 kVA. Επομένως για τον υπολογισμό του κόστους θα θεωρηθεί ότι χρησιμοποιείται Μ/Σ 315 kVA. Τα αναλυτικά στοιχεία κόστους καθώς επίσης και τα αποτελέσματα των προσημειώσεων παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ	
ΚΟΣΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ (ΤΕΜ.)	35000
ΚΟΣΤΟΣ Μ.Α. (€/m ³ /day):	1000
ΜΕΑΒΛΗΤΟ ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ Μ.Α. (€/m ³):	0,3
ΣΤΑΘΕΡΟ ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ Μ.Α (€)	30000
ΚΟΣΤΟΣ Η/Ζ (€/kW)	300
ΆΛΛΑ ΚΟΣΤΟΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (€)	10000
ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€/MW)	77,19
ΚΟΣΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ (€/Kw/month)	3,616

Πίνακας 4.1: Στοιχεία κόστους συστήματος αφαλάτωσης τροφοδοτούμενο απευθείας από το δίκτυο.

Όπως το αναμέναμε από την προκαταρκτική σχεδίαση που έγινε στο κεφάλαιο 3 οι μονάδες με έξι και επτά στοιχεία είναι ικανές να καλύψουν τις ανάγκες του νησιού σε πόσιμο νερό, αδιάλειπτα κάθε χρονική στιγμή. Η μονάδα με τα επτά στοιχεία, λόγω μεγαλύτερης δυνατότητας παραγωγής νερού θα μπορούσε εν γένει να προσφέρει στο υποσχεδίαση αυτόνομο σύστημα μεγαλύτερη ευελιξία. Ωστόσο, λόγω του αυξημένου κόστους κτήσης οδηγούμαστε σε αύξηση κόστους σχεδόν 11%. Επομένως η μονάδα με τα έξι στοιχεία κρίνεται ως η βέλτιστη επιλογή και αυτή θα χρησιμοποιηθεί στην διερεύνηση που θα ακολουθήσει στα παρακάτω κεφάλαια.

	6 MODULES	7 MODULES
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	1500	1500
Μονάδα RO (m ³ /day)	2088	2450
Μέγιστη ισχύς γεννητριας(kW)	160	160
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης		
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	419260,0	420270,0
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1148,9	1151,4
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1078,3	1080,9
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	12323,0	11514,0
Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1,1286	1,2119
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,8815	0,9650
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0,5100	0,5936
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,3715	0,3714
Κόστος δικτύου(€/m ³)	0,2244	0,2243
→ Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/m ³)	0,1985	0,1985
→ Κόστος ηλεκτρικής ισχύος (€/m ³)	0,0259	0,0258

Πίνακας 4.2: Διερεύνηση ως προς την μονάδα αφαλάτωσης

Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι στο βοηθητικό αυτό μοντέλο το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος έχει καθαρά εφεδρικό χαρακτήρα και γι' αυτό τον λόγο στις ετήσιες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, θεωρήθηκε ότι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ήταν συνεχής, Ωστόσο για να υπάρξει ένα αντιπροσωπευτικό κόστος παραγωγής νερού, συμπεριλήφθηκε σε αυτό το κόστος κτήσης του Η/Ζ.

4.4 Διαστασιολόγηση μπαταριών

Οι βασικές παράμετροι του συστήματος αποθήκευσης για τις οποίες πρέπει να γίνει διερεύνηση είναι η ισχύς και η χωρητικότητα των μπαταριών. Εν γένει η μεταβολή των δυο αυτών παραμέτρων αναμένουμε να προκαλέσει παρόμοια αποτελέσματα στο υποσχεδίαση σύστημα καθώς πιθανή αύξηση τους θα οδηγήσει σε καλύτερη αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής και μείωση της παραγόμενης ενέργειας από το Η/Ζ.

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των δύο αυτών παραμέτρων αποτελεί η συμπληρωματικότητα τους. Πιο συγκεκριμένα η ισχύς αναφέρεται στο πόσο γρήγορα φορτίζονται και εκφορτίζονται οι μπαταρίες, ενώ η χωρητικότητα πόσο ενέργεια μπορούν να απορροφήσουν και να προσφέρουν στο σύστημα. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να λειτουργήσει περιοριστικά καθώς για παράδειγμα σε μια υλοποίηση με μεγάλη χωρητικότητα και με μικρή ισχύ, δεν μπορούν να ακολουθηθούν γρήγορες μεταβολές με αποτέλεσμα να μην γίνεται αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Για να πραγματοποιηθεί, επομένως, σωστή διαστασιολόγηση τους θα πρέπει να εξεταστούν παράλληλα και όχι ξεχωριστά.

Διερεύνηση χωρητικότητας για ισχύ μπαταριών 200 kW

Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	100	200	400	600	800
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	200				
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	1500				
Μονάδα RO (m ³ /day)	2100				
Ισχύς μονάδος RO(kW)	225				
Μέγιστη ισχύς γεννητριας(kW)	160				
A/Γ (kW)	800				
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης					
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	419280,00	419280,00	419230,00	419260,00	419250,00
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	32839,00	33343,00	32398,00	3249,70	3196,70
Μέση χωρητικότητα δεξαμενής (%)	39,29%	39,56%	36,67%	37,65%	37,63%
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	81,27%	81,04%	81,82%	82,17%	82,69%
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1078,40	1078,40	1078,30	1078,30	1078,30
Ενέργεια παραγόμενη από την A/Γ (MWh)	1089,30	1107,30	1115,00	1128,70	1141,20
Capacity factor A/Γ (%)	15,54%	15,80%	15,91%	16,11%	16,28%
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	45,65	74,80	104,80	115,97	150,65
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	22,84	37,44	52,48	58,86	75,48
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	22,80	37,36	52,32	58,10	75,16
Μέσο soc μπαταρίας (%)	66,07%	65,61%	64,86%	69,78%	62,94%
Ενέργεια παραγόμενη από την γεννήτρια (MWh)	127,16	115,56	113,27	102,88	97,13
Μέση ισχύς γεννήτριας (kW)	100,95	102,71	111,14	110,30	109,40
Ποσοστό λειτουργίας γεννήτριας(%)	14,38%	12,84%	11,63%	10,65%	10,14%

Πίνακας 4.3: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

Δείκτες ζωής μπαταρίας					
Κύκλοι μπαταρίας	3335	2773	2285,0	1902,0	1910,0
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	8,2%	8,0%	6,68%	5,77%	5,46%
Έτη ζωής μπαταρίας	6,0	7,0	10,0	13,0	14,0

Πίνακας 4.4: Δείκτες ζωής μπαταρίας

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1,3069	1,3095	1,3244	1,3347	1,3497
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0,2526	0,2526	0,2527	0,2526	0,2527
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,8816	0,8816	0,8817	0,8816	0,8817
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0,5100	0,5100	0,5101	0,5100	0,5101
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,3716	0,3716	0,3716	0,3716	0,3716
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0,0249	0,0364	0,0530	0,0712	0,0834
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0,0085	0,0170	0,0340	0,0510	0,0608
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0,0067	0,0097	0,0093	0,0105	0,0129
→ Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος μπαταρίας (€/m ³)	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097	0,0097
Κόστος γεννήτριας(€/m ³)	0,1077	0,0989	0,0970	0,0891	0,0848
→ Αρχικό κόστος κτήσης γεννήτριας(€/m ³)	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117
→ Κόστος καυσίμου (€/m ³)	0,0960	0,0872	0,0853	0,0774	0,0731

