



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

# **Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Συστημάτων Αφαλάτωσης με Κυματική Ενέργεια**

**Στεφανάκης Κωνσταντίνος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος**

**Επίκουρος Καθηγητής Πέππας Γεώργιος**

**Χανιά, Ιούλιος 2024**

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιου, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαιτέρως για την επιμονή του και την αστείρευτη παροχή βοήθειας και καθοδήγησης ανά πάσα στιγμή, καθώς και για τη μοναδική ευκαιρία να ασχοληθώ και να λάβω γνώσεις για ένα θέμα τόσο επίκαιρο, όσο και τεράστιου ενδιαφέροντος. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου αλλά και όλους όσους με στήριξαν όλο αυτό το διάστημα των σπουδών μου.

## Περίληψη

Στις μέρες μας γίνεται ολοένα και πιο απαιτητική η ύδρευση μικρών και μεγάλων οικισμών. Η παροχή πόσιμου νερού δεν είναι πάντα εύκολη και συνεπώς αναζητούνται τρόποι κάλυψης των αναγκών σε πόσιμο νερό για κάθε πληθυσμό. Οι παραθαλάσσιες περιοχές υπερτερούν έναντι των χερσαίων λόγω της άμεσης πρόσβασης που διαθέτουν σε νερό, το οποίο έχουν τη δυνατότητα, με τις κατάλληλες μονάδες αφαλάτωσης να αξιοποιήσουν. Εκτός όμως από τη δυνατότητα της υδροδότησης, το νερό της θάλασσας δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω αξιοποίησής του. Οι διάφοροι κυματισμοί στην επιφάνεια του νερού που προκαλούνται από τα διάφορα καιρικά φαινόμενα, φέρουν ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική με χρήση κατάλληλων μετατροπέων κυματικής ενέργειας.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μονάδων αφαλάτωσης, οι οποίες λειτουργούν με κυματική ενέργεια. Για τη βελτιστοποίηση έγινε χρήση του αλγορίθμου PSO (Particle Swarm Optimization), ως προς το κόστος λειτουργίας (για αυτόνομα και διασυνδεδεμένα συστήματα) και το κέρδος πώλησης περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από τη μετατροπή κυματικής (για διασυνδεδεμένα συστήματα). Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε τρεις κατηγορίες συστημάτων, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί κυματικοί μετατροπείς (Wave Energy Converters - WECs). Η πρώτη κατηγορία είναι τα συμβατικά συστήματα που ηλεκτροδοτούνται αποκλειστικά από το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο σύγκρισης της απόδοσης αλλά και για τη σύγκριση κόστους λειτουργίας μεταξύ αυτών και των συστημάτων που αξιοποιούν κυματική ενέργεια. Η δεύτερη, είναι τα πλήρως αυτόνομα συστήματα που τροφοδοτούνται αποκλειστικά με κυματική ενέργεια. Η τρίτη και τελευταία κατηγορία συστήματος είναι τα διασυνδεδεμένα, τα οποία συνδυάζουν την τροφοδοσία από το ηλεκτρικό δίκτυο με την τροφοδοσία μέσω κυματικής ενέργειας. Σκοπός είναι να βρεθούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί σε αριθμό, των στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα, ικανοποιώντας όχι μόνο τον εκάστοτε στόχο της βελτιστοποίησης, αλλά και τις ανάγκες σε πόσιμο νερό για μια εικοσαετία.

## Abstract

Nowadays, the water supply of small and large settlements is becoming more and more demanding. Providing drinking water is not an easy task. Thus, ways are being sought to cover the drinking water needs of each population. Coastal areas have an advantage over inland areas due to the direct access they have to water, which, by utilizing appropriate desalination units, are able to exploit. But apart from the opportunity of water supply, sea water gives the possibility of its further utilization. The waves on the surface of the water caused by various weather conditions, carry energy which can be converted into electrical energy using suitable wave energy converters.

