



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΑΠΟ
ΑΠΕ »***

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Καλλιόπης Β. Νατούδη

Επιβλέπων

Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου, Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Νατούδη Καλλιόπη

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

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

Copyright © Νατούδη Καλλιόπη, 2017

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 τη 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.

Στον Τάσο....

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Παπαθανασίου Σταύρο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον μηχανολόγο μηχανικό Γιώργο Καραβελάκη ο οποίος με τις γνώσεις του και την εμπειρία του σε πρακτικές εφαρμογές αφαλάτωσης, συνέβαλε καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Αισθάνομαι ακόμα την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου Χρήστο, που με στήριξαν και με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου, που μου στάθηκαν στα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε.

Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που θα τροφοδοτείται αποκλειστικά από Α/Γ, η εφαρμογή του οποίου θα είναι ανεξάρτητη από την ύπαρξη δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας έτσι δυνατή την εγκατάστασή του σε απομονωμένες περιοχές που αντιμετωπίζουν πρόβλημα στην κάλυψη των αναγκών πόσιμου νερού. Για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι απαραίτητη η χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας, αφενός για την παροχή αυτονομίας στη μονάδα αφαλάτωσης για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, σε περίπτωση που δεν επαρκεί η διαθέσιμη αιολική ενέργεια και αφετέρου για την εξομάλυνση των διαταραχών που μπορεί να προκληθούν από το συνδυασμό της χρονικά μεταβαλλόμενης αιολικής ενέργειας με τις απαιτήσεις σταθερής ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Μία από τις συνεισφορές αυτής της διπλωματικής είναι η μοντελοποίηση της αρχιτεκτονικής του συστήματος αφαλάτωσης μεγάλης ισχύος. Υπό αυτό το μοντέλο, βασικός στόχος είναι ο σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης με Α/Γ. Δομήθηκε, ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος που ορίζει τη λειτουργία και τη διαχείριση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στόχος του είναι ο προγραμματισμός ένταξης και αποσύνδεσης των επιμέρους συνιστωσών και η ρύθμιση της ισχύος τους, ώστε να επιτυγχάνεται σε μακροχρόνια βάση υψηλή παραγωγή νερού, υπό χαμηλό κόστος και με καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Η εξεταζόμενη διαχείριση των συνιστωσών αφορά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, δίνοντας βαρύτητα στην τήρηση του ενεργειακού ισοζυγίου συστήματος. Αφού καταστρώθηκε το λογιστικό μοντέλο, πραγματοποιήθηκε ενεργειακή προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος με στόχο να διερευνηθούν οι στρατηγικές ελέγχου και να αναλυθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του και να εξεταστεί η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων ελέγχου στο κόστος του παραγόμενου νερού. Η εγκατάσταση ενός αυτόνομου συστήματος προϋποθέτει την διερεύνηση ορισμένων παραμέτρων, οι βασικότερες εκ των οποίων είναι η επιλογή της/των Α/Γ, της μονάδας αφαλάτωσης και των μπαταριών. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε προσπάθεια βέλτιστης διαστασιολόγησης των ανωτέρων συνιστωσών με βάση τις τεχνολογίες της αγοράς, με στόχο την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας νερού για την κάλυψη των αναγκών, λαμβάνοντας υπόψη την οικονομικότητα (κόστος επένδυσης και λειτουργικό κόστος) αλλά και την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

Abstract

This master thesis studies the design of an autonomous desalination system, which is powered exclusively from a wind turbine and is independent from the public electrical grid. Such a system can be installed in remote regions, which usually also have water access problems. Batteries are essential for this system to function for two reasons: i) they offer desalination unit autonomy for a certain time when wind energy is not total available and ii) they can limit the effect caused by the combination of the time - varying wind energy and constant power demands of the desalination unit. One of the contributions of this thesis is the model of a large scale desalination system architecture. Under this model, the basic goal of this thesis is to design the control algorithm of the stand-alone desalination unit. The later is modeled as the solution to an optimization problem. More specifically, it decides when the components of the system function are connected (or are disconnected) and also regulates their power while trying to keep the long - term water production high, with low cost and good operating performance of the desalination unit. The examined system 's components management is with respect to the steady - state operation and gives weight to satisfying the system 's power balance. After building the model we perform simulation of the system' s operation to analyze the performance and examine the influence of several control parameters to the water production cost. The installation of such an autonomous system requires the careful selection of design parameters, such as the wind turbine, the desalination plant and the batteries. In this thesis, we search for optimal dimensioning of the above parameters, based on the technology available in the market, to meet the water demand under two criteria: i) economical cost (investment and operational cost) ii) reliable performance.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ.....	9
1.1. Το πρόβλημα των υδατικών πόρων.....	9
1.2. Η τεχνολογία της αφαλάτωσης.....	11
1.3. Μέθοδοι αφαλάτωσης νερού.....	14
1.4. Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης νερού.....	20
1.5. Ανάλυση σύγχρονων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση.....	21
1.6. Κόστος αφαλάτωσης.....	30
1.7. Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	31
1.8. Σύστημα αφαλάτωσης με χρήση Α/Γ.....	32
Κεφάλαιο 2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	37
2.1. Μοντελοποίηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης.....	37
2.2. Στοιχεία Μαθηματικού Προγραμματισμού.....	38
2.3. Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	39
2.4. Απλή στρατηγική ελέγχου.....	45
Κεφάλαιο 3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ.....	46
3.1. Συνιστώσες και παράμετροι προσομοίωσης του συστήματος.....	46
Κεφάλαιο 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	55
4.1. Εισαγωγή.....	55
4.2. Στρατηγική άμεσης προσαρμογής της μονάδας RO στην παραγωγή της Α/Γ.....	56
4.3. Στρατηγική ομαλής προσαρμογής της ισχύος λειτουργίας της μονάδας RO στην παραγωγή της Α/Γ.....	63
4.4. Σύγκριση στρατηγικών ελέγχου.....	74
4.5. Στρατηγική απλής διαχείρισης.....	78
Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84

5.1.	Συγκεντρωτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας.....	84
5.2.	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	86

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

1.1. Το πρόβλημα των υδατικών πόρων

1.1.1. Γενικά

Η σημερινή ανάπτυξη του πληθυσμού, οι ανάγκες των συστημάτων παραγωγής νερού συγκεκριμένης ποιότητας, οι αλλαγές στις συνήθειες, αλλά και οι ανάγκες των κατοίκων των μικρών και μεγάλων αστικών κέντρων, έχουν δημιουργήσει τρομακτική ζήτηση βιομηχανικού και πόσιμου νερού. Οι αλλαγές κλίματος που προκάλεσαν την ελάττωση των βροχοπτώσεων, η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων και η χωρίς επεξεργασία διάθεση στο περιβάλλον πάσης φύσεως αποβλήτων, έχουν ελαττώσει σημαντικά τα διαθέσιμα αποθέματα πόσιμου νερού.

Συνεπώς η συνεχής αύξηση της ζήτησης σε νερό κατάλληλης ποιότητας οφείλεται στους εξής λόγους[1]:

- Αύξηση του μόνιμου πληθυσμού και του βιοτικού επιπέδου.
- Μεγάλες μετακινήσεις πληθυσμών σε μικρές χρονικές περιόδους (ανάπτυξη τουρισμού).
- Αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων.
- Χρήση μεγάλων ποσοτήτων νερού στη βιομηχανία.

Ως εκ τούτου, οι υπάρχοντες υδάτινοι πόροι νερού σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι επαρκείς για την κάλυψη της κατανάλωσης. Ακόμη όμως και αν είναι διαθέσιμο το νερό σε επαρκείς ποσότητες, πολλές φορές δεν έχει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για την χρήση που επιθυμείται, Συνεπώς συχνά απαιτείται κατεργασία ακόμη και του γλυκού νερού. Λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια ποσότητα θαλασσινού νερού και την ύπαρξη υφάλμυρων υδάτινων πόρων είναι λογική η προσπάθεια παραγωγής νερού κατάλληλης ποιότητας για συγκεκριμένη χρήση από θάλασσα ή υφάλμυρα νερά, αλλά και η επαναχρησιμοποίηση υδάτινων αποβλήτων μετά από κατάλληλη επεξεργασία.

1.1.2. Η κατάσταση στην Ελλάδα[2]

Στην Ελλάδα, οι περιοχές που αντιμετωπίζουν σοβαρό πρόβλημα λειψυδρίας είναι τα νησιά του Αιγαίου και κυρίως οι Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα. Αυτό οφείλεται κυρίως στα χαμηλά μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης καθώς και στη γεωλογία ορισμένων νησιών που δεν βοηθά στη δημιουργία υδροφόρων οριζόντων. Πολλά από τα νησιά αυτά αποτελούν δημοφιλείς προορισμούς, γεγονός που εκτοξεύει τη ζήτηση νερού στα ύψη κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών.

Μέχρι σήμερα, η κάλυψη των αναγκών ύδρευσης των άνυδρων νησιών των Κυκλάδων και των Δωδεκανήσων πραγματοποιείται κυρίως μέσω μεταφοράς νερού με υδροφόρα πλοία με αποτέλεσμα να καταβάλλονται από το Ελληνικό Δημόσιο υπέρογκα ποσά χωρίς έτσι να λαμβάνεται υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος από τις μεταφορές αυτές και ούτε να εξασφαλίζεται η αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας σε βάθος χρόνου. Μέρος των αναγκών καλύπτεται κατά περίπτωση από τοπικές δημοτικές ή ιδιωτικές γεωτρήσεις, από αφαλάτωση θαλασσινού νερού και συμπληρωματικά από συγκέντρωση όμβριων υδάτων είτε σε επίπεδο οικισμού ή νησιού με λιμνοδεξαμενές, είτε ανά νοικοκυριό με στέρνες (για ύδρευση).

Η επιδείνωση του προβλήματος της λειψυδρίας επιβεβαιώνεται από τη σημαντική αύξηση που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στις ποσότητες νερού που μεταφέρονται με υδροφόρα πλοία, κυρίως το καλοκαίρι λόγω των αυξημένων αναγκών από τον εποχιακό τουρισμό. Είναι χαρακτηριστικό δε ότι παρόλο που τα τελευταία χρόνια η αύξηση των υδρευτικών αναγκών είναι πολύ μεγάλη και έχουν επεκταθεί τα έργα υδροληψίας (νέες γεωτρήσεις, αφαλατώσεις, μεταφερόμενες ποσότητες) δεν υπάρχει παράλληλα διαχειριστική πολιτική μείωσης της υδρευτικής ζήτησης, π.χ. με περιορισμό των απωλειών, κατάλληλη τιμολογιακή πολιτική κ.τ.λ..

Ειδικότερα, στο *Σχήμα 1* απεικονίζονται οι μεταφερθείσες ποσότητες νερού στις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα, κατά τη δεκαετία 2000-2010 καθώς και τα αντίστοιχα ετήσια και ειδικά κόστη μεταφοράς. Παρατηρείται ειδικά για τις Κυκλάδες ότι από το 2000 ως το 2008 τόσο η μεταφερθείσα ποσότητα νερού (m^3) όσο και το ετήσιο κόστος μεταφοράς (€ / year) σχεδόν πενταπλασιάστηκαν. Τα πράγματα ήταν λίγο καλύτερα για τα Δωδεκάνησα καθώς τα αντίστοιχα μεγέθη αυξήθηκαν σε μικρότερο βαθμό, συγκεκριμένα σχεδόν διπλασιάστηκαν. Το ειδικό κόστος μεταφοράς νερού (€ / m^3) που πλήρωσε το Υπουργείο Εμπορική Ναυτιλίας Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής αυξήθηκε εντός της δεκαετίας από 7.99 € / m^3 σε 9.84 € / m^3 για τις Κυκλάδες και από 3.61 € / m^3 σε 9.84 € / m^3 για τα Δωδεκάνησα.

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: Μεταφερθείσες ποσότητες (m³/year) ετήσια κόστη μεταφοράς (€/year) και ειδικά κόστη (€/m³) μεταφοράς νερού κατά τη δεκαετία 2000 - 2010

1.2. Η τεχνολογία της αφαλάτωσης

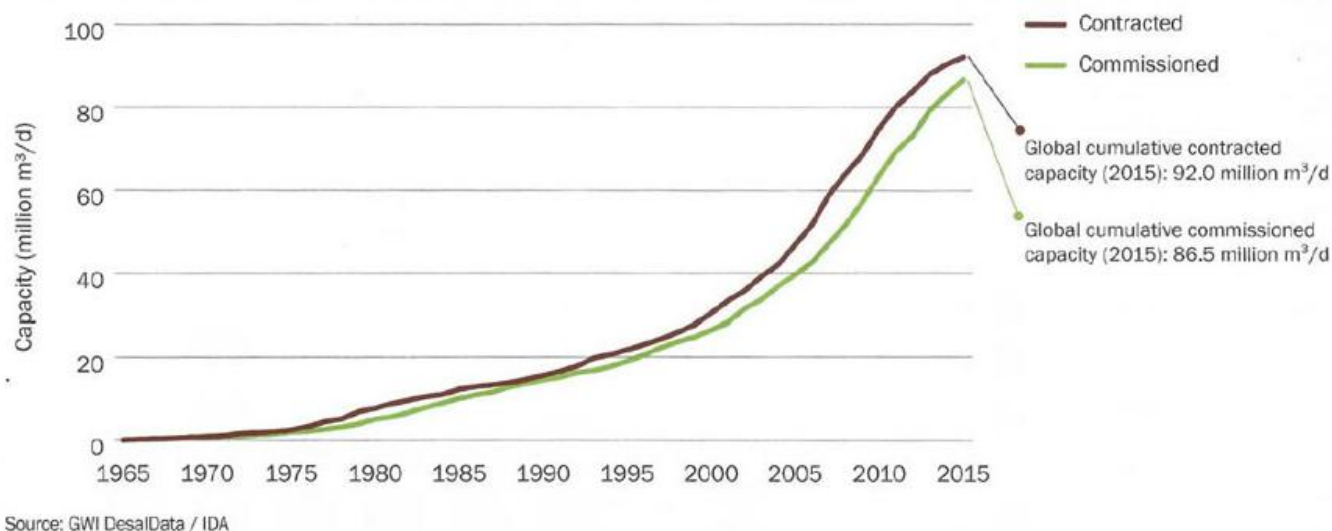
Οι μέθοδοι επεξεργασίας νερού έχουν στόχο την αφαίρεση όλων εκείνων των συστατικών του νερού που κρίνονται ανεπιθύμητα για την εκάστοτε χρήση με τη βοήθεια φυσικών και χημικών διεργασιών. Οι διεργασίες αυτές μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στους υπάρχοντες υδάτινους πόρους όσο και στα αστικά ή βιομηχανικά απόβλητα.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης ειδικότερα, έχουν ως στόχο τη μείωση του ποσοστού αλάτων που περιέχονται στο νερό σε τέτοιο επίπεδο ώστε το νερό να είναι χημικά και μικροβιολογικά αποδεκτό προς την προδιαγραφόμενη χρήση, η οποία συνήθως αφορά την κατανάλωση του ως πόσιμο νερό. Πρακτικά συνήθως εφαρμόζεται για την ανάκτηση πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια και λίμνες.

Η εξέλιξη των μεθόδων κατεργασίας νερού και αφαλάτωσης είναι συνεχής με κύριους στόχους τη μείωση του κόστους παραγωγής, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή νερού σε προσιτές τιμές για τον μέσο καταναλωτή και τη φιλικότητα τους προς το περιβάλλον. Η δυνατότητα παραγωγής πόσιμου νερού με την αφαλάτωση θεωρείται εδώ και αρκετά χρόνια δεδομένη.

Τα τελευταία χρόνια η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού αναπτύσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς και φαίνεται ότι στο μέλλον θα αποτελέσει μία από τις κύριες πηγές υδροδότησης ως μη συμβατικός υδάτινος πόρος. Σήμερα εκτιμάται ότι σε όλο τον κόσμο λειτουργούν πάνω από 21000 μονάδες αφαλάτωσης σε περισσότερες από 120 χώρες, 50% των οποίων επεξεργάζονται θαλασσινό νερό και οι υπόλοιπες 50% υφάλμυρο. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2, ειδικά από

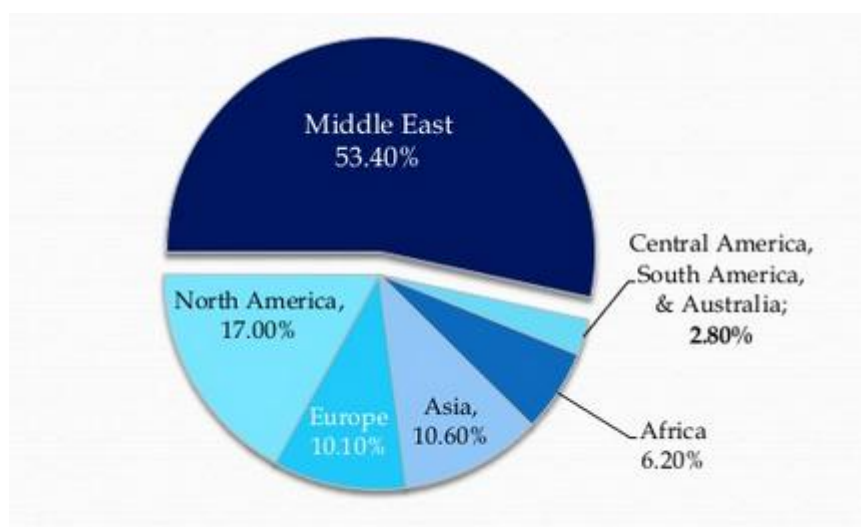
το 1995 και ύστερα παρατηρείται μία εκρηκτική αύξηση της συνολικής (ανεξαρτήτως τεχνολογίας ή τελικής χρήσης) δυναμικότητας των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, η οποία ξεπερνά τα 85 εκατομμύρια m³/day.



Σχήμα 2: Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη και αδειοδοτημένη δυναμικότητα μονάδων αφαλάτωσης [Πηγή: GWI DesalData/IDA]

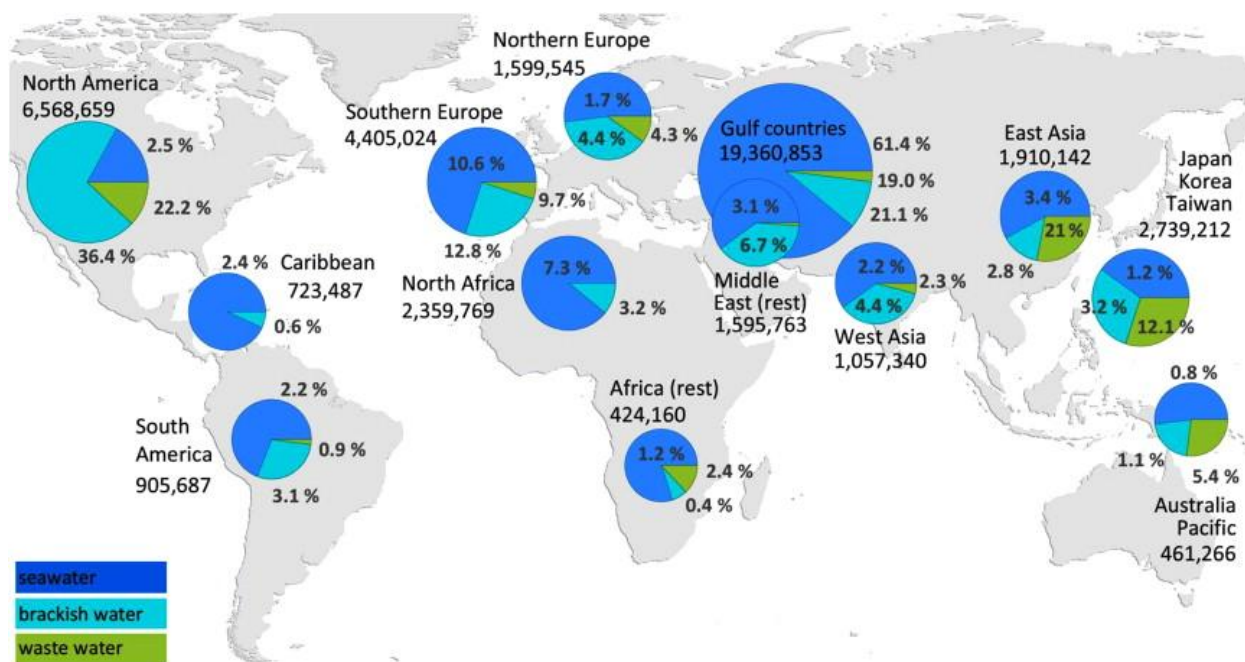
Στις χώρες του κόλπου (Μέση Ανατολή) λειτουργεί ο μεγαλύτερος αριθμός μονάδων αφαλάτωσης παγκοσμίως, ενώ ακολουθούν οι ΗΠΑ, η Μεσόγειος (Ευρώπη - Αφρική) και η Ασία. Τα ποσοστά των εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης για κάθε γεωγραφική περιοχή παρουσιάζονται στο

Σχήμα 3.

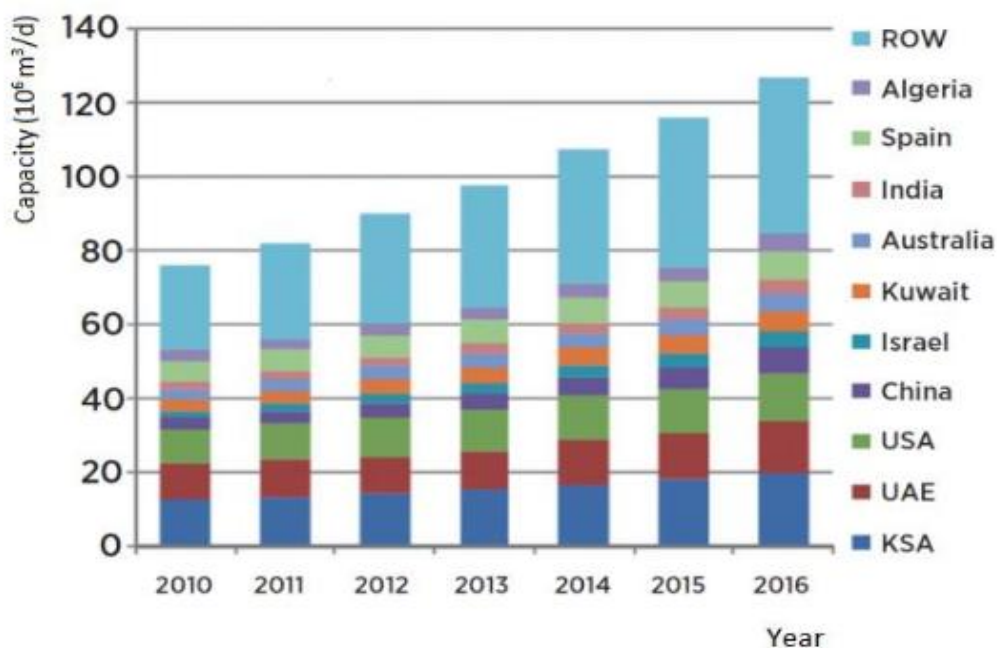


Σχήμα 3: Ποσοστά παγκόσμιας εγκατεστημένης δυναμικότητα αφαλάτωσης ανά γεωγραφική περιοχή, 2010-2016.

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποια σχήματα με παγκόσμια στοιχεία ως προς την επεξεργασία νερού και την εφαρμογή της τεχνολογίας αφαλάτωσης.



Σχήμα 4: Ποσοστά επεξεργασίας ανά τύπο νερού ανά τον κόσμο.



Σχήμα 5: Συνολική εγκατεστημένη δυναμικότητα μονάδων αφαλάτωσης ανά τις χώρες του κόσμου, 2010 -2016

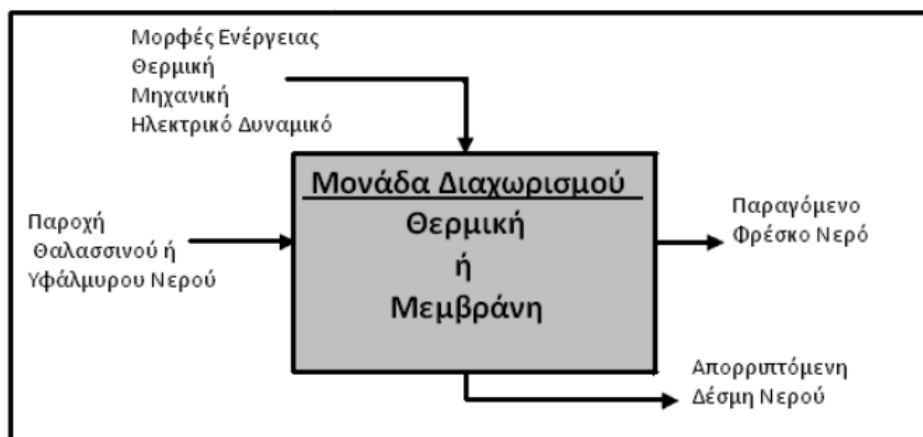
The biggest desalination plants around the world			
Country, Location	Capacity (m ³ /d)	Feedwater	Operation year
Saudi Arabia SA, Ras Al-Khair (Ras Azzour)	1,025,000	N/A	2013
Saudi Arabia SA, Shuaiba III	880,000	Seawater	2007
Saudi Arabia SA, Ras Al-Zour	800,000	Seawater	2007
Saudi Arabia SA, Al Jobail II Ex	730,000	Seawater	2007
UAE AE, Jebel Ali M	600,000	Seawater	2011
Kuwait KW, Al-Zour North	567,000	Seawater	2007

Σχήμα 6: Οι μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης σε λειτουργία ανά τον κόσμο

1.3. Μέθοδοι αφαλάτωσης νερού

Οι εμπορικά διαθέσιμες μέθοδοι αφαλάτωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Σε μεθόδους που περιλαμβάνουν αλλαγή φάσης (θερμικές διεργασίες). Αυτές είναι η απόσταξη και η κρυστάλλωση. Η δεύτερη δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Όσον αφορά την απόσταξη, οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι 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).
- Σε μεθόδους των οποίων οι διεργασίες πραγματοποιούνται σε μία μόνο φάση, δηλαδή την υγρή. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν η αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis, RO) και η ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED), οι οποίες χρησιμοποιούν μεμβράνες για την απομάκρυνση των αλάτων.



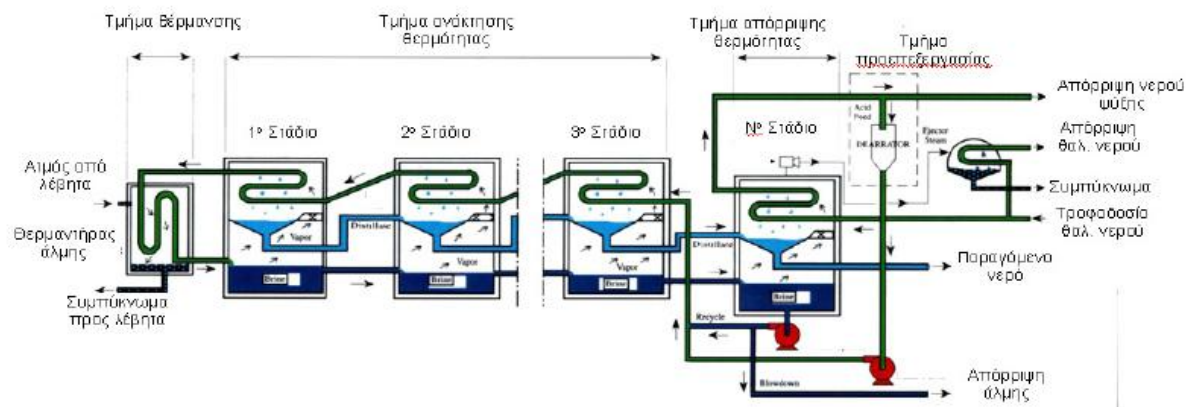
Σχήμα 7: Σχηματική περιγραφή της διαδικασίας αφαλάτωσης

Ακολουθεί αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου, καταλήγοντας τελικά σε αυτήν που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα, αυτή της αντίστροφης όσμωσης.

Πολυβάθμια εκτόνωση (multiple stage flashing MSF)

Η πολυβάθμια εκτόνωση είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος αφαλάτωσης, από την άποψη της συνολικής ικανότητας παραγωγής νερού των εγκατεστημένων μονάδων παραγωγής ανά τον κόσμο. Η μέθοδος έχει αναπτυχθεί για εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη παραγωγή νερού, συνήθως μεγαλύτερη από 5000 m³/day.

Η αρχή λειτουργίας της παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 8 και είναι η εξής: το θαλασσινό νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη του σημείου ζέσεως και στη συνέχεια εισέρχεται στον πρώτο θάλαμο που υπάρχει πίεση χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού, όπου ατμοποιείται. Ο ατμός έρχεται σε επαφή με τους σωλήνες που μεταφέρουν το κρύο θαλασσινό νερό, υγροποιείται και συλλέγεται ως καθαρό νερό. Η άλμη προωθείται στους επόμενους θαλάμους όπου το φαινόμενο επαναλαμβάνεται και η πίεση διαρκώς μειώνεται για να παρακολουθήσει την αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας της άλμης μέχρι που τελικά απορρίπτεται. Οι εγκαταστάσεις MSF μπορεί να αποτελούνται από 4-40 στάδια. Σε πολλές εφαρμογές οι εγκαταστάσεις αυτές βρίσκονται δίπλα σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας για καλύτερη αξιοποίηση του καυσίμου. Έτσι ο ατμός υψηλής πίεσης εκτονώνεται στον στρόβιλο και στη συνέχεια χρησιμοποιείται για αφαλάτωση.

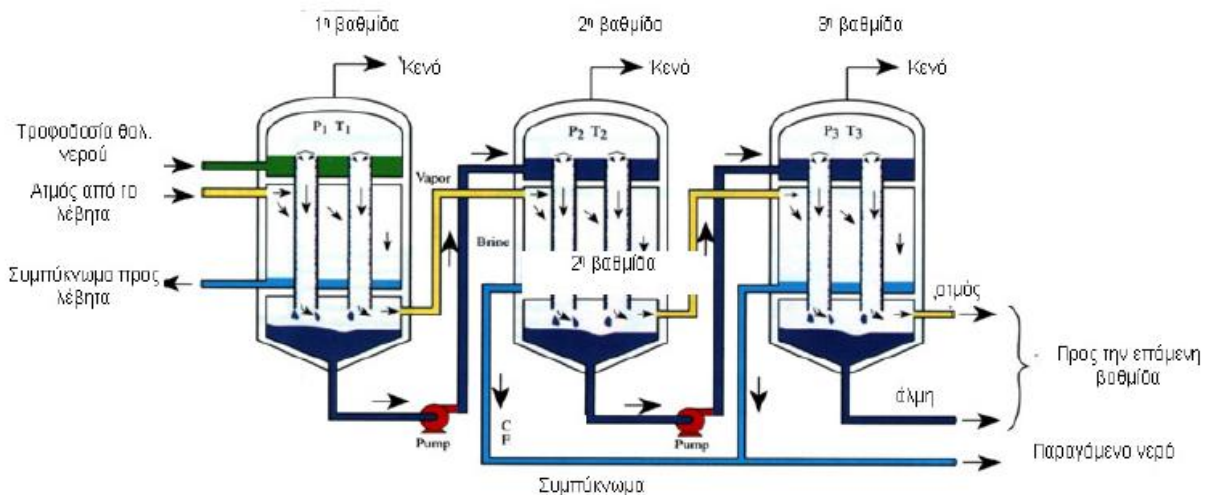


Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της πολυβάθμιας εκτόνωσης

Πολυβάθμια εξάτμιση (Multiple Effect Distillation MED)

Η πολυβάθμια εξάτμιση ήταν η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για αφαλάτωση θαλασσινού νερού. Αρχικά αναπτύχθηκε στη χημική βιομηχανία, όπου συνεχίζει να χρησιμοποιείται και σήμερα σε μεγάλο βαθμό. Η μέθοδος MED είναι παρόμοια με τη μέθοδο MSF, με τη διαφορά ότι σ' αυτήν τη μέθοδο η πλειοψηφία του αποστάγματος παράγεται με βρασμό.