Πίνακας 4.5: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού

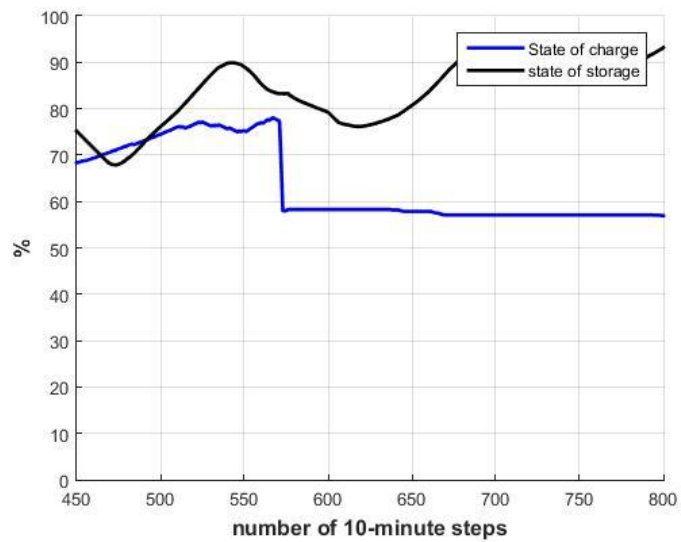
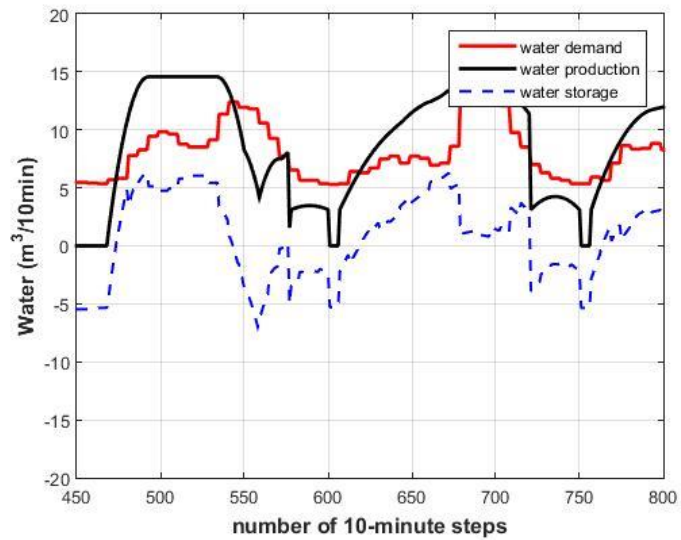
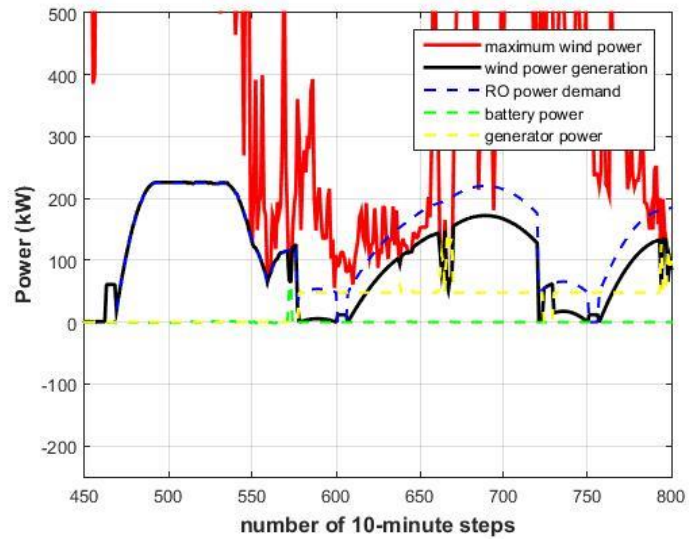
Παρατηρώντας τους πίνακες με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος επιβεβαιώνουμε την αρχική μας υπόθεση ότι η αύξηση της χωρητικότητας οδηγεί σε καλύτερη αξιοποίηση της αιολικής παραγωγής αφού παρουσιάζεται έστω και μια μικρή αύξηση του capacity factor από 15,54% σε 16,28%. Αυτό συνοδεύεται με την σειρά του με μείωση της ενέργειας που παράγεται από το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος.

Η συγκεκριμένη παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από τα στιγμιότυπα των σχημάτων 4.1,4.2 , όπου παρουσιάζεται η διαφορετική συμπεριφορά του μοντέλου μια χρονική περίοδο όπου δεν έχουμε περίσσεια αιολικής παραγωγής. Έτσι στην μικρή μπαταρία για να διατηρηθεί η ομαλή λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης ο αλγόριθμος αναγκάζεται να ενεργοποιήσει το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος, ενώ στην περίπτωση στην περίπτωση των μπαταριών με μεγάλη χωρητικότητα η ρύθμιση αυτή γίνεται εξολοκλήρου με την χρήση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

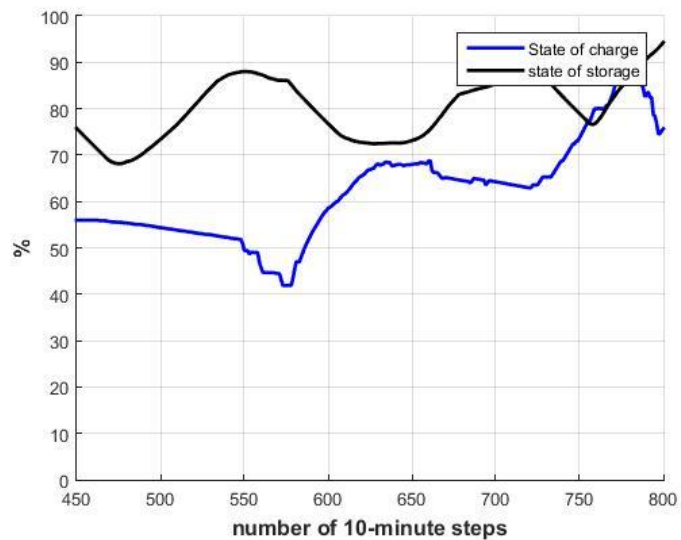
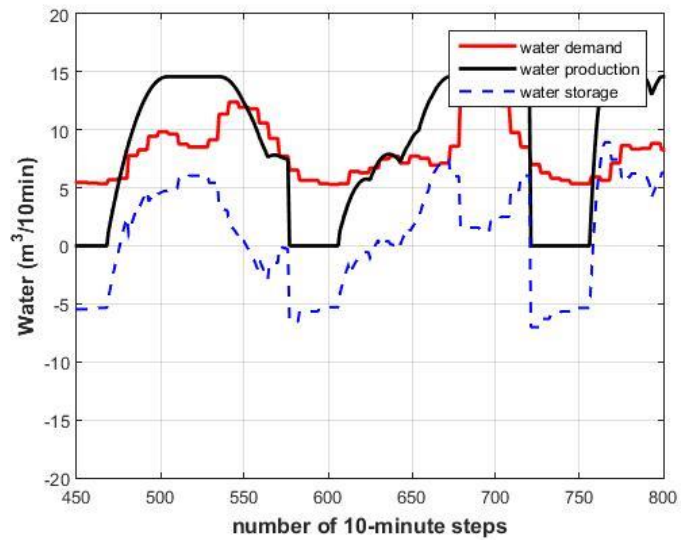
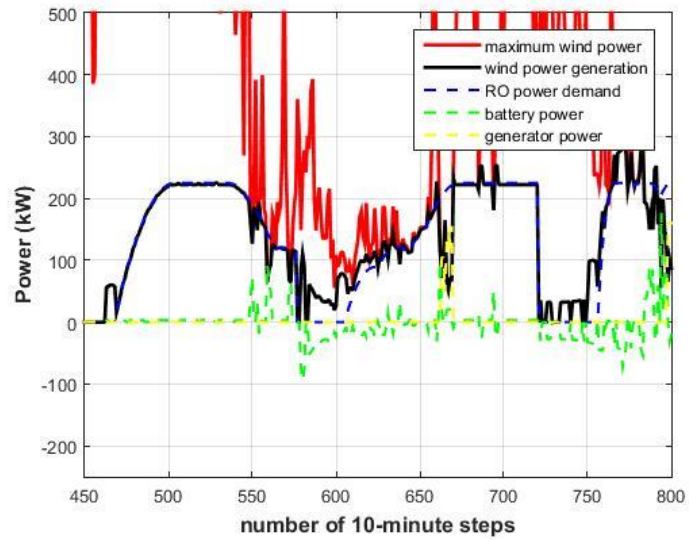
Ένα επιπλέον στοιχείο που στηρίζει τον παραπάνω συμπέρασμα είναι η συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης. Η συνολική παραγωγή νερού, καθώς επίσης και η χρονική διάρκεια λειτουργίας της μονάδας ουσιαστικά παραμένουν αμετάβλητες με την μεταβολή της χωρητικότητας. Επομένως δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά οι «αποφάσεις» του αλγορίθμου για το πότε και πόσο θα λειτουργήσει η μονάδα RO, αλλά μόνο από ποια πηγή θα καλυφθεί το πιθανό έλλειμμα ενέργειας.

Όσον αφορά την καταπόνηση των μπαταριών παρατηρούμε ότι στα σενάρια με μικρότερη χωρητικότητα, παρόλο που συμμετέχουν λιγότερο στην ρύθμιση του φορτίου παρουσιάζονται μεγάλα βάθη εκφόρτισης που οδηγούν σε συχνή αντικατάσταση.