The purpose of this thesis is to optimize the design of desalination units, which operate with wave energy. For the optimization, the PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm was used, in terms of operating costs (for autonomous and grid-connected systems) and the profit of selling excess electrical energy derived from the wave conversion (for grid-connected systems). The optimization was performed in three classes of systems, while four different types of wave energy converters (WECs) were used. The first category is the conventional systems that are electrified exclusively from the power supply network. Conventional desalination systems were used not only as a measure of performance comparison, but also for the comparison of operating costs between them and the systems that utilize wave energy. The second system class is the fully autonomous systems powered exclusively by wave energy. The third and final category is the grid-connected systems, which combine power from the electric grid with power obtained from wave energy. The objective is to find the optimal quantity combination of the various elements that synthesize the system, satisfying both the optimization goals, and the potable water needs for a twenty-year period.

# Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	9
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	9
2.2 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ.....	9
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	14
3.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	14
3.2 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ.....	19
3.3 ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.....	28
3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	30
3.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	36
4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ.....	45
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
4.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ PSO.....	46
4.3 ΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ....	47
4.3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	47
4.3.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ #1.....	53
4.3.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ #2.....	53
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	54
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	54
5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	55
5.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ #1.....	69
5.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ #1.....	72
5.3.2 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ #1.....	82

<b>5.4</b>	<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ #2 .....</b>	<b>84</b>
<b>5.4.1</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ #2 .....</b>	<b>86</b>
<b>5.5</b>	<b>ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ #2 .....</b>	<b>96</b>
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>98</b>
<b>7.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>101</b>

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Τη σημερινή εποχή, αυξάνεται ραγδαία η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η ρύπανση του περιβάλλοντος και η κλιμακωτή μείωση των διαθέσιμων πόρων ορυκτών καυσίμων είναι παράγοντες στους οποίους οφείλεται η ολοένα και μεγαλύτερη στροφή στην ανάπτυξη και βελτίωση των τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες πληθαίνουν μέρα με τη μέρα. Μια λιγότερο δημοφιλής Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας είναι η Κυματική Ενέργεια, η οποία αξιοποιεί υδάτινους κυματισμούς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Κυματικοί Μετατροπείς (Wave Energy Converters - WECs), οι οποίοι μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε ηλεκτρική, χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα αφαλάτωσης και άντλησης νερού. Η εγκατάσταση συστημάτων αφαλάτωσης σε περιοχές που βρίσκονται δίπλα στη θάλασσα, βελτιώνει σημαντικά την αξιοπιστία και αμεσότητα ενός τέτοιου συστήματος, όμως δεν είναι πάντα εύκολη η ηλεκτροδότηση σε αυτές τις τοποθεσίες. Συνεπώς, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί η κυματική ενέργεια που προσφέρουν οι παραθαλάσσιες περιοχές εγκατάστασης των σταθμών αφαλάτωσης, χρησιμοποιώντας μετατροπείς για την ηλεκτροδότηση.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η βελτιστοποίηση σχεδιασμού συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με χρήση κυματικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά, μπορεί να είναι είτε αυτόνομα, είτε διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, τα οποία συνδυάζουν την

τροφοδοσία των μετατροπέων και την παροχή του ηλεκτρικού δικτύου. Και στις δύο περιπτώσεις, αναζητείται το βέλτιστο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός συστήματος αφαλάτωσης, το οποίο είναι ικανό να καλύψει την απαραίτητη ζήτηση σε πόσιμο νερό καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του. Για να γίνει σύγκριση της με τα παραπάνω συστήματα, εξετάζεται και ο βέλτιστος συνδυασμός για το (συμβατικό) πλήρως εξαρτώμενο από το ηλεκτρικό δίκτυο σύστημα. Για τις βελτιστοποιήσεις χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO), προσομοιώνοντας τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων για κάθε έναν από 4 διαφορετικούς μετατροπείς κυματικής ενέργειας.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά και περιγραφή των κατηγοριών των κυματικών μετατροπέων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και περιγράφεται εν συντομία το μοντέλο του συστήματος προς μελέτη και οι παραλλαγές του. Στο ίδιο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή των κυματικών μετατροπέων που μελετώνται, με παρουσίαση της παραγωγικής ικανότητας του καθενός, καθώς και ανάλυση των τρόπων διασύνδεσης των μπαταριών που συνθέτουν τη συστοιχία. Επίσης γίνεται η περιγραφή της προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος βελτιστοποίησης του συστήματος με τη μέθοδο PSO που μελετάται στην παρούσα εργασία, αλλά και οι βελτιστοποιήσεις που μελετήθηκαν. Πραγματοποιήθηκαν δύο βελτιστοποιήσεις με διαφορετικά προφίλ ζήτησης πόσιμου νερού. Τα αποτελέσματα αυτών των βελτιστοποιήσεων παρουσιάζονται και αναλύονται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν και προτάσεις για μελλοντικές μελέτες πάνω στο θέμα, με επιπρόσθετες ή και διαφορετικές προσεγγίσεις.