Ο ατμός περνάει μέσα από σωλήνες, ενώ το ψυχρό θαλασσινό νερό ψεκάζεται πάνω τους, για να δημιουργηθεί φιλμ και να εξατμιστεί αποτελεσματικότερα. Έτσι μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και συλλέγεται σαν καθαρό νερό, ενώ ο υπόλοιπος ατμός, μαζί με το μέρος του θαλασσινού νερού που ατμοποιήθηκε, συνεχίζουν στον επόμενο θάλαμο. Σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού για να βοηθά στην εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε θάλαμο, ίση με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία σε υψηλή (>90°C) ή χαμηλή (<90°C) θερμοκρασία και μάλιστα η μέγιστη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι έως και 55°C, πράγμα που λειτουργεί ανασταλτικά στη διάβρωση και επιτρέπει τη χρήση χαμηλού επιπέδου απορριπτόμενης θερμότητας από άλλες θερμικές διεργασίες. Στη μέθοδο αυτή συχνά χρησιμοποιούνται και συμπιεστές (μηχανικοί ή θερμικοί), ενώ οι παραλλαγές της προκύπτουν απ' την οριζόντια ή κάθετη διάταξη των σωλήνων ατμού και τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομορορή, αντιρορή ή παράλληλη).



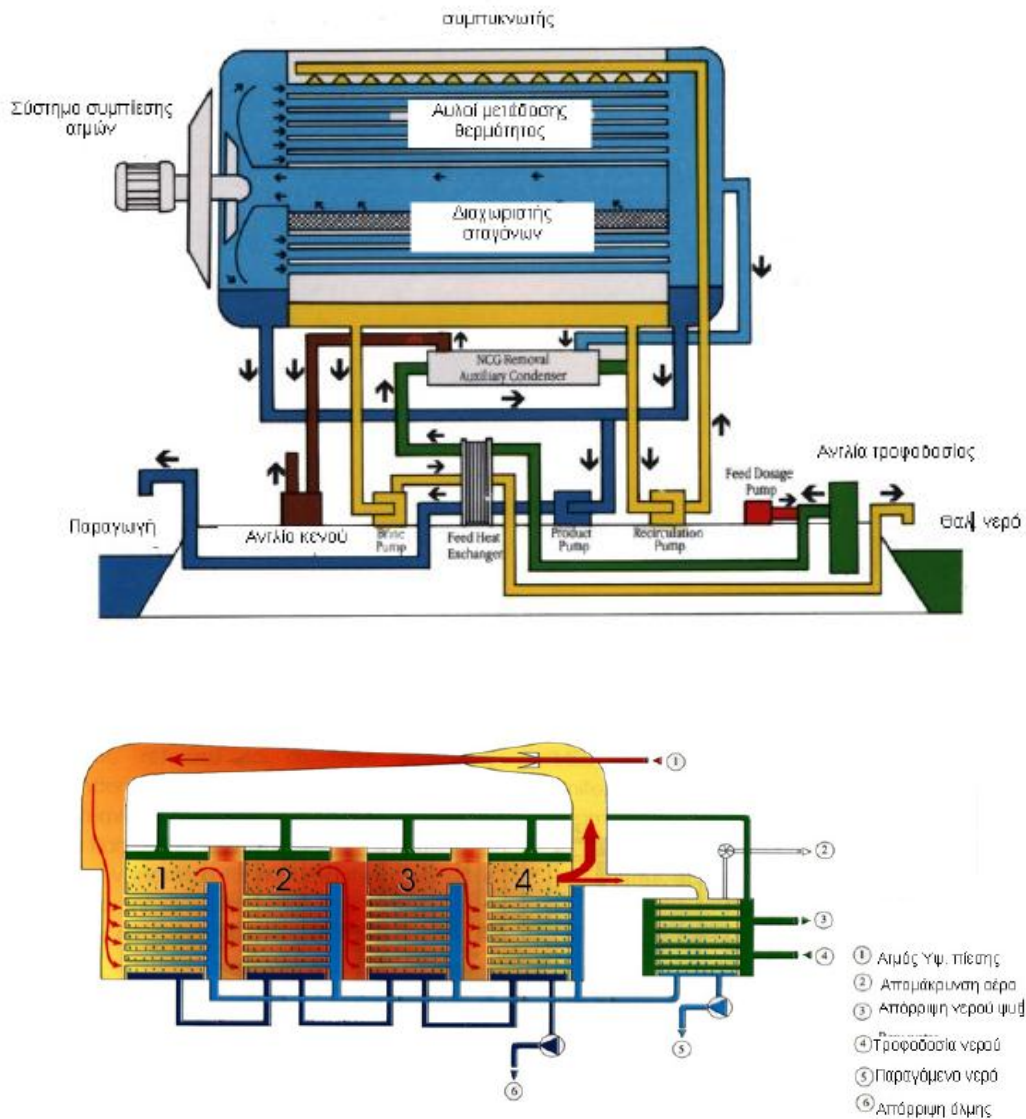
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση της πολυβάθμιας εξάτμισης

Εξάτμιση με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression, VC)

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο αποδοτική και απλή στην κατασκευή, χωρίς πολλαπλά στάδια. Το θαλασσινό νερό ψεκάζεται πάνω σε μια σειρά σωλήνων που τους διαπερνά ατμός, θερμαίνεται και εξατμίζεται με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή που δημιουργεί υποπίεση. Ο συμπιεστής αυτός μαζεύει τους ατμούς του καθαρού νερού και τους εκτοξεύει με πίεση μέσα στους σωλήνες και με την επαφή του ψυχρού θαλασσινού νερού συμπυκνώνονται και λαμβάνονται ως προϊόν. Η κύρια διαφορά με τις προηγούμενες δύο μεθόδους είναι προφανώς η απουσία πηγής θερμότητας, αφού εδώ η εξάτμιση προκαλείται αποκλειστικά και μόνο από τη χαμηλή πίεση, δηλαδή λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Και εδώ η δημιουργία λεπτού φιλμ πάνω στους σωλήνες είναι το κλειδί για την αποτελεσματικότερη εξάτμιση και άρα απόδοση της εγκατάστασης.

Η εξάτμιση με συμπίεση ατμών χρησιμοποιείται γενικά σε μικρές και μεσαίες εγκαταστάσεις και παράγει μέχρι και 3000m³/day. Οι μονάδες VC είναι πολύ απλούστερες από τια αντίστοιχες

MSF και MED, γι' αυτό και η συγκεκριμένη μέθοδος έχει βρει πολλές εφαρμογές. Λόγω του μικρού χώρου που απαιτεί μια μονάδα VC, της απλής λειτουργίας της και της δυνατότητας μεταφοράς της έχει εφαρμοστεί και στο στρατό. Η μέθοδος VC χρησιμοποιείται κυρίως στις δυτικές χώρες. Το 20% των συνολικών εγκατεστημένων μονάδων βρίσκεται στις ΗΠΑ, το 13% στη Μέση Ανατολή και το 22% στην Ευρώπη.

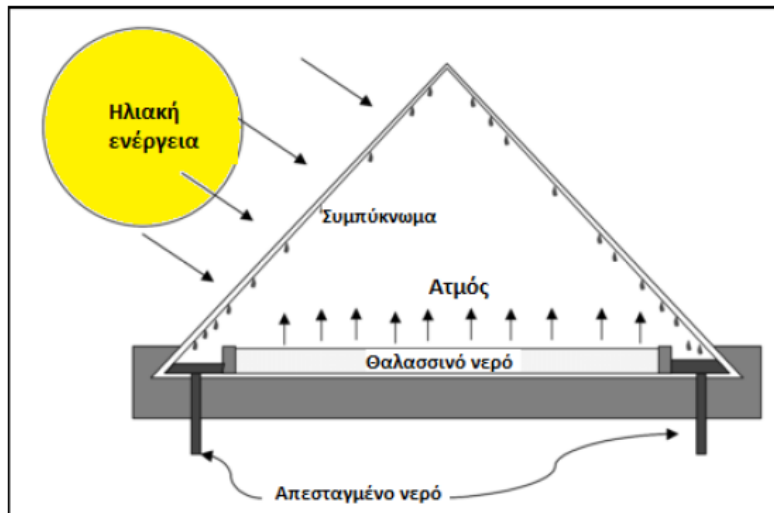


Σχήμα 10: Σχηματική απεικόνιση της εξάτμισης με συμπίεση ατμών

Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)

Οι συσκευές της κατηγορίας αυτής ουσιαστικά αναπαράγουν τον υδρολογικό κύκλο σε μικρή κλίμακα: οι ακτίνες του ήλιου διέρχονται μέσα από μια διαφανή οροφή και θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται στον πάτο. Αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην οροφή που είναι κεκλιμένη, οπότε συμπυκνώνεται πάλι και συλλέγεται ως προϊόν από κατάλληλη διάταξη. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν λιγότερο από το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και η

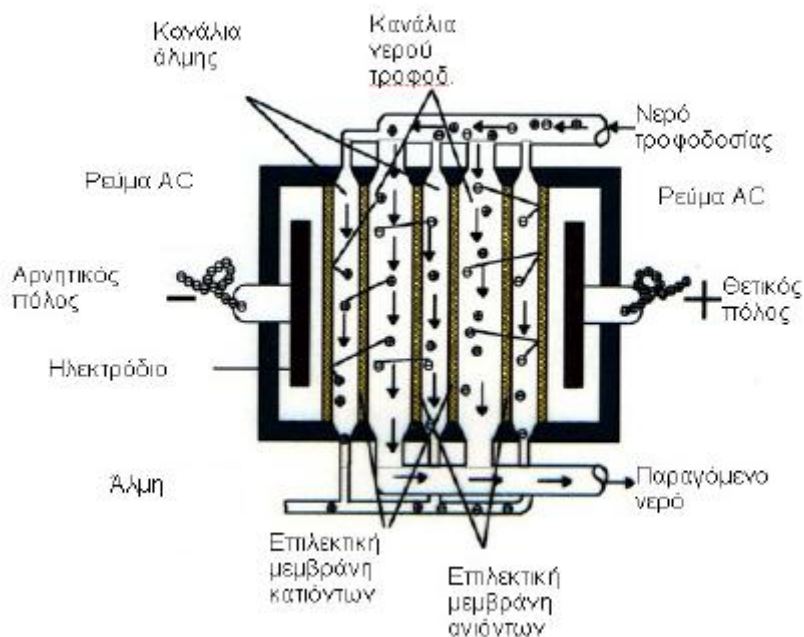
απόδοσή τους είναι αρκετά χαμηλή, περίπου 4 λίτρα καθαρό νερό τη μέρα ανά m^2 εδάφους. Για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιούνται φθηνά σχετικά υλικά για να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης, που είναι και το μόνο έξοδο ουσιαστικά, αφού τα λειτουργικά κόστη είναι από ελάχιστα ως μηδαμινά. Πρέπει βέβαια να αναφερθεί ότι το νερό που παράγεται δεν είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς, διότι δεν βράζει σε μεγάλη θερμοκρασία και άρα χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε μικρές εγκαταστάσεις ή για οικιακή χρήση.



Σχήμα 11: Σχηματική απεικόνιση της ηλιακής απόσταξης

Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis)

Η μέθοδος αυτή όπως δηλώνει και το όνομά της χρησιμοποιεί τον ηλεκτρισμό για να καθαρίσει το νερό. Το νερό τροφοδοσίας περνάει ανάμεσα από φορτισμένες μεμβράνες, θετικά και αρνητικά εναλλάξ. Έτσι, τα ιόντα που είναι διαλυμένα προσκολλώνται στις μεμβράνες, οι οποίες επιτρέπουν τη διέλευσή τους και μόνο, δημιουργώντας διαμερίσματα μικρότερης και μεγαλύτερης συγκέντρωσης, που μας δίνουν το προϊόν και την άλμη αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να απομακρύνει τα μη ιοντικά στερεά, αλλά και όσον αφορά τα ιοντικά, η απαιτούμενη ενέργεια αυξάνει ανάλογα με τη συγκέντρωση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε νερά χαμηλής συγκέντρωσης αλάτων, όπως τα υφάλμυρα. Για τον καθαρισμό και την καλύτερη λειτουργία των μεμβρανών, εφαρμόζεται αντιστροφή των πεδίων, αλλάζοντας θέση στα κανάλια του προϊόντος με αυτά της άλμης. Έτσι τα τμήματα των μεμβρανών που είχαν μαζέψει πολλά άλατα καθαρίζονται από τη ροή καθαρού νερού. Στο τέλος της διεργασίας γίνεται επεξεργασία του νερού για τη ρύθμιση της σκληρότητας και του pH.



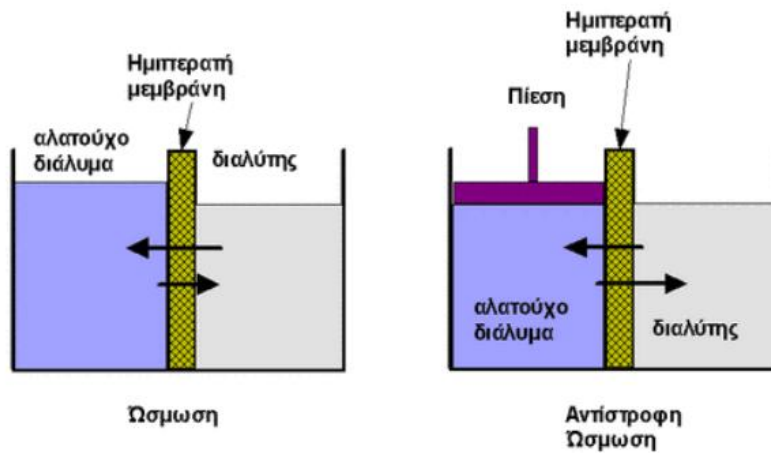
Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτροδιάλυσης

Αντίστροφη όσμωση (Reverse osmosis)

Από τις μεθόδους αφαλάτωσης, η αντίστροφη όσμωση κατέχει εξέχουσα θέση στις εφαρμογές καθώς η τεχνική της παρουσιάζει ιδιαίτερη ευελιξία. Επιτρέπει την κατασκευή διατάξεων και συστημάτων από την πιο μεγάλη εγκατάσταση για την ύδρευση μίας κοινότητας ή μιας πόλης, έως και τη κατασκευή της πιο μικρής συσκευής προορισμένης να καλύψει τις ανάγκες μιας οικογένειας.

Η μέθοδος αυτή, όπως φαίνεται και από το όνομα της, βασίζεται στο φαινόμενο της όσμωσης, κατά το οποίο όταν δύο διαλύματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις (πυκνότητες) χωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη (μεμβράνη που δεν επιτρέπει τη διέλευση κάποιων ουσιών μέσα από αυτή, όπως π.χ. άλατα) τότε το διάλυμα με τη μικρότερη συγκέντρωση θα περάσει μέσα από τη μεμβράνη προς το πυκνότερο διάλυμα, μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις τους. Το φαινόμενο αυτό απαντάται πολύ συχνά στη φύση και στους ζωντανούς οργανισμούς, ανάμεσά τους και ο άνθρωπος, καθώς πολλές κυτταρικές λειτουργίες βασίζονται σ' αυτό, για παράδειγμα το δέρμα, τα νεφρά, οι πνεύμονες και τα ίδια τα κύτταρα λειτουργούν λίγο πολύ ως μεμβράνες.

Αναλυτικότερα, η όσμωση είναι μία ειδική περίπτωση της διάχυσης στην οποία τα μόρια είναι νερό και η βύθωση συγκέντρωσης εμφανίζεται πέρα από μια ημιπερατή μεμβράνη. Η ημιπερατή μεμβράνη επιτρέπει τη μετάβαση του νερού, αλλά όχι των ιόντων (π.χ. Na^+ , Ca^{2+} , Cl^-) ή των μεγαλύτερων μορίων (π.χ. γλυκόζη, ουρία, βακτηρίδια). Η διάχυση και η όσμωση ευνοούνται θερμοδυναμικά και συνεχίζονται έως ότου επέλθει η ισορροπία. Η όσμωση μπορεί να επιβραδυνθεί, να σταματήσει, ή ακόμα και να αντιστραφεί εάν ικανοποιητική πίεση εφαρμοσθεί στη μεμβράνη από την πλευρά της που βρίσκεται το διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης, π.χ. θαλασσινό νερό. Το φαινόμενο της όσμωσης και η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση της όσμωσης και της αντίστροφης όσμωσης

1.4. Σύγκριση μεθόδων αφαλάτωσης νερού

Η επιλογή μεθόδου αφαλάτωσης βασίζεται σε συνδυασμό πολλών παραγόντων, οι πιο σημαντικοί από τους οποίους είναι:

- ❖ Η ποιότητα του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού
- ❖ Η απαιτούμενη ποσότητα του παραγόμενου νερού (πόσιμο, αρδευτικό ή βιομηχανικό)
- ❖ Το μέγεθος της μονάδας
- ❖ Η διαθεσιμότητα και το κόστος ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας
- ❖ Τα χαρακτηριστικά του χερσαίου και θαλάσσιου περιβάλλοντα χώρου
- ❖ Περιβαλλοντικοί περιορισμοί
- ❖ Προϋπολογισμός

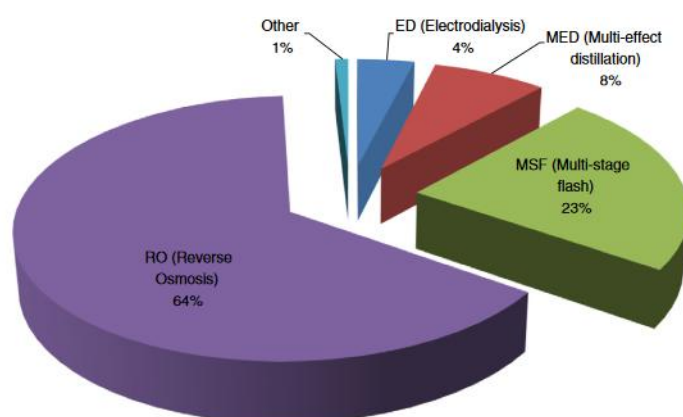
Έτσι έχουν επικρατήσει οι θερμικές μέθοδοι σε περιοχές όπου το κόστος ενέργειας είναι χαμηλό, καθώς και σε βιομηχανίες με περίσσεια θερμικών φορτίων και ιδανικότερα ατμού (όπως π.χ. τα δυλιστήρια και οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί). Επιπλέον, το νερό που παράγεται με τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άλατα σε σχέση με την αφαλάτωση νερού με μεμβράνες. Το γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί ευνοϊκό για τις ανάγκες ορισμένων βιομηχανιών, αποτελεί όμως μειονέκτημα για την παραγωγή πόσιμου νερού, καθώς είναι δυσκολότερη η προσθήκη της αναγκαίας σκληρότητας με παράλληλη ρύθμιση του pH.

Σε αντίθεση με τις θερμικές αφαλατώσεις που χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού και κατά κανόνα συμφέρουν οικονομικά σε δυναμικότητες άνω των $1000 \text{ m}^3 / \text{ημέρα}$, η αφαλάτωση με μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης έχει ένα τεράστιο πεδίο εφαρμογής. Μπορεί να εφαρμοστεί από την απλούστερη μορφή της για την κάλυψη οικιακών αναγκών με συστήματα δυναμικότητας από $1 \text{ m}^3 / \text{ημέρα}$ έως εργοστάσια παραγωγής νερού δυναμικότητας $300000 \text{ m}^3 / \text{ημέρα}$ για τις ανάγκες ύδρευσης πόλεων.

Συνοπτικά τα κυριότερα **πλεονεκτήματα** της τεχνολογίας αντίστροφης όσμωσης (RO) είναι τα παρακάτω[1]:

- ✓ Σχετικά απλή λειτουργία και συντήρηση
- ✓ Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους αφαλάτωσης
- ✓ Δυνατότητα ενσωμάτωσης συστημάτων ανάκτησης ενέργειας για την περαιτέρω μείωση του ενεργειακού κόστους.
- ✓ Απομακρύνει από το νερό εκτός από αλάτι και άλλα ανεπιθύμητα συστατικά όπως π.χ. βακτήρια.
- ✓ Χαμηλό κόστος εγκατάστασης - μεγάλο εύρος δυναμικότητας - αξιοπιστία σε όλο το εύρος μεγεθών.
- ✓ Μικρός όγκος εγκατάστασης - δυνατότητα τοποθέτησης σε εμπορευματοκιβώτια (containers) μονάδων έως και 5000 m³/ ημέρα.
- ✓ Δυνατότητα επέκτασης της μονάδας / εύκολη αύξηση παραγωγής (modularity).

Συμπερασματικά, η αντίστροφη όσμωση έχει πλέον επιβληθεί στην αφαλάτωση για την παραγωγή πόσιμου νερού είτε από θαλασσινό είτε από υφάλμυρο. Αξίζει να αναφερθεί ότι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 14, σε παγκόσμιο επίπεδο εκτιμάται ότι οι τεχνολογίες αφαλάτωσης MSF και RO αποτελούν το 87% όλων των εγκατεστημένων αφαλατώσεων.



Σχήμα 14: Ποσοστά συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας ανά τεχνολογία αφαλάτωσης, σε παγκόσμιο επίπεδο [17].

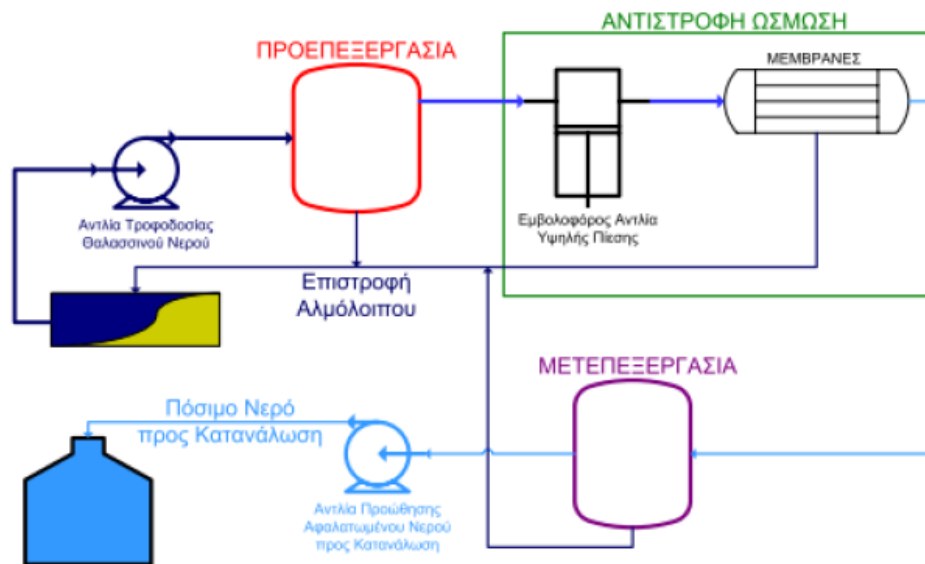
1.5.Ανάλυση σύγχρονων μονάδων αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση

Ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση αποτελείται από τα παρακάτω κυρίως τμήματα:

- Το αντλιοστάσιο παροχής θαλασσινού νερού και τους σωλήνες προσαγωγής - απόρριψης.
- Το σύστημα προκατεργασίας ή προεπεξεργασίας νερού.
- Το κυρίως σύστημα της αφαλάτωσης (μεμβράνες).

- Το σύστημα μετεπεξεργασίας του νερού (εφόσον προορίζεται για παραγωγή πόσιμου νερού) και τη δεξαμενή γλυκού νερού.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής της διαδικασίας για ένα απλό σύστημα χωρίς σύστημα ανάκτησης ενέργειας παρατίθεται στο Σχήμα 15:



Σχήμα 15: Τυπικό σύστημα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα βασικά στάδια επεξεργασίας που λαμβάνουν χώρα σε μία μονάδα αφαλάτωσης και παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.

1.5.1. Τροφοδοσία - άντληση θαλασσινού νερού

Οι εγκαταστάσεις αφαλάτωσης (ανεξαρτήτως μεγέθους) απαιτούν ένα σύστημα πρόσληψης νερού ικανού να παρέχει την απαιτούμενη παροχή ακατέργαστου νερού με σχετικά σταθερή ποιότητα και παράλληλα να έχει τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το είδος της πρόσληψης ακατέργαστου νερού αποτελεί το πρώτο στάδιο στην προεπεξεργασία επηρεάζοντας κρίσιμα τα χαρακτηριστικά του ακατέργαστου νερού καθώς και το σχεδιασμό και την απόδοση του συστήματος προεπεξεργασίας αλλά και του γενικότερου σχεδιασμού της διεργασίας της αφαλάτωσης.

Ο σχεδιασμός της πρόσληψης ακατέργαστου νερού εξειδικεύεται ανάλογα με το σημείο εγκατάστασης σε βαθμό πολύ μεγαλύτερο από οποιοδήποτε τμήμα της εγκατάστασης αφαλάτωσης. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα αναρρόφησης θα προστατεύει όχι μόνο τον κατάντη εξοπλισμό και θα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή, αλλά θα

αναβαθμίσει την απόδοση ολόκληρης της διεργασίας μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης του συστήματος προεπεξεργασίας και το λειτουργικό κόστος ολόκληρης της μονάδας αφαλάτωσης.

Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι αναρρόφησης του θαλασσινού νερού είναι γενικά οι εξής[2]:

- Με γεωτρήσεις
- Με πηγάδια
- Με κατασκευή υποθαλάσσιου αγωγού

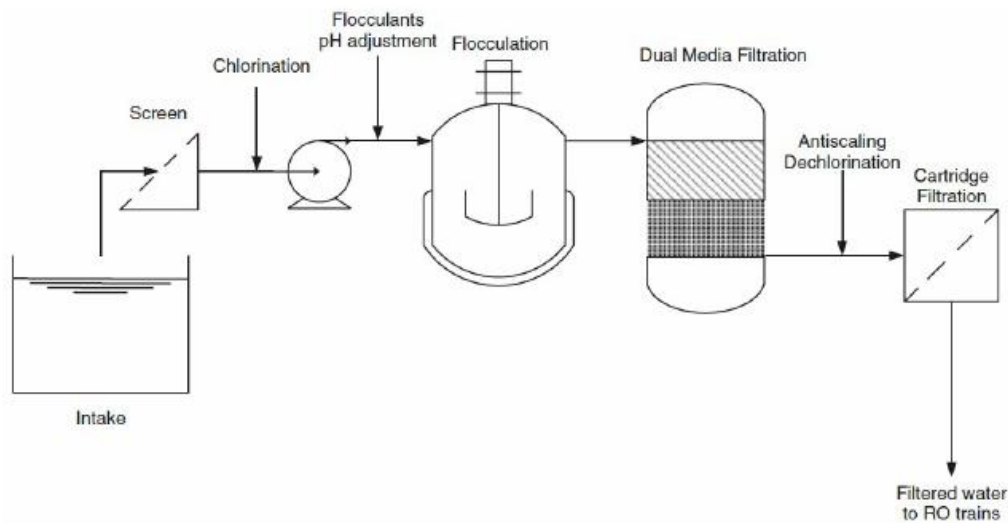
Η μέθοδος που προτιμάται είναι συνήθως οι παράκτιες γεωτρήσεις οι οποίες δίνουν καλύτερη ποιότητα νερού απ' ότι η ανοικτή θάλασσα. Επιπλέον οι παράκτιες γεωτρήσεις απαιτούν συνήθως μικρότερες επεμβάσεις και κατασκευαστικές δυσκολίες από ότι τα παράκτια πηγάδια. Η οριστική επιλογή γίνεται κατά περίπτωση για κάθε μονάδα, σύμφωνα με τις επικρατούσες τοπικές συνθήκες, έχοντας λάβει υπόψη και γενικότερους παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα της άλμης.

1.5.2. Προεπεξεργασία θαλασσινού νερού

Στα συστήματα αντίστροφης όσμωσης, για την καλύτερη λειτουργία των μεμβρανών, το πρώτο στάδιο επεξεργασίας του θαλασσινού νερού είναι πολύ σημαντικό. Στο στάδιο αυτό, οι μικροοργανισμοί πρέπει να καταστραφούν και τα αιωρούμενα στερεά να αφαιρεθούν ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη μικροοργανισμών και η εναπόθεση αλάτων στις μεμβράνες. Η προεπεξεργασία του θαλασσινού νερού συνήθως περιλαμβάνει:

- Φίλτρο εισόδου (με τοποθέτηση σχάρας στην αναρρόφηση για να μην εισέλθουν ψάρια, φύκια και πλαστικά).
- Προχλωρίωση του θαλασσινού νερού (με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου). Προσθήκη οξέος (συνήθως θειικό οξύ για τη ρύθμιση της οξύτητας και την αποφυγή εναπόθεσης αλάτων).
- Συσσωμάτωση των κολλοειδών/οργανικών ουσιών (με προσθήκη χλωριούχου σιδήρου και πολυηλεκτρολύτη).
- Φίλτρο άμμου (περιλαμβάνει άμμο, χαλίκια και ανθρακίτη για την κατακράτηση ακόμα μικρότερων στερεών αιωρούμεων σωματιδίων). Τα φίλτρα αυτά περιέχουν κατάλληλες σωληνώσεις και βαλβίδες ώστε να είναι δυνατή η έκπλυσή τους.
- Φίλτρα πολυπροπυλενίου (για κατακράτηση στερεών ουσιών με μέγεθος μέχρι και 1μm, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν φθορά στις μεμβράνες).
- Αποχλωρίωση (με θειούχο νάτριο ή φίλτρο ενεργού άνθρακα, γιατί οι μεμβράνες καταστρέφονται στην παρουσία ελεύθερου χλωρίου).

- Αποστείρωση με υπεριώση ακτινοβολία.



Σχήμα 16: Διάγραμμα ροής προεπεξεργασίας θαλασσινού νερού

1.5.3. Κυρίως επεξεργασία νερού (αντίστροφη όσμωση)

Μετά την ολοκλήρωση της προκατεργασίας, το νερό τροφοδότησης περνά από τις αντλίες υψηλής πίεσης, όπου αυξάνεται η πίεσή του στο βαθμό που απαιτείται για να περάσει μέσα από τις μεμβράνες και να απορρίψει τα άλατά του. Η πίεση μετά το στάδιο αυτό κυμαίνεται συνήθως στα 55 - 85 bar για το θαλασσινό νερό. Γενικά η τιμή της απαιτούμενης πίεσης καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε άλατα του νερού τροφοδότησης και τη διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης. Μόνο ένα μέρος όμως της αρχικής ποσότητας νερού περνά μέσω των μεμβρανών όπου και του αφαιρείται το μεγαλύτερο μέρος των διαλυμένων στερεών. Το υπόλοιπο νερό μαζί με τα άλατα που αφαιρέθηκαν εξέρχονται από τις μονάδες μεμβρανών της 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 επακόλουθο την εναπόθεση των υπερκορεσμένων αλάτων και αύξηση της οσμωτικής πίεσης κατά μήκος των μεμβρανών. Η ποσότητα του απορριπτόμενου νερού είναι μεταξύ 20% και 70% της ροής τροφοδοσίας και εξαρτάται από τη συγκέντρωση αλάτων στο νερό τροφοδοσίας

Μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος συσκευής μεμβράνης αντίστροφης όσμωσης είναι αυτός που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το προς καθαρισμό νερό εισέρχεται από την είσοδο (1) στη συσκευή και καταλαμβάνει το χώρο (3). Υπάρχουν δύο διέξοδοι: η (5) και η (6). Ο χώρος (3) βρίσκεται υπό πίεση και το νερό εξαναγκάζεται κατά ποσοστό 25% περίπου να διέλθει μέσα από τη μεμβράνη (2), οπότε και καθαρίζεται και εξέρχεται από την (6) ως προϊόν, είτε μόλις η πίεση ξεπεράσει το όριο της βαλβίδας (4) να βγει από την έξοδο (5), σε ποσοστό 75% περίπου,

παρασύροντας μαζί του και τις ακαθαρσίες στην επιφάνεια της μεμβράνης, όπου και απορρίπτεται.