Όλα τα παραπάνω εκφράζονται και στο κόστος παραγωγής νερού. Πιο συγκεκριμένα όσο μεγαλώνει η χωρητικότητα των μπαταριών παρατηρείται πτώση του κόστους καυσίμου, με αύξηση ωστόσο του συνολικού κόστους των μπαταριών. Αυτή η αντίστροφη πορεία των δύο συνιστωσών κόστους οδηγεί τελικώς σε μια μικρή αύξηση του κόστους παραγωγής του νερού.



Σχήμα 4.1: Πάνω Ισοζύγιο ισχύος. Μέση παραγωγής ζήτησης νερού. Κάτω κατάσταση δεξαμενής για ισχύ μπαταριών 200 kW και χωρητικότητα 100 kWh



Σχήμα 4.2: Πάνω Ισοζύγιο ισχύος. Μέση παραγωγή- ζήτηση νερού. Κάτω κατάσταση δεξαμενής και μπαταριών για ισχύ μπαταριών 200 kW και χωρητικότητα 800 kWh

Διερεύνηση χωρητικότητας για ισχύ μπαταριών 400 kW

Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	100	200	400	600	800
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	400				
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	1000				
Μονάδα RO (m ³ /day)	2100				
Ισχύς μονάδος RO(kW)	225				
Μέγιστη ισχύς γεννητριας(kW)	160				
A/Γ (kW)	800				
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης					
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	419260,00	419260,00	419260,00	419270,00	419320,00
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	33333,00	32815,00	32561,00	32081,00	32601,00
Μέση χωρητικότητα δεξαμενής (%)	40,77%	40,25%	39,77%	38,55%	40,90%
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	81,68%	82,71%	83,57%	84,97%	84,10%
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1078,30	1078,30	1078,30	1078,40	1078,50
Ενέργεια παραγόμενη από την A/Γ (MWh)	1089,70	1106,50	1141,00	1149,10	1167,00
Capacity factor A/Γ (%)	15,55%	15,79%	16,28%	16,40%	16,65%
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	46,92	79,10	112,18	139,14	173,90
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	23,46	39,54	56,07	69,46	86,80
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	23,47	39,56	56,12	69,68	87,11
Μέσο soc μπαταρίας (%)	66,21%	65,45%	65,49%	65,44%	66,08%
Ενέργεια παραγόμενη από την γεννήτρια (MWh)	126,92	116,79	90,92	88,19	77,76
Μέση ισχύς γεννήτριας (kW)	92,10	93,52	115,70	111,40	115,11
Ποσοστό λειτουργίας γεννήτριας(%)	15,73%	14,26%	8,90%	9,04%	7,71%

Πίνακας 4.5: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

Δείκτες ζωής μπαταρίας					
Κύκλοι μπαταρίας	2619	2333	2108,0	1961,0	2229,0
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	11,0%	10,2%	7,90%	7,02%	5,83%
Έτη ζωής μπαταρίας	6,0	7,0	10,0	11,0	11,0

Πίνακας 4.6: Δείκτες ζωής μπαταρίας

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1,3166	1,3203	1,3171	1,3354	1,3486
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0,2526	0,2526	0,2527	0,2527	0,2526
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,8816	0,8816	0,8816	0,8816	0,8816
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0,5100	0,5100	0,5100	0,5100	0,5100
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,3716	0,3716	0,3716	0,3716	0,3716
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0,0346	0,0461	0,0680	0,0831	0,1043
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0,0085	0,0170	0,0340	0,0510	0,0680
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0,0067	0,0097	0,0146	0,0127	0,0169
→ Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος μπαταρίας (€/m ³)	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194	0,0194
Κόστος γεννήτριας(€/m ³)	0,1077	0,0999	0,0800	0,0780	0,0701
→ Αρχικό κόστος κτήσης γεννήτριας(€/m ³)	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117
→ Κόστος καυσίμου (€/m ³)	0,0960	0,0882	0,0683	0,0663	0,0584

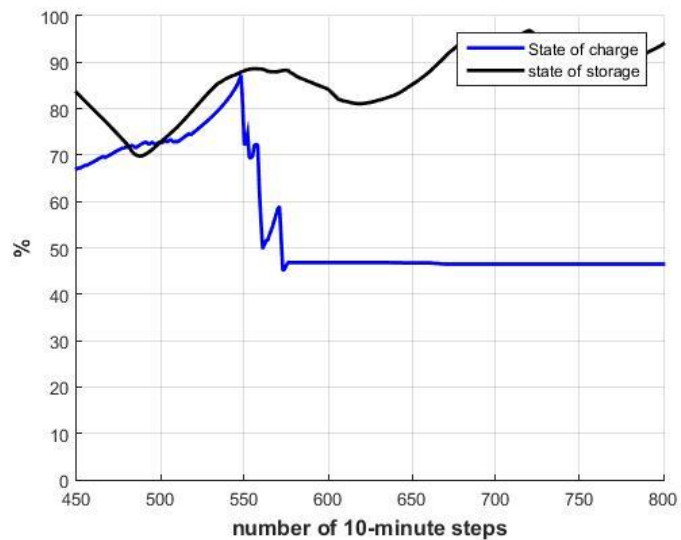
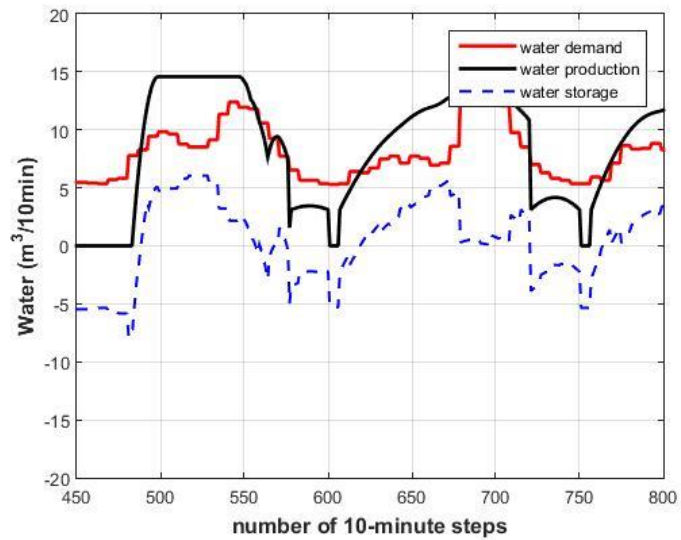
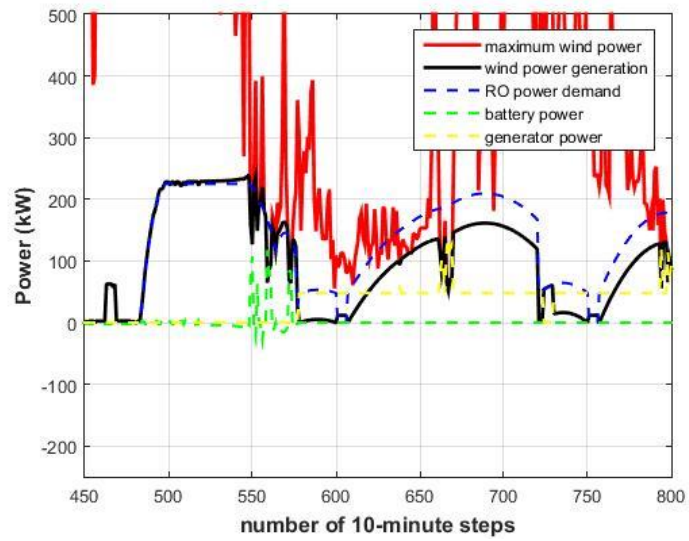
Πίνακας 4.7: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού

Όπως έγινε και στις προσομοιώσεις με ισχύ μπαταριών 200 kW, έτσι και στα 400 kW με την αύξηση της χωρητικότητας αυξήθηκε και η αιολική παραγωγή, αφού ο συντελεστής αξιοποίησης αυξήθηκε κατά 1%, από 15,55% σε 16,65%. Η βασική διαφοροποίηση σε σχέση με τις προηγούμενες υλοποιήσεις των 200 kW έγκειται στην μεγάλη μείωση που επιτυγχάνεται στην ενέργεια που παράγεται από το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος. Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια αυτή μειώνεται κατά 49 Mwh και ο χρόνος κατά τον οποίο λειτουργεί το Η/Ζ περιορίζεται στο 7,71% ετησίως. Επιβεβαιώνεται έτσι η αρχική μας υπόθεση ότι για να γίνει καλή αξιοποίηση της μεγάλης χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης θα πρέπει να συνοδεύεται από αυξημένη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος, κυρίως κατά την περίοδο της φόρτισης.