# 2.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

---

### 2.1 Εισαγωγικά

Τα συστήματα αφαλάτωσης που μελετώνται στην παρούσα εργασία αποτελούνται από διαφορετικά στοιχεία, το κάθε ένα με το δικό του ρόλο στη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος. Τα διασυνδεδεμένα και αυτόνομα συστήματα αξιοποιούν την κυματική ενέργεια. Η ενέργεια που συλλέγεται μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Το ρόλο αυτόν αναλαμβάνουν οι κυματικοί μετατροπείς.

### 2.2 Κυματική ενέργεια και μετατροπείς

Κυματική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από τα θαλάσσια κύματα, η οποία συλλέγεται με σκοπό την παραγωγή έργου. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί δημιουργούνται από την ενέργεια του αέρα που εφάπτεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται από τον αέρα στα κύματα. Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας ή κυματικοί μετατροπείς, είναι συσκευές οι

οποίες τοποθετούνται είτε στη θάλασσα είτε στην ακτή, με σκοπό τη συλλογή κυματικής ενέργειας, την οποία στη συνέχεια μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Δύο βασικά χαρακτηριστικά των κυματισμών καθορίζουν την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας: το ύψος και η περίοδος του κύματος. Ο τρόπος με τον οποίο οι κυματικοί μετατροπείς συλλέγουν ενέργεια, διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του καθενός. Υπάρχουν επτά τύποι κυματικών μετατροπέων [1]-[4]:

- Overtopping / terminator devices

Αυτός ο τύπος μετατροπέα, αξιοποιεί τη δυναμική ενέργεια που προκύπτει από την ανύψωση μιας ποσότητας νερού, πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Συνεπώς, το ύψος του κύματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας, περισσότερο από την περίοδο. Σε γενικές γραμμές αποτελείται από ένα είδος ράμπας, στο οποίο, όταν φθάνουν οι κυματισμοί, ανυψώνονται και στη συνέχεια καταλήγουν σε μια μικρο-δεξαμενή με ενσωματωμένο υδροστρόβιλο. Ο όγκος νερού καθώς πέφτει λόγω βαρύτητας, περιστρέφει τον υδροστρόβιλο και επιστρέφει στη θάλασσα. Όσο υψηλότερο το κύμα, τόσο περισσότερη ενέργεια μεταφέρει στο στρόβιλο. Αποτέλεσμα της περιστροφής είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Overtopping devices μπορούν να τοποθετηθούν είτε στην ακτή, είτε σε υπεράκτιες περιοχές. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συσκευές όπως PowerGin, AWS-III και Wave Dragon [5]. Η τελευταία μελετάται παρακάτω (αναφέρεται ως τύπος WEC04).