Σχήμα 17: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας της συσκευής αντίστροφης όσμωσης

Μια μεμβράνη για να είναι κατάλληλη για τη διεργασία της αντίστροφης όσμωσης, θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά[1]:

- ✓ Μεγάλη απόρριψη αλάτων με υψηλή διαπερατότητα διαλύτη, εκτός των περιπτώσεων όπου είναι επιθυμητή μειωμένη απόρριψη αλάτων λόγω ιδιοτήτων της εφαρμογής ή μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας.
- ✓ Ικανότητα να σχηματίζει λεπτά διαχωριστικά στρώματα μεγάλης αντοχής (ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία πολλαπλών στρώσεων - τυλιγμάτων 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, εξαρτώμενη από την ποιότητα του νερού προς επεξεργασία και τον τρόπο χρήσης και καθαρισμού.
- ✓ Μεγάλη αντοχή στην προσβολή από χημικές ενώσεις και μικροοργανισμούς.
- ✓ Ικανότητα λειτουργίας και ιδιαίτερα διενέργειας χημικού καθαρισμού της σε μεγάλο εύρος pH.
- ✓ Χαμηλό κόστος.

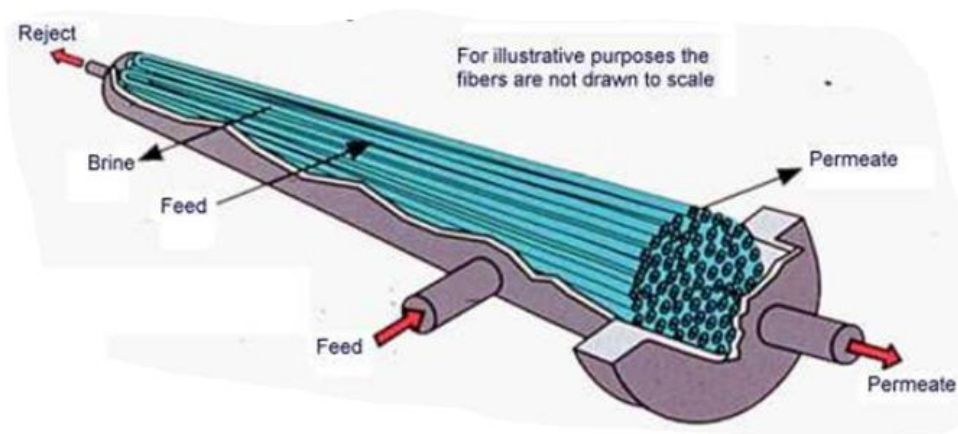
Επειδή η διαπερατότητα των μεμβρανών σε νερό είναι σχετικά μικρή, για να έχουμε μια ικανοποιητική παραγωγή νερού θα πρέπει η επιφάνεια των μεμβρανών να είναι μεγάλη. Ως μεμβράνη δεν θεωρείται μόνο το ενεργό στρώμα που εκτελεί τη διαδικασία της αφαλάτωσης αλλά και το υπόστρωμα, άρα ο αποδεκτά χρησιμοποιούμενος όρος είναι στοιχείο μεμβράνης (membrane module/ element). Από τη δεκαετία του 1960 μέχρι σήμερα έχουν δοκιμασθεί διάφορες διαμορφώσεις των στοιχείων μεμβρανών, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος λόγος επιφάνειας προς όγκο. Οι διαμορφώσεις αυτές είναι:

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

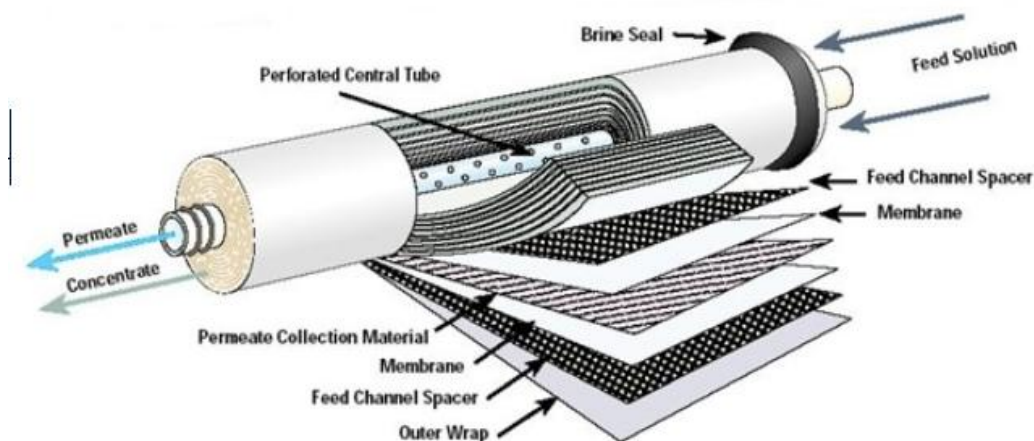
Από τις παραπάνω διαμορφώσεις μεμβρανών, τα δισκοειδή στοιχεία χρησιμοποιούνται συνήθως για εργαστηριακές δοκιμές. Τα σωληνοειδή στοιχεία είχαν σχετική εμπορική επιτυχία σε διαχωρισμούς κυρίως χημικών ενώσεων και στην επεξεργασία τροφίμων, επειδή το κόστος τους ήταν απαγορευτικό για την εφαρμογή τους στην επεξεργασία νερού. Στην επεξεργασία νερού χρησιμοποιούνται κυρίως σπειροειδούς διαμόρφωσης και λεπτών κοίλων ινών.

Συγκεκριμένα, οι πρώτες εμπορικές μεμβράνες αφαλάτωσης κατασκευάστηκαν υπό μορφή κοίλων ινών. Οι μεμβράνες αυτές θεωρούνται ως σωλήνες μεγάλου πάχους τοιχωμάτων και πολύ μικρού μεγέθους που δεν χρειάζονται καμία υποστήριξη. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης θεωρείται το μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας μεμβράνης ανά όγκο, επιτρέποντας τη χρήση υλικών για μεμβράνη ακόμη και με σχετικά μικρό συντελεστή διαπερατότητας σε νερό. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι η διαμόρφωσή τους επιτρέπει την εύκολη συσσώρευση των αιωρούμενων συστατικών του διαλύματος τροφοδοσίας με αποτέλεσμα να θεωρούνται ευάλωτες σε μόλυνση - έμφραξή τους.

Τα στοιχεία μεμβρανών ελικοειδούς περιέλιξης αποτελούν πλέον την κυρίαρχη εμπορική εφαρμογή για την αφαλάτωση νερού. Παρουσιάζουν υψηλή επιφάνεια ανά μονάδα όγκου και χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς μάζας και μικρότερη συγκέντρωση αλάτων και σωματιδίων λόγω της τύρβης που δημιουργείται στην επιφάνεια της μεμβράνης. Η διαμόρφωσή τους είναι αρκετά περίπλοκη, όχι όμως όσο των μεμβρανών κοίλων ινών. Για την επίτευξη των επιθυμητών παροχών αφαλατωμένου νερού εγκαθίστανται ένα ή συνήθως περισσότερα στοιχεία μεμβρανών σε σειρά εντός των δοχείων πίεσης σχηματίζοντας ένα σύστημα ή μία συστοιχία μεμβρανών αντίστροφης όσμωσης. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας των παραπάνω φτάνει έως και τα 84 bar για αφαλάτωση θαλασσινού νερού και περίπου 41 bar για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού.



Σχήμα 18: Στοιχείο μεμβράνης κοίλων ινών



Σχήμα 19: Στοιχείο μεμβράνης σπειροειδούς διαμόρφωσης

Αντλητικά συστήματα

Οι αντλίες αποτελούν εξαιρετικά σημαντικό τμήμα όλων μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης καθώς, όπως προαναφέρθηκε, παρέχουν την απαραίτητη πίεση για τη διακίνηση του νερού τροφοδοσίας εντός των αγωγών και τη διέλευσή του μέσα από τις μεμβράνες. Ειδικά στις μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού όπου η απαιτούμενη πίεση συνήθως κυμαίνεται από 60 - 70 bar, η επιλογή του κατάλληλου αντλητικού συστήματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς η απόδοσή και η αντοχή του σε ένα ιδιαίτερα διαβρωτικό υγρό όπως το θαλασσινό νερό επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την αξιοπιστία ολόκληρης της μονάδας. Η αντλία υψηλής πίεσης διαμορφώνει την τάξη μεγέθους της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος ενός συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Ωστόσο οι ηλεκτρικές απαιτήσεις του συστήματος δεν είναι μόνο αυτές. Θα πρέπει να γίνει υπολογισμός της άντλησης από τη θάλασσα, της τροφοδοσίας ακατέργαστου νερού στη μονάδα, των δοσομετρικών αντλιών για τα διάφορα χημικά που θα πρέπει να μπουν στην προεπεξεργασία, επεξεργασία και

μετεπεξεργασία. Επίσης θα πρέπει να γίνει υπολογισμός για την ενέργεια που απαιτείται στην διαδικασία της αντίστροφης πλύσης των πολυστρωματικών φίλτρων, του χημικού καθαρισμού (cip) των μεμβρανών καθώς και της έκπλυσης του συστήματος με καθαρό νερό. Η συχνότητα των παραπάνω διαδικασιών δεν είναι στάνταρ, εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος και τη σύσταση του νερού προς αφαλάτωση.

Οι **φυγοκεντρικές αντλίες** αποτελούν τον επικρατέστερο τύπο αντλητικού μηχανήματος σε εφαρμογές αφαλάτωσης. Η διάταξή τους είναι τέτοια ώστε το υγρό που εισέρχεται στο κέλυφος αξονικώς, να κινείται και να εξέρχεται κάθετα προς τον άξονα της αντλίας, δηλαδή ακτινικώς. Όπως μαρτυρά και το όνομά τους, η άυξηση της πίεσης του υγρού οφείλεται στη δράση της αναπτυσσόμενης φυγόκεντρης δύναμης. Στις μονάδες αφαλάτωσης είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη η εγκατάσταση φυγοκεντρικών αντλιών σε σειρά, δεδομένου ότι απαιτείται μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ αναρρόφησης και κατάθλιψης.

Στις περισσότερες εφαρμογές αφαλάτωσης επιλέγονται αντλίες μεταβλητών στροφών, των οποίων οι ασύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες διαθέτουν ρυθμιστές στροφών. Πρακτικά με τη χρήση των ρυθμιστών στροφών επιτυγχάνεται ακρίβεια στην ταχύτητα του κινητήρα με αποτέλεσμα να είναι εύκολο να προσαρμοστεί στις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας, επιτρέπει δηλαδή να μεταβάλλεται η ταχύτητα σύμφωνα με το αντίστοιχο φορτίο και έτσι μειώνεται η ενεργειακή κατανάλωση.

Συστήματα ανάκτησης ενέργειας (μονάδες αφαλάτωσης 1ης γενιάς, 2ης γενιάς και 3ης γενιάς) [1]

Η εφαρμογή ης ανάκτησης ενέργειας στοχεύει στην αξιοποίηση της υψηλής πίεσης της απορριπτόμενης άλμης (>90% της πίεσης του ρεύματος εισόδου), με σκοπό τη μείωση τη μείωση των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης, κυρίως μέσω υποβοήθησης της αντλίας υψηλής πίεσης.

Οι συνηθέστερες διατάξεις ανάκτησης ενέργειας είναι οι παρακάτω:

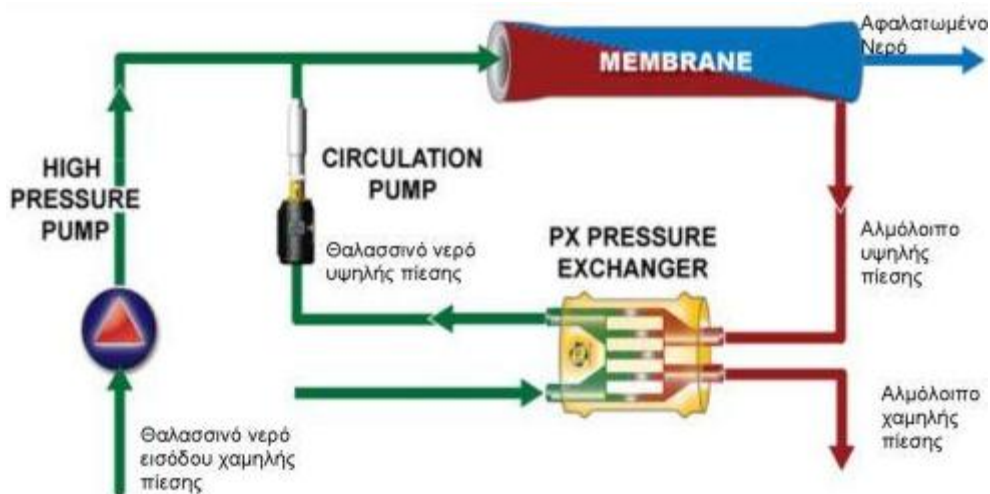
- Αντίστροφη υδραυλική αντλία (reverse running pump)
- Υδροστρόβιλος Πέλτον (Pelton wheel)
- Hydraulic Turbo Charger
- Εναλλάκτης Πίεσης (Pressure Exchanger)

Βάσει των παραπάνω έχουν εμπορικώς οριστεί γενιές αφαλάτωσης, όπου η 1η γενιά δεν συμπεριλαμβάνει καμία διάταξη ανάκτησης ενέργειας και είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα, η 2η γενιά περιλαμβάνει διατάξεις ανάκτησης ενέργειας μέτριας απόδοσης όπως οι υδροστρόβιλοι Pelton και Francis, ο Hydraulic Turbo Charger και τέλος η τρίτη γενιά περιλαμβάνει νεότερες διατάξεις με πολύ υψηλή απόδοση όπως ο εναλλάκτης πίεσης ή ο εναλλάκτης έργου (που είναι όμως λιγότερο διαδεδομένος).

Ο εναλλάκτης πίεσης αποτελεί την επικρατέστερη διάταξη ανάκτησης ενέργειας στις σύγχρονες μονάδες αφαλάτωσης. Με την εφαρμογή του είναι δυνατή η ανάκτηση της πίεσης της άλμης σε ποσοστά 95 - 98%, γεγονός που συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 30 - 40%.

Όπως φαίνεται και στο

Σχήμα 20, ο εναλλάκτης πίεσης περιλαμβάνει κυλινδρικό περιστροφέα με αυλούς, τοποθετημένο σε κυλινδρικό περίβλημα ανάμεσα σε δύο καπάκια, που έχει 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 περιοχή στεγάνωσης που απομονώνει και διαχωρίζει τον περιστροφέα σε χαμηλής και υψηλής πίεσης. Με την περιστροφή οι αυλοί του περιστροφέα εκτίθενται πρώτα στο χαμηλή πίεσης νερό τροφοδοσίας, που γεμίζει τις οπές και εκτοπίζει την άλμη. Με την κίνηση του περιστροφέα μετά την περιοχή στεγάνωσης, εκτίθεται στην άλμη υψηλής πίεσης, που γεμίζει τις οπές και εκτοπίζει το εισερχόμενο θαλασσινό νερό σε υψηλή πίεση.



Σχήμα 20: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής αφαλάτωσης θαλασσινού νερού - Απεικόνιση διάταξης εναλλάκτη πίεσης.

1.5.4. Μετεπεξεργασία νερού

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

- Απομάκρυνση αερίων, όπως το υδρόθειο.
- Ρύθμιση της οξύτητας (pH) και αύξηση της σκληρότητας (με προσθήκη ειδικά επεξεργασμένου ασβέστη και διοξειδίου του άνθρακα).
- Τελική χλωρίωση.

1.6.Κόστος αφαλάτωσης

Το κόστος των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Κόστος αρχικής επένδυσης
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Το κόστος της αρχικής επένδυσης περιλαμβάνει τα κόστη μελέτης, κατασκευής, προμηθειών, και δανειοδότησης. Βέβαια, από όλα αυτά τα προαναφερόμενα κόστη, μεγαλύτερο είναι εκείνο της κατασκευής της εγκατάστασης αφαλάτωσης.

Το κόστος κατασκευής της μονάδας αποτελεί ένα ποσοστό 50-80% του αρχικού κόστους επένδυσης και περιλαμβάνει τα κόστη προμήθειας, κατασκευής και εγκατάστασης των συστημάτων αφαλάτωσης και των συστημάτων επεξεργασίας του νερού, πριν και μετά την αφαλάτωση. Το υπόλοιπο ποσοστό, δηλαδή το 20 - 50% αναφέρεται στα διαδικαστικά κόστη μελέτης, σχεδιασμού και αδειοδότησης.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αναφέρεται στις ενεργειακές δαπάνες που απαιτεί η εγκατάσταση, το κόστος του εργατοτεχνικού προσωπικού, αναλώσιμα, ανταλλακτικά κλπ. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης αποτελείται από δύο παραμέτρους: το σταθερό και το μεταβλητό κόστος. Το σταθερό κόστος αναφέρεται σε όλα τα κόστη που δεν εξαρτώνται από την ποσότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού και είναι: τα εργατικά, η συντήρηση του εξοπλισμού, ο τεχνικός έλεγχος, τα κόστη για την περιβαλλοντική προστασία από τη μονάδα αφαλάτωσης, και συνήθως αποτελεί το 15 - 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας και συντήρησης. Το μεταβλητό κόστος εξαρτάται από την παραγόμενη ποσότητα νερού και αναφέρεται στην ενέργεια που καταναλώνεται, την απαιτούμενη χημική επεξεργασία, την αντικατάσταση ανταλλακτικών που φθείρονται, την απομάκρυνση της άλμης κλπ. και αποτελεί το υπόλοιπο 50 - 85 % του κόστους συντήρησης και λειτουργίας. Συχνά το ενεργειακό κόστος αγγίζει το 60% του μεταβλητού κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Είναι προφανές ότι για την οικονομική αξιολόγηση μιας μονάδας αφαλάτωσης υπολογίζεται το άθροισμα των κοστών που αναφέρθηκαν παραπάνω σε €/m³, δηλαδή ως προς την ποσότητα του παραγόμενου νερού.

Μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει το κόστους παραγωγής του αφαλατωμένου νερού είναι το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης (οικονομίας κλίμακας). Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με δυναμικότητα 5000 m³/ημέρα έχει κόστος παραγόμενου νερού κατά μέσο όρο 1,5 €/m³ ενώ όταν η δυναμικότητα αυξηθεί σε 20000 m³/ημέρα το κόστος μειώνεται σε 0,75 €/m³ κατά μέσο όρο[2].

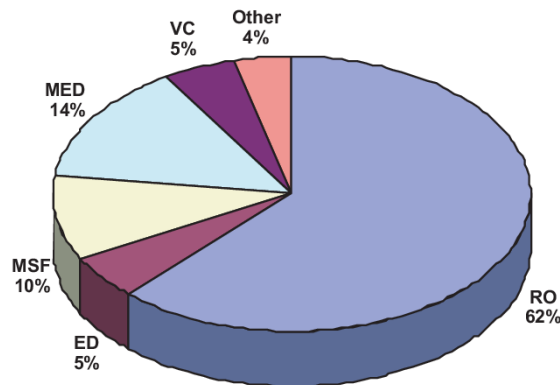
Το κόστος του παραγόμενου νερού με ΑΠΕ (€/m³) εξαρτάται βασικά από:

- ✓ την αλατότητα (υφάλμυρο η θαλασσινό)
- ✓ την τεχνολογία και το δυναμικό ΑΠΕ της περιοχής

- ✓ τη δυναμικότητα της μονάδας
- ✓ τοπικά χαρακτηριστικά (π.χ. κόστος γης, εργατικό κόστος, υδροληψία)

1.7. Αφαλάτωση με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών αφαλάτωσης και ΑΠΕ είναι τεχνικά εφικτός και αποτελεί λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη η διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως σε απομακρυσμένα χωριά και νησιά. Η μέθοδος της αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ έχει πλέον αρκετές εφαρμογές παγκοσμίως. Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 21, λόγω της χαμηλής της κατανάλωσης ενέργειας, η αντίστροφη όσμωση αποτελεί την επικρατέστερη τεχνολογία αφαλάτωσης που εφαρμόζεται συνδυαστικά με ΑΠΕ, σε ποσοστό που αγγίζει το 62% των εφαρμογών παγκοσμίως.

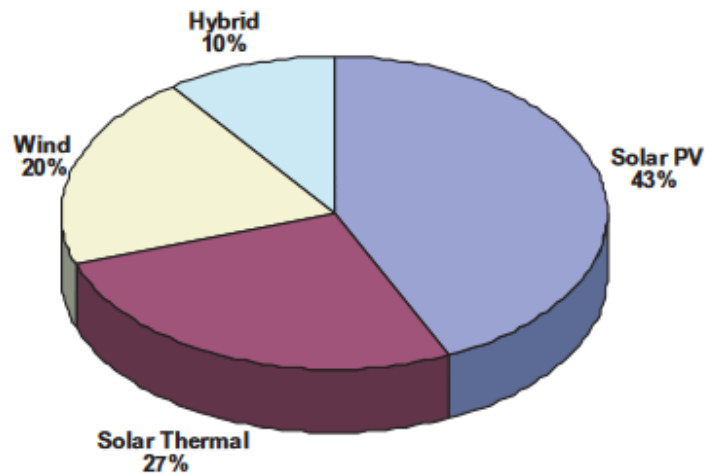


Σχήμα 21: Τεχνολογίες αφαλάτωσης σε συνδυασμό με ΑΠΕ [5]

Ο συνδυασμός αφαλάτωσης με ΑΠΕ θα μπορούσε να αποτελέσει μία λύση στο πρόβλημα υδροδότησης των νησιών του Αιγαίου, δεδομένου ότι τα ηλεκτρικά συστήματά τους δεν είναι συνδεδεμένα στο ηπειρωτικό σύστημα και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται κυρίως από τοπικούς συμβατικούς σταθμούς μικρής δυναμικότητας αφενός, εξαιρετικά ρυπογόνους αφετέρου. Η λύση όμως αυτή δεν αποτελεί πανάκεια. Απαιτείται μελέτη της κάθε περίπτωσης αναλυτικά καθώς πρέπει να διερευνηθεί το δυναμικό της κάθε μορφής ΑΠΕ στην περιοχή ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη και να διαστασιολογηθεί σωστά. Πρέπει να γίνει τεχνοοικονομική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η διαθεσιμότητα της κάθε τεχνολογίας και η εμπορική της ωριμότητα, η δυνατότητα εφαρμογής της στην κάθε περίπτωση, οι υπάρχουσες υποδομές καθώς και αυτές που απαιτείται να γίνουν, το κόστος της επένδυσης και της εγκατάστασης.

Η πιο δημοφιλής τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που εφαρμόζεται συνδυαστικά με αφαλάτωση αντίστροφης όσμωσης είναι αυτή των φωτοβολταϊκών πάνελ (Σχήμα 22). Τα φωτοβολταϊκά ωστόσο είναι κατάλληλα για μικρές εφαρμογές αφαλάτωσης και αποδίδουν μόνο σε περιοχές με αυξημένη ηλιοφάνεια. Για εφαρμογές αφαλάτωσης μεγάλης κλίμακας, η αιολική

ενέργεια είναι πιο συμφέρουσα από οικονομικής άποψης σε σύγκριση με τα φωτοβολταικά, ενώ απαιτείται και πολύ μικρότερη έκταση για την εγκατάσταση του εξοπλισμού.



Σχήμα 22: Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αφαλάτωση RO[5]

Η κατηγοριοποίηση των Α/Γ με βάση την ονομαστική τους ισχύ μπορεί να γίνει ως εξής[2]:

- ✓ Α/Γ **πολύ μικρού** μεγέθους: ονομαστική ισχύς <10 kW
- ✓ Α/Γ **μικρού** μεγέθους: ονομαστική ισχύς <100 kW
- ✓ Α/Γ **μεσαίου** μεγέθους: ονομαστική ισχύς <0.5 MW
- ✓ Α/Γ **μεγάλου** μεγέθους: ονομαστική ισχύς >0.5MW

Η τεχνολογία των Α/Γ είναι αρκετά ώριμη και συνεπώς αξιόπιστη και ανταγωνιστική οικονομικά. Οι νέες στρατηγικές ελέγχου και οι νέοι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας βελτιώνουν τις δυνατότητες παραγωγής των Α/Γ. Με δεδομένο ότι η αντίστροφη όσμωση έχει την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από όλες τις διαδικασίες αφαλάτωσης, ο συνδυασμός με την αιολική ενέργεια σε παράκτιες περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού καθίσταται ιδιαίτερα δελεαστικός.

1.8.Σύστημα αφαλάτωσης με χρήση Α/Γ

Βάσει των παραπάνω, η Α/Γ αποτελεί την ιδανικότερη τεχνολογία ΑΠΕ για πρακτική εφαρμογή συνδυαστικά με μονάδα αφαλάτωσης RO, σ ένα νησί του Αιγαίου που χαρακτηρίζεται από υψηλό αιολικό δυναμικό. Μέχρι σήμερα συναντώνται δύο τρόποι συνδυασμού της αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση και Α/Γ:

- Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας
- Πλήρως αυτόνομα συστήματα

1.8.1. Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Στα συστήματα αυτά η μονάδα αφαλάτωσης καθώς και η μονάδα ΑΠΕ συνδέονται στο δίκτυο. Βασική σχεδιαστική λογική των συστημάτων αφαλάτωσης σε σύνδεση με ΑΠΕ είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης να καλύπτεται από αντίστοιχη παραγωγή μονάδων ΑΠΕ, ώστε τελικά να επιτυγχάνεται ισοζύγιο παραγόμενης - καταναλισκόμενης ενέργειας, άρα ενεργειακή αυτονομία των έργων και βέλτιστη από περιβαλλοντικής άποψης αντιμετώπισης του προβλήματος.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα των μονάδων αφαλάτωσης, καθώς και η βέλτιστη εκμετάλλευση του ανανεώσιμου δυναμικού, οι μονάδες αφαλάτωσης συνδέονται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού καταναλώνοντας την απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία τους. Παράλληλα, οι μονάδες ΑΠΕ λειτουργούν ως σχεδόν ανεξάρτητες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διοχετεύοντας την παραγωγή τους απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο του νησιού. Ωστόσο, η έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες ΑΠΕ στο δίκτυο δεν θα πρέπει να γίνεται εντελώς ανεξάρτητα από την κατανάλωση ενέργειας από την αφαλάτωση, αλλά θα πρέπει να προγραμματίζεται βάσει αλγορίθμου ο οποίος θα στοχεύει μεν στην μεγιστοποίηση της διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο, επιτυγχάνοντας δε σε κάθε περίπτωση θετικό ενεργειακό ισοζύγιο (Παραγωγή ΑΠΕ / Κατανάλωση ενέργειας Μ.Α.) .

Ο συνδυασμός των δύο συστημάτων μπορεί να πραγματοποιείται μέσω κεντρικού συστήματος τηλεελέγχου - τηλεχειρισμού, το οποίο συντονίζει τη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων του έργου.

1.8.2. Πλήρως αυτόνομα συστήματα

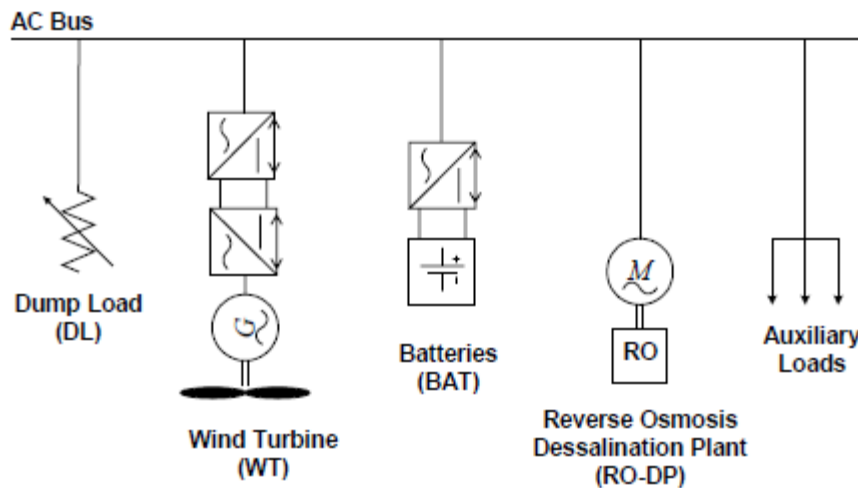
Τα αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από Α/Γ παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή η εφαρμογή τους δεν εξαρτάται από την ύπαρξη δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ανάγκες πόσιμου νερού σε απομονωμένες περιοχές, όπως απομακρυσμένα χωριά, ενώ ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή τους και στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα του Αιγαίου, δεδομένου του υψηλού διαθέσιμου αιολικού δυναμικού τους και των κορεσμένων στην πλειονότητα ηλεκτρικών συστημάτων τους.

Βασικές συνιστώσες ενός τέτοιου αυτόνομου συστήματος είναι:

- η Α/Γ (μονάδα ΑΠΕ γενικά)
- η μονάδα αφαλάτωσης RO
- το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες)

Επιπλέον για τη λειτουργία του συστήματος απαιτούνται μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ και ΣΡ/ΕΡ για τη σύζευξη της Α.Γ με την μονάδα RO, καθώς και μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ (φορτιστής) για τη διακίνηση της ενέργειας από και προς τις μπαταρίες. Ένα τυπικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 23. Προφανώς η συγκεκριμένη διάταξη είναι ενδεικτική,

όχι μοναδική. Το φορτίο απόρριψης ενέργειας που απεικονίζεται στον εν λόγω σχήμα, δεν απαιτείται στην πραγματική διάταξη, αφού οι σύγχρονες Α/Γ διαθέτουν δυνατότητα αυτορύθμισης, δηλαδή άμεσης προσαρμογής της ισχύος εξόδου στην εκάστοτε ζήτηση. Το όλο σύστημα είναι εφοδιασμένο με κεντρικό σύστημα ελέγχου, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και τη διαχείριση της λειτουργίας του.



Σχήμα 23: Διάταξη που περιλαμβάνει τις βασικές συνιστώσες αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης με Α/Γ[3].

Σημαντική επιλογή για το στήσιμο μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι η διαστασιολόγηση των τμημάτων της μονάδας ώστε να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη παραγωγή νερού με το ελάχιστο δυνατό κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

Μέχρι στιγμής σε πρακτικό επίπεδο συναντώνται μικρής έως μεσαίας κλίμακας (μέχρι 1000 m³ νερού / ημέρα) αυτόνομα συστήματα σαν αυτό που περιγράφεται παραπάνω. Αυτό συμβαίνει γιατί ακόμα υπάρχει έλλειψη βιομηχανικής εμπειρίας και τεχνογνωσία στο συγκεκριμένο πεδίο, δεδομένου ότι η λειτουργία τέτοιου είδους συστημάτων μεγάλης κλίμακας παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις, οι βασικότερες εκ των οποίων αναφέρονται παρακάτω:

Αναπόφευκτη υπερδιαστασιολόγηση συστημάτων

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων για τα ελληνικά νησιά, οι μονάδες αφαλάτωσης θα πρέπει να καλύπτουν το σύνολο των αναγκών των νησιών σε νερό και όχι απλά να συμπληρώνουν το ισοζύγιό τους με περιορισμένες ποσότητες.

Ως εκ τούτου, το σύστημα μονάδας RO και μονάδας ΑΠΕ θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να καλύπτει τη ζήτηση νερού σε ετήσια βάση και σε επίπεδο ημερήσιας αιχμής, αλλά κυρίως να μπορεί να ανταποκρίνεται άμεσα και στις ημερήσιες διακυμάνσεις της ζήτησης. Βάσει των ανωτέρω, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη κάλυψη της ζήτησης νερού απαιτείται αναπόφευκτα υπερδιαστασιολόγηση όλων των υποσυστημάτων του έργου (μονάδες

αφαλάτωσης, μονάδες ΑΠΕ, μπαταρίες και δεξαμενές λειτουργίας - τροφοδότησης) ώστε να εξομαλύνεται η ζήτηση, με άμεση και σημαντική επιβάρυνση του κόστους παραγωγής νερού.

Μεταβλητότητα της παραγωγής ΑΠΕ

Η παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα λόγω της στοχαστικότητας των φαινομένων που εκμεταλλεύεται (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) με αποτέλεσμα να εισάγονται τεχνικοί περιορισμοί (έντονες διαταραχές τάσης και συχνότητας, απότομες διακυμάνσεις παραγωγής) που δυσχεραίνουν την αυτόνομη λειτουργία τέτοιων συστημάτων.