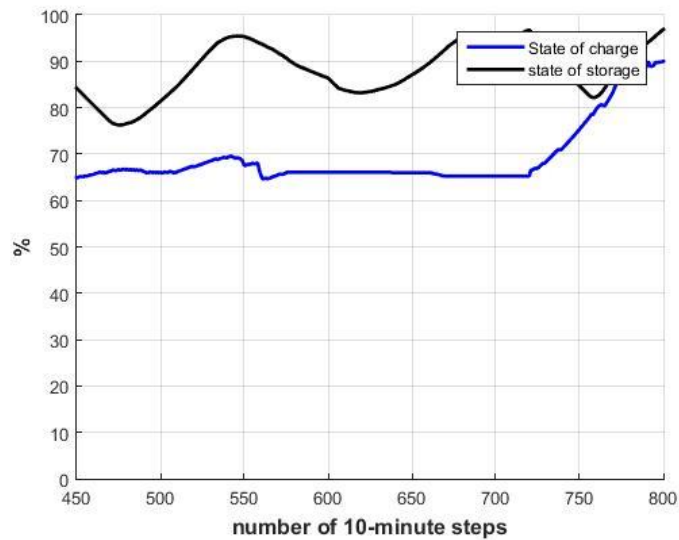
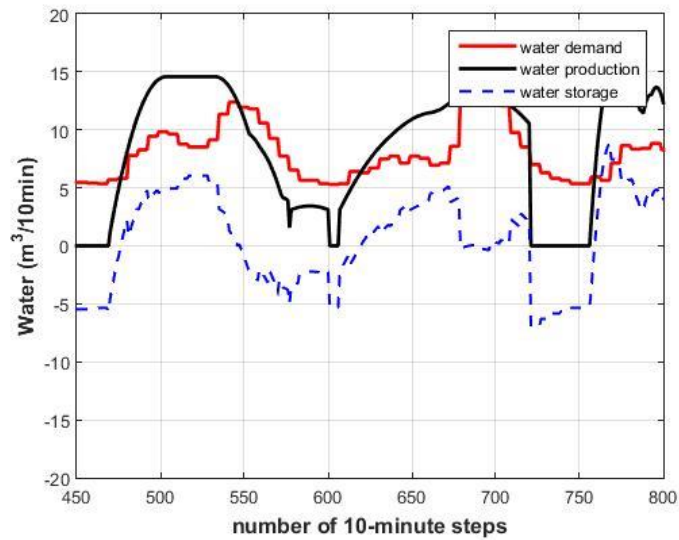
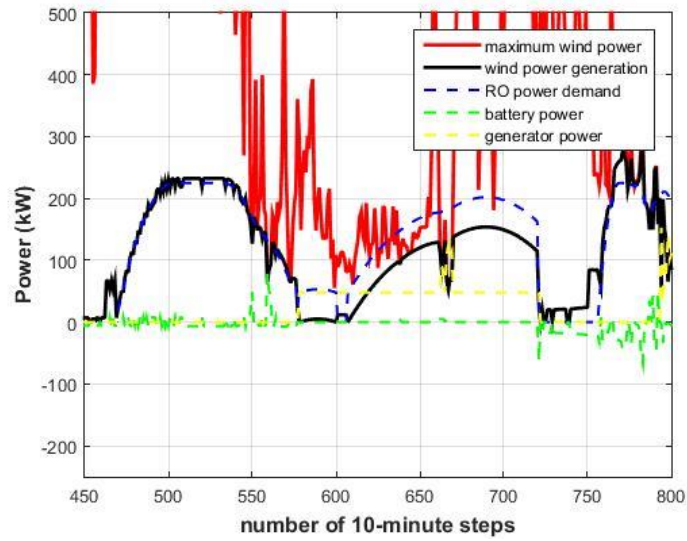
Ούτως η αλλιώς η διαφοροποίηση του συστήματος των 200 kW με αυτό των 400 kW δεν βρίσκεται στην ικανότητα τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης, αφού και οι δύο μπορούν να καλύψουν σχεδόν πλήρως της απαιτήσεις της μονάδας RO, αλλά στο πόσο γρήγορα φορτίζουν. Επομένως φαίνεται ότι η υπερδιαστασιολόγηση της ισχύος των μπαταριών βοηθάει στο να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της περίσσειας της αιολικής παραγωγής κυρίως μάλιστα όταν αυτή διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα.

Όστόσο η αυξημένη αυτή διείσδυση της αιολικής παραγωγής και η μείωση του κόστους καυσίμου δεν αντικατοπτρίζεται στο τελικό κόστος παραγωγής νερού καθώς και εδώ όπως και προηγουμένως η αύξηση στο κόστος των μπαταριών είναι μεγαλύτερη.

Στα στιγμιότυπα που ακολουθούν φαίνεται αυτό που παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη ενότητα ότι στις υλοποιήσεις με μεγαλύτερη χωρητικότητα οι μπαταρίες συνεισφέρουν περισσότερο στην ομαλή λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον αν γίνει σύγκριση αυτών των στιγμιότυπων με τα αντίστοιχα των 200 kW φαίνεται ότι παρόλο που αλλάζει το ποιος τροφοδοτεί την μονάδα RO, τα επίπεδα παραγωγής της καθώς επίσης και η στάθμη της δεξαμενής αποθήκευσης νερού παραμένουν σχετικώς αμετάβλητα. Αυτό επιβεβαιώνεται ακόμα από την συνολική παραγωγή νερού και το συνολικό χρόνο λειτουργίας της μονάδας που σε όλες τις υλοποιήσεις έως τώρα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα.



Σχήμα 4.3: Πάνω Ισοζύγιο ισχύος. Μέση παραγωγή- ζήτηση νερού. Κάτω κατάσταση δεξαμενής και μπαταριών για ισχύ μπαταριών 400 kW και χωρητικότητα 200 kWh



Σχήμα 4.4: Πάνω Ισοζύγιο ισχύος. Μέση παραγωγή- ζήτηση νερού. Κάτω κατάσταση δεξαμενής και μπαταριών για ισχύ μπαταριών 400 kW και χωρητικότητα 800 kWh

Διερεύνηση χωρητικότητας για ισχύ μπαταριών 600 kW

Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	100	200	400	600	800
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	600				
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	1500				
Μονάδα RO (m ³ /day)	2100				
Ισχύς μονάδος RO(kW)	225				
Μέγιστη ισχύς γεννητριας(kW)	160				
A/Γ (kW)	800				
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης					
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	419280,00	419270,00	419260,00	419300,00	419320,00
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	33170,00	33043,00	32372,00	32825,00	32388,00
Μέση χωρητικότητα δεξαμενής (%)	39,36%	39,51%	39,12%	39,17%	41,01
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	82,28%	82,79%	83,91%	82,93%	84,29%
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1078,40	1078,40	1078,30	1078,40	1078,50
Ενέργεια παραγόμενη από την A/Γ (MWh)	1103,30	1119,60	1134,30	1147,80	1165,10
Capacity factor A/Γ (%)	15,74%	15,98%	16,19%	16,38%	16,62%
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	60,09	84,22	110,14	143,52	170,63
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	30,04	42,10	55,05	71,65	85,16
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	30,05	42,12	55,09	71,87	85,46
Μέσο soc μπαταρίας (%)	65,93%	64,72%	65,38%	65,90%	65,55%
Ενέργεια παραγόμενη από την γεννήτρια (MWh)	116,79	105,89	96,63	90,10	78,99
Μέση ισχύς γεννήτριας (kW)	102,81	106,32	115,98	110,70	111,99
Ποσοστό λειτουργίας γεννήτριας(%)	12,97%	11,37%	9,50%	9,30%	8,05%

Πίνακας 4.8: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος

Δείκτες ζωής μπαταρίας					
Κύκλοι μπαταρίας	3110	2275	1870,0	1966,0	1897,0
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	12,0%	11,2%	8,66%	7,26%	6,73%
Έτη ζωής μπαταρίας	5,0	7,0	10,0	11,0	12,0