- Attenuators

Είναι πλωτές συσκευές, συνήθως μακρόστενης διάταξης, οι οποίες τοποθετούνται κατά μήκος της κατεύθυνσης των κυματισμών. Αποτελούνται από έναν αριθμό τμημάτων με ενσωματωμένα έμβολα και μοτέρ, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις. Τα επερχόμενα κύματα ταλαντεύουν τα τμήματα της συσκευής και με τις κινήσεις τους ταλαντεύουν τα έμβολα της συσκευής. Αυτά με τη σειρά τους ωθούν υψηλής πίεσης υδραυλικά υγρά τα οποία δίνουν κίνηση στα μοτέρ, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την κατηγορία κυματικών μετατροπέων επιδρούν εξίσου το ύψος αλλά και η περίοδος των κυματισμών στην παραγόμενη ενέργεια, διότι πλέον πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας. Ως μια από τις περισσότερο δημοφιλείς κατηγορίες μετατροπέων, στους attenuators περιλαμβάνεται μια μεγάλη γκάμα συσκευών όπως η Pelamis P2 που μελετάται στην παρούσα εργασία (αναφέρεται ως τύπος WEC02). Ο Pelamis P2 είναι ένας αξιόλογος και ιδιαίτερα δημοφιλής κυματικός μετατροπέας, ο οποίος δεν

κατασκευάζεται πλέον καθώς η εταιρία Pelamis Wave Power η οποία τον ανέπτυξε, δεν λειτουργεί πλέον. Οι Centipod και Stingray είναι επίσης αξιόλογες συσκευές [5].

- Submerged Pressure Differential

Οι συσκευές αυτής της κατηγορίας τοποθετούνται συνήθως κοντά στις ακτές βυθισμένες ώστε να στέκονται στο βυθό της θάλασσας. Η λειτουργία τους βασίζεται στην κίνηση των κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας, τα οποία αλληλεπιδρούν με ένα είδος φλοτέρ, το οποίο με τη σειρά του προκαλεί ανύψωση και βύθιση ενός εμβόλου. Οι μεταβολές πίεσης που προκύπτουν από τις ταλαντώσεις του εμβόλου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται άμεσα από το βάθος του φλοτέρ σε σχέση με την επιφάνεια του νερού. Όσο βαθύτερα βρίσκεται, τόσο λιγότερη ενέργεια παράγεται. Παρόλα αυτά, όντας βυθισμένη η συσκευή, προστατεύεται περισσότερο από ακραίες κλιματικές συνθήκες. Όπως οι attenuators, έτσι και αυτή η κατηγορία κυματικών μετατροπέων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Οι αποδοτικότερες είναι η CETO 6 και η Etymol WEC, με την τελευταία να φτάνει σε απόδοση έως και 4 MW [5]. Ωστόσο, ο Etymol WEC βρίσκεται σε στάδιο μελέτης, ενώ ο CETO 6 βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης.

- Point absorbers

Είναι άλλος ένας τύπος πλωτής συσκευής που απορροφά ενέργεια από όλες τις κατευθύνσεις των κυμάτων πάνω στη θαλάσσια επιφάνεια. Κατασκευαστικά, αποτελείται από δύο μέρη. Το σταθερό μέρος είναι εγκατεστημένο στο βυθό της θάλασσας, ενώ το κινούμενο πλέει επάνω στην επιφάνεια, επηρεαζόμενο από τις κυματικές μεταβολές όλων των κατευθύνσεων. Τα δύο μέρη συνήθως ενώνονται με ένα έμβολο. Εξαιτίας της κατασκευής του, η οποία είναι πολύ μικρότερη σε μήκος σε σχέση με το ύψος του, καθίσταται δυνατή η απορρόφηση κυματικής ενέργειας στη θέση ενός σημείου, η οποία είτε κινεί ένα ενσωματωμένο στη συσκευή μοτέρ είτε ωθεί υψηλής πίεσης υδραυλικά υγρά, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω της κατασκευής τους, η ενέργεια που παράγουν οι σημειακοί απορροφητές, επηρεάζεται άμεσα από το ύψος αλλά και την περίοδο των προσπιπόντων κυματισμών. Παρόλα αυτά περιορίζονται από το μέγιστο ύψος που μπορεί να φτάσει η συσκευή. Η κλάση αυτή κυματικών μετατροπέων ίσως να είναι η πιο δημοφιλής, καθώς υπάρχουν πάνω από 50 συσκευές διαθέσιμες στο εμπόριο. Μεταξύ αυτών, η συσκευή η οποία αποδίδει το μέγιστο καταγεγραμμένο είναι η PowerBuoy (PB3) της Ocean Power