Η πλειοψηφία των εγκατεστημένων σήμερα μονάδων αφαλάτωσης RO έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε σταθερή ισχύ ή σε μικρό εύρος ισχύος. Αυτός ο λειτουργικός περιορισμός υφίσταται για δύο κυρίως λόγους.

1) Σε κάθε τυχόν αυξομείωση της ηλεκτρικής ισχύος, θα πρέπει αρχικά να αναπροσαρμόζονται οι παροχές του νερού. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί να γίνεται και αντίστοιχη ρύθμιση της απόρριψης για να διατηρείται το ποσοστό ανάκτησης καθαρού νερού. Σε περίπτωση που θα πρέπει να μειωθεί πάρα πολύ η παραγωγή λόγω μειωμένης ισχύος θα πρέπει να «βγουν» εκτός και κάποιες μεμβρανοθήκες από το σύστημα και οι αντίστοιχες αντλίες. Σε μια τέτοια περίπτωση το σύστημα ξεφεύγει σε επίπεδο αυτοματισμού και αλγορίθμου και θα πρέπει η μονάδα να τίθεται σε λειτουργία standby έχοντας αποθέματα ενέργειας στις μπαταρίες ώστε να γίνει μια έκπλυση με καθαρό νερό.

2) Ο εναλλάκτης πίεσης που χρησιμοποιείται ως διάταξης ανάκτησης ενέργειας στις σύγχρονες μονάδες αφαλάτωσης 3ης γενιάς, έχει περιορισμένα όρια λειτουργίας ως προς την παροχή του νερού. Αυτό σημαίνει ότι αν απαιτηθεί λειτουργία εκτός των ορίων της διάταξης η μονάδα αναγκαστικά θα πρέπει να σταματήσει. Σ' αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει η δυνατότητα να βγουν εκτός κάποιες μεμβράνες.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ένα τέτοιο αυτόνομο σύστημα απαιτεί την παρουσία ενός σωστά διαστασιοποιημένου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (επί το πλείστον συστοιχίες μπαταριών) ώστε να μπορεί να απορροφά τις αυξομειώσεις ισχύος που εισάγει η αβεβαιότητα της αιολικής παραγωγής και συνεπώς να εξασφαλίζει τη λειτουργία της μονάδας RO μέσα στα αποδεκτά όρια ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε, είναι αναπόφευκτη η υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης, με αποτέλεσμα την άμεση επίπτωση στο κόστος παραγωγής νερού.

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα τελευταία χρόνια μελετώνται σε ερευνητικό επίπεδο αλλά έχουν αρχίσει να κυκλοφορούν και εμπορικά μοντέλα μονάδων αφαλάτωσης με δυνατότητα λειτουργίας σε μεταβλητή ισχύ. Αυτό επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο με την παράλληλη λειτουργία πολλών ανεξάρτητων υπομονάδων (modules) RO μικρού εύρους ισχύος η κάθε μία, που όμως σε συνδυαστική λειτουργία επιτυγχάνουν μεγάλο εύρος ισχύος λειτουργίας. Έτσι η προσαρμογή στα διάφορα επίπεδα ισχύος γίνεται με την έναυση ή σβέση αντίστοιχα του κατάλληλου αριθμού υπομονάδων. Η ευελιξία αυτών των μονάδων τις καθιστά ως την ιδανικότερη επιλογή για συνδυαστική λειτουργία αφαλάτωσης με ΑΠΕ και θα είχε

ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη λειτουργίας μία τέτοιας μονάδας σε συνδυασμό με αιολική ενέργεια στα πλαίσια ενός αυτόνομου συστήματος με εφαρμογή στα νησιά του Αιγαίου. Ακόμη και σ' αυτήν την περίπτωση όμως, η παρουσία αποθηκευτικού συστήματος είναι απαραίτητη, καθώς δεν υπάρχει εμπειρία ως προς την ικανότητα απόκρισης μίας τέτοιας μονάδας αφαλάτωσης στις ταχύτατες μεταβολές του ανέμου σε χρόνο μικρότερο του δεκαλέπτου της ώρας ούτε της καταπόνησης που μπορεί να υφίσταται ο μηχανολογικός εξοπλισμός της κατά την προσπάθεια να προσαρμοστεί στα διάφορα επίπεδα ισχύος.

Βάσει των παραπάνω και ειδικά για την περίπτωση μονάδας RO μεταβλητής ισχύος, απαιτείται ο σχεδιασμός ενός πολύπλοκου αλγορίθμου ελέγχου που θα συντονίζει τη λειτουργία των τριών βασικών συνιστώσεων του αυτόνομου συστήματος, την μονάδα RO, την Α/Γ και το σύστημα αποθήκευσης. Αυτό αποτελεί και ένα από τα αντικείμενα διερεύνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Κεφάλαιο 2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1. Μοντελοποίηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης

Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα διερευνήθηκαν στο 1ο κεφάλαιο σχετικά με την λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης εξειδικεύοντας στην τεχνολογία της αντίστροφης όσμωσης, και τη λειτουργία των αυτόνομων συστημάτων, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης, μεγάλης κλίμακας, με δυνατότητα εφαρμογής σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα με σκοπό την εξολοκλήρου κάλυψη των υδρευτικών αναγκών του νησιού. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από μία μονάδα αφαλάτωσης RO, μία Α/Γ, συστοιχίες μπαταριών και δεξαμενή πόσιμου νερού. Ενδεικτική απεικόνιση του ηλεκτρικού συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 23, στην υποενότητα 1.8.2..

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος περιλαμβάνει κατά σειρά τα εξής στάδια:

- Κατάστρωση του αλγορίθμου ελέγχου του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης
- Παραμετρική διερεύνηση ως προς τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου
- Εκτέλεση ετήσιων προσομοιώσεων προς δύο κατευθύνσεις διερεύνησης:
 - Στρατηγική διαχείρισης της λειτουργίας του συστήματος
 - Βέλτιστη διαστασιολόγηση των συνιστωσών του συστήματος

Η κατάστρωση του αλγορίθμου ελέγχου του συστήματος αποτελεί ένα από βασικότερα αντικείμενα προς διερεύνηση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο. Ο αλγόριθμος ελέγχου αποσκοπεί στην ουσία στον συντονισμό των επιμέρους συνιστωσών, δηλαδή στον προγραμματισμό ένταξης και αποσύνδεσής τους και τη ρύθμιση της ισχύος τους, ώστε να καλύπτεται σε ετήσια βάση η απαιτούμενη ζήτηση νερού, υπό χαμηλό κόστος και με καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Στην ουσία δομείται ο αλγόριθμος ελέγχου του συστήματος που είναι υπερκείμενος των ελεγκτών των επιμέρους μονάδων, με τους οποίους επικοινωνεί.

Εξετάζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου σε κλίμακα λίγων λεπτών της ώρας, σε κατάσταση όμως μόνιμης λειτουργίας του συστήματος, δεν ενδιαφέρει δηλαδή η δυναμική συμπεριφορά σε κλίμακες χρόνου sec ή μικρότερες, ούτε και τα μεταβατικά φαινόμενα.

Στη βιβλιογραφία [3][6][10][11][12] μέχρι στιγμής έχουν γίνει προσπάθειες διαμόρφωσης διάφορων στρατηγικών ελέγχου, αφορούν όμως κυρίως εφαρμογές μικρής κλίμακας. Μπορούν να εφαρμοστούν κατά κύριο λόγο απλές στρατηγικές ελέγχου που βασίζονται στην απλή λογική διαχείρισης, επικεντρώνοντας στην ικανοποίηση του ενεργειακού ισοζυγίου μεταξύ μονάδας RO, Α/Γ και μπαταρίας και στο ισοζύγιο ποσοτήτων νερού. Ωστόσο οι στρατηγικές ελέγχου απλής λογικής παρουσιάζουν δυσκολία στην ενσωμάτωση σύνθετων λειτουργικών περιορισμών

του συστήματος, αυξάνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων και καταστάσεων αδυναμίας επίλυσης του αλγορίθμου, καθώς δεν μπορούν να προβλεφθούν όλες οι πιθανές καταστάσεις λειτουργίας. Ειδικότερα μάλιστα όσον αφορά σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, το τελευταίο μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων με αποτέλεσμα η επένδυση να μην καθίσταται οικονομικά βιώσιμη.

Ως εναλλακτική επιλογή κατάστροφης του αλγορίθμου ελέγχου, στα πλαίσια αντιμετώπισης των παραπάνω δυσμενών καταστάσεων, αποτελεί η διατύπωσή του ως πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού. Στην ενότητα που ακολουθεί γίνεται μία σύντομη αναφορά στις βασικές αρχές του μαθηματικού προγραμματισμού.

2.2. Στοιχεία Μαθηματικού Προγραμματισμού

2.2.1. Γενικά στοιχεία

Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η καλύτερη ή η άριστη λύση σ' 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. Ένα αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης σαν αυτό που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για παράδειγμα, πρέπει να διαθέτει ένα σύστημα ελέγχου το οποίο να αποφασίζει κάθε στιγμή θα είναι η βέλτιστη λειτουργία των συνιστωσών του, ώστε να παράγεται η απαιτούμενη ποσότητα νερού προς ικανοποίηση της ζήτησης, υπό το ελάχιστο κόστος παραγωγής νερού. Τα μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού παρέχουν το κατάλληλο πλαίσιο ώστε οι βέλτιστες αποφάσεις να λαμβάνονται 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 προβλήματος.
- Διερεύνηση των διαφορετικών λύσεων του προβλήματος.
- Εύρεση της πιο κατάλληλης ή αν είναι δυνατό της άριστης λύσης.

Το πρόβλημα του Μαθηματικού Προγραμματισμού μοντελοποιείται και εκφράζεται ως εξής:

Αναζητούνται οι τιμές των μεταβλητών x_1, \dots, x_n (μεταβλητές απόφασης) ώστε να ικανοποιούνται οι m συνθήκες (ανισότητες ή ισότητες) της μορφής

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

που καλούνται γενικά περιορισμοί (constraints) και επιπλέον να μεγιστοποιείται ή να ελαχιστοποιείται η συνάρτηση:

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

Με άλλα λόγια, το πρόβλημα του Μαθηματικού Προγραμματισμού είναι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Το είδος των συναρτήσεων των περιορισμών, όσο και της αντικειμενικής συνάρτησης χαρακτηρίζουν το πρόβλημα του μαθηματικού προγραμματισμού ως γραμμικό, ακέραιο, στοχαστικό, δυναμικό κ.λ.π.

2.2.2. Μικτός ακέραιος προγραμματισμός με τετραγωνικό κόστος

Ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός αποτελεί κατηγορία του μαθηματικού προγραμματισμού στον οποίο όλες οι μεταβλητές είναι είτε ακέραιες είτε δυαδικές. Οι δυαδικές μεταβλητές αναπαριστούν συνήθως κάποια απόφαση, όπως για παράδειγμα τη λειτουργική κατάσταση μίας μονάδας αφαλάτωσης και παίρνουν τιμές 0 ή 1. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να περιλαμβάνει όρους είτε γραμμικής είτε τετραγωνικής μορφής, ανάλογα με το κριτήριο προς βελτιστοποίηση.

Στις ενότητες που ακολουθούν μοντελοποιείται η λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης ως πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με τετραγωνικό κόστος. Η διαχείριση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης επιλέγεται να δομηθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, όχι μόνο για επιτευχθεί ο βέλτιστος συντονισμός μεταξύ των συνιστωσών του, αλλά γιατί ο σχεδιασμός του ελέγχου ενός τέτοιου συστήματος στην πράξη είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος ώστε να δομηθεί με απλή λογική ανθρώπινου μυαλού. Επιπλέον αυτή η διατύπωση προσφέρει ευελιξία στην παραμετροποίηση και συνεπώς στην προσομοίωση διαφορετικών πολιτικών διαχείρισης. Ο χρονικός ορίζοντας βελτιστοποίησης αποτελεί παράμετρο του αλγορίθμου (από ένα ως μερικά 24ωρα), ενώ ως χρονικό βήμα επιλέγεται το 10λεπτο της ώρας. Εντός του 10λέπτου δεν εξετάζονται δυναμικά φαινόμενα, δηλαδή θεωρείται σταθερή συμπεριφορά και λειτουργία του συστήματος.

2.3. Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται η μαθηματική διατύπωση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στόχος δεν είναι να παρουσιαστούν αναλυτικά μία προς μία οι μαθηματικές εξισώσεις, αλλά οι πιο βασικές, για να γίνει πιο κατανοητή η ποιοτική λειτουργία του συστήματος.

Για εποπτικούς λόγους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι συμβολισμοί και η σημασία των δεικτών, των σταθερών και των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική περιγραφή του προβλήματος.

Δείκτες

t : Χρονικό βήμα 10 min της ώρας

Σταθερές

- NT : Χρονικός ορίζοντας βελτιστοποίησης (αριθμός 10 min)
- $F_d(t)$: Ζήτηση νερού το τρέχον δεκάλεπτο t ($m^3/10 min$)
- $P_{WT}(t)$: Μέγιστη δυνατή αιολική παραγωγή το τρέχον δεκάλεπτο t βάσει ανέμου (kW)
- $st_{flush}(t)$: Παίρνει την τιμή 1 όταν η μονάδα RO είναι σε κατάσταση πλύσης, αλλιώς είναι 0
- F_{p_max} : Μέγιστη παραγωγή νερού από μονάδα RO ($m^3/10 min$)
- F_{p_min} : Ελάχιστη παραγωγή νερού από μονάδα RO ($m^3/10 min$)
- P_{dp_max} : Μέγιστη ισχύς κατανάλωσης από μονάδα RO (kW)
- P_{dp_min} : Ελάχιστη ισχύς κατανάλωσης από μονάδα RO (kW)
- E_{bat_max} : Ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)
- P_{bat_max} : Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kWh)
- A_s : Επιφάνεια δεξαμενής νερού (m^2)
- P_{flush} : Ισχύς ανάστροφης πλύσης των φίλτρων της μονάδας RO (kW)
- h_{max} : Μέγιστη δυνατή στάθμη νερού στη δεξαμενή (m)
- Dt : Χρονικό διάστημα βήματος σε ώρες (h)

Θετικές Μεταβλητές

- $F_p(t)$: Παραγωγή νερού από τη μονάδα RO το τρέχον δεκάλεπτο t ($m^3/10 min$)
- $P_{dp}(t)$: Κατανάλωση ισχύος της μονάδας RO το τρέχον δεκάλεπτο t (kW)
- $P_{out_WT}(t)$: Παραγωγή της Α/Γ το τρέχον δεκάλεπτο t (kW)
- $E_{bat}(t)$: Χωρητικότητα της μπαταρίας το τρέχον δεκάλεπτο t (kWh)
- $h(t)$: Ύψος δεξαμενής το τρέχον δεκάλεπτο (m)
- $soc(t)$: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας (state of charge, ≤ 1)
- $sos(t)$: Κατάσταση δεξαμενής (state of storage, ≤ 1)

Ελεύθερες Μεταβλητές

$F_s(t)$: Ποσότητα νερού που παρέχει η δεξαμενή το τρέχον δεκάλεπτο t ($m^3/10 \text{ min}$)

$P_{bat}(t)$: Ισχύς της μπαταρίας το τρέχον δεκάλεπτο t (kW)

Δυαδικές Μεταβλητές

$st(t)$: Λαμβάνει την τιμή 1 αν το τρέχον δεκάλεπτο t η μονάδα RO είναι σε λειτουργία

2.3.1. 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 τριών βασικών συνιστωσών του συστήματος, δηλαδή της μονάδας RO, της Α/Γ και της μπαταρίας. Οι διάφορες πολιτικές διαχείρισης και οι επιθυμητές «συμπεριφορές» του συστήματος μοντελοποιούνται μαθηματικά και ενσωματώνονται ως κόστη στην αντικειμενική συνάρτηση. Τα κόστη αυτά μπορεί είτε γραμμικού τύπου είτε τετραγωνικού, ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία. Ενδεικτικά αναφέρονται πολιτικές διαχείρισης που ενσωματώνονται ως κόστη στην αντικειμενική συνάρτηση:

1. Μεγιστοποίηση της παραγωγής νερού

$$\min[F_{p_max} - F_p(t)]$$

Επιλέγεται ως γραμμικό κόστος, ώστε να τιμωρεί ομοιόμορφα την απόκλιση, σε όλο τον ορίζοντα βελτιστοποίησης.

2. Μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ

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

Αντίστοιχα επιλέγεται ως γραμμικό.

3. Προτεραιότητα στην αξιοποίηση της ισχύος της Α/Γ

$$\min[P_{dp}(t) + P_{flush} \times st_{flush}(t) - P_{out_WT}(t)]^2$$

Το συγκεκριμένο κόστος έχει ως σκοπό να αξιοποιείται κατά προτεραιότητα η ισχύς της Α/Γ για τη λειτουργία της μονάδας RO και δευτερευόντως, αν δεν επαρκεί, η ισχύς της

μπαταρίας. Στην ουσία δηλαδή «τιμωρεί» τις μεγάλες ισχείς φόρτισης / εκφόρτισης της μπαταρίας. Επιλέγεται ως τετραγωνικό ώστε να «τιμωρεί» κυρίως τις μεγάλες αποκλίσεις.

4. Περιορισμός στις μεγάλες μεταβολές ισχύος της μονάδας RO

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

Αντίστοιχα, τετραγωνικού τύπου ώστε να τιμωρεί κυρίως τις απότομες μεταβολές στην ισχύ, που μπορούν να καταπονήσουν το μηχανολογικό εξοπλισμό.

Αυτά τα κριτήρια είναι μερικές από τις βασικές συμπεριφορές λειτουργίας που μπορούν να ενσωματωθούν στην αντικειμενική συνάρτηση. Η μοντελοποίηση με μαθηματικό προγραμματισμό παρέχει την ευελιξία για συνδυαστική εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας, ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία του συστήματος. Αυτό αποτελεί και ένα βασικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, το ότι μπορεί να ενσωματώσει πολλές πολιτικές διαχείρισης και λειτουργικούς περιορισμούς, που είναι αδύνατο ή εξαιρετικά πολύπλοκο να μοντελοποιηθούν με απλή λογική ελέγχου.

2.3.2. Διατύπωση λειτουργικών περιορισμών του συστήματος

Ισοζύγιο παραγωγής - ζήτησης - αποθήκευσης νερού

Για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης πρέπει η ποσότητα νερού που παράγεται από τη μονάδα RO να καλύπτει την αντίστοιχη ζήτηση. Σε περίπτωση περίσσειας ή ελλείμματος νερού αναλαμβάνει η δεξαμενή αποθηκεύοντας ή παρέχοντας νερό προς κατανάλωση αντίστοιχα.

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

όπου

$F_s(t) > 0$ όταν η δεξαμενή αποθηκεύει νερό λόγω πλεονάζουσας παραγωγής της μονάδας RO και

$F_s(t) < 0$ όταν η δεξαμενή παρέχει νερό για κάλυψη της ζήτησης, λόγω ελλειμματικής παραγωγής της μονάδας RO

Ισοζύγιο ισχύος

Για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης πρέπει να τηρείται το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ της μονάδας RO, της A/Γ και της μπαταρίας.

$$P_{out_WT}(t) = P_{dp}(t) + P_{flush} * st_{flush}(t) - P_{bat}(t)$$

όπου

$P_{bat}(t) > 0$ όταν η μπαταρία εκφορτίζεται

$P_{bat}(t) < 0$ όταν η μπαταρία φορτίζεται

Στο ισοζύγιο ισχύος λαμβάνεται υπόψη και κατάσταση πλύσης των πολυστρωματικών φίλτρων της μονάδας RO, καθώς πρόκειται για κατάσταση λειτουργίας που απαιτεί σημαντική ηλεκτρική ισχύ. Επιπλέον στο ισοζύγιο ισχύος λαμβάνονται υπόψη και οι βαθμοί απόδοσης των μετατροπέων καθώς και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της μπαταρίας, όμως δεν αποτυπώνονται στην παραπάνω εξίσωση για λόγους απλούστερης διατύπωσης.

Λειτουργικοί περιορισμοί μονάδας αφαλάτωσης

Εξετάζεται η περίπτωση μονάδας αφαλάτωσης RO με δυνατότητα λειτουργίας σε μεταβλητή ισχύ και συνεπώς ανάλογη δυνατότητα προσαρμογής της παραγωγής νερού.

Το εύρος της ισχύος λειτουργίας της μονάδας RO διατυπώνεται ως εξής:

$$P_{dp}(t) \leq P_{dp_max} \times st(t)$$

$$P_{dp}(t) \geq P_{dp_min} \times st(t)$$

και αντίστοιχα το εύρος παραγωγής νερού:

$$F_p(t) \leq F_{p_max} \times st(t)$$

$$F_p(t) \geq F_{p_min} \times st(t)$$

Θεωρείται αναλογική συσχέτιση ηλεκτρικής ισχύος και παραγωγής νερού, δηλαδή:

$$\frac{F_p(t)}{F_{p_max}} = \frac{P_{dp}(t)}{P_{load_max}}$$

Τέλος, εξασφαλίζεται ότι η μονάδα RO δεν μπορεί να βρίσκεται συγχρόνως σε κατάσταση λειτουργίας και σε κατάσταση πλύσης των φίλτρων, ισχύει δηλαδή για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης:

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

Εξισώσεις δεξαμενής

Για κάθε δεκάλεπτο του ορίζοντα βελτιστοποίησης υπολογίζεται η στάθμη του διαθέσιμου νερού της δεξαμενής, ανάλογα με την παροχή αποθήκευσης. Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας έγινε η παραδοχή ότι δεν υπάρχει περιορισμός στην ταχύτητα εισόδου ή εξόδου του νερού από τη δεξαμενή.

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

Για λόγους καλύτερης εποπτείας εισάγεται μία μεταβλητή που αποτυπώνει την κατάσταση της δεξαμενής (state of storage) για κάθε δεκάλεπτο:

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

Η στάθμη του νερού της δεξαμενής περιορίζεται από τα φυσικά όρια της δεξαμενής:

$$sos(t) \leq sos_{max}$$

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

Η έννοια του κατώτατου ορίου (sos_{min}) σημαίνει ότι η δεξαμενή δεν αδειάζει ποτέ τελείως για λόγους αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών.

Εξισώσεις μπαταρίας

Σε κάθε δεκάλεπτο υπολογίζεται η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας ως εξής:

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

Η μέγιστη ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης δεν πρέπει να ξεπερνά τα κατασκευαστικά όρια της μπαταρίας:

$$|P_{bat}(t)| \leq P_{bat_max}$$

Όπως και στην περίπτωση της δεξαμενής, ορίζεται μεταβλητή που δείχνει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (state of charge)

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

Η μπαταρία δεν πρέπει να φορτίζεται και να εκφορτίζεται πέρα από κάποια όρια, καθώς αυτό έχει αρνητική στο χρόνο ζωής της.

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

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

Λειτουργία A/Γ

Η παραγωγή της A/Γ μπορεί είναι το πολύ ίση με αυτή που της επιτρέπει η καμπύλη ισχύος της δεδομένης της ταχύτητας του ανέμου για το τρέχον δεκάλεπτο

$$P_{out_WT}(t) \leq P_{WT}(t)$$

2.4.Απλή στρατηγική ελέγχου

Εκτός από τη μοντελοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, προτάθηκε και μια απλή στρατηγική ελέγχου διαχείρισης των συνιστωσών του συστήματος, κυρίως για λόγους σύγκρισης. Η απλή στρατηγική διαμορφώνεται χονδρικά ως εξής:

- Αν η διαθέσιμη ισχύς της A/Γ είναι τουλάχιστον ίση με την ισχύ που απαιτείται για την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης, τότε αυτή αξιοποιείται κατά προτεραιότητα ως εξής:
 1. Λειτουργία της μονάδας RO στο επίπεδο που απαιτείται για την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης
 2. Φόρτιση της μπαταρίας
 3. Λειτουργία της μονάδα RO σε υψηλότερο επίπεδο ισχύος και αποθήκευσης πλεονάσματος στη δεξαμενή
- Αν η διαθέσιμη ισχύς της A/Γ δεν επαρκεί για την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης, τότε αναλαμβάνουν κατά προτεραιότητα οι εξής συνιστώσες:
 1. Λειτουργία της μονάδας RO μέχρι το εφικτό επίπεδο ισχύος
 2. Παροχή νερού από τη δεξαμενή
 3. Εκφόρτιση μπαταρίας

Κεφάλαιο 3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

3.1. Συνιστώσες και παράμετροι προσομοίωσης του συστήματος

Το μαθηματικό μοντέλο η διατύπωση του οποίου προηγήθηκε στο Κεφάλαιο 3, εφαρμόζεται για την προσομοίωση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης αποτελούμενο από τη μονάδα RO, A/Γ, μπαταρία και δεξαμενή πόσιμου νερού, με σκοπό την εφαρμογή του σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα του Αιγαίου. Σκοπός της εργασίας είναι η επίτευξη ετήσιας προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος, με στόχο το σχεδιασμό του κεντρικού αλγορίθμου ελέγχου που απαιτείται για τον συντονισμό των επιμέρους συνιστωσών του έργου. Στη συνέχεια, αποτελεί αντικείμενο προς διερεύνηση, βάση και της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου, η απαιτούμενη διαστασιολόγηση ενός τέτοιου αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης, ώστε να αποτελεί μία ρεαλιστική και οικονομικά βιώσιμη επιλογή προς πρακτική εφαρμογή, με δυνατότητα πλήρους κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό ενός νησιού και με χαμηλό κόστος παραγωγής.

Στο παρόν Κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στις παραμέτρους και στα δεδομένα εισόδου που λήφθηκαν υπόψη κατά την προσομοίωση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης.

3.1.1. Χρονοσειρά ζήτησης νερού

Ελλείπει πραγματικών στοιχείων περί υδρευτικών απαιτήσεων των νησιών εντός του έτους σε κλίμακα μικρότερη της μηνιαίας, κατασκευάστηκε με απλουστευμένο τρόπο, για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, μία χρονοσειρά ζήτησης νερού με βήμα 10λέπτου. Θεωρήθηκε η παραδοχή ότι η ζήτηση νερού σχετίζεται άμεσα με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, δεδομένης μίας ετήσιας χρονοσειράς πρόβλεψης φορτίου με ωριαίο βήμα για το έτος 2018 για το νησί της Πάτμου και των απολογιστικών μηνιαίων καταναλώσεων πόσιμου νερού για το 2006 (Πίνακας 1) για το ίδιο νησί, κατασκευάστηκε ετήσια χρονοσειρά ζήτησης νερού. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή της χρονοσειράς νερού περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [2]:

1. Ορίζεται η αδιάστατη ζήτηση νερού - ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για έναν συντελεστή που λαμβάνει υπόψη τη διακύμανση της ηλεκτρικής ενέργειας:

$$\text{Αδιάστατη ζήτηση νερού - ηλεκτρικής ενέργειας} = \text{Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας} / \text{Αιχμή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας}$$

2. Υπολογίζεται η ωριαία ζήτηση νερού βάσει της ετήσιας υδρευτικής απαίτησης και της αδιάστατης ζήτησης νερού ηλεκτρικής ενέργειας ως εξής:

$$\text{Μέση ωριαία ζήτηση νερού (m}^3\text{)} = \text{Ετήσια υδρευτική απαίτηση} / 8760$$

$\Omega\text{ριαία ζήτηση νερού} = \text{Μέση ωριαία ζήτηση νερού} \times \text{Αδιάστατη ζήτηση νερού} - \text{ηλεκτρικής ενέργειας} / \text{Μέση αδιάστατη ζήτηση νερού} - \text{ηλεκτρικής ενέργειας}$

3. Στην ωριαία ζήτηση νερού που προέκυψε στο βήμα 2, εισάγουμε μεγαλύτερη προσαύξηση στις ώρες με μεγάλη ζήτηση και μικρότερη σε εκείνες με μικρή ζήτηση, ως εξής:

$\text{Προσαυξημένη ωριαία ζήτηση νερού} = (\Omega\text{ριαία ζήτηση νερού} - \min[\Omega\text{ριαία ζήτηση νερού}]) \times 1,5 + \min[\Omega\text{ριαία ζήτηση νερού}]$

Πίνακας 1: Μεταφερόμενες ποσότητες νερού (m³) με υδροφόρα πλοία για το 2006 στην Πάτμο [Πηγή: Υπουργείο Ανάπτυξης, 2008]

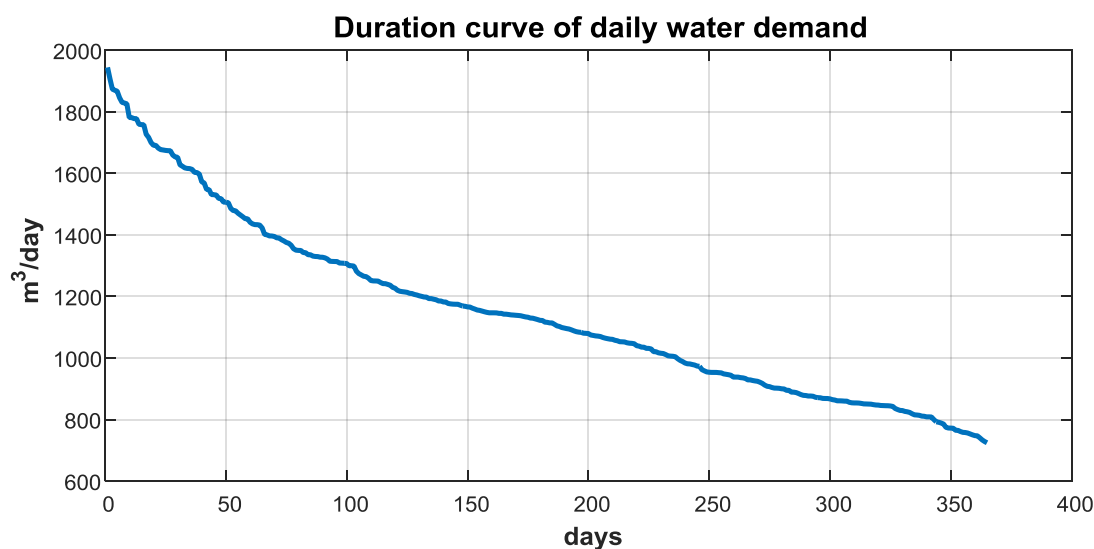
ΜΗΝΑΣ	1 ^{ος}	2 ^{ος}	3 ^{ος}	4 ^{ος}	5 ^{ος}	6 ^{ος}	7 ^{ος}	8 ^{ος}	9 ^{ος}	10 ^{ος}	11 ^{ος}	12 ^{ος}	ΣΥΝΟΛΟ
ΠΑΤΜΟΣ	7500	5600	17500	17600	25200	33000	25700	35000	29400	27000	17600	12500	253600

3.1.2. Μονάδα αφαλάτωσης

Η μέθοδος αφαλάτωσης που επιλέγεται είναι η αντίστροφη όσμωση (RO). Στα πλαίσια των προσομοιώσεων εξετάζεται μονάδα RO με δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος ισχύος και δυνατότητα ρύθμισης ανά 10λεπτο. Εντός του 10λέπτου η μονάδα RO αναπαρίσταται ως φορτίο σταθερής ισχύος.