Πίνακας 4.9: Δείκτες ζωής μπαταρίας

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1,3196	1,3216	1,3311	1,3465	1,3577
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0,2526	0,2526	0,2527	0,2526	0,2526
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,8816	0,8816	0,8816	0,8815	0,8815
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0,5100	0,5100	0,5100	0,5100	0,5100
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0,3716	0,3716	0,3716	0,3715	0,3715
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0,0456	0,0559	0,0725	0,0928	0,1125
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0,0085	0,0170	0,0340	0,0510	0,0680
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0,0079	0,0097	0,0093	0,0127	0,0154
→ Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος μπαταρίας (€/m ³)	0,0292	0,0292	0,0292	0,0291	0,0291
Κόστος γεννήτριας(€/m ³)	0,0998	0,0915	0,0843	0,0794	0,0710
→ Αρχικό κόστος κτήσης γεννήτριας(€/m ³)	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117	0,0117
→ Κόστος καυσίμου (€/m ³)	0,0881	0,0798	0,0726	0,0677	0,0593

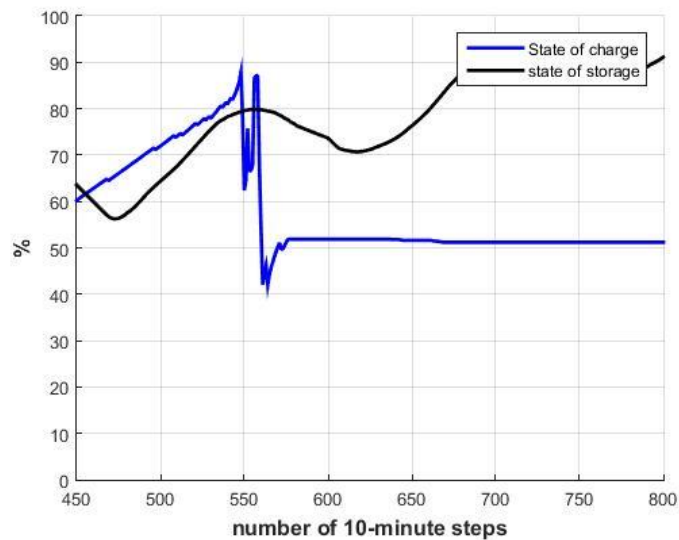
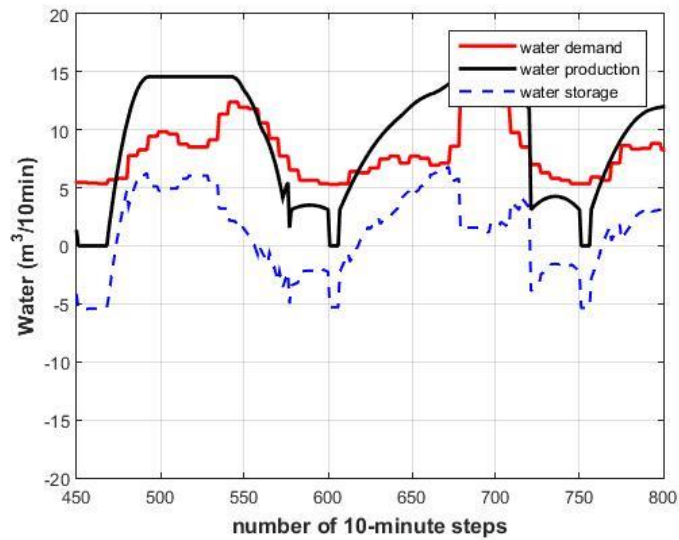
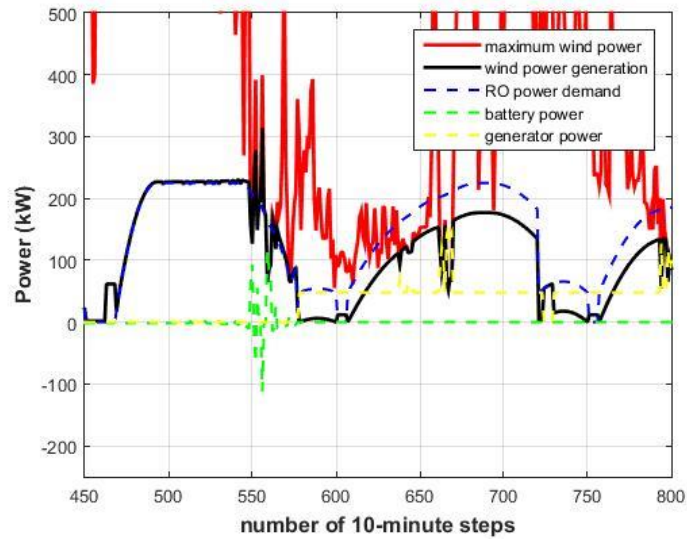
Πίνακας 4.10: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού

Για να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διεύρυνση της αιολικής παραγωγής αυξάνεται περισσότερο η ισχύς των μπαταριών στα 600 kW με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα.

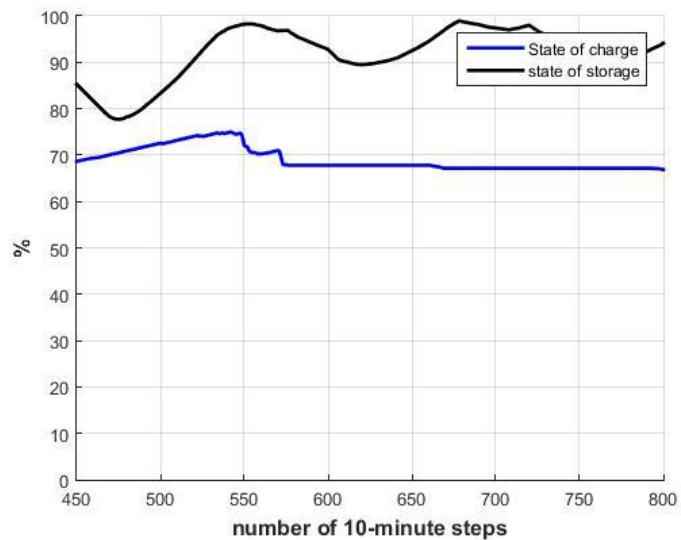
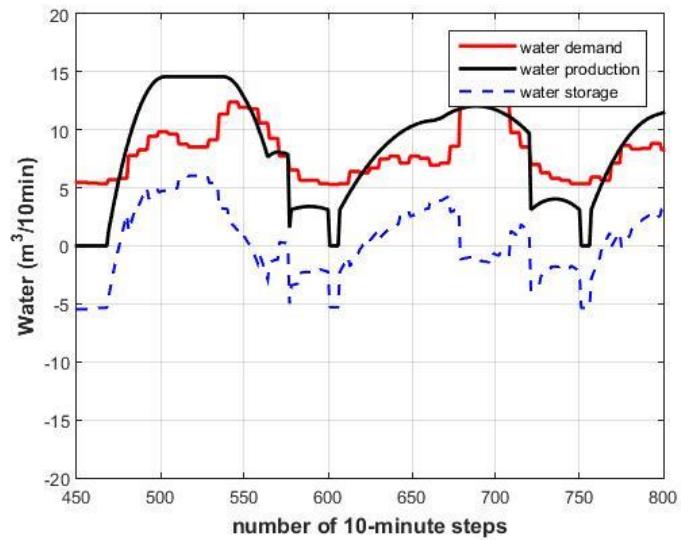
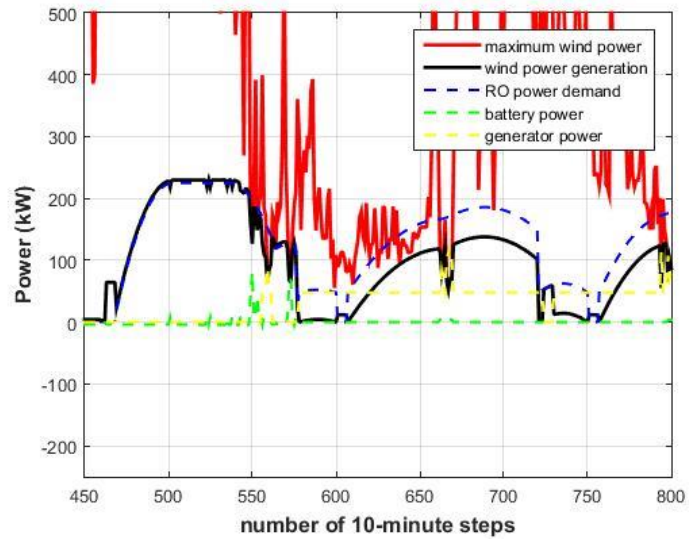
Αρχικά παρατηρείται ότι η βασική συσχέτιση μεταξύ της χωρητικότητας των μπαταριών και την παραγωγή με το H/Z που υπήρχε στις υλοποιήσεις των 200 kW και 400 kW, συνεχίζεται και σε αυτήν την περίπτωση. Η βασική διαφοροποίηση εντοπίζεται στο γεγονός ότι η αύξηση της ισχύος από τα 200 στα 400 kW οδήγησε τελικώς σε μεγάλο περιορισμό της παραγωγής από το ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος, ενώ η αντιστοίχιση από τα 400 στα 600 kW δεν προκάλεσε σημαντικές μεταβολές.