Technologies με μέγιστη παραγωγή τα 5 MW [5]. Στην ίδια κατηγορία ανήκει και ο AquaBuoy της AquaEnergy Group Ltd., ο οποίος μελετάται στην παρούσα εργασία (αναφέρεται ως τύπος WEC03) [4]. Και οι δύο από τους παραπάνω κυματικούς μετατροπείς έχουν αναπτυχθεί και αξιοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όμως ο AquaBuoy δεν είναι πλέον εμπορικά διαθέσιμος.

- Oscillating mass

Αυτές οι συσκευές είναι συνήθως πλωτές και χρησιμοποιούν ένα βαρίδιο που βρίσκεται συνήθως σταθεροποιημένο σε έναν άξονα στο κέντρο της συσκευής. Αυτό το βαρίδιο χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός εναλλάκτη. Οι κυματισμοί που χτυπούν τη συσκευή προκαλούν μεταβολή της βαρύτητας. Έτσι, η μάζα, προσπαθώντας να ισορροπήσει περιστρέφεται στον άξονα της και παράγει ηλεκτρισμό. Αυτός ο τύπος συσκευών δεν είναι τόσο διαδεδομένος καθώς η παραγόμενη ενέργεια δεν είναι τόσο μεγάλη όσο μπορούν άλλες κατηγορίες. Παραδείγματα τέτοιων μετατροπέων είναι η Penguin της Wello Oy και ο ISWEC της Wave For Energy S.R.L. με μέγιστη παραγωγή λιγότερο από 350 kW [5].

- Oscillating wave surge

Οι μετατροπείς που έχουν σχεδιαστεί με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία λειτουργίας ταλαντεύονται με την ορμή των κυμάτων. Εγκαθίστανται υποβρυχίως, στον πυθμένα ρηχών υδάτων. Για το λόγο αυτό, η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται από την περίοδο κυματισμών και όχι τόσο από το ύψος τους. Ο σχεδιασμός τους αποτελείται από ένα ταλαντευόμενο πτερύγιο αρθρωμένο πάνω σε ένα σταθερό άξονα, το οποίο μπορεί να συνδεθεί είτε με μία γεννήτρια, είτε με μία αντλία πίεσης υγρού, για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Παραδείγματα ταλαντευόμενων μετατροπέων είναι ο bioWAVE και ο SurgeWEC [5].

- Oscillating Water Column

Οι μετατροπείς αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από έναν κατακόρυφο θάλαμο, εγκατεστημένο στην ακτή, στο ύψος της στάθμης της θάλασσας. Στην κορυφή του θαλάμου βρίσκεται ένας στρόβιλος αμφίδρομης περιστροφής. Η λειτουργία της συσκευής έχει ως εξής. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί εισέρχονται στο θάλαμο. Στη συνέχεια, αυξομειώνεται η στάθμη του νερού εντός του θαλάμου με αποτέλεσμα την εναλλαγή της πίεσης του αέρα που βρίσκεται φυλακισμένος σε αυτόν. Η εναλλαγή αυτή της πίεσης προκαλεί την περιστροφή

του στροβίλου, η οποία οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Συνεπώς, καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας παίζει το ύψος του κύματος που εισέρχεται στο θάλαμο. Στην αγορά υπάρχουν πολλές συσκευές αυτής της κατηγορίας, όπως η LEANCON Wave Energy Device με μέγιστη παραγωγή 4600 kW [5].