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 1.8.2, στην πράξη λειτουργία μονάδων RO μεγάλης κλίμακας με δυνατότητα ρύθμισης της ηλεκτρικής ισχύος λειτουργίας τους επιτυγχάνεται με συνδυαστική χρήση μικρότερων υπομονάδων RO και κατάλληλο σύστημα ελέγχου που συντονίζει τις επιμέρους υπομονάδες (modules), δηλαδή προγραμματίζει την έναυση και σβέση τους ανάλογα με την τρέχουσα ζήτηση νερού.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ως τέτοια βασική υπομονάδα θεωρείται ένα module RO με εύρος λειτουργίας από 18.75 - 37.5 kW και αντίστοιχη παραγωγή νερού 175 - 350 m³/day ή 1.22 - 2.43 m³/10 min. Με βάση την χρονοσειρά ζήτησης νερού που κατασκευάστηκε στην παραπάνω υποενότητα προκύπτει η παρακάτω ετήσια καμπύλη ημερήσιας ζήτησης νερού (Σχήμα 24). Όπως διαπιστώνεται η μέγιστη ημερήσια ζήτηση μέσα στο έτος αγγίζει τα 2000 m³, συνεπώς απαιτείται μία μονάδα αφαλάτωσης τουλάχιστον αντίστοιχης δυναμικότητας. Επειδή όμως εξετάζεται αυτόνομο σύστημα που θα πρέπει να καλύπτει πλήρως τις υδρευτικές απαιτήσεις του νησιού και δεδομένου ότι ως βασική πηγή ηλεκτρική ισχύος θεωρείται ο άνεμος που χαρακτηρίζεται από στοχαστικότητα και μεταβλητότητα, θα εξεταστούν και μεγαλύτερης δυναμικότητας μονάδες με συνδυασμό 7 ως 8 modules RO, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 24: Ετήσια καμπύλη διάρκειας ημερήσιας ζήτησης νερού (m³/day)

Πίνακας 2: Εύρος παραγωγής νερού και ηλεκτρικής ισχύος μονάδων αφαλάτωσης προς διερεύνηση

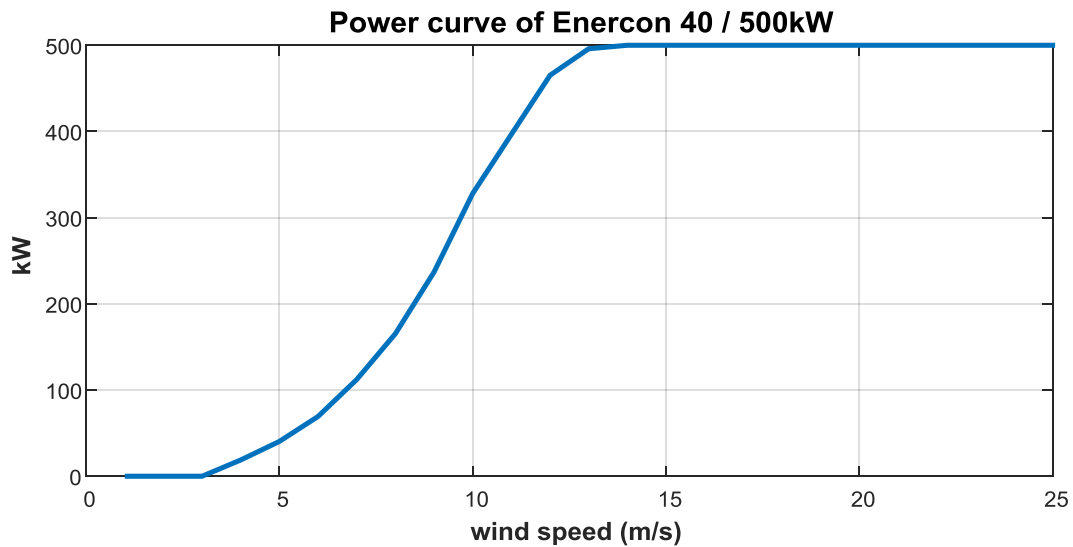
	Ικανότητα παραγωγής νερού (m ³ /day)/(m ³ /10min)	Ισχύς λειτουργίας (kW)
1 module	175-350 / 1.22-2.43	18.75-37.5
7 modules	175-2450 / 1.22-17	18.75-262.5
8 modules	175-2800 / 1.22-19.44	18.75-300
9 modules	175-3150 / 1.22-21.88	18.75-338

Επιπλέον όσον αφορά την διαχείριση της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, λαμβάνεται υπόψη ότι μία φορά τη μέρα η μονάδα RO θα πρέπει να σταματά ώστε να πραγματοποιούνται αναστροφές πλύσεις στα πολυστρωματικά φίλτρα κατά το στάδιο προεπεξεργασίας του νερού. Η πλύση αυτή κρίνεται αναγκαίο να πραγματοποιείται κάθε μέρα καθώς η ύπαρξη μετεωρίτη στο θαλασσινό νερό του Αιγαίου δημιουργεί πολύ συχνά έμφραξη στα φίλτρα. Η διάρκεια μίας τέτοιας πλύσης κυμαίνεται στα 60 min (6 10λεπτα) και η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς γύρω στα 60 kW, για μονάδες δυναμικότητας του Πίνακας 2. Μέσα στη μέρα ο αλγόριθμος ελέγχου επιλέγει τη σβέση της μονάδας με σκοπό την ανάστροφη πλύση των φίλτρων της, την ώρα που εμφανίζεται η ελάχιστη ζήτηση νερού ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες περίπτωσης αδυναμίας κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό.

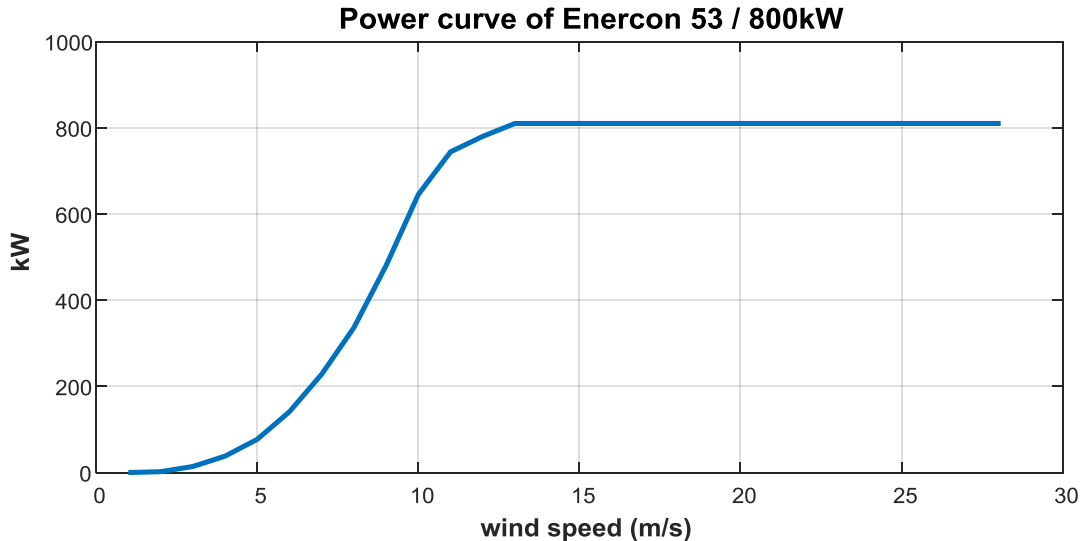
3.1.3. Ανεμογεννήτρια

Στα πλαίσια των προσομοιώσεων με σκοπό τη διαστασιολόγηση του συστήματος εξετάζονται δύο εμπορικά μοντέλα Α/Γ της ENERCON, τα οποία είναι ιδιαίτερα δημοφιλή για τέτοιου

είδους εφαρμογές. Πρόκειται για τις Α/Γ E40/500kW και E53/800kW, οι καμπύλες ισχύος των οποίων απεικονίζονται στα Σχήμα 25 και Σχήμα 26. Και τα δύο μοντέλα Α/Γ διαθέτουν δυνατότητα περιορισμού της παραγόμενης ισχύος στις ανάγκες του φορτίου (όταν επαρκεί η ταχύτητα ανέμου).



Σχήμα 25: Καμπύλη ισχύος για την Α/Γ ENERCON 40/500kW



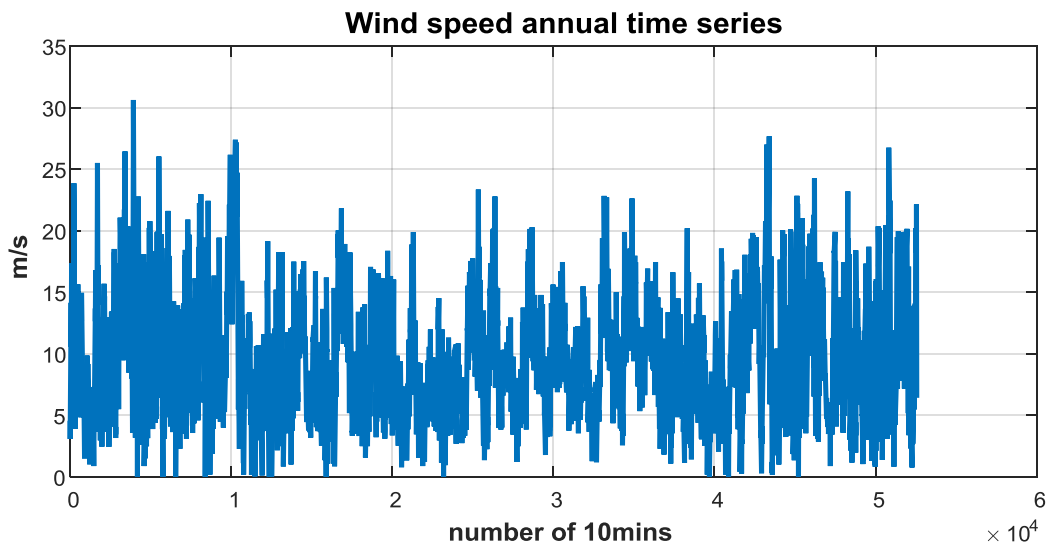
Σχήμα 26: Καμπύλη ισχύος για την Α/Γ ENERCON 53/800kW

Με βάση την καμπύλη ισχύος της εκάστοτε Α/Γ και τη διαθέσιμη χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου, υπολογίζεται για κάθε δεκάλεπτο του έτους η παραγόμενη ισχύς από την Α/Γ, μέσω γραμμικής παρεμβολής στην καμπύλη ισχύος. Η δεδομένη χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου που χρησιμοποιείται ανάγεται στο ύψος του δρομέα της Α/Γ, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a$$

όπου v_1, v_2 ταχύτητα του ανέμου σε δύο διαφορετικά ύψη h_1, h_2 εντός του οριακού στρώματος και a ένας συντελεστής που εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Στο εξής όταν γίνεται αναφορά στη μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου, αυτή εννοείται στο ύψος της πλήμνης της Α.Γ.

Η βασική χρονοσειρά που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις αντιστοιχεί σε μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,27 m/s και απεικονίζεται στο Σχήμα 27.



Σχήμα 27: Ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου με βήμα 10λέπτο, στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ

3.1.4. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας - Μπαταρίες

Οι μπαταρίες αποτελούν βασική συνιστώσα ενός αυτόνομου συστήματος και η χρήση τους είναι απαραίτητη για δύο λόγους:

1. Για να παρέχουν μικρή αυτονομία λειτουργίας στη μονάδα RO, εξασφαλίζοντας την πλήση των πολυστρωματικών φίλτρων μία φορά την ημέρα όταν δεν επαρκεί η παραγόμενη αιολική ενέργεια.
2. Για να εξομαλύνουν τη μεγάλη μεταβλητότητα της παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ και να εξασφαλίζουν ομαλότερη λειτουργία του συστήματος (λιγότερες εκκινήσεις - σβέσεις).

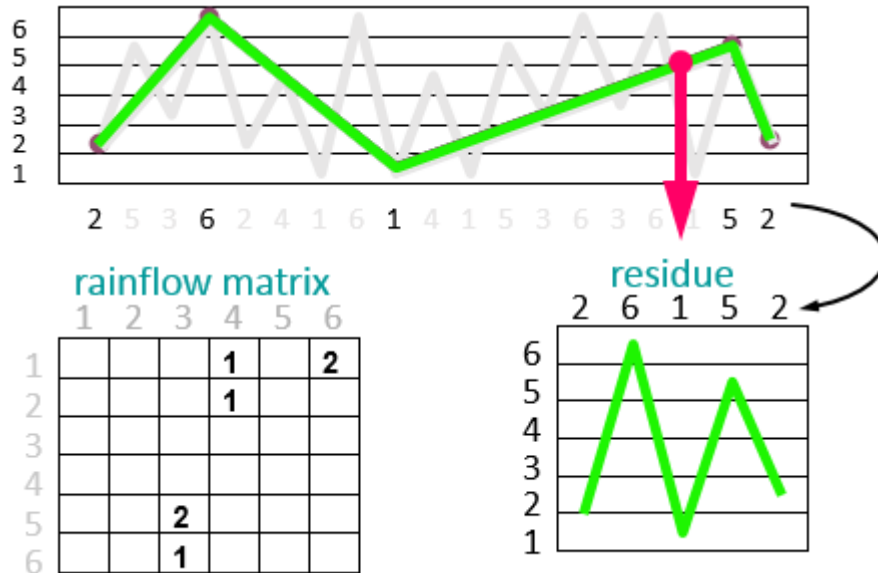
Οι μπαταρίες που επιλέγονται είναι ιόντων-λιθίου. Συνήθως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας επιλέγονται ολόκληρα «κοντέινερς» που αποτελούνται από συστοιχίες μπαταριών. Ως μπαταρία δηλαδή θεωρείται ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης. Οι βασικές παράμετροι προς διερεύνηση είναι η μέγιστη ισχύς φόρτισης / εκφόρτισης και η χωρητικότητα της μπαταρίας. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης των μπαταριών λαμβάνεται ίσος με $n_{bat} = 90\%$ ενώ ο βαθμός απόδοσης του DC-AC μετατροπέα ίσος με $n_{DC-AC} = 95\%$. Το κατώτατο και το ανώτατο επίπεδο φόρτισης των μπαταριών ορίζονται $SOC_{min} = 30\%$ και $SOC_{max} = 100\%$ αντίστοιχα.

Η διαστασιολόγηση της μπαταρίας επηρεάζεται σημαντικά από την στρατηγική διαχείρισης του συστήματος κάτι το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ευελιξία της μονάδας (εύρος ισχύος λειτουργίας, ρυθμός μεταβολής ισχύος). Σε κάθε περίπτωση, η χωρητικότητα και η μέγιστη ισχύς της μπαταρίας πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται τουλάχιστον η ενεργοβόρα διαδικασία της πλήσης, μία φορά την ημέρα, για χρονική διάρκεια μίας ώρας. Ως εκ τούτου, βάσει και των βαθμών απόδοσης των μετατροπών και των μπαταριών, αλλά και των ορίων φόρτισης / εκφόρτισης που ορίστηκαν, η μέγιστη ισχύς και η χωρητικότητα της μπαταρίας δεν μπορούν να θεωρηθούν μικρότερες από 100kW και 100kWh αντίστοιχα.

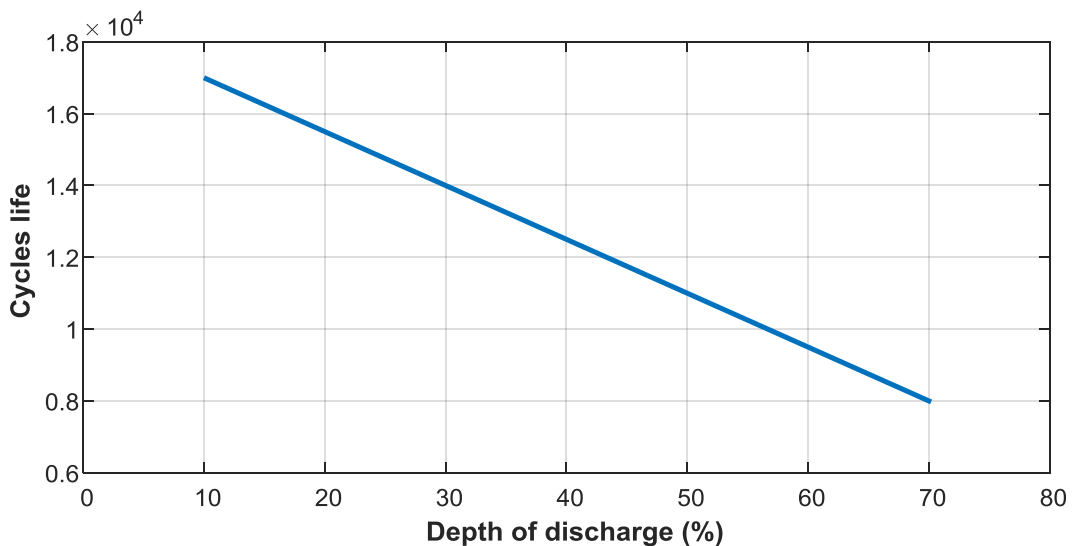
Στα βασικότερα στοιχεία που χαρακτηρίζουν μία μπαταρία συγκαταλέγεται εκτός από την ονομαστική της χωρητικότητα και το βάθος εκφόρτισης, ο μέγιστος αριθμός κυκλικών φορτίσεων - εκφορτίσεων που μπορεί να δεχτεί μέχρι να χάσει την ονομαστική της χωρητικότητα. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος εκφόρτισης στον οποίο αυτοί πραγματοποιούνται. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο μειώνεται ο αριθμός των κύκλων που μπορεί να δεχτεί μία μπαταρία .

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε προσπάθεια να προσδιοριστούν χονδρικά ο αριθμός των κύκλων που πραγματοποιεί η μπαταρία κατά την προσομοίωση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης, με σκοπό να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής της και η επίπτωση της αντικατάστασής της στο κόστος ου παραγόμενου νερού. Για τον προσδιορισμό του αριθμού των κύκλων εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος Rainflow Counting[15] ο οποίος ορίζει ως κύκλο δύο διαδοχικά περιστατικά φόρτισης - εκφόρτισης με ίδιο πλάτος εκφόρτισης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί μία 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 ταλαντώσεις. Συνοπτικό παράδειγμα εφαρμογής του παρουσιάζεται στο Σχήμα 28.

Η τελική εκτίμηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας γίνεται με βάση το Σχήμα 29, που αποτελεί ένα σχεδιάγραμμα των διαδοχικών κύκλων τους οποίους μπορεί να πραγματοποιήσει μία μπαταρία συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης. Το συγκεκριμένο διάγραμμα κατασκευάστηκε με στοιχεία από εμπορικό μοντέλο μπαταρίας για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε συνδυασμό με ΑΠΕ.



Σχήμα 28: Συνοπτικό παράδειγμα εφαρμογής αλγορίθμου Rainflow Counting



Σχήμα 29: Συνολικοί κύκλοι φόρτισης - εκφόρτισης μιας μπαταρίας συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης [TESVOLT-Eng-TLC-datasheet]

3.1.5. Δεξαμενή αποθήκευσης πόσιμου νερού

Η δεξαμενή για την αποθήκευση πόσιμου νερού είναι αναγκαία συνιστώσα ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης ειδικά στην περίπτωση που το σύστημα θα πρέπει να καλύπτει το σύνολο των υδρευτικών αναγκών ενός νησιού. Ο ρόλος της δεξαμενής είναι να αποθηκεύει την ενδεχόμενη περίσσεια νερού όταν εφικτή η παραγωγή του λόγω υψηλού αιολικού δυναμικού, με στόχο να το χρησιμοποιήσει για την κάλυψη της ζήτησης νερού σε περιπτώσεις που το αιολικό δυναμικό δεν επαρκεί για τη λειτουργία της μονάδας RO στα απαιτούμενα επίπεδα ή σε έκτακτες καταστάσεις που η ζήτηση ξεπεράσει τη δυναμικότητα της μονάδας RO.

Είναι προφανές λοιπόν ότι όσο μεγαλύτερη είναι η δεξαμενή, τόσο περισσότερο ενισχύεται η αξιοπιστία του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης. Ωστόσο όσο μεγαλύτερη η δεξαμενή, τόσο πιο σύνθετο και δαπανηρό έργο αποτελεί η κατασκευή της. Επιπλέον δεν επιτρέπει η μορφολογία του εδάφους όλων των νησιών την εγκατάσταση μεγάλης χωρητικότητας δεξαμενών, ενώ συνήθως πρόκειται για ένα έργο που πρέπει να προϋπάρχει της εγκατάστασης του ηλεκτρικού μέρους του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη δεξαμενής εβδομαδιαίας χωρητικότητας που κυμαίνεται στα 10000-15000 m³.

3.1.6. Οικονομικά στοιχεία και υπολογισμοί

Με δεδομένο το αρχικό επενδυτικό κόστος του συστήματος και τις ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορεί να υπολογιστεί άμεσα το συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής πόσιμου νερού σε €/m³, καθώς και η συμμετοχή σε αυτό των επιμέρους συνιστωσών κόστους. Υπολογίζεται επομένως το ετήσιο ισοδύναμο κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης ως εξής [18]:

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

όπου:

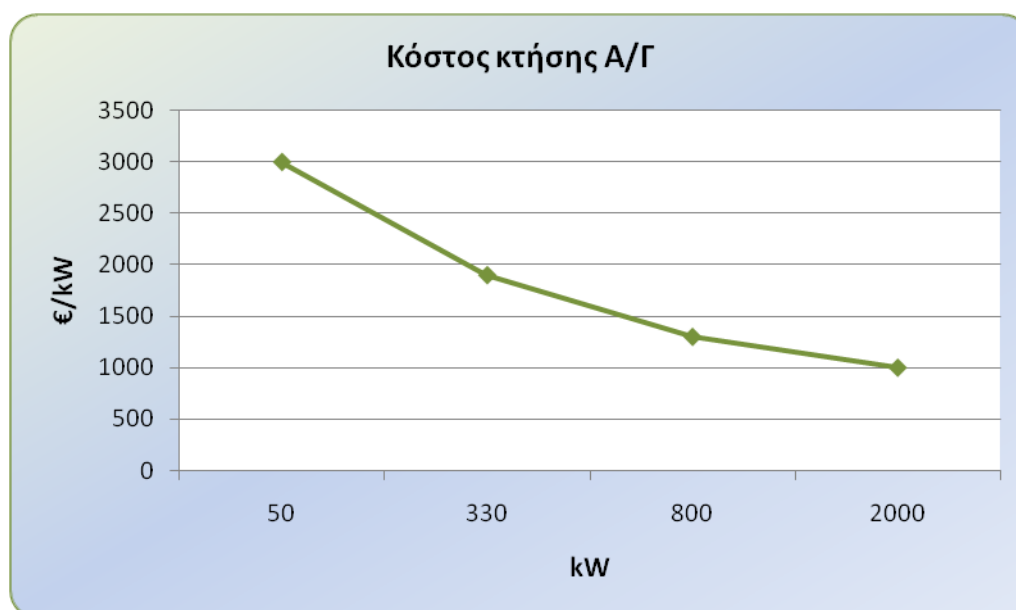
- k : Το επιτόκιο της αναγωγής
- n : Η θεωρούμενη διάρκεια ζωής του συστήματος σε έτη
- K_o : Το αρχικό κόστος επένδυσης
- $\Lambda\Delta_t$: Οι ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης

Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης εκφράζει την ετήσια επιβάρυνση από το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης, ενώ ο δεύτερος της ετήσιες λειτουργικές δαπάνες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τις εκτιμήσεις κόστους παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Δεδομένα κόστους των συνιστωσών του αυτόνομου συστήματος

Δεδομένα κόστους	
Κόστος μονάδας RO (€/m ³ /day):	1000
Κόστος μπαταριών (€/kWh)	500
Κόστος συστήματος ελέγχου (€):	350000
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος (€/kW)	200
Άλλα κόστη εγκατάστασης (€):	65000
Σταθερό ετήσιο κόστος μονάδας RO (€):	30000
Μεταβλητό ετήσιο κόστος μονάδας RO (χημικά καθαρισμού) (€/m ³):	0.3
Επιτόκιο αναγωγής:	8%
Οικονομική διάρκεια ζωής εγκατάστασης:	20 έτη

Επιπλέον, όσον αφορά το κόστος κτήσης της Α/Γ αυτό υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή από το Σχήμα 30, ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ της.



Σχήμα 30: Κόστος κτήσης Α/Γ (€/kW) ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ.

Μετά τον υπολογισμό του ισοδύναμου ετήσιου κόστους από την παραπάνω σχέση, το μέγεθος αυτό διαιρείται με τη συνολική ετήσια παραγωγή νερού και προκύπτει το αντίστοιχο ειδικό κόστος.

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του κόστους περιλαμβάνονται και οι δαπάνες περιοδικής αντικατάστασης των μπαταριών, ανάλογα με την κατά περίπτωση εκτιμώμενη διάρκεια ζωής τους, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της υποενότητας 3.1.4.

Κεφάλαιο 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

4.1.Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις ετήσιες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, για διάφορα σενάρια λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που περιγράφηκε στα κεφάλαια 3 και 4. 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 διάφορων παραμέτρων ελέγχου και σεναρίων διαστασιολόγησης στο κόστος του παραγόμενου νερού. Η τελική επιλογή των παραμέτρων και των μεγεθών του συνιστώσων γίνονται με γνώμονα την καλύτερη δυνατή λειτουργία του συστήματος και το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η ενεργειακή προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιείται μέσω της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση του λογισμικού βελτιστοποίησης Gams. Ο χρονικός ορίζοντας βελτιστοποίησης λαμβάνεται ίσος με 5 ημέρες και το χρονικό βήμα βελτιστοποίησης ίσο με 10 λεπτά. Η επιλογή του βήματος έγινε σε επίπεδο πολύ μικρότερο της ώρας ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της στοχαστικής φύσης της πρωτογενούς πηγής ηλεκτρικής ενέργειας (άνεμος) στη λειτουργία και στη διαστασιολόγηση του συστήματος. Ωστόσο εντός του διαστήματος αυτού δεν εξετάζονται δυναμικά φαινόμενα, δηλαδή θεωρείται σταθερή συμπεριφορά και λειτουργία του συστήματος, συνεπώς όλα τα επιμέρους μεγέθη (παραγόμενη ισχύς της Α/Γ, ισχύς φορτίου, μπαταριών κλπ) αποτελούν μέσες τιμές 10λέπτου. Παρόλο που ο ορίζοντας βελτιστοποίησης επιλέγεται ίσος με 5 μέρες, η επίλυση του προβλήματος γίνεται κυλιόμενα ανά μέρα, δηλαδή υπάρχει επικάλυψη μεταξύ δύο συνεχόμενων οριζόντων. Πιο συγκεκριμένα, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης για ένα πενταήμερο αλλά επιστρέφεται ως αποτέλεσμα μόνο η λύση που αφορά την πρώτη μέρα και ο νέος ορίζοντας αρχικοποιείται στη δεύτερη μέρα και όχι στην έκτη. Αυτή η τεχνική πλεονεκτεί σε σχέση με την απλή κυλιόμενη επίλυση στο ότι επιτρέπει την βελτιστοποίηση της τρέχουσας χρονικής περιόδου (εν προκειμένω μία ημέρα) έχοντας λάβει υπόψη τα μελλοντικά χρονικά περιθώρια, ως μέτρο πρόβλεψης μελλοντικών δυσμενών καταστάσεων (π.χ. χαμηλό αιολικό δυναμικό ή/και υψηλή ζήτηση νερού) και πρόληψης σπατάλης πόρων (μπαταρία, δεξαμενή) ώστε να μην βρεθεί ο αλγόριθμος ελέγχου σε καταστάσεις αδυναμίας κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό.

Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν μπορούν χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σενάρια που εξετάζουν τη διαχείριση της λειτουργίας του συστήματος και εστιάζουν στην στρατηγική σύζευξης της Α/Γ και της μονάδας RO, καθώς και στο βασικό κριτήριο ελέγχου που τίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση
- Σενάρια που εστιάζουν στη επιλογή της βέλτιστης διαστασιολόγησης του συστήματος ανάλογα με την εκάστοτε πολιτική διαχείρισης

4.2.Στρατηγική άμεσης προσαρμογής της μονάδας RO στην παραγωγή της Α/Γ

Αυτή η στρατηγική διαχείρισης μπορεί να χαρακτηριστεί ως παρόντος φορτίου, καθώς διέπεται από τη λογική της προσαρμογής της ισχύος λειτουργίας της μονάδας RO (φορτίο) στη μεταβλητή εισερχόμενη ισχύ της Α/Γ, με επακόλουθο να δίνεται προτεραιότητα στην απορρόφηση της ισχύος ΑΠΕ και να περιορίζεται η χρήση της μπαταρίας.

4.2.1. Κριτήρια βελτιστοποίησης

Καταρχάς διερευνώνται δύο βασικά σενάρια ως προς το κριτήριο που τίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση:

- Μεγιστοποίηση της ποσότητας παραγόμενου νερού
- Μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ

Τα παραπάνω αποτελούν τα βασικότερα κριτήρια που εμπλέκονται στην αντικειμενική συνάρτηση με την έννοια ότι έχουν τους πιο αυστηρούς συντελεστές παραβίασης και συνεπώς καθορίζουν τη βασική αρχή ελέγχου.. Ωστόσο δεν είναι τα μοναδικά καθώς έχει θεωρηθεί και κριτήριο της προτεραιότητας της Α/Γ για τη λειτουργία της μονάδας RO έναντι συμμετοχής της μπαταρίας, με πολύ μικρότερο όμως συντελεστή βαρύτητας (2.3.1).

Τα δύο σενάρια που παρουσιάζονται αρχικά εξετάστηκαν με τη μικρότερη δυνατή διαστασιολόγηση.

Τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης παρουσιάζονται στους Πίνακες 4 -Πίνακας 6.

Πίνακας 4: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος - Στρατηγική παρόντος φορτίου

	Κριτήριο προς βελτιστοποίηση	
	Μεγιστοποίηση παραγόμενου νερού	Μεγιστοποίηση παραγωγής Α/Γ
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	200	
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	100	
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	12000	
Μονάδα RO (m ³ /day)	2800	
Α/Γ (kW)	500	
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης		
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	422500.6	422436.6
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1157.2	1157.4
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	70.9%	69.9%
Ενέργεια παραγόμενη από την Α/Γ (MWh)	1234.5	1239.1
Capacity factor Α/Γ (%)	28.2%	28.3%
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	612.8	608.7
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1086.4	1086.5
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	17.6	42.9
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	8.8	21.4
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	8.8	21.4
Μέσο sos μπαταρίας (%)	68.2%	64.8%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	59238.7	60071.7
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	4302	4475
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	8.2%	8.5%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	1	1

Πίνακας 5: Δείκτες ζωής μπαταρίας - Στρατηγική παρόντος φορτίου

Δείκτες ζωής μπαταρίας		
Κύκλοι μπαταρίας	404	1736
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	12.0%	6.9%
Έτη ζωής μπαταρίας	41.3	13.6

Πίνακας 6: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού - Στρατηγική παρόντος φορτίου

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1.378	1.386
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0.203	0.203
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.046	1.046
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.675	0.675
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.024	0.032
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.024	0.024
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.000	0.008
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος (€/m ³)	0.005	0.005

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τα δύο σενάρια δεν διαφέρουν ιδιαίτερα ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος, ενώ τα δύο κριτήρια που τέθηκαν στην αντικειμενική συνάρτηση δεν φαίνεται έχουν σημαντική επίπτωση στα αντίστοιχα μεγέθη (παραγόμενο νερό, παραγόμενη ισχύς από Α/Γ). Ενδεχομένως τα δύο κριτήρια είναι παρόμοια γιατί έτσι όπως έχει δομηθεί ο αλγόριθμος, η απαιτούμενη ισχύς για τη λειτουργία της μονάδας RO παρέχεται κατά κύριο λόγο από την Α/Γ.