Επιπλέον παρατηρώντας τόσο τα στιγμιότυπα που ακολουθούν όσο και τους δείκτες που αφορούν την συμπεριφορά της μονάδας RO(συνολική παραγωγή νερού, ποσοστό λειτουργίας) φαίνεται πως ούτε και σε αυτήν την περίπτωση η μεταβολή στα χαρακτηριστικά των μπαταριών οδήγησε σε κάποια μεταβολή στην πολιτική διαχείρισης της μονάδας αφαλάτωσης. Υπάρχει επομένως κάποιος ανασταλτικός παράγοντας από τις υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος που εμποδίζει τον αλγόριθμο να ακολουθήσει μια διαφορετική πολιτική διαχείρισης της μονάδας RO η οποία ενδεχομένως να εμφάνιζε πιο οικονομικές υλοποιήσεις.

Επομένως, αφού καμία από τις ηλεκτρικές συνιστώσες δεν δρα περιοριστικά και αφού το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης όπως αποδείχτηκε στο κεφάλαιο 3 υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις σε νερό, ο περιοριστικός παράγοντας είναι το μέγεθος των δεξαμενών. Ο συγκεκριμένος συλλογισμός μπορεί να αποδειχτεί χρησιμοποιώντας και τα στιγμιότυπα που ακολουθούν, παρατηρώντας τα δεκάλεπτα 720 μέχρι 750, όπου ενώ υπάρχει διαθέσιμη αιολική παραγωγή ο αλγόριθμος περιορίζει την μονάδα RO λόγω έλλειψης χώρου στην δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτό ουσιαστικά οδηγεί τον αλγόριθμο να ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό την ζήτηση, χωρίς να έχει την δυνατότητα δηλαδή να παράγει πολύ περισσότερο όταν παρουσιάζεται περίσσεια αιολικού δυναμικού και να χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ποσότητα νερού όταν η αιολική παραγωγή δεν επαρκεί.



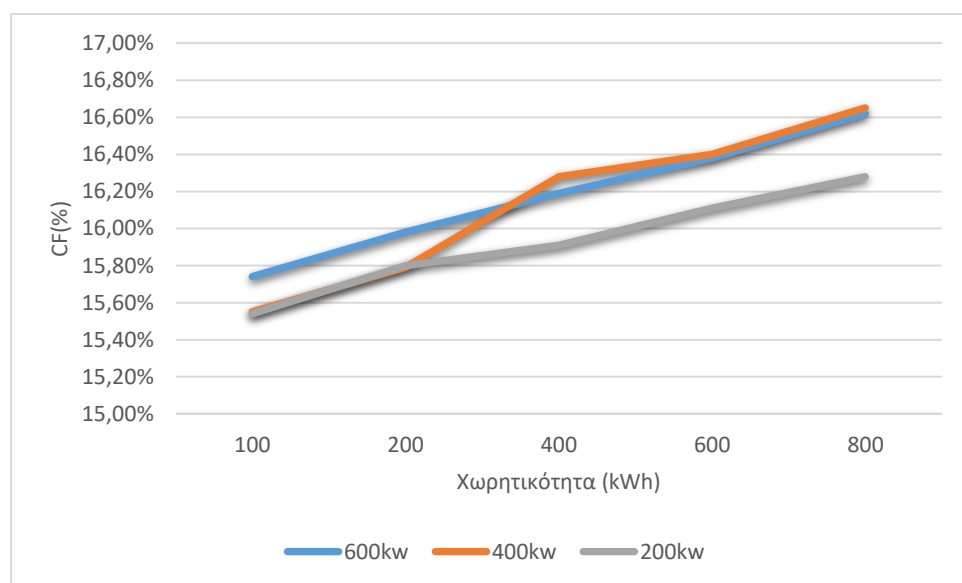
Διάγραμμα 4.5: Πάνω Ισοζύγιο ισχύος. Μέση παραγωγή- ζήτηση νερού. Κάτω κατάσταση δεξαμενής και μπαταριών για ισχύ μπαταριών 600 kW και χωρητικότητα 100 kWh



Διάγραμμα 4.6: Πάνω Ισοζύγιο ισχύος. Μέση παραγωγή- ζήτηση νερού. Κάτω κατάσταση δεξαμενής και μπαταριών για ισχύ μπαταριών 600 kW και χωρητικότητα 800 kWh

4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

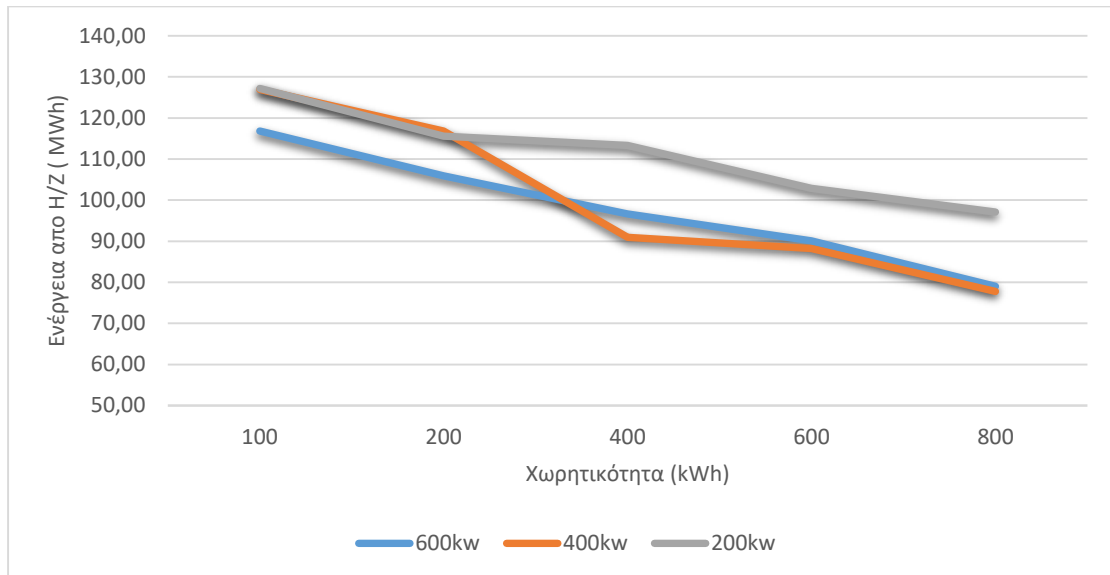
Με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου τα οποία απεικονίζονται στο σχήμα 4.7 φαίνεται ότι παρουσιάζεται έστω και μια μικρή αύξηση στο συντελεστή χρησιμοποίησης αυξάνοντας την χωρητικότητα. Όσον αφορά την ισχύ η αύξηση της από τα 200 kW στα 400 kW συνεισφέρει στην αύξηση της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής για χωρητικότητες μεγαλύτερες των 400 kWh, ενώ αντίστοιχα η αύξηση της ισχύος από τα 400 kW στα 600 kW είναι αποτελεσματική για μικρές χωρητικότητες (μικρότερες των 200 kWh). Ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις οι διαφοροποιήσεις είναι πολύ μικρές εξαιτίας του περιορισμού στην διαχείριση της μονάδας αφαλάτωσης που εισέρχεται από το μικρό μέγεθος των δεξαμενών, αλλά κυρίως από την υπερδιαστασιολόγηση της Α/Γ. Ακόμα και στην περίπτωση του μικρότερου CF, δηλαδή 15,55%, η ενέργεια από την αιολική παραγωγή καλύπτει πρωτογενώς τις 1078,4 MWh που απαιτεί η μονάδα αφαλάτωσης.