# 3.

## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

---

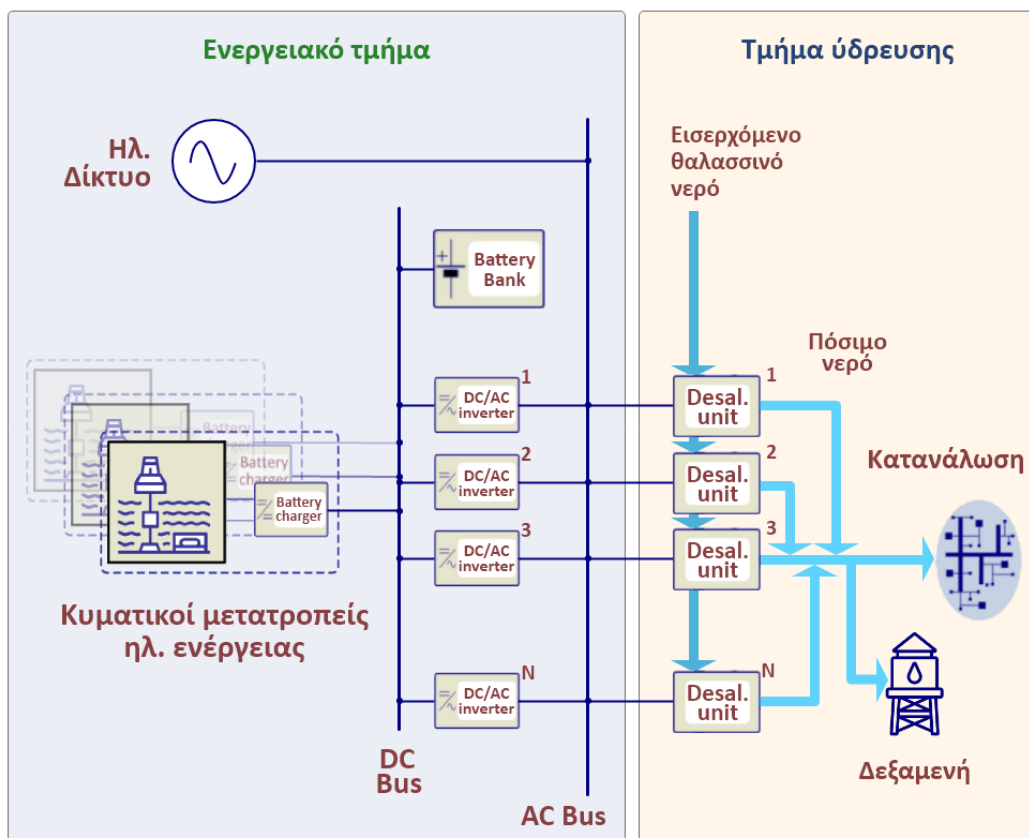
### 3.1 Σύντομη περιγραφή του συστήματος

Τα συστήματα αφαλάτωσης που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουν στόχο την παραγωγή μιας προκαθορισμένης ποσότητας πόσιμου νερού, με σκοπό την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών ενός δικτύου ύδρευσης. Στα Σχήματα 1, 2 και 3, φαίνεται παραστατικά η δομή των συστημάτων αυτών, τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν με τρεις τρόπους. Είτε να είναι αυτόνομα με αποκλειστική τροφοδοσία μέσω ΑΠΕ (Σχήμα 2), είτε διασυνδεδεμένα, ώστε να τροφοδοτούνται συνδυαστικά με κυματικούς μετατροπείς και την υποστήριξη του ηλεκτρικού δικτύου (Σχήμα 1), είτε να λειτουργούν αποκλειστικά με την ενέργεια του δικτύου παροχής ηλεκτρικού ρεύματος (Σχήμα 3). Χωρίζονται σε δύο τμήματα, το Ενεργειακό τμήμα και το Υδρευτικό. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις, το Υδρευτικό τμήμα αποτελείται από:

- Μονάδες αφαλάτωσης (Desalination units)
- Δεξαμενή (Water tank)

- Οικισμός / Κατανάλωση

Τα μέρη του ενεργειακού τμήματος, αλλάζουν ανάλογα με τον τύπο του συστήματος και περιγράφονται παρακάτω, για κάθε τύπο ξεχωριστά.



Σχήμα 1. Διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος αφαλάτωσης με κυματικούς μετατροπείς.