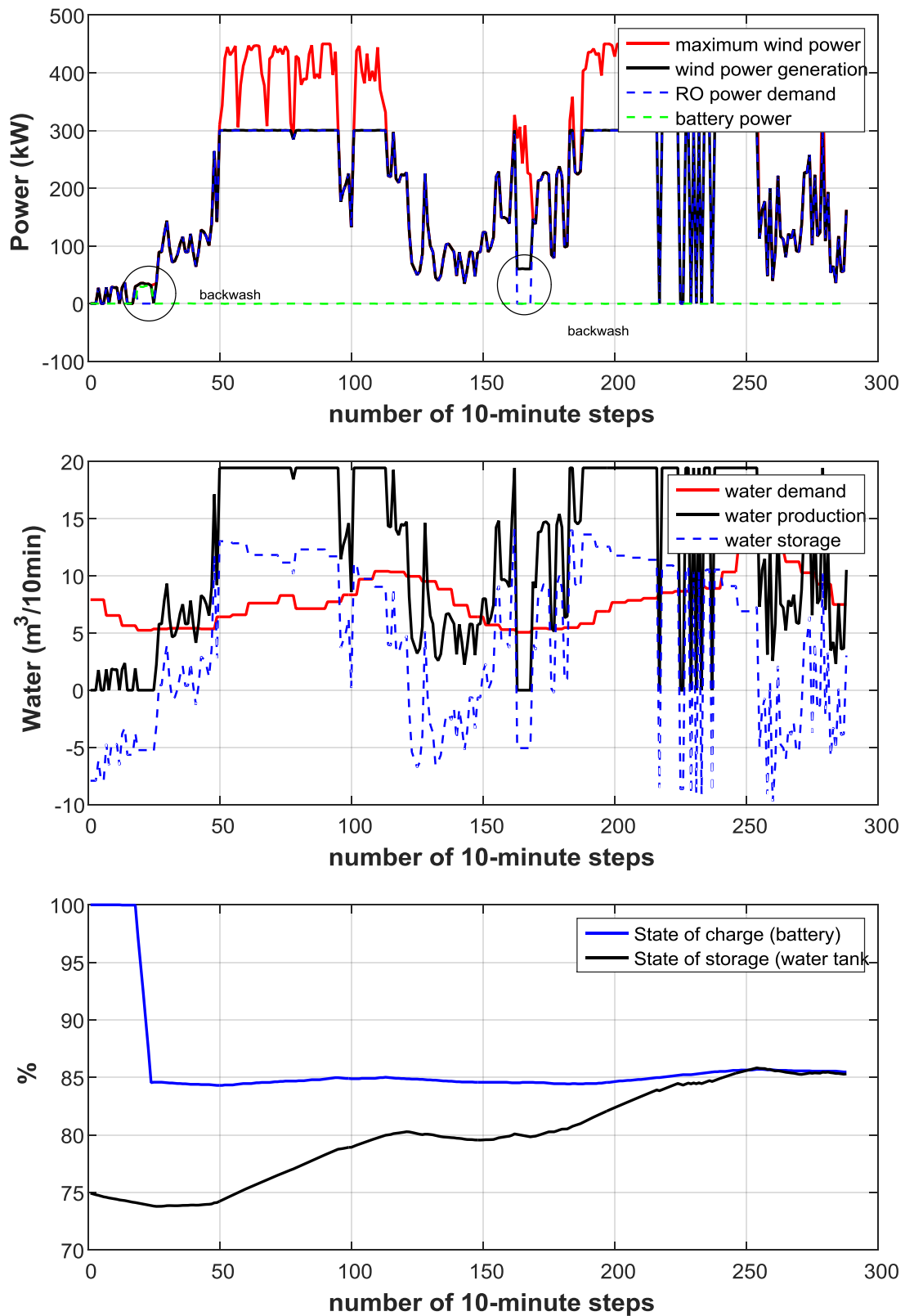
Ωστόσο αυτό πρέπει να διερευνηθεί και με παράλληλη παραμετρική διερεύνηση του μεγέθους και της αρχικής κατάστασης της δεξαμενής, διότι ακόμη και αν οι καιρικές συνθήκες (άνεμος) δίνουν στο σύστημα μεγαλύτερα περιθώρια παραγωγής νερού, αν η δεξαμενή δεν επιτρέπει την περαιτέρω αποθήκευση νερού, αυτά τα περιθώρια δεν μπορούν να αξιοποιηθούν.

Παρατηρείται επιπλέον ότι στο σενάριο με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του νερού, είναι ιδιαίτερα περιορισμένη η χρήση της μπαταρίας, με αποτέλεσμα η διάρκεια ζωής της να φτάνει τα 40 χρόνια. Βέβαια αυτό δεν είναι ρεαλιστικό, καθώς ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δεν έχει λάβει υπόψη το φυσικό degradation της μπαταρίας που συμβαίνει με την πάροδο του χρόνου και οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, π.χ. θερμοκρασία περιβάλλοντος, ωστόσο αυτό δεν αποτελεί σημείο διερεύνησης της παρούσας εργασίας. Η ουσία είναι ότι η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου απαιτεί μεγάλη ευελιξία από πλευράς της μονάδας RO ώστε να ανταποκρίνεται άμεσα στις μεταβολές του ανέμου καθιστώντας την μπαταρία απαραίτητη μόνο για την διεξαγωγή της πλύσης και αυτό όταν δεν επαρκεί το αιολικό δυναμικό. Το κριτήριο με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την A/Γ δεν είναι τόσο συντηρητικό ως προς τη χρήση της μπαταρίας, ωστόσο της δίνει ικανοποιητικό χρόνο ζωής. Λόγω του ότι δεν απαιτείται αντικατάσταση της μπαταρίας εντός του χρόνου ζωής του έργου, το σενάριο με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του νερού προκύπτει ελαφρώς οικονομικότερο ως προς το κόστος του παραγόμενου νερού. Στην πράξη τα δύο σενάρια μπορούν να θεωρηθούν παρόμοια, καθώς εντός της εικοσαετίας θα πρέπει να αντικατασταθούν μία φορά.

Τέλος σημειώνεται ότι και τα δύο σενάρια παρουσιάζουν αυξημένο αριθμό εκκινήσεων μέσα στο έτος, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο όταν η ισχύς λειτουργίας της μονάδας ακολουθεί ακριβώς την ισχύ της A/Γ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά στιγμιότυπα της λειτουργίας του συστήματος μέσα στο έτος, για τις δύο πρώτες μέρες του Ιανουαρίου. Κάθε σχήμα αποτελείται από τρία γραφήματα. Στο επάνω γράφημα αποτυπώνεται στην ουσία το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος, δηλαδή της A/Γ, της μονάδας RO και της μπαταρίας. Σημειώνονται επίσης με κύκλο τα δύο περιστατικά πλύσης τις ώρες μέσα στη μέρα που εμφανίζεται η χαμηλότερη ζήτηση. Στο μεσαίο γράφημα αποτυπώνεται το ισοζύγιο νερού, δηλαδή η ζήτηση, η παραγωγή και η συμμετοχή της δεξαμενής. Τέλος στο τρίτο γράφημα απεικονίζεται η στάθμη της δεξαμενής και η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Μεγιστοποίηση παραγόμενου νερού - Στιγμιότυπο Ιανουάριος 1-2

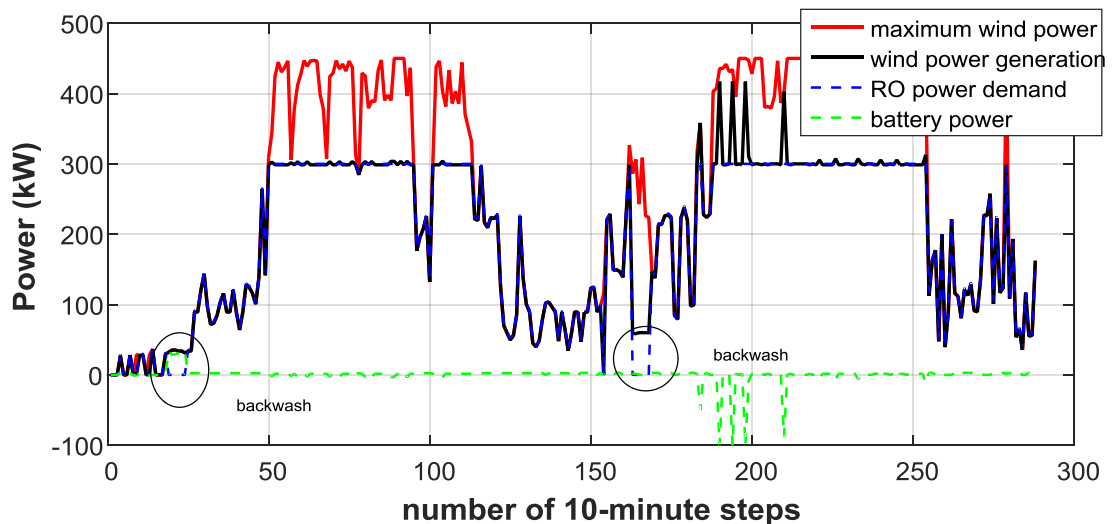


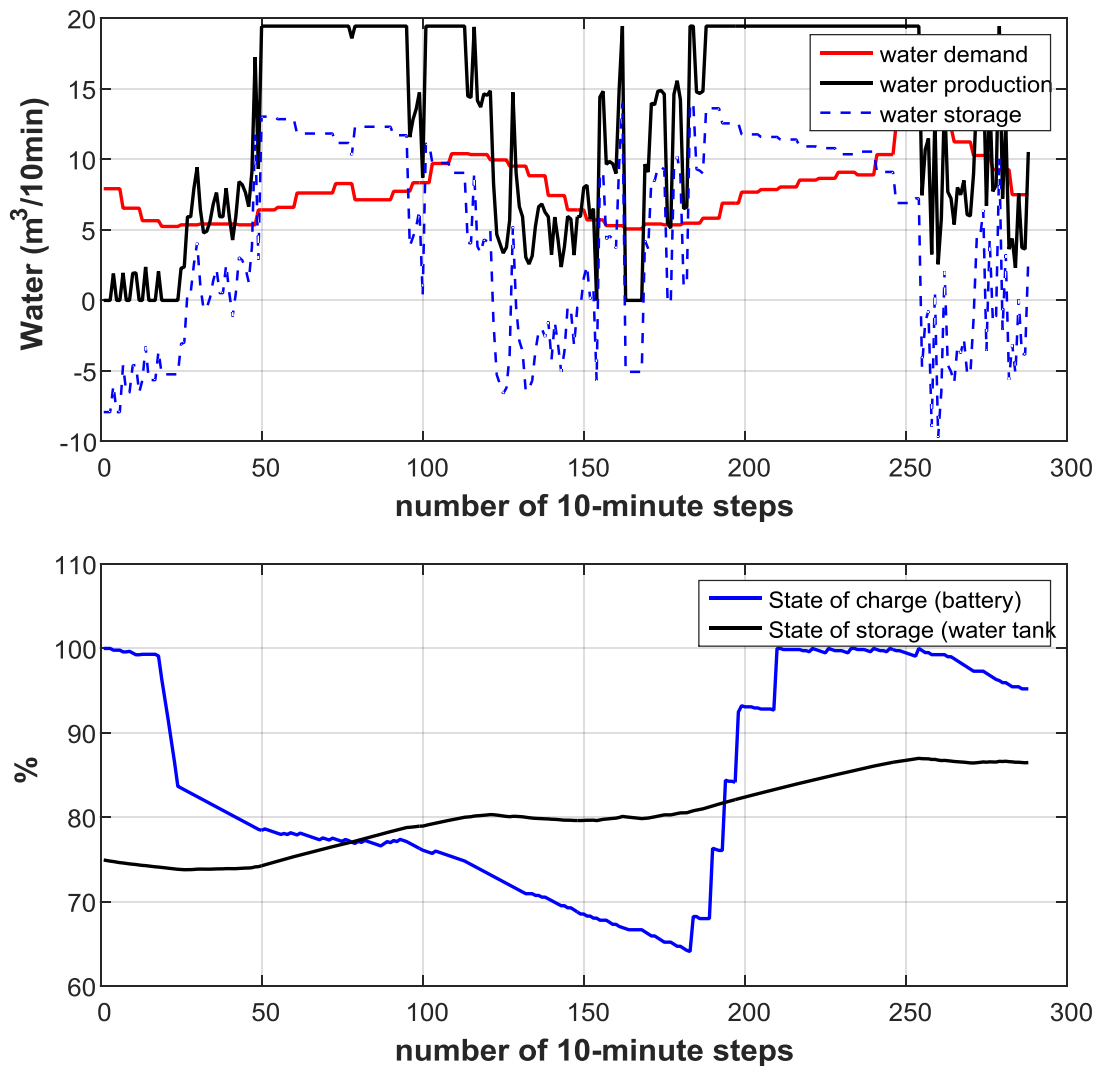
Σχήμα 31: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Α/Γ (κόκκινο), παραγωγή Α/Γ (μαύρο), ισχύς λειτουργίας μονάδας RO (μπλε), ισχύς μπαταρίας (πράσινο). **Μέση:** ζήτηση νερού (κόκκινο), παραγωγή νερού (μαύρο), αποθήκευση νερού (μπλε). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας, κατάσταση δεξαμενής (sos).

Από το πρώτο γράφημα είναι εμφανές ότι η ισχύς λειτουργίας της μονάδας RO ακολουθεί πιστά την ισχύ της Α/Γ. Η συμμετοχή της μπαταρίας είναι μηδαμινή, εκτός μόνο από την πρώτη πλύση που δεν επαρκεί ο αέρας για τη διεξαγωγή της. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το τρίτο γράφημα, όπου το Soc εμφανίζει ένα σκαλοπάτι εκφόρτισης στην αρχή της πρώτης ημέρας και στη συνέχεια συνεχίζει σχεδόν ως ευθεία γραμμή.

Όσον αφορά την παραγωγή του νερού αυτή κινείται κατ' αναλογία της ισχύος της μονάδας RO. Τις πρωινές ώρες που ο αέρας είναι χαμηλός, η παραγωγή της μονάδας RO δεν επαρκεί για την πλήρη κάλυψη της ζήτησης, οπότε συμμετέχει και η δεξαμενή. Τις υπόλοιπες ώρες που η μονάδα RO λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ της, η παραγωγή νερού υπερκαλύπτει τη ζήτηση και το πλεόνασμα αποθηκεύεται στη δεξαμενή. Εντός του διημέρου, η δεξαμενή αυξάνει τη στάθμη της από το 75% στο 85%.

Μεγιστοποίηση ισχύος Α/Γ - Στιγμιότυπο Ιανουάριος 1-2





Σχήμα 32: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Α/Γ (κόκκινο), παραγωγή Α/Γ (μαύρο), ισχύς λειτουργίας μονάδας RO (μπλε), ισχύς μπαταρίας (πράσινο). **Μέση:** ζήτηση νερού (κόκκινο), παραγωγή νερού (μαύρο), αποθήκευση νερού (μπλε). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας, κατάσταση δεξαμενής (sos).

Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και η λειτουργία του συστήματος με κριτήριο προς βελτιστοποίηση τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ. Η βασική διαφορά εντοπίζεται στο ότι χρησιμοποιείται πιο πολύ η μπαταρία, χωρίς όμως να υπάρχει ουσιαστική ανάγκη στα πλαίσια των απαιτήσεων του συστήματος. Ο αλγόριθμος επιλέγει να φορτίζει και να εκφορτίζει πιο συχνά τη μπαταρία για να μεγιστοποιήσει την ισχύ που παράγει η Α/Γ. Φροντίζει δηλαδή να αναπληρώσει άμεσα την ισχύ που καταναλώθηκε για την πρώτη πλύση των φίλτρων της μονάδας RO.

4.2.2. Διαστασιολόγηση

Στη συνέχεια εξετάζεται η αποφυγή των καταστάσεων αδυναμίας που παρατηρήθηκαν παραπάνω μέσω διερεύνησης της διαστασιολόγησης. Ενδεικτικά επιλέγεται το σενάριο με κριτήριο προς βελτιστοποίηση τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου νερού, καθώς ήταν το πιο οικονομικό. Ερευνώνται δύο πιθανά σενάρια διαστασιολόγησης, ένα με Α/Γ μεγαλύτερης ισχύος, 800kW έναντι 500kW και ένα με δεξαμενή αποθήκευσης νερού μεγαλύτερης χωρητικότητας 16000 m³ έναντι 12000 m³. Τα αποτελέσματα των ετήσιων προσομοιώσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 7 -Πίνακας 9. Το σενάριο 1 είναι το σενάριο της προηγούμενης υποενοήτας με κριτήριο προς βελτιστοποίηση τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου νερού, αλλά παρατίθεται ξανά για λόγους εποπτείας και σύγκρισης.

Πίνακας 7: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος

	Σενάρια - Διαστασιολογηση		
	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	200		
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	100		
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	12000		16000
Μονάδα RO (m ³ /day)	2800		
Α/Γ (kW)	500	800	500
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης			
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	422500.6	422808.8	423408.3
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1157.2	1158.4	1160.0
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	70.9%	62.2%	70.7%
Ενέργεια παραγόμενη από την Α/Γ (MWh)	1234.5	1234.0	1237.2
Capacity factor Α/Γ (%)	28.2%	17.6%	0.3
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	612.8	2014.7	610.4
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1086.4	1087.5	1089.0
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	17.6	7.8	16.4
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	8.8	3.9	8.2
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	8.8	3.9	8.2
Μέσο σοc μπαταρίας (%)	68.2%	73.4%	68.2%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	59238.7	64208.9	59506.0
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	4302	6755	4277
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	8.2%	12.9%	8.1%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	1	0	0

Πίνακας 8: Δείκτες ζωής μπαταρίας

Δείκτες ζωής μπαταρίας			
Κύκλοι μπαταρίας	404	302	654
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	12.0%	7.0%	6.5%
Έτη ζωής μπαταρίας	41.3	57.8	26.8

Πίνακας 9: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m ³)	1.378	1.425	1.375
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0.203	0.251	0.202
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.046	1.045	1.044
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.675	0.674	0.673
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.024	0.024	0.024
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.024	0.024	0.024
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.000	0.000	0.000
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος(€/m ³)	0.005	0.005	0.005

Καταρχάς παρατηρείται ότι τόσο με το σενάριο 2 όσο και με το σενάριο 3 αποφεύγονται οι καταστάσεις αδυναμίας. Ειδικά στο σενάριο 3, με την αύξηση του όγκου της δεξαμενής παρατηρείται και σημαντική αύξηση της ποσότητας του παραγόμενου νερού, της τάξης των 1000 m³. Συγχρόνως το σενάριο 3 παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος παραγόμενου νερού, καθώς δεν έχει ληφθεί υπόψη η συμμετοχή της αύξησης της χωρητικότητας της δεξαμενής στο συνολικό κόστος, ελλείψει στοιχείων.

Στο σημείο αυτό επιβεβαιώνεται ότι η παρουσία δεξαμενής πόσιμου νερού είναι βασική για την απρόσκοπτη λειτουργία ενός συστήματος αφαλάτωσης και ο όγκος της παίζει καθοριστικό ρόλο στην αποφυγή της υπερδιαστασιολόγησης του ηλεκτρικού μέρους του συστήματος (Α/Γ, μπαταρία). Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε σε παραπάνω ενότητα, δεν διαθέτουν όλα τα νησιά μεγάλες δεξαμενές και αντίστοιχες υποδομές, ούτε είναι γνωστός ο χρόνος και το κόστος κατασκευής των δεξαμενών αυτών, ούτε αν υπάρχει επαρκής χώρος για την κατασκευή τους. Συνεπώς στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δίνεται βαρύτητα κυρίως στη διαστασιολόγηση των υπόλοιπων συνιστωσών του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης.

4.3. Στρατηγική ομαλής προσαρμογής της ισχύος λειτουργίας της μονάδας RO στην παραγωγή της Α/Γ

Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική διαχείρισης, η μονάδα RO έχει μεν τη δυνατότητα λειτουργίας στο ίδιο εύρος ηλεκτρικής ισχύος, ωστόσο θεωρείται ότι η ισχύς λειτουργίας της προσαρμόζεται στην μεταβλητή ισχύ εισόδου με ομαλό τρόπο και αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές ισχύος από 10λεπτο σε 10λεπτο. Σ' αυτήν την περίπτωση αναμένεται καθοριστικός ο ρόλος της μπαταρίας, ώστε να απορροφά τις απότομες διακυμάνσεις της παραγόμενης από την Α/Γ ισχύος και γι αυτό το λόγο απαιτείται μεγαλύτερη διαστασιολόγηση μπαταριών σε σχέση με τα σενάρια της αμέσως προηγούμενης ενότητας.

4.3.1. Κριτήρια βελτιστοποίησης

Και για αυτήν την στρατηγική εξετάζονται πρώτα τα δύο σενάρια αναφορικά με το κριτήριο προς βελτιστοποίηση στην αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή τη μεγιστοποίηση του

παραγόμενου νερού και την μεγιστοποίηση του παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ. Τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης παρουσιάζονται στους Πίνακες 10 - Πίνακας 12.

Πίνακας 10: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος - Στρατηγική ομαλών μεταβολών ισχύος μονάδας RO

	Κριτήριο προς βελτιστοποίηση	
	Μεγιστοποίηση παραγόμενου νερού	Μεγιστοποίηση παραγωγής Α/Γ
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	1000	
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	400	
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	12000	
Μονάδα RO (m ³ /day)	3150	
Α/Γ (kW)	500	
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης		
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	422134.7	421139.0
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1156.5	1153.8
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	81.6%	65.9%
Ενέργεια παραγόμενη από την Α/Γ (MWh)	1266.5	1256.8
Capacity factor Α/Γ (%)	28.9%	28.7%
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	584.1	592.8
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1085.5	1082.9
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	210.7	167.5
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	105.0	83.7
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	105.7	83.8
Μέσο soc μπαταρίας (%)	67.5%	77.5%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	54008.7	65276.8
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	1614	1965
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	3.1%	3.74%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	1	3

Πίνακας 11: Δείκτες ζωής μπαταρίας - Στρατηγική ομαλών μεταβολών ισχύος μονάδας RO

Δείκτες ζωής μπαταρίας		
Κύκλοι μπαταρίας	1607	2035.5
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	7.8%	4.46%
Έτη ζωής μπαταρίας	13.6	14.2

Πίνακας 12: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού - Στρατηγική ομαλών μεταβολών ισχύος μονάδας RO

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1.615	1.615
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0.203	0.204
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.131	1.133
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.760	0.762
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.162	0.159
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.121	0.121
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.041	0.038
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος(€/m ³)	0.019	0.019

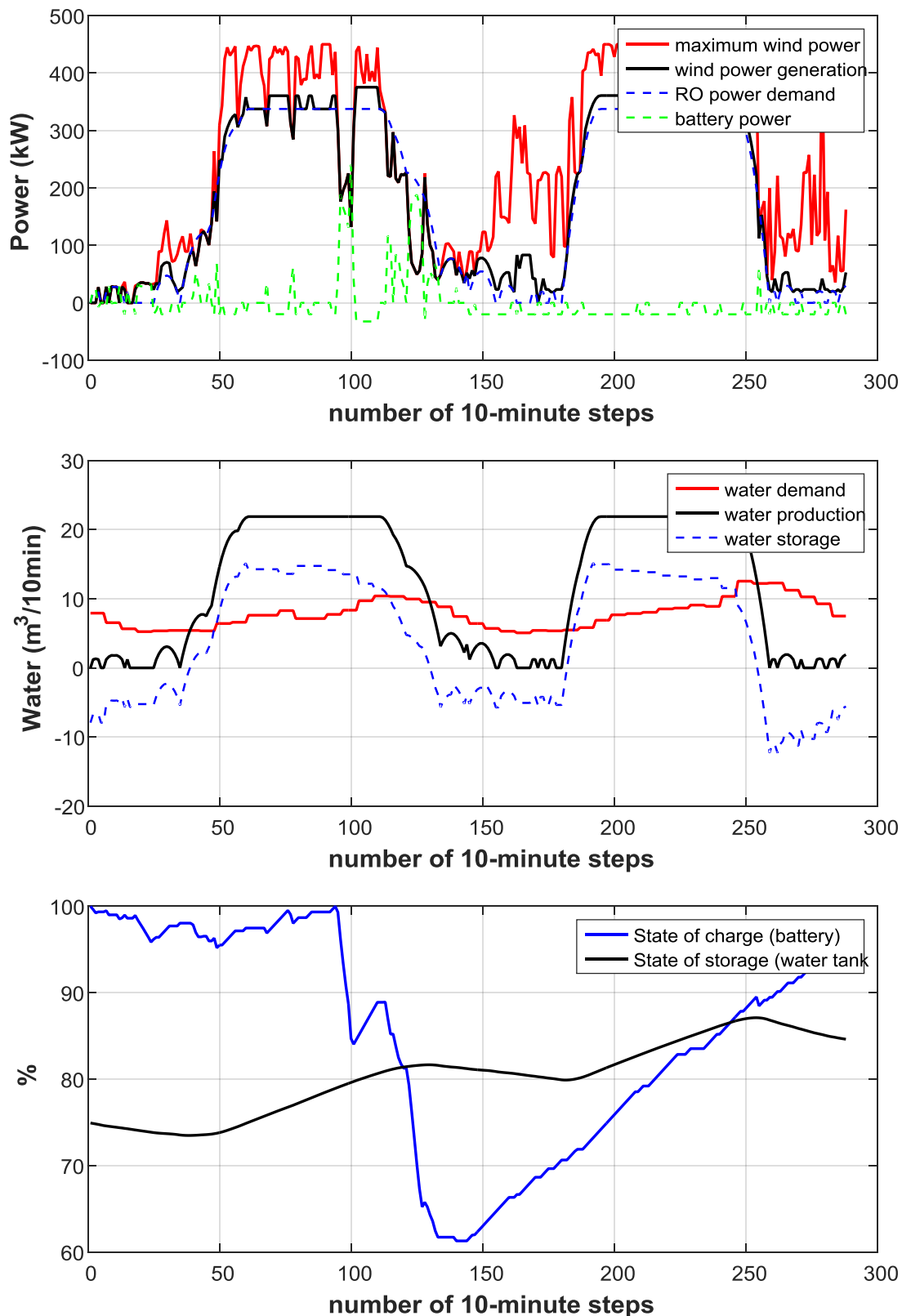
Πριν την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, επισημαίνεται ότι πράγματι για τη συγκεκριμένη στρατηγική διαχείρισης για να πραγματοποιηθεί ετήσια προσομοίωση απαιτήθηκε πολύ μεγαλύτερη μπαταρία σε σχέση με τα σενάρια της ενότητας 4.2 τόσο ως προς την ισχύ όσο και ως προς τη χωρητικότητα, για τα ίδια μεγέθη των υπόλοιπων συνιστωσών (Α/Γ, μονάδα RO, δεξαμενή) . Ως προς την ισχύ γιατί πλέον η μπαταρία δεν αρκείται στην εξασφάλιση της πλύσης αλλά πρέπει να μπορεί να καλύψει τις διαταραχές ή απότομες μεταβολές της ισχύος της Α/Γ ώστε να μπορέσει να προσαρμοστεί πιο ομαλά στα νέα επίπεδα λειτουργίας η μονάδα RO. Η μέγιστη μεταβολή ισχύος που καλείται να καλύψει η μπαταρία ισούται με το εύρος ισχύος λειτουργίας της μονάδας RO, το οποίο μαζί με τους βαθμούς απόδοσης μετατροπών ξεπερνά τα 300 kW . Ως προς τη χωρητικότητα γιατί η μπαταρία θα πρέπει να παρακολουθεί συνεχώς την αιολική ισχύ με σκοπό να λειτουργεί ως «buffer» για την ισχύ λειτουργίας της μονάδας RO. Ακόμη όμως και με την παραπάνω διαστασιολόγηση κατά τις ετήσιες προσομοιώσεις εμφανίστηκαν καταστάσεις αδυναμίας επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Ως προς τα δύο σενάρια, παρατηρούμε ότι και για αυτή τη στρατηγική διαχείρισης τα δύο σενάρια δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Το σενάριο με κριτήριο βελτιστοποίησης τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου νερού εμφανίζει λίγο καλύτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά και συνεπώς λιγότερες καταστάσεις αδυναμίας επίλυσης (μία έναντι τριών). Η ετήσια παραγόμενη ποσότητα νερού είναι μεγαλύτερη κατά 1000m³ περίπου, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από το ετήσιο ποσοστό λειτουργίας της μονάδας (RO) το οποίο ανέρχεται σε 81.6 % της συνολικής διάρκειας του έτους, έναντι 65.9% για το σενάριο της μεγιστοποίησης της παραγόμενης αιολικής ισχύος. Ως προς το ειδικό κόστος του παραγόμενου νερού δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για δύο διήμερα του Ιανουαρίου στα

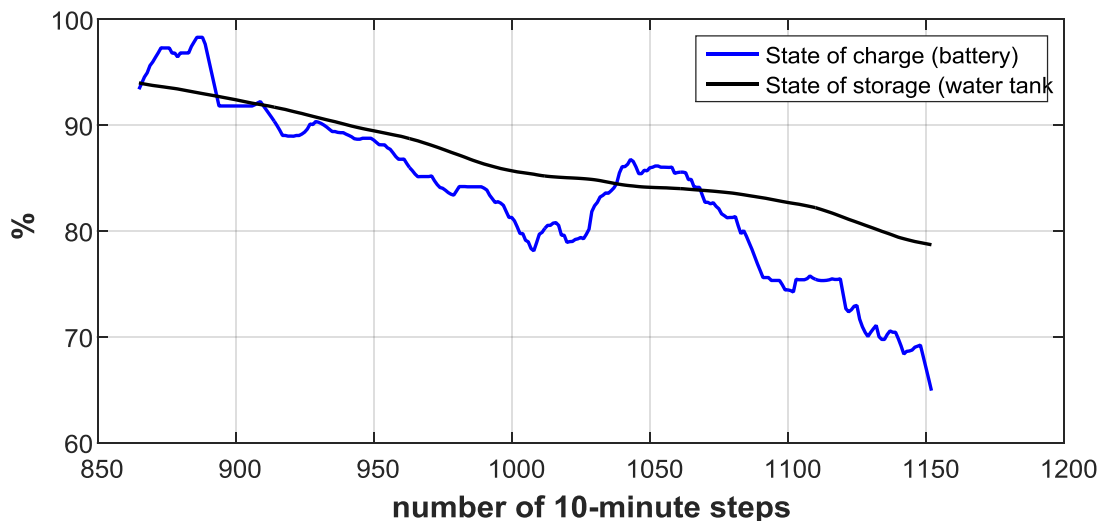
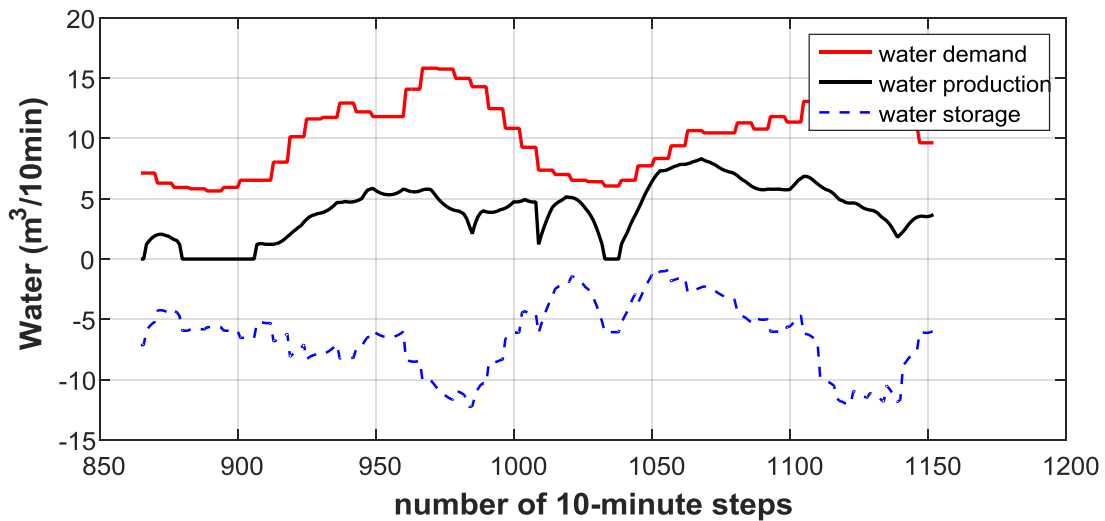
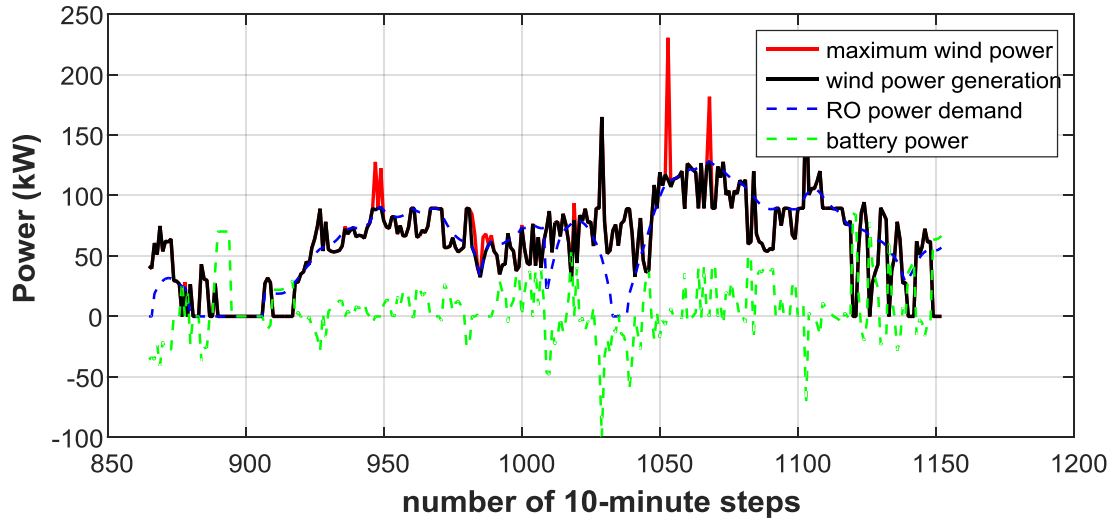
Σχήμα 33 και Σχήμα 34. Ειδικά στο 2ο διήμερο (7 - 8 Ιανουαρίου), που η αιολική ισχύς παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις είναι φανερό η λογική της στρατηγικής που εξετάζεται στην παρούσα ενότητα. Η καμπύλη της ισχύος λειτουργίας της μονάδας RO ακολουθεί την εξέλιξη της αιολικής παραγωγής, αλλά εμφανώς εξομαλυσμένη. Ως προς αυτό είναι καθοριστικός ο ρόλος της μπαταρίας, η συμμετοχή της οποίας είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε σχέση με τα σενάρια της ενότητας 4.2.