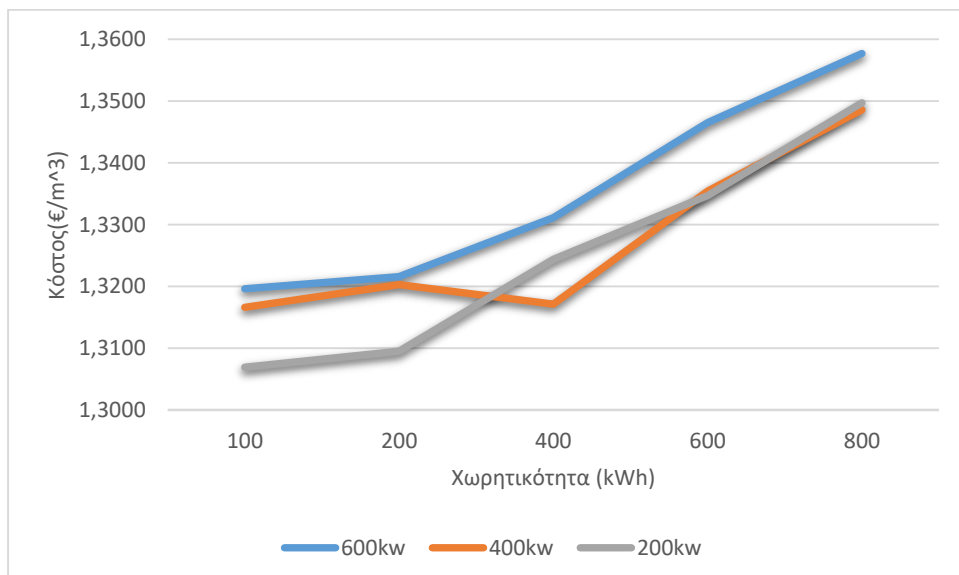
Σχήμα 4.7: Μεταβολή του capacity factor σε σχέση με την χωρητικότητα. **Με γκρι** χρώμα για ισχύ 200 kW, **με κόκκινο** χρώμα για ισχύ 400 kW, **με μπλέ** χρώμα για ισχύ 600 kW,

Όσον αφορά την συμπεριφορά του ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της ενέργειας που προέρχεται από αυτό, σχεδόν 40%. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται ότι για μικρές χωρητικότητες (μικρότερες των 200 kWh), η αύξηση της ισχύος στα 600 kW περιορίζει περισσότερο την παραγωγή του Η/Ζ, ενώ για μεγαλύτερες χωρητικότητες την βέλτιστη επιλογή αποτελούν οι μπαταρίες των 400 Kw.

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο είναι ότι ακόμα και σε μεγάλα συστήματα μπαταριών η παρουσία του ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους είναι απαραίτητη για να μπορεί η μονάδα αφαλάτωσης να καλύπτει συνεχώς τις απαιτήσεις σε πόσιμο νερό.



Σχήμα 4.8: Μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας από το Η/Ζ σε σχέση με την χωρητικότητα. **Με γκρι** χρώμα για ισχύ 200 kW, **με κόκκινο** χρώμα για ισχύ 400 kW, **με μπλέ** χρώμα για ισχύ 600 kW,

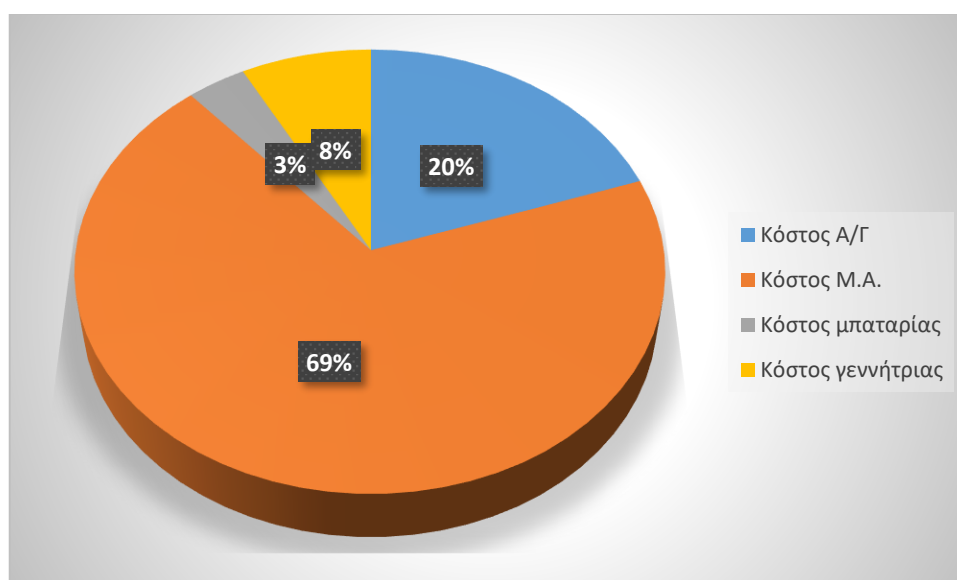


Σχήμα 4.9: Μεταβολή του ειδικού κόστους παραγωγής νερού σε σχέση με την χωρητικότητα. **Με γκρι** χρώμα για ισχύ 200 kW, **με κόκκινο** χρώμα για ισχύ 400 kW, **με μπλέ** χρώμα για ισχύ 600 kW,

Επιπλέον παρόλο που αυξάνοντας το μέγεθος των μπαταριών επιτυγχάνεται μείωση του κόστους καυσίμου, η αύξηση του κόστους των μπαταριών είναι μεγαλύτερη. Επομένως υλοποιήσεις με μικρότερες μπαταρίες φαίνεται ότι είναι οικονομικότερες. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή του πετρελαίου δεν είναι σταθερή. Επομένως ενδεχόμενη αύξηση της τιμής του θα αυξήσει έντονα την τιμή του παραγόμενου προϊόντος, ειδικά στις διαμορφώσεις που το Η/Ζ προσφέρει αρκετή ενέργεια.

Ένα ακόμα στοιχείο που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι η μικρή μεταβολή του κόστους που παρουσιάζεται ανά περίπτωση. Σύμφωνα με την ανάλυση κόστους του σχήματος 4.10 φαίνεται ότι το κόστος του Η/Ζ και των μπαταριών είναι πολύ μικρό σε σχέση με το κόστος της μονάδας αφαλάτωσης και της Α/Γ. Αυτή είναι και η αιτία όπου υπάρχει μικρή αλλαγή του κόστους ανά περίπτωση.

Τέλος πραγματοποιώντας σύγκριση στα ειδικά κόστη παραγωγής νερού του αυτόνομου συστήματος με ένα σύστημα στο οποίο η μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτείται απευθείας από το δίκτυο, όπως αυτό περιγράφηκε στην ενότητα 4.3, παρατηρούμε έντονη διαφοροποίηση. Πιο συγκεκριμένα το κόστος στην οικονομικότερη υλοποίηση στο αυτόνομο σύστημα 1,3069 ενώ στην περίπτωση τροφοδοσίας από το δίκτυο 1,1286. Αυτό οφείλεται στην υπερδιαστασιολόγηση που γενικά παρουσιάζουν τα αυτόνομα συστήματα και με πιο καθοριστικό παράγοντα στην περίπτωσή μας το μέγεθος της Α/Γ.



Σχήμα 4.10: Γραφική απεικόνιση επιμέρους στοιχείων ειδικού κόστους παραγωγής νερού μπαταρίες ισχύος 600 kW και χωρητικότητας 100 kWh.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Συγκεντρωτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε μοντελοποίηση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης, μεγάλης κλίμακας με σκοπό την εγκατάσταση του σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα για την πλήρη κάλυψη των υδρευτικών του αναγκών. Το σύστημα που εξετάστηκε περιλαμβάνει μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, μια Α/Γ, ένα ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος τροφοδοτούμενο με καύσιμο diesel, συστοιχίες μπαταριών και την δεξαμενή αποθήκευσης πόσιμου νερού

Η πλήρως μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος, των τεχνικών περιορισμών του και η δημιουργία του αλγορίθμου ελέγχου του, αποτέλεσαν τις βασικότερες επιδιώξεις τις παρούσας εργασίας. Η ορθή σχεδίαση του αλγορίθμου ελέγχου εξασφαλίζει την αδιάλειπτη κάλυψη της ζήτησης σε νερό με παράλληλη τήρηση όλων των τεχνικών περιορισμών που εισάγονται στο σύστημα από τις επιμέρους συνιστώσες του, ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος παραγωγής του. Προτιμήθηκε να δομηθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς με αυτόν τον τρόπο όχι μόνο γίνεται ο βέλτιστος συντονισμός των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος, αλλά και γιατί η σχεδίαση ενός τέτοιου αλγορίθμου με απλή λογική είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Επιπλέον για να πραγματοποιηθεί η όσο το δυνατόν καλύτερη διαχείριση του συστήματος, επιλέχτηκε να πραγματοποιείται κυλιόμενη επίλυση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης ανά μέρα με ορίζοντα βελτιστοποίησης της, μεγαλύτερο της ημέρας. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι μπορεί να προβλέψει επερχόμενες δυσμενείς καταστάσεις, όπως αύξηση της ζήτησης σε νερό με μείωση του αιολικού δυναμικού και να προβεί στις απαιτούμενες ενέργειες, αρχικά για να μην υπάρξει αδυναμία κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό και δευτερεύοντος οι κινήσεις αυτές να πραγματοποιηθούν με την μικρότερη δυνατή επιβάρυνση στο κόστος παραγωγής του. Ο ορίζοντας της βελτιστοποίησης προσδιορίστηκε στις πέντε μέρες, αφού ύστερα από εκτενή διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι το χρονικό πλαίσιο αυτό προσφέρει ικανοποιητικού βαθμού πρόβλεψη, χωρίς να δυσχεραίνει και να αυξάνει τον χρόνο επίλυσης του αλγορίθμου.