Στιγμιότυπο Ιανουάριος 1-2



Σχήμα 33: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Α/Γ (κόκκινο), παραγωγή Α/Γ (μαύρο), ισχύς λειτουργίας μονάδας RO (μπλε), ισχύς μπαταρίας (πράσινο). **Μέση:** ζήτηση νερού (κόκκινο), παραγωγή νερού (μαύρο), αποθήκευση νερού (μπλε). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας, κατάσταση δεξαμενής (sos).

Στιγμιότυπο Ιανουάριος 7-8



Σχήμα 34: **Πάνω:** μέγιστη δυνατή παραγωγή Α/Γ (κόκκινο), παραγωγή Α/Γ (μαύρο), ισχύς λειτουργίας μονάδας RO (μπλε), ισχύς μπαταρίας (πράσινο). **Μέση:** ζήτηση νερού (κόκκινο), παραγωγή νερού (μαύρο), αποθήκευση νερού (μπλε). **Κάτω:** κατάσταση (soc) μπαταρίας, κατάσταση δεξαμενής (sos).

4.3.2. Διαστασιολόγηση

Για το σενάριο με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου νερού, στο εξής Σενάριο 4 (συνεχίζεται η αρίθμηση της προηγούμενης ενότητας), προσομοιώνονται σενάρια διαστασιολόγησης των συνιστωσών του συστήματος, ώστε να αντιμετωπιστεί καταρχάς η περίπτωση αδυναμίας επίλυσης που εντοπίστηκε και να διερευνηθεί η επίπτωση στα χαρακτηριστικά λειτουργίας και το κόστος του παραγόμενου νερού.

Διερεύνηση ως προς τη χωρητικότητα της μπαταρίας

Προσομοιώνεται αρχικά η λειτουργία του συστήματος έχοντας αυξήσει χωρητικότητα της μπαταρία από 1000kWh σε 1400kWh. Ωστόσο από τον Πίνακα 13 διαπιστώνεται ότι δεν παρατηρείται ιδιαίτερη βελτίωση στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος και προπάντων δεν αποφεύγεται η κατάσταση αδυναμίας.

Αντιθέτως μάλιστα φαίνεται να αυξάνεται σημαντικά το ειδικό κόστος παραγόμενου νερού, από 1.615 €/m³ σε 1.679 €/m³. Η μεγαλύτερη μπαταρία παρά το γεγονός ότι εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής λόγω του ότι εμφανίζει μικρότερα βάθη εκφόρτισης, έχει ιδιαίτερα αυξημένο κόστος κτήσης και εν τέλει επιδρά αρνητικά στο κόστος του παραγόμενου νερού.

Πίνακας 13: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος - Διερεύνηση ως προς τη μπαταρία

	Διαστασιολόγηση	
	Σενάριο 4	Σενάριο 5
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	1000	1400
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	400	
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	12000	
Μονάδα RO (m ³ /day)	3150	
A/Γ (kW)	500	
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης		
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	422134.7	422315.6
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1156.5	1157.0
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	81.6%	81.3%
Ενέργεια παραγόμενη από την A/Γ (MWh)	1266.5	1268.5
Capacity factor A/Γ (%)	28.9%	29.0%
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	584.1	582.3
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1085.5	1086.0
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	210.7	220.9
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	105.0	110.0
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	105.7	110.9
Μέσο soc μπαταρίας (%)	67.5%	68.5%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	54008.7	54557.1
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	1614	1564
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	3.1%	3.0%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	1	1

Πίνακας 14: Δείκτες ζωής μπαταρίας - Διερεύνηση ως προς τη μπαταρία

Δείκτες ζωής μπαταρίας		
Κύκλοι μπαταρίας	1607	1305
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	7.8%	6.9%
Έτη ζωής μπαταρίας	13.6	13.4

Πίνακας 15: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού - Διερεύνηση ως προς μπαταρία

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1.615	1.679
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0.203	0.203
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.131	1.131
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.760	0.760
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.162	0.226
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.121	0.169
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.041	0.057
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος(€/m ³)	0.019	0.019

Διερεύνηση ως προς την Α/Γ

Βάσει των παραπάνω προκύπτει ότι η συνεχής αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας δεν αποτελεί συμφέρουσα οικονομικά λύση που να εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος, καθώς το όφελος που προσφέρει είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με την επιβάρυνση που προκαλεί στο κόστος του παραγόμενου νερού.

Ως επόμενο βήμα εξετάστηκε η προσομοίωση του συστήματος με μεγαλύτερη Α/Γ, με μέγιστη ισχύ παραγωγής 800 kW έναντι 500kW. Στη συνέχεια παράλληλα με την αύξηση της ισχύος της Α/Γ εξετάστηκε μια σειρά σεναρίων με μειούμενη χωρητικότητα μπαταρίας ξεκινώντας από τις 1000kWh του σεναρίου αναφοράς και καταλήγοντας στις 600kWh. Τα ετήσια αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 16: Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος - Διερεύνηση ως προς την Α/Γ και τη μπαταρία

	Σενάρια - Διαστασιολόγηση			
	Σενάριο 6	Σενάριο 7	Σενάριο 8	Σενάριο 9
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	1000	1000	800	600
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	400			
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	12000			
Μονάδα RO (m ³ /day)	3150			
Α/Γ (kW)	500	800		
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης				
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	422134.7	422707.9	422711.3	422834.3
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1156.5	1158.1	1158.1	1158.5
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	81.6%	62.1%	61.7%	61.9%
Ενέργεια παραγόμενη από την Α/Γ (MWh)	1266.5	1252.7	1250.0	1249.3
Capacity factor Α/Γ (%)	28.9%	17.9%	17.8%	17.8%
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	584.1	1997.8	2000.2	2000.9
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1085.5	1087.0	1087.0	1087.3
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	210.7	122.0	105.2	99.5
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	105.0	60.7	52.4	49.5
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	105.7	61.3	52.8	49.9
Μέσο soc μπαταρίας (%)	67.5%	62.9%	67.3%	65.7%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	54008.7	61717.3	61985.5	61943.8
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	1614	2201	2194	2151
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	3.1%	4.19%	4.17%	4.09%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	1	0	0	0

Πίνακας 17: Δείκτες ζωής μπαταρίας - Διερεύνηση ως προς την Α/Γ και τη μπαταρία

Δείκτες ζωής μπαταρίας				
Κύκλοι μπαταρίας	1607	686	691	784.5
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	7.8%	10.6%	11.5%	13.17%
Έτη ζωής μπαταρίας	13.6	24.7	24.3	21.1

Πίνακας 18: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού - Διερεύνηση ως προς την Α/Γ και τη μπαταρία

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1.615	1.620	1.596	1.572
Κόστος Α/Γ (€/m ³)	0.203	0.251	0.251	0.251
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.131	1.130	1.130	1.130
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.760	0.759	0.759	0.759
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.162	0.120	0.096	0.072
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.121	0.120	0.096	0.072
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.041	0.000	0.000	0.000
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος(€/m ³)	0.019	0.019	0.019	0.019

Πράγματι, με τη χρήση μεγαλύτερης Α/Γ δεν προκύπτουν πλέον καταστάσεις αδυναμίας επίλυσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Αυτό συμβαίνει γιατί για δεδομένο άνεμο, η Α/Γ των 800kW παράγει πολύ περισσότερη ισχύ σε σχέση με την Α/Γ των 500kW, συνεπώς η μονάδα RO λειτουργεί σε υψηλότερα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος με αποτέλεσμα να παράγει περισσότερο νερό και να αποθηκεύει το πλεόνασμα στη δεξαμενή. Αυτό δίνει την ευελιξία στο αυτόνομο σύστημα να μπορεί να ανταπεξέλθει στην κάλυψη της ζήτησης ακόμη και με μικρότερης χωρητικότητας μπαταρία και μάλιστα λειτουργώντας πολύ λιγότερο χρόνο μέσα στο έτος, αξιοποιώντας την περίσσεια νερού στη δεξαμενή. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι η ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή είναι κατά 7000 m³ μεγαλύτερη στα σενάρια με την Α/Γ των 800kW. Κατά τα άλλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα.

Από την παρούσα διερεύνηση αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι αποτελεί πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση η υπερδιαστασιολόγηση από την πλευρά της Α/Γ παρά από της μπαταρίας. Όπως παρατηρείται και από τον Πίνακα 18, το κόστος για την κτήση και εγκατάσταση μεγαλύτερης Α/Γ εξισορροπείται από το μειωμένο κόστος για κτήση και αντικατάσταση της μπαταρίας. Είναι αξιοσημείωτο το ότι για τα σενάρια 7, 8 και 9, με την επίλυση που προτείνει ο αλγόριθμος δεν απαιτείται αντικατάσταση της μπαταρίας εντός του χρόνου ζωής της επένδυσης του έργου αφαλάτωσης. Το ειδικό κόστος παραγόμενου νερού κυμαίνεται από 1.615 €/m³ σε 1.572 €/m³ μεταξύ των σεναρίων 6 και 9.

Διερεύνηση ως προς τη μονάδα RO

Το σενάριο 9 παραπάνω που αποτελεί μέχρι στιγμής το οικονομικότερο σενάριο για τη συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου προσομοιώνεται για μικρότερη μονάδα RO (σενάριο 10), με ικανότητα παραγωγής 2800 m³/day έναντι 3150 m³/day.

Από τα αποτελέσματα στους Πίνακες παρατηρείται ότι το αυτόνομο σύστημα μπορεί να ανταπεξέλθει στην κάλυψη της ζήτησης νερού, χωρίς καταστάσεις αδυναμίας, και με μικρότερη μονάδα RO. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα, ενώ η μείωση στην παραγόμενη ποσότητα νερού είναι ανεπαίσθητη (της τάξης των 300 m³ ετησίως). Παρατηρείται ελαφρώς αυξημένη χρήση της μπαταρίας και προκύπτει ότι θα χρειαστεί αντικατάσταση μία φορά εντός των 20 ετών λειτουργίας του έργου, ωστόσο το συνολικό ειδικό κόστος του παραγόμενου νερού προκύπτει κατά πολύ μειωμένο λόγω του σημαντικά μικρότερου κόστους κτήσης της μονάδας RO. Εξετάστηκε προσομοίωση και με ακόμα μικρότερη μονάδα RO με ικανότητα παραγωγής 2450 m³ /day δεδομένου ότι η μέγιστη ημερήσια ζήτηση, όπως προαναφέρθηκε στην 3.1.2 κυμαίνεται στα 2000 m³/day, ωστόσο δεν ήταν εφικτή η επίλυση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Αναδεικνύεται επομένως ακόμα μία φορά, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των αυτόνομων συστημάτων, δηλαδή το ότι απαιτούν υπερδιαστασιολόγηση για να λειτουργήσουν χωρίς εξωτερική υποστήριξη. Εν προκειμένω η μεγαλύτερη μονάδα RO

απαιτείται ώστε να παράγεται σημαντικό πλεόνασμα νερού τις μέρες που έχει αέρα και να αποθηκεύεται στη δεξαμενή πόσιμου νερού, με στόχο να διατεθεί προς κάλυψη της ζήτησης τις ημέρες όπου δεν φυσάει και δεν μπορεί να λειτουργήσει η μονάδα RO.

Πίνακας 19: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος - Διερεύνηση ως προς τη μονάδα RO

	Διαστασιολόγηση	
	Σενάριο 9	Σενάριο 10
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	600	
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	400	
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	12000	
Μονάδα RO (m ³ /day)	3150	2800
A/Γ (kW)	800	
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης		
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	422834.3	422587.6
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1158.5	1157.8
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	61.9%	66.5%
Ενέργεια παραγόμενη από την A/Γ (MWh)	1249.3	1250.6
Capacity factor A/Γ (%)	17.8%	17.8%
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	2000.9	1999.7
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1087.3	1086.9
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	99.5	109.3
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	49.5	54.5
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	49.9	54.9
Μέσο soc μπαταρίας (%)	65.7%	65.1%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	61943.8	56091.3
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	2151	1984
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	4.09%	3.77%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	0	0

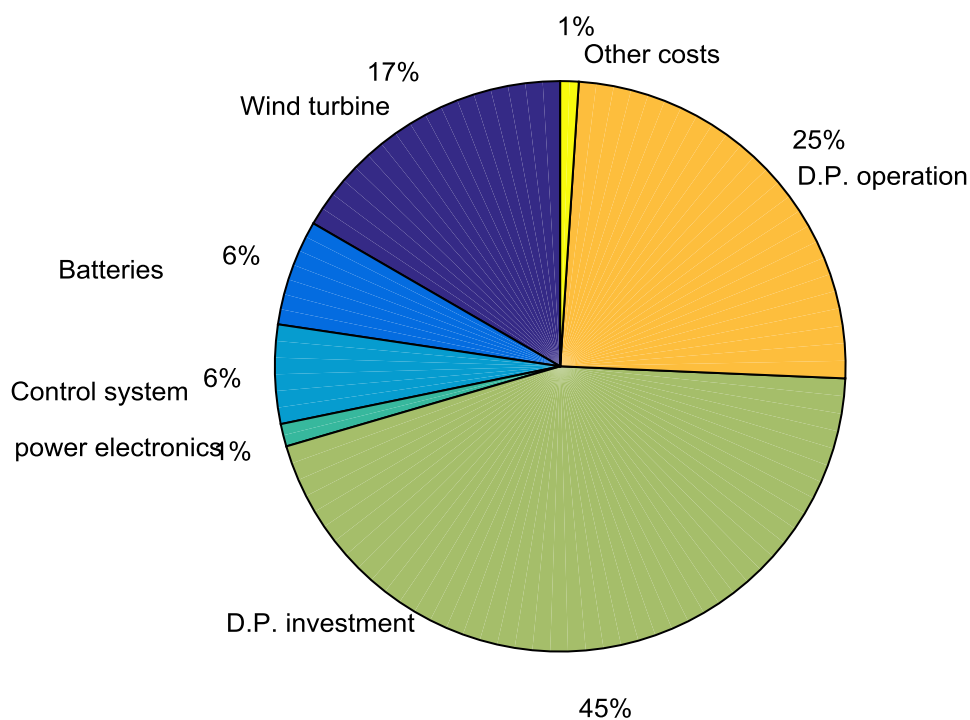
Πίνακας 20: Δείκτες ζωής μπαταρίας - Διερεύνηση ως προς τη μονάδα RO

Δείκτες ζωής μπαταρίας		
Κύκλοι μπαταρίας	785	980
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	13.2%	11.0%
Έτη ζωής μπαταρίας	21.1	17.2

Πίνακας 21: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού - Διερεύνηση ως προς τη μονάδα RO

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1.572	1.506
Κόστος A/Γ (€/m ³)	0.251	0.251
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.130	1.046
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.759	0.675
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.072	0.090
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.072	0.072
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.000	0.018
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος(€/m ³)	0.019	0.019

Στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται η ανάλυση του κόστους παραγωγής νερού για τη λειτουργία του συστήματος σύμφωνα με τη διαστασιολόγηση του σεναρίου 6. Παρατηρείται ότι το κόστος της μονάδας αφαλάτωσης RO αποτελεί το 70% του συνολικού κόστους του παραγόμενου νερού, με το σταθερό κόστος για την κτήση και την εγκατάσταση της μονάδας να αποτελεί το 45% και το λειτουργικό κόστος το 25%. Η αμέσως σημαντικότερη συνιστώσα του κόστους αφορά την κτήση και εγκατάσταση της Α/Γ, με συμμετοχή 17%.



Σχήμα 35: Ανάλυση κόστους παραγόμενου νερού για το σενάριο 6

4.4. Σύγκριση στρατηγικών ελέγχου

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται οι βασικές αρχές των δύο στρατηγικών ελέγχου που διερευνήθηκαν στις ενότητες 4.2, 4.2 και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

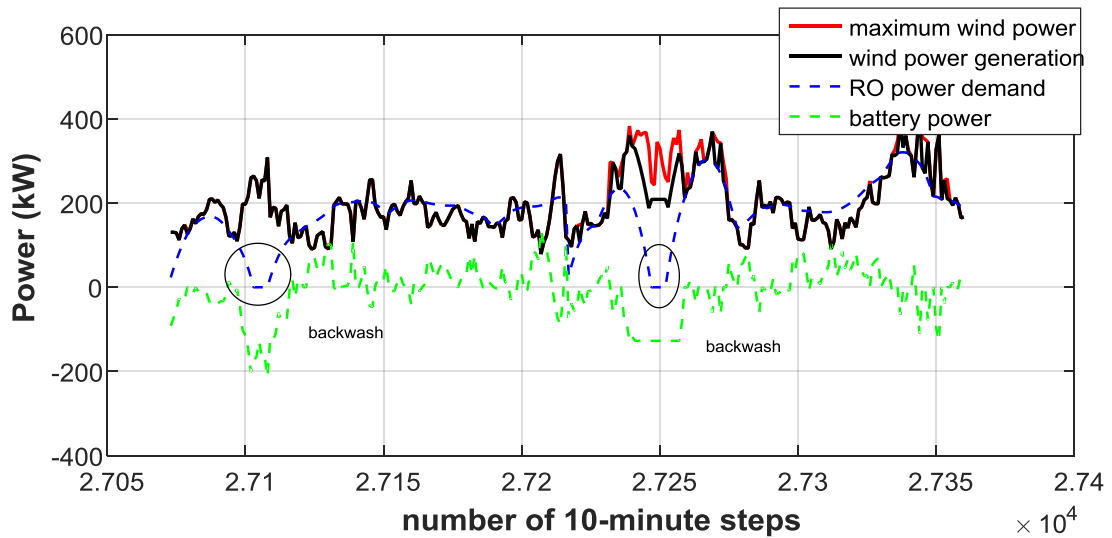
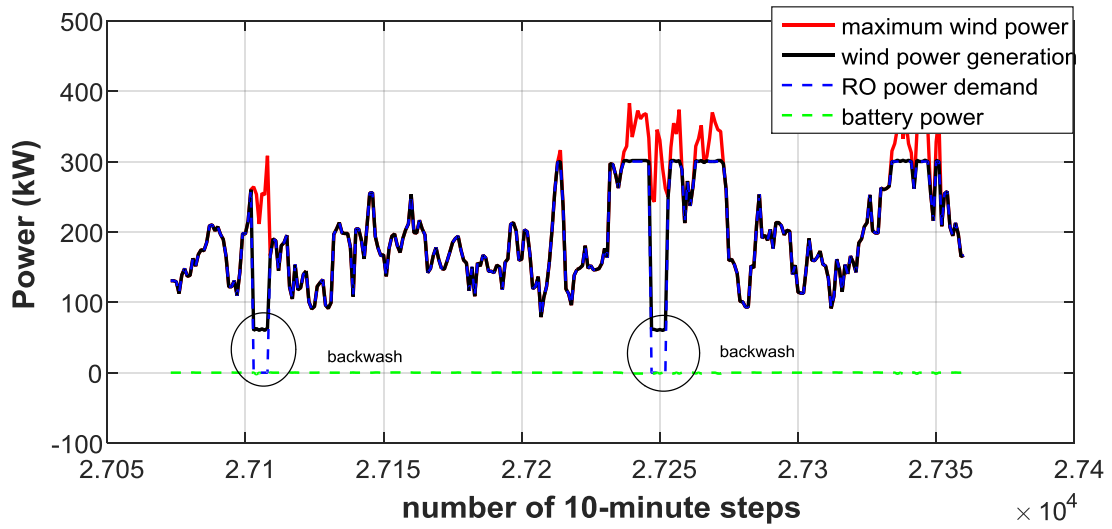
Η στρατηγική παρόντος φορτίου επιβάλλει μία πολιτική που προϋποθέτει μεγάλη ευελιξία από πλευράς μονάδας RO. Σύμφωνα με αυτήν την πολιτική διαχείρισης η ισχύ της μονάδας RO προσαρμόζεται άμεσα στην μεταβλητή εισερχόμενη ισχύ της Α/Γ ώστε να αξιοποιείται όσον το δυνατόν περισσότερο η διαθέσιμη αιολική παραγωγή. Ως εκ τούτου, ο ρόλος της μπαταρίας περιορίζεται κυρίως στην διασφάλιση της πλήσης σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί το αιολικό

δυναμικό. Οι μικρές απαιτήσεις ως προς τη διαστασιολόγηση της μπαταρίας οδηγούν σε χαμηλό σχετικά κόστος παραγόμενου νερού, της τάξης 1.35 - 1.45 €/m³, κάτι το οποίο αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης στρατηγικής. Από την άλλη πλευρά, πρόκειται για μια στρατηγική που καταπονεί ιδιαίτερα το μηχανολογικό εξοπλισμό της μονάδας RO, τόσο λόγω των απότομων μεταβολών της ισχύος λειτουργίας της όσο και της υψηλής συχνότητας εκκινήσεων και σβέσεων. Δεν είναι γνωστό κατά πόσο η εφαρμογή τη συγκεκριμένης στρατηγικής είναι ρεαλιστική σε μονάδες του εμπορίου. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ένα ταχύτατης απόκρισης σύστημα ελέγχου.

Η στρατηγική ομαλών μεταβολών αποτελεί την πιο ρεαλιστική επιλογή. Η μονάδα RO μπορεί να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ισχύος, ωστόσο η ισχύς λειτουργίας της προσαρμόζεται ομαλά, κατά τάξη μεγέθους στη μεταβλητή ισχύς της Α/Γ, ελαχιστοποιώντας έτσι την καταπόνηση του μηχανολογικού εξοπλισμού της μονάδας RO και περιορίζοντας τον συνολικό αριθμό εκκινήσεων /σβέσεων μέσα στο έτος. Αυτό ωστόσο έχει το μειονέκτημα ότι απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη μπαταρία ώστε να μπορεί να εξομαλύνει την ισχύ λειτουργίας της RO, επιδρώντας αρνητικά στο κόστος του παραγόμενου νερού. Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι για τη συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου το ειδικό κόστος παραγωγής νερού είναι της τάξης των 1.5 - 1.65 €/m³.

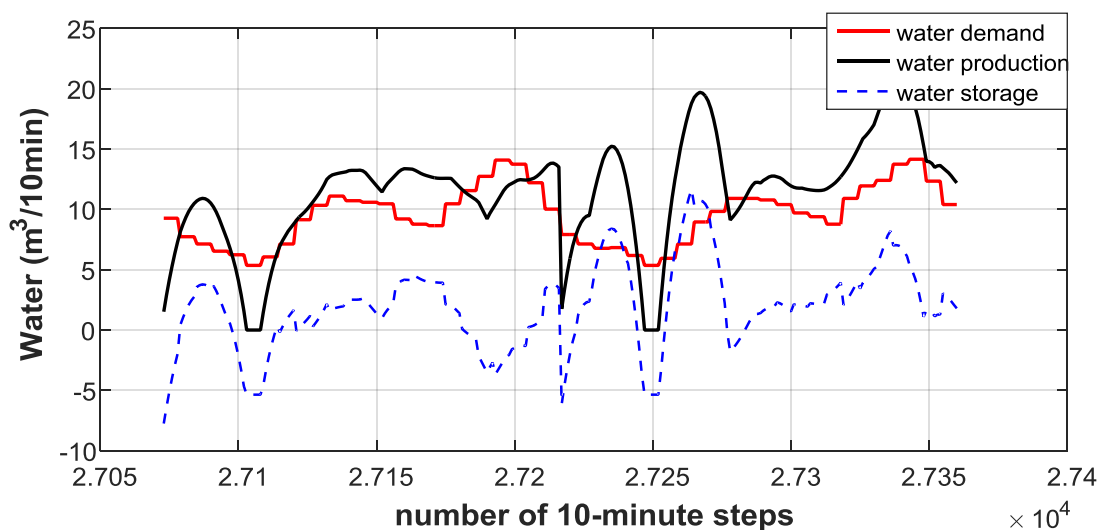
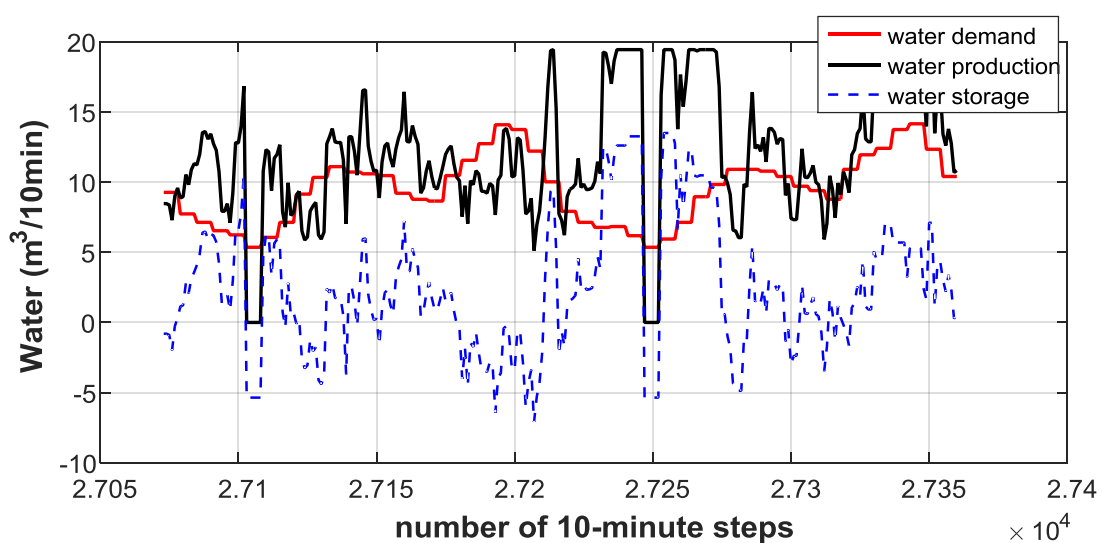
Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά στιγμιότυπα από τη λειτουργία του συστήματος μέσα στο έτος, παραθετικά για κάθε στρατηγική. Κάθε σχήμα περιλαμβάνει δύο γραφήματα, το πάνω γράφημα αφορά τη στρατηγική παρόντος φορτίου και το κάτω τη στρατηγική των ομαλών μεταβολών.

Ενεργειακό ισοζύγιο συστήματος - Στιγμιότυπο Ιούλιος 8 - 9



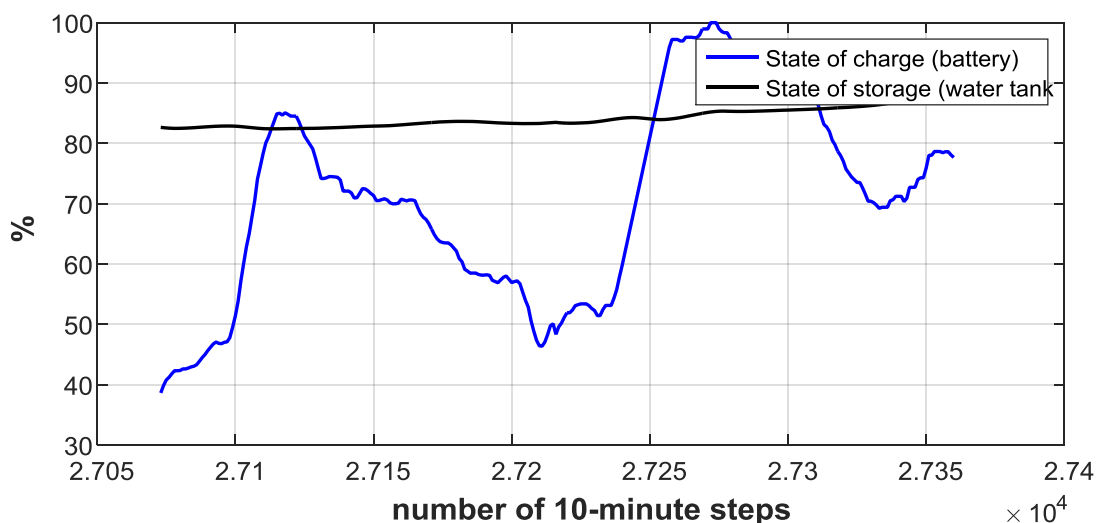
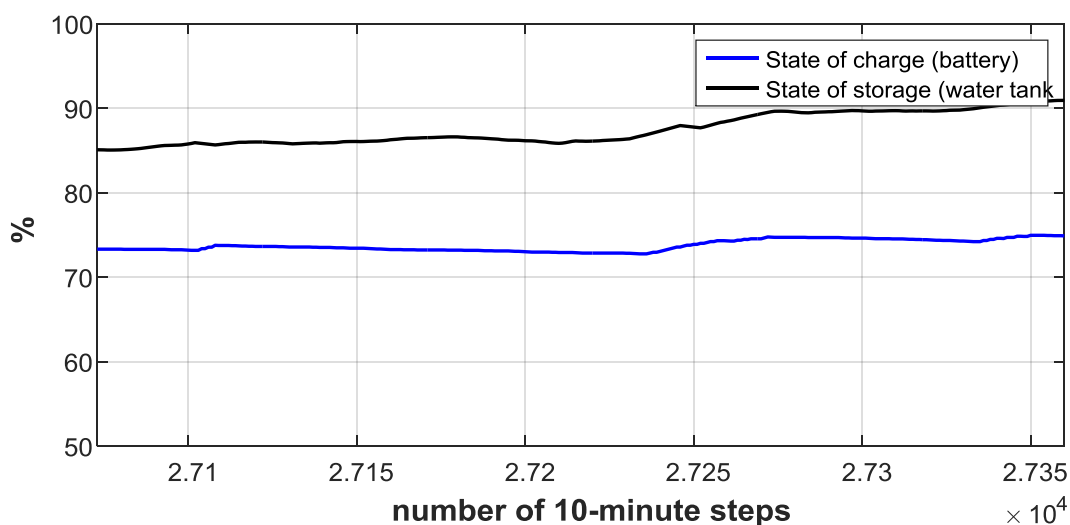
Σχήμα 36: Ενεργειακό ισοζύγιο συστήματος. Πάνω: Στρατηγική παρόντος φορτίου. Κάτω: Στρατηγική ομαλών μεταβολών

Ισοζύγιο παραγωγής / ζήτηση νερού - Στιγμιότυπο Ιούλιος 8 - 9



Σχήμα 37: Ισοζύγιο παραγωγής - ζήτησης. **Πάνω:** Στρατηγική παρόντος φορτίου. **Κάτω:** Στρατηγική ομαλών μεταβολών

Καταστάσεις μπαταρίας / δεξαμενής - Στιγμιότυπο Ιούλιος 8 - 9



Σχήμα 38: Καταστάσεις μπαταρίας - δεξαμενής. Πάνω: Στρατηγική παρόντος φορτίου. Κάτω: Στρατηγική ομαλών μεταβολών.