Για να πραγματοποιηθεί η επιλογή της κατάλληλης τάξης μεγέθους των παραμέτρων που αφορούν τις συνιστώσες του συστήματος, προηγήθηκε διερεύνηση των εμπορικά διαθέσιμων μοντέλων που κυκλοφορούν στην αγορά. Ειδικά όσον αφορά την επιλογή της μονάδας αφαλάτωσης αποδείχτηκε ότι για την συγκεκριμένη εφαρμογή την βέλτιστη επιλογή αποτελεί η μονάδα αντίστροφης όσμωσης με δυνατότητα λειτουργίας, ωστόσο, σε μεταβλητή ισχύ εισόδου.

Επιπλέον εξαιτίας των λειτουργικών περιορισμών που εισέρχονται στο σύστημα, κυρίως λόγω της μονάδας RO, επιλέχτηκε για τον έλεγχό της, η στρατηγική ομαλών

μεταβολών. Η χρησιμοποίηση της εξασφαλίζει την λειτουργία της μονάδας RO σε μεγάλο εύρος ισχύος αποφεύγοντας όμως τις πολύ έντονες μεταβολές της και περιορίζοντας τον αριθμό εκκινήσεων /σβέσεων μέσα σε ένα έτος. Με αυτόν το τρόπο ελαχιστοποιείται η καταπόνηση του μηχανολογικού εξοπλισμού και εν γένει προσομοιώνεται μια πιο ρεαλιστική λειτουργία του συστήματος. Το βασικό μειονέκτημα της στρατηγικής αυτής, ωστόσο, είναι ότι η αντιστάθμιση της έντονης μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής προκαλεί έντονη καταπόνηση των μπαταριών και αυξημένη παραγωγή από το H/Z.

Με την αναλυτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι η χρησιμοποίηση του H/Z εξασφαλίζει την αδιάλειπτη κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό και περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την υπερδιαστασιολόγηση που κατά κανόνα διέπει τα αυτόνομα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα η δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης του συστήματος ήταν η μικρότερη δυνατή για να καλύψει τις ανάγκες σε πόσιμο νερό και οι δεξαμενές διαστασιολογήθηκαν στο να παρέχουν αυτονομία μια μόνο ημέρα. Το μοναδικό μέγεθος το οποίο παρουσιάζει αυξημένη δυναμικότητα σε σχέση με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης είναι η Α/Γ η οποία ωστόσο είναι η εμπορικά μικρότερη διαθέσιμη. Αποδείχτηκε ότι αυξάνοντας την δυναμικότητα των μπαταριών μειώνεται η παραγόμενη από το H/Z ενέργεια, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζεται ιδιαίτερη μεταβολή στο κόστος παραγωγής του νερού. Παρατηρήθηκε επίσης ότι εξαιτίας πρωτίστως του μικρού μεγέθους των δεξαμενών και δευτερεύοντος της δυνατότητας παραγωγής της μονάδας RO περιορίζεται η ικανότητα του αλγόριθμου να χρησιμοποιήσει διαφορετική πολιτική διαχείριση της μονάδας, ακόμα και σε συστήματα με μεγάλες συστοιχίες μπαταριών.

Τέλος τόσο για να γίνει η διαστασιολόγηση της μονάδας RO, όσο και για λόγους σύγκρισης κατασκευάστηκε ένα βοηθητικό μοντέλο στο οποίο η μονάδα τροφοδοτείται απευθείας από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Από την επίλυση του διαπιστώθηκε ότι το ειδικό κόστος παραγωγής νερού είναι κατά 16% μικρότερο από την πιο οικονομική περίπτωση του αυτόνομου συστήματος, εξαιτίας της υπερδιαστασιολόγησης που έχει γίνει στην Α/Γ. Ωστόσο σε κάθε περίπτωση παραμένουν συγκρίσιμες και πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες χρεώσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την μέθοδο της ακτοπλοϊκής μεταφοράς.

5.2 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης. Συγκεντρωτικά αυτά είναι:

- Να ληφθεί υπόψη το σφάλμα πρόβλεψης ανέμου που θα έρχεται ως διαταραχή και ο αλγόριθμος θα πρέπει να αναπροσαρμόζει την λύση
- Να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της δυνατότητας εγκατάστασης ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης σε κάποιο νησί με μεγαλύτερες υδρευτικές ανάγκες και στη συνέχεια να γίνει σύγκριση της τιμής του

παραγόμενου νερού με αυτήν που προκύπτει αν η μονάδα τροφοδοτείται απευθείας από το δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- [1] Καλλιόπη Νατούδη « Μοντελοποίηση και παραμετρική διερεύνηση της λειτουργίας αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης τροφοδοτούμενο από ΑΠΕ», Μεταπτυχιακή εργασία, 2018, ΕΜΠ
- [2] Δημήτριος Ράπτης “Μελέτη αφαλάτωσης με μικρές μονάδες. Ειδικά με αυτόνομη μονάδα αντίστροφης όσμωσης και χρήση ΑΠΕ.” , διπλωματική εργασία, 2012, Πανεπιστήμιο Πατρών- Τμήμα Φυσικής
- [3] Νικόλαος Υφαντής « Σχεδιασμός και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη όσμωση- Μελέτες Περιπτώσεων», Διδακτορική διατριβή
- [4] ΕΠΙΣΕΥ-ΕΜΠ, «Στρατηγικές ελέγχου και παραμετρική διερεύνηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης», Τομείς Ηλεκτρικής Ισχύος και Σημάτων, Ελέγχου και Ρομποτικής, Φεβρουάριος 2006.
- [5] Γ. Κάραλης, Γ. Εμμανουηλίδης, « Μονάδες αφαλάτωσης στα άνυδρα νησιά του Αιγαίου», Ενεργειακό Γραφείο Ίου-Αιγαίου, Ιανουάριος 2011
- [6] S. D. Downing, D. F. Socie, «Application of capacitive deionisation in water desalination: a review». *Desalination*, 342 (2014): 3 -15.
- [7] E. Tzen, R. Morris, «Renewable energy sources for desalination». *Solar Energy*, 75 (2003) 375 - 379.
- [8] Wei Qi, Jinfeng Liu, Panagiotis Christofides, «Supervisory Predictive Control for Long-Term Scheduling of an Integrated Wind/ Solar Energy Generation and Water Desalination System». *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 20, No. 2, March 2012.
- [9] Wei Qi, Jinfeng Liu, Panagiotis Christofides, «A distributed control framework for smart grid development: Energy/water system optimal operation and electric grid integration». *Journal of Process Control*, 21 (2011) 1504 -1516.
- [11] Π. Κάπρος, Κ. Ντελκλής , « Οικονομική ανάλυση επιχειρήσεων», Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2014.
- [10] D. Assimacopoulos, «A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies». NTUA.
- [11] Kay Paulsen, Frank Hensel, «Design of an autarkic water and energy supply driven by renewable energy using commercially available components». *Desalination*, 203 (2007) 455 - 462.
- [12] S. D. Downing, D. F. Socie, “Application of capacitive deionisation in water desalination: a review”. *Desalination*, 342 (2014): 3 -15.

[13] Panagiotis A. Koklas, Stavros A. Papathanassiou, «Component sizing for an autonomous wind-driven desalination plant», *Renewable Energy* 31 (2006) 2122–2139.

[14] Panagiotis A. Koklas, Stavros A. Papathanassiou, «Logistic modelling of an autonomous wind-driven desalination plant»