4.5.Στρατηγική απλής διαχείρισης

Για λόγους πληρότητας της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια κατάστρωσης του καταλληλότερου αλγορίθμου με σκοπό τον έλεγχο του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης πραγματοποιήθηκε ετήσια προσομοίωση και με την απλή στρατηγική ελέγχου που περιγράφηκε στην ενότητα 2.4. Επισημαίνεται ότι η απλή στρατηγική ελέγχου δεν μπορεί να ενσωματώσει περιορισμό για ομαλές μεταβολές ισχύος της μονάδας RO, συνεπώς η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη στρατηγική βελτιστοποίησης παρόντος φορτίου. Τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης παρατίθενται προς σύγκριση με αυτά του σεναρίου 3 .

Πίνακας 22: Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος - Σύγκριση βελτιστοποίησης με απλή λογική ελέγχου

	Αλγόριθμος ελέγχου	
	Βελτιστοποίηση	Απλή στρατηγική
Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	200	
Μέγιστη ισχύς μπαταρίας (kW)	100	
Χωρητικότητα δεξαμενής (m ³)	16000	
Μονάδα RO (m ³ /day)	2800	
A/Γ (kW)	500	
Δείκτες λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης		
Συνολική παραγωγή νερού (m ³)	423408.3	424058.1
Μέση ημερήσια παραγωγή νερού (m ³ /day)	1160.0	1161.8
Ποσοστό λειτουργίας Μ.Α. (%)	70.7%	83.1%
Ενέργεια παραγόμενη από την A/Γ (MWh)	1237.2	1237.9
Capacity factor A/Γ (%)	0.3	28.1%
Απορριπτόμενη αιολική ενέργεια (MWh)	610.4	614.9
Ενέργεια καταναλισκόμενη από τη Μ.Α. (MWh)	1089.0	1089.8
Συνολική ενέργεια που διακινείται μέσω των μπαταριών (MWh)	16.4	10.5
Αιολική ενέργεια για φόρτιση της μπαταρίας (MWh)	8.2	5.3
Ενέργεια μπαταρίας προς Μ.Α. (MWh)	8.2	5.3
Μέσο soc μπαταρίας (%)	68.2%	94.4%
Συνολική ποσότητα νερού που διακινείται από τη δεξαμενή (m ³)	59506.0	45422.0
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α.	4277	1911
Αριθμός εκκινήσεων Μ.Α. ως ποσοστό του έτους	8.1%	3.6%
Περιστατικά αδυναμίας ελέγχου	0	32

Πίνακας 23: Δείκτες ζωής μπαταρίας - Σύγκριση βελτιστοποίησης με απλή λογική ελέγχου

Δείκτες ζωής μπαταρίας		
Κύκλοι μπαταρίας	654	170
Μέσο βάθος εκφόρτισης κύκλου (%)	6.5%	18.1%
Έτη ζωής μπαταρίας	26.8	60.6

Πίνακας 24: Ειδικά κόστη παραγόμενου νερού - Σύγκριση βελτιστοποίησης με απλή λογική ελέγχου

Συνολικό ειδικό κόστος παραγωγής νερού (€/m³)	1.375	1.374
Κόστος A/Γ (€/m ³)	0.202	0.202
Κόστος Μ.Α. (€/m ³)	1.044	1.043
→ Αρχικό κόστος επένδυσης Μ.Α. (€/m ³)	0.673	0.672
→ Λειτουργικό κόστος Μ.Α. (€/m ³)	0.371	0.371
Κόστος μπαταρίας (€/m ³)	0.024	0.024
→ Αρχικό κόστος κτήσης μπαταρίας (€/m ³)	0.024	0.024
→ Κόστος αντικατάστασης μπαταρίας (€/m ³)	0.000	0.000
Κόστος ηλεκτρονικών ισχύος(€/m ³)	0.005	0.005

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές οι δύο στρατηγικές ελέγχου δίνουν παρόμοια λειτουργικά χαρακτηριστικά και ίδιο κόστος παραγόμενου νερού. Η απλή

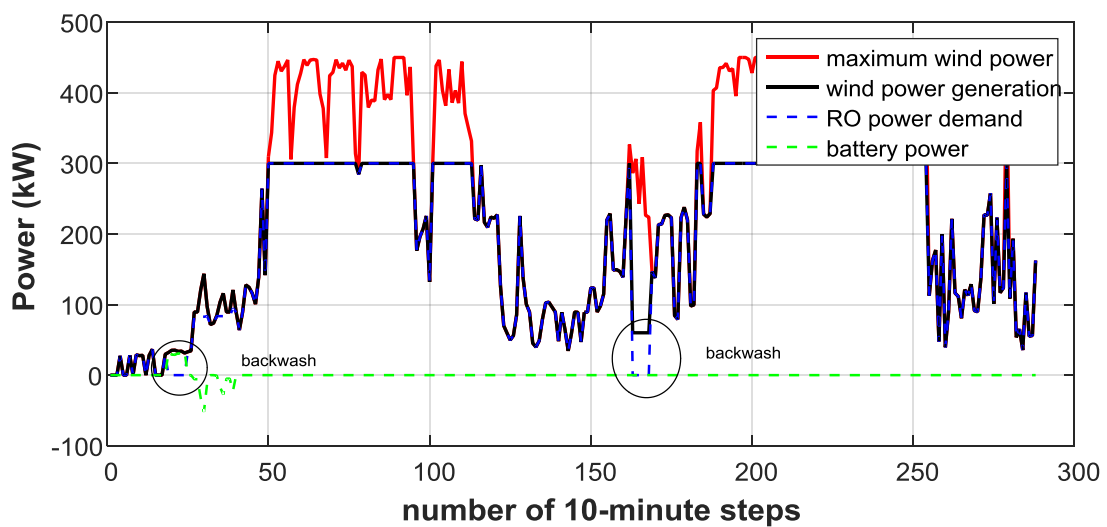
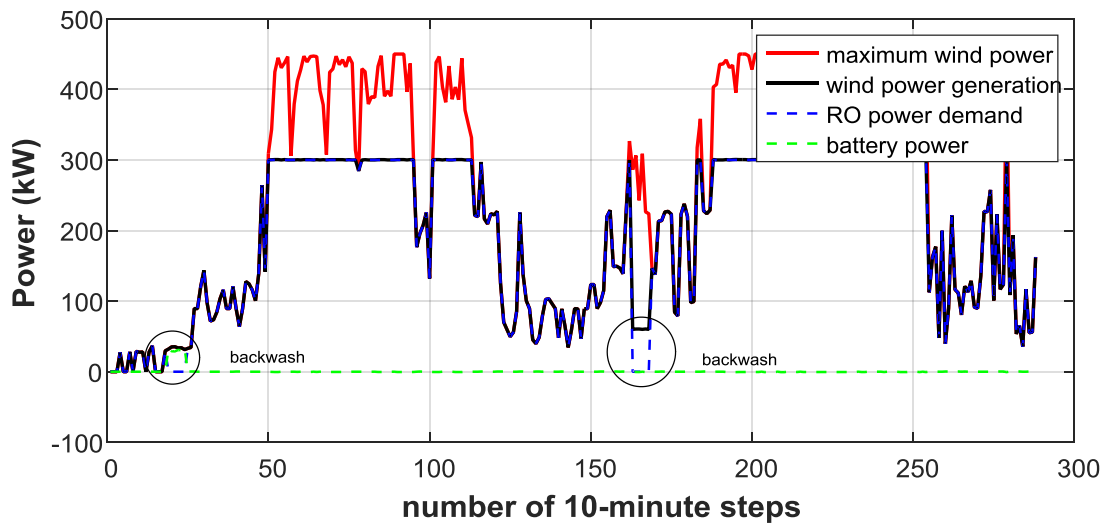
στρατηγική ελέγχου μάλιστα φαίνεται να επιτυγχάνει πολύ μικρή αύξηση της παραγόμενης ποσότητας νερού (κατά 500 m³ ετησίως) με αυξημένο ποσοστό λειτουργίας της μονάδας RO μέσα στο έτος κατά 10% . Επιπλέον παρατηρείται μικρότερη χρήση της μπαταρίας και πολύ μικρότερος αριθμός εκκινήσεων της μονάδας RO σε σχέση με τη στρατηγική βελτιστοποίησης.

Η ουσιαστική όμως διαφορά μεταξύ των δύο στρατηγικών που αποδεικνύει και την υπεροχή της στρατηγικής βελτιστοποίησης, έγκειται στο ότι για την ίδια διαστασιολόγηση, η απλή στρατηγική έρχεται αντιμέτωπη με 32 καταστάσεις αδυναμίας ελέγχου. Μετά από αναλυτική διερεύνηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι πρόκειται για 32 περιστατικά αδυναμίας ολοκλήρωσης της πλύσης των πολυστρωματικών φίλτρων. Αυτό είναι σοβαρό πρόβλημα, ειδικά αν αυτά τα περιστατικά προκύψουν κοντά χρονικά μεταξύ τους, καθώς λόγω των αυξημένων ποσοτήτων μετεωρίτη στο θαλασσινό νερό, υπάρχει αυξημένος κίνδυνος έμφραξης τους και κατά συνέπεια αδυναμίας λειτουργίας του σταδίου προεπεξεργασίας του νερού.

Ο λόγος που η στρατηγική βελτιστοποίησης υπερτερεί έναντι της απλής στρατηγικής είναι ότι επιλύει το πρόβλημα λαμβάνοντας υπόψη και τις μελλοντικές συνθήκες αέρα και ζήτησης νερού, προβλέποντας έτσι πιθανές καταστάσεις αδυναμίας και ως εκ τούτου προτείνοντας καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων. Αντιθέτως, η απλή στρατηγική ελέγχου επιλύει το πρόβλημα συντονισμού των συνιστωσών του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη μόνο το τρέχον 10λεπτο, αγνοώντας μελλοντικές καταστάσεις.

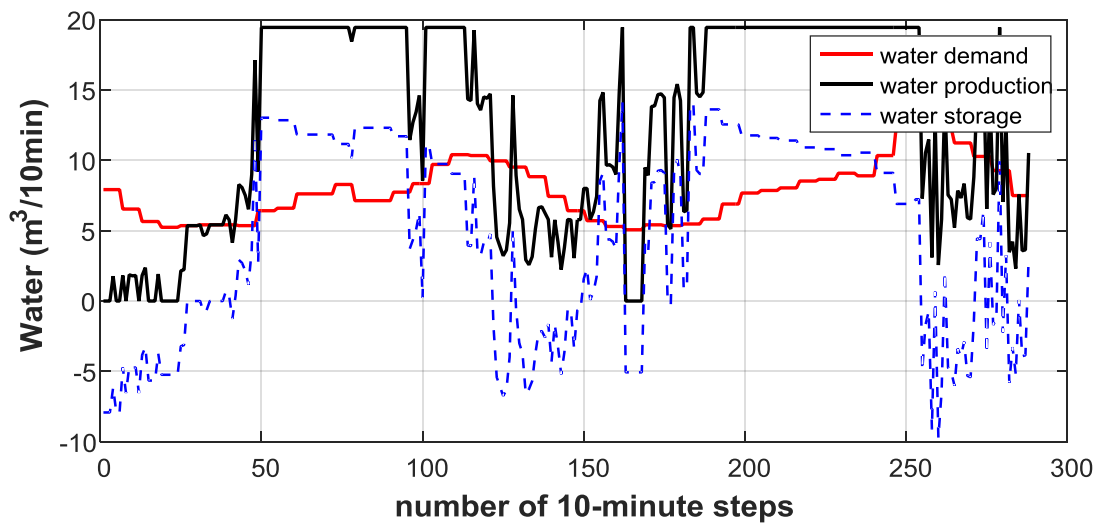
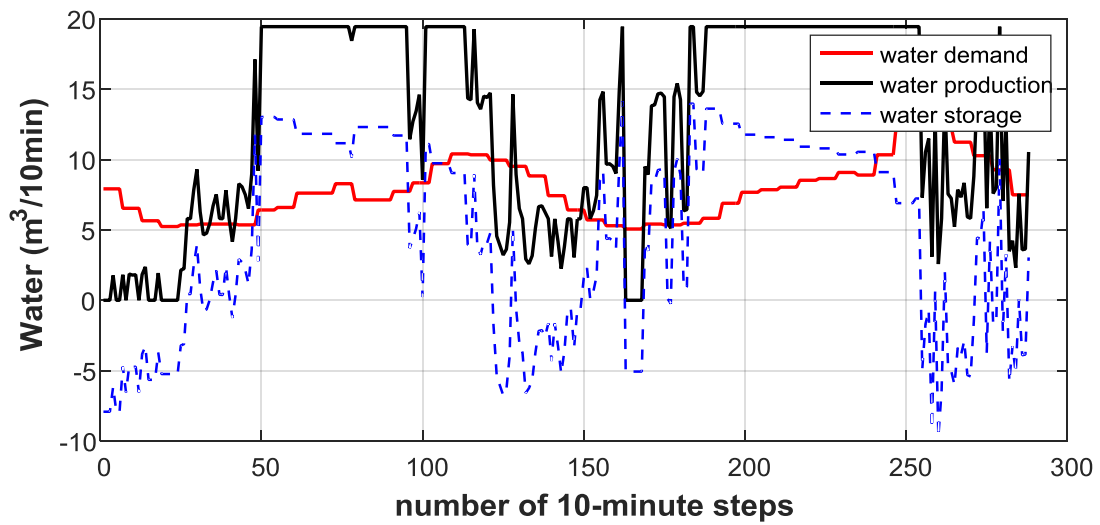
Παρατίθενται και τα γνωστά στιγμιότυπα λειτουργίας του συστήματος, για το πρώτο διήμερο του Ιανουαρίου. Είναι αξιοσημείωτο ότι και οι δυο στρατηγικές προτείνουν την ίδια διαχείριση του συστήματος, με μια μικρή διαφορά στη φόρτιση της μπαταρίας

Ενεργειακό ισοζύγιο συστήματος - Στιγμιότυπο Ιανουάριος 1 - 2



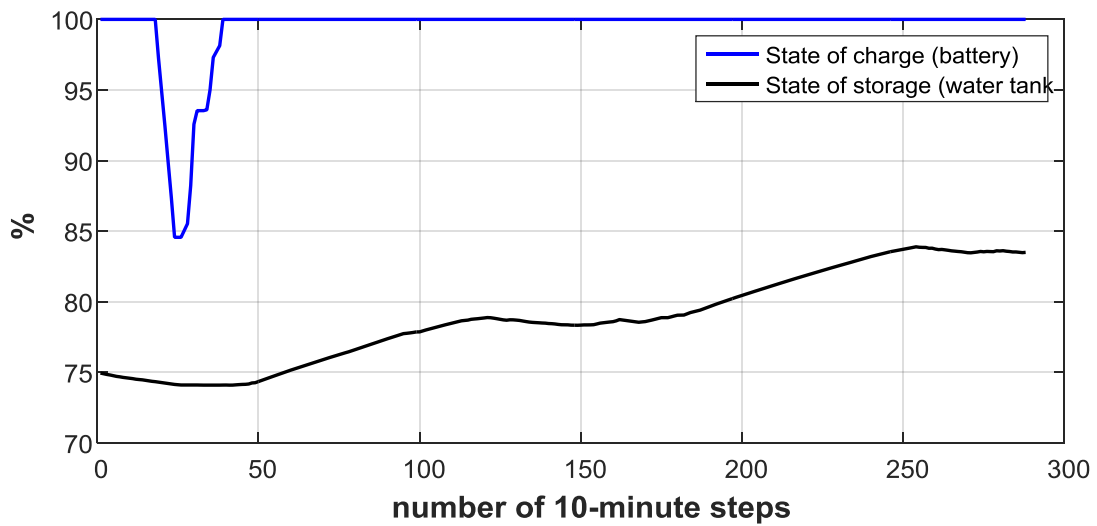
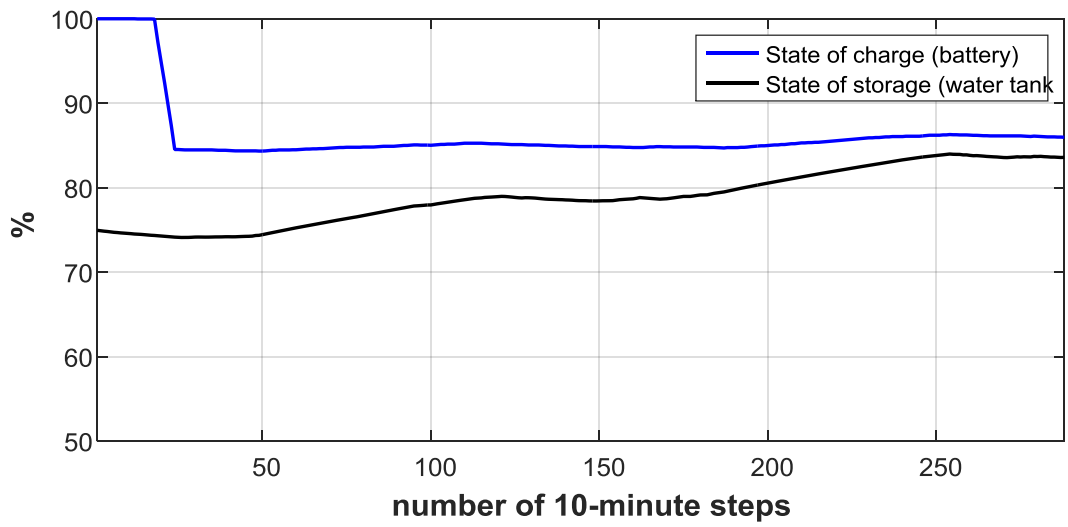
Σχήμα 39: Ενεργειακό ισοζύγιο συστήματος. **Πάνω:** Στρατηγική παρόντος φορτίου. **Κάτω:** Απλή στρατηγική.

Ισοζύγιο παραγωγής / ζήτηση νερού - Στιγμιότυπο Ιανουάριος 1 - 2



Σχήμα 40: Ισοζύγιο παραγωγής - ζήτησης. **Πάνω:** Στρατηγική παρόντος φορτίου. **Κάτω:** Απλή στρατηγική.

Καταστάσεις μπαταρίας / δεξαμενής - Στιγμιότυπο Ιανουάριος 1-2



Σχήμα 41: Καταστάσεις μπαταρίας - δεξαμενής. **Πάνω:** Στρατηγική παρόντος φορτίου. **Κάτω:** Απλή στρατηγική.

Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Συγκεντρωτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επικεντρώθηκε στη μοντελοποίηση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης, μεγάλης κλίμακας, με δυνατότητα εφαρμογής σε ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα με σκοπό την εξολοκλήρου κάλυψη των υδρευτικών αναγκών του νησιού. Το σύστημα που εξετάστηκε περιλαμβάνει τις εξής συνιστώσες: μία μονάδα αφαλάτωσης τεχνολογίας RO, μία Α/Γ, συστοιχίες μπαταριών και δεξαμενή πόσιμου νερού.

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος περιλαμβάνει κατά σειρά τα εξής στάδια:

- Κατάστρωση του αλγορίθμου ελέγχου του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης
- Παραμετρική διερεύνηση ως προς τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου
- Εκτέλεση ετήσιων προσομοιώσεων προς δύο κατευθύνσεις διερεύνησης:
 - Στρατηγική διαχείρισης της λειτουργίας του συστήματος
 - Βέλτιστη διαστασιολόγηση των συνιστωσών του συστήματος

Η κατάστρωση του αλγορίθμου ελέγχου και η μαθηματική μοντελοποίησή του αποτέλεσε μία από τις βασικότερες επιδιώξεις της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για τον αλγόριθμο που ορίζει τη λειτουργία και τη διαχείριση του συστήματος, με γνώμονα την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης νερού, υπό χαμηλό κόστος παραγωγής και επιτυγχάνοντας καλά λειτουργικά χαρακτηριστικά για τις συνιστώσες του συστήματος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα ως πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού τετραγωνικού κόστους. Προτιμήθηκε η μοντελοποίηση του ως πρόβλημα βελτιστοποίησης έναντι απλών λογικών ελέγχου, όχι μόνο για επιτευχθεί ο βέλτιστος συντονισμός μεταξύ των συνιστωσών του, αλλά γιατί ο σχεδιασμός του ελέγχου ενός τέτοιου συστήματος στην πράξη είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος ώστε να δομηθεί με απλή λογική. Στην τελευταία περίπτωση αυξάνεται η πιθανότητα σφαλμάτων και καταστάσεων αδυναμίας επίλυσης του αλγορίθμου, καθώς δεν μπορούν να προβλεφθούν όλες οι πιθανές καταστάσεις λειτουργίας. Επιπλέον η διατύπωση ως πρόβλημα βελτιστοποίησης προσφέρει ευελιξία στην παραμετροποίηση και στην ενσωμάτωση λειτουργικών περιορισμών και διαφορετικών πολιτικών διαχείρισης. Ωστόσο καταστρώθηκε και μια απλή στρατηγική ελέγχου για λόγους σύγκρισης.

Σημαντικό σημείο της διερεύνησης αποτέλεσε η επιλογή του ορίζοντα βελτιστοποίησης. Μετά από πλήθος προσομοιώσεων διαπιστώθηκε ότι η καταλληλότερη τεχνική για την επίτευξη ετήσιων προσομοιώσεων και αντιμετώπισης καταστάσεων αδυναμίας επίλυσης του

προβλήματος βελτιστοποίησης, είναι η κυλιόμενη επίλυση ανά μέρα, με ορίζοντα βελτιστοποίησης μεγαλύτερο της ημέρας. Αυτή η τεχνική πλεονεκτεί σε σχέση με την απλή κυλιόμενη επίλυση στο ότι επιτρέπει την βελτιστοποίηση της τρέχουσας χρονικής περιόδου (εν προκειμένω μία ημέρα) έχοντας λάβει υπόψη τα μελλοντικά χρονικά περιθώρια, ως μέτρο πρόβλεψης μελλοντικών δυσμενών καταστάσεων (π.χ. χαμηλό αιολικό δυναμικό ή/και υψηλή ζήτηση νερού) και πρόληψης σπατάλης πόρων (μπαταρία, δεξαμενή) ώστε να μην βρεθεί ο αλγόριθμος ελέγχου σε καταστάσεις αδυναμίας κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό.

Προς επιλογή της κατάλληλης τάξης μεγέθους των παραμέτρων που αφορούν τις συνιστώσες του συστήματος, προηγήθηκε διερεύνηση των εμπορικών μοντέλων που κυκλοφορούν στην αγορά. Ειδικά όσον αφορά τη μονάδα RO εξετάστηκε μονάδα με δυνατότητα λειτουργίας σε μεταβλητή ισχύ εισόδου. Επιπλέον κατασκευάστηκε χρονοσειρά ζήτησης νερού μέσω μεθοδολογίας που συσχετίζει τη ζήτηση νερού με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά τις ετήσιες προσομοιώσεις, διερευνήθηκαν καταρχάς δύο βασικές στρατηγικές διαχείρισης της λειτουργίας του συστήματος, η στρατηγική παρόντος φορτίου και η στρατηγική ομαλών μεταβολών της ισχύος της μονάδας RO. Για κάθε στρατηγική πραγματοποιήθηκε δεύτερος κύκλος διερευνήσεων, ως προς την κατάλληλη διαστασιολόγηση με στόχο την απρόσκοπτη κάλυψη της ζήτησης νερού και το χαμηλό κόστος παραγωγής.

Η στρατηγική παρόντος φορτίου επιβάλλει μία πολιτική που προϋποθέτει μεγάλη ευελιξία από πλευράς μονάδας RO. Σύμφωνα με αυτήν την πολιτική διαχείρισης η ισχύ της μονάδας RO προσαρμόζεται άμεσα στην μεταβλητή εισερχόμενη ισχύ της Α/Γ ώστε να αξιοποιείται όσον το δυνατόν περισσότερο η διαθέσιμη αιολική παραγωγή. Ως εκ τούτου, ο ρόλος της μπαταρίας περιορίζεται κυρίως στην διασφάλιση της πλήσης σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί το αιολικό δυναμικό. Οι μικρές απαιτήσεις ως προς τη διαστασιολόγηση της μπαταρίας οδηγούν σε χαμηλό σχετικά κόστος παραγόμενου νερού, της τάξης 1.35 - 1.45 €/m³, κάτι το οποίο αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης στρατηγικής. Από την άλλη πλευρά, πρόκειται για μια στρατηγική που καταπονεί ιδιαίτερα το μηχανολογικό εξοπλισμό της μονάδας RO, τόσο λόγω των απότομων μεταβολών της ισχύος λειτουργίας της όσο και της υψηλής συχνότητας εκκινήσεων και σβέσεων. Δεν είναι γνωστό κατά πόσο η εφαρμογή τη συγκεκριμένης στρατηγικής είναι ρεαλιστική σε μονάδες του εμπορίου. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ένα ταχύτατης απόκρισης σύστημα ελέγχου.

Η στρατηγική ομαλών μεταβολών αποτελεί την πιο ρεαλιστική επιλογή. Η μονάδα RO μπορεί να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ισχύος, ωστόσο η ισχύς λειτουργίας της προσαρμόζεται ομαλά, κατά τάξη μεγέθους στη μεταβλητή ισχύς της Α/Γ, ελαχιστοποιώντας έτσι την καταπόνηση του μηχανολογικού εξοπλισμού της μονάδας RO και περιορίζοντας τον συνολικό αριθμό εκκινήσεων /σβέσεων μέσα στο έτος. Αυτό ωστόσο έχει το μειονέκτημα ότι απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη μπαταρία ώστε να μπορεί να εξομαλύνει την ισχύ λειτουργίας της RO, επιδρώντας αρνητικά στο κόστος του παραγόμενου νερού. Από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι

για τη συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου το ειδικό κόστος παραγωγής νερού είναι της τάξης των 1.5 - 1.65 €/m³.

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της στρατηγικής παρόντος φορτίου με την απλή στρατηγικής ελέγχου. Επιβεβαιώθηκε αυτό που αναφέρθηκε και παραπάνω ότι δηλαδή η μοντελοποίηση με βελτιστοποίηση υπερέχει αφενός γιατί μπορεί να ενσωματώσει πιο σύνθετες πολιτικές διαχείρισης (εν προκειμένω στρατηγική ομαλών μεταβολών) και αφετέρου γιατί μπορεί να προβλέψει μελλοντικές καταστάσεις αδυναμίας.

Βασικό συμπέρασμα που προκύπτει ως προς τη διαστασιολόγηση αυτόνομων συστημάτων μεγάλης κλίμακας είναι ότι είναι η αναπόφευκτη η υπερδιαστασιολόγηση όλων των υποσυστημάτων του έργου (μονάδες αφαλάτωσης, μονάδες ΑΠΕ, μπαταρίες, δεξαμενές λειτουργίας) καθώς το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να καλύπτει τη ζήτηση νερού σε ετήσια βάση και σε επίπεδο ημερήσιας αιχμής, αλλά κυρίως να μπορεί να ανταποκρίνεται άμεσα και στις ημερήσιες διακυμάνσεις.

Η παρουσία συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία) είναι απαραίτητη για την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος αφενός για την παροχή αυτονομίας στη μονάδα αφαλάτωσης για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, σε περίπτωση που δεν επαρκεί η διαθέσιμη αιολική ενέργεια και αφετέρου για την εξομάλυνση των διαταραχών που μπορεί να προκληθούν από το συνδυασμό της χρονικά μεταβαλλόμενης αιολικής ενέργειας με τις απαιτήσεις σταθερής ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Ωστόσο δεν μπορεί να βασιστεί η αυτονομία ενός συστήματος αποκλειστικά και μόνο στην μπαταρία, για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της ημέρας. Από ένα σημείο και μετά η υπερδιαστασιολόγηση της μπαταρίας επιβαρύνει το κόστος του συστήματος, χωρίς να παρέχει την αντίστοιχη αξιοπιστία. Για να διασφαλιστεί η πλήρης αυτονομία σε καταστάσεις πολυήμερης άπνοιας και υψηλής ζήτησης νερού απαιτείται η χρήση πιο αξιόπιστων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. Η/Ζ με καύσιμο diesel.

Επίσης σημαντικό ρόλο στην δυνατότητα πλήρους αυτόνομης λειτουργίας ενός συστήματος αφαλάτωσης παίζει και το μέγεθος της δεξαμενής πόσιμου νερού. Αν το νησί διαθέτει μεγάλης δυναμικότητας δεξαμενές μπορεί να περιοριστεί ως ένα βαθμό η υπερδιαστασιολόγηση του ηλεκτρικού μέρους του συστήματος.

5.2.Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Βάσει των όσων αναφέρθηκαν στην παραπάνω ενότητα, ως επέκταση της παρούσας εργασίας μπορούν να αποτελέσουν τα εξής

- Μοντελοποίηση της λειτουργίας του συστήματος ως υβριδικού, με ενσωμάτωση ντηζελογεννήτριας και διερεύνηση της επίπτωσης στη διαστασιολόγηση, το κόστος και την αξιοπιστία του συστήματος.

- Να ληφθεί υπόψη σφάλμα πρόβλεψης ανέμου που θα έρχεται ως διαταραχή και ο αλγόριθμος θα πρέπει να αναπροσαρμόσει τη λύση (MPC).
- Διερεύνηση λειτουργίας ως smart grid, δηλαδή δυνατότητα επιλογής διπλής κατάστασης λειτουργίας είτε ως αυτόνομο σύστημα είτε σε σύνδεση με το υφιστάμενο δίκτυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Νικόλαος Υφαντής, “Σχεδιασμός και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης νερού με αντίστροφη όσμωση - Μελέτες περιπτώσεων”. *Διδακτορική διατριβή*
- [2] Γ. Κάραλης, Γ. Εμμανουηλίδης, “Μονάδες αφαλάτωσης στα άνυδρα νησιά του Αιγαίου”. *Ενεργειακό Γραφείο Του - Αιγαίου*, Ιανουάριος 2011.
- [3] ΕΠΙΣΕΥ - ΕΜΠ, “Στρατηγικές ελέγχου και παραμετρική διερεύνηση της λειτουργίας του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης”. *Τομείς Ηλεκτρικής Ισχύος και Σημάτων, Ελέγχου & Ρομποτικής*, Φεβρουάριος 2006.
- [4] R. H. Newnhan, W. G. A. Baldsing, “Benefits of partial-state-of-charge operation in remote - aea power - supply systems”. *Journal of Power Sources*, 107 (2002) 273 -279.
- [5] E. Tzen, R. Morris, “Renewable energy sources for desalination”. *Solar Energy*, 75 (2003) 375 - 379.
- [6] Baltasar Penate, Fernando Castellano, Alejandro Bello, Lourdes Garcia-Rodriguez, “Assessment of a stand-alone gradual capacity reserve osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: A case study”. *Energy*, 36 (2011) 4372 - 4384.
- [7] J. A. Carta, J. Gonzalez, V. Subiela, “Operational analysis of an innovative wind powered reserve osmosis system installed in the Canary Islands”. *Solar Energy*, 75 (2003) 153 - 168.
- [8] Qingfen Ma, Hui Lu, “Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state- of -the-art”. *Desalination*, 277 (2011) 274 - 280.
- [9] Lauren F.Greenlee, Desmond F. Lawler, Beeny D. Freeman, Benoit Marrot, Philippe Moulin, “Reserve osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges”. *Water Research*, 43 (2009) 2317 - 2348
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] D. Assimacopoulos, “A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies”. NTUA.

- [14] ENREL, “Technoeconomic Modeling of Battery Energy Storage in SAM”. September 2015.
- [15] S. D. Downing, D. F. Socie, “Simple rainflow counting algorithms”. *INT. J. FATIGUE*, January 1982.
- [16] Chiara Bordin, Harold Oghenetjiri Anuta, Andrew Crossland, Isabel Lascurain Gutierrez, Chris J. Dent, Daniele Vigo, “A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration”. *Renewable Energy*, 101 (2017) 417 - 430.
- [17] S. D. Downing, D. F. Socie, “Application of capacitive deionisation in water desalination: a review”. *Desalination*, 342 (2014): 3 -15.
- [18] Π. Κάπρος, Κ. Ντελκής, “Οικονομική ανάλυση επιχειρήσεων”. Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2014.