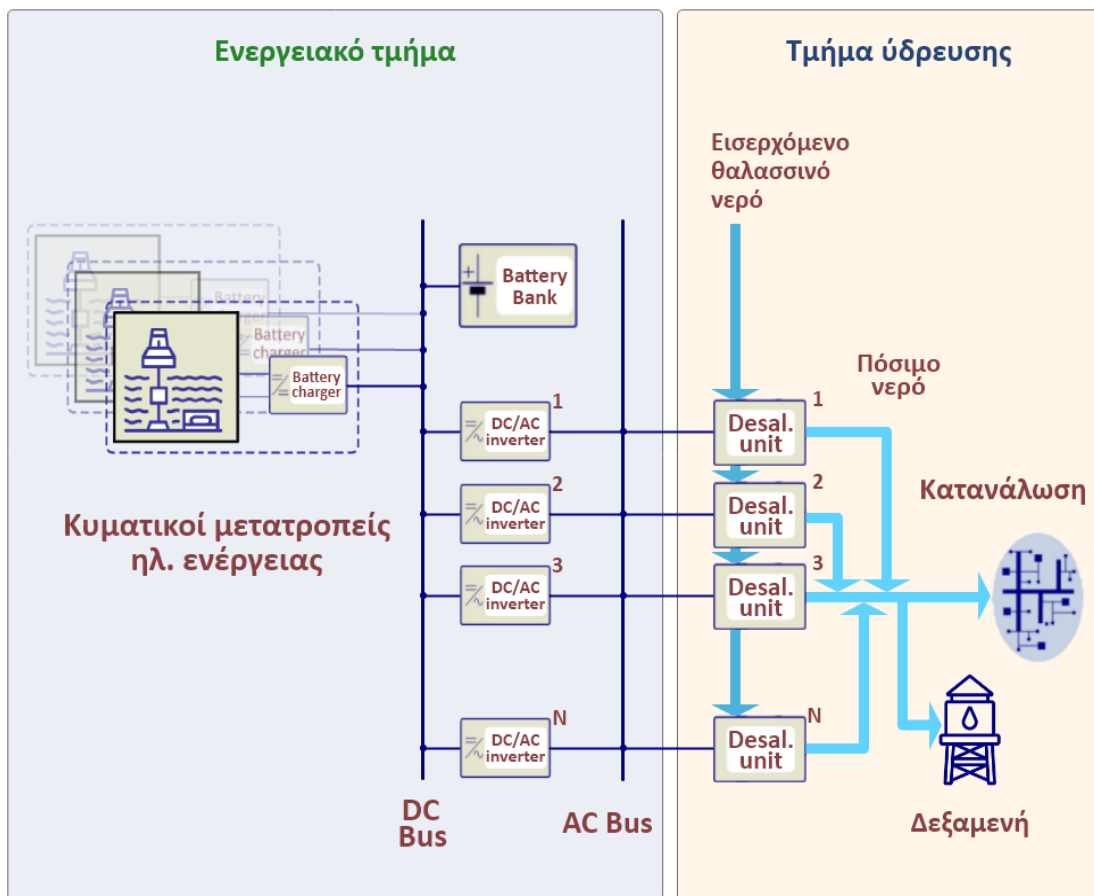
Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται το διασυνδεδεμένο σύστημα αφαλάτωσης. Τα μέρη που αποτελούν το ενεργειακό τμήμα του παραπάνω συστήματος είναι:

- Μετατροπείς κυματικής ενέργειας (WECs) με ενσωματωμένους φορτιστές μπαταρίας,
- Σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο,
- DC δίαυλος (DC Bus) για τη διασύνδεση των αντιστροφών και των μπαταριών (battery bank) με τους μετατροπείς,

- Συστοιχία μπαταριών,
- DC/AC μετατροπείς (DC/AC inverters),
- AC δίαυλος (AC Bus) για τη διασύνδεση των αντιστροφών και της τροφοδοσίας από το ηλεκτρικό δίκτυο με τις μονάδες αφαλάτωσης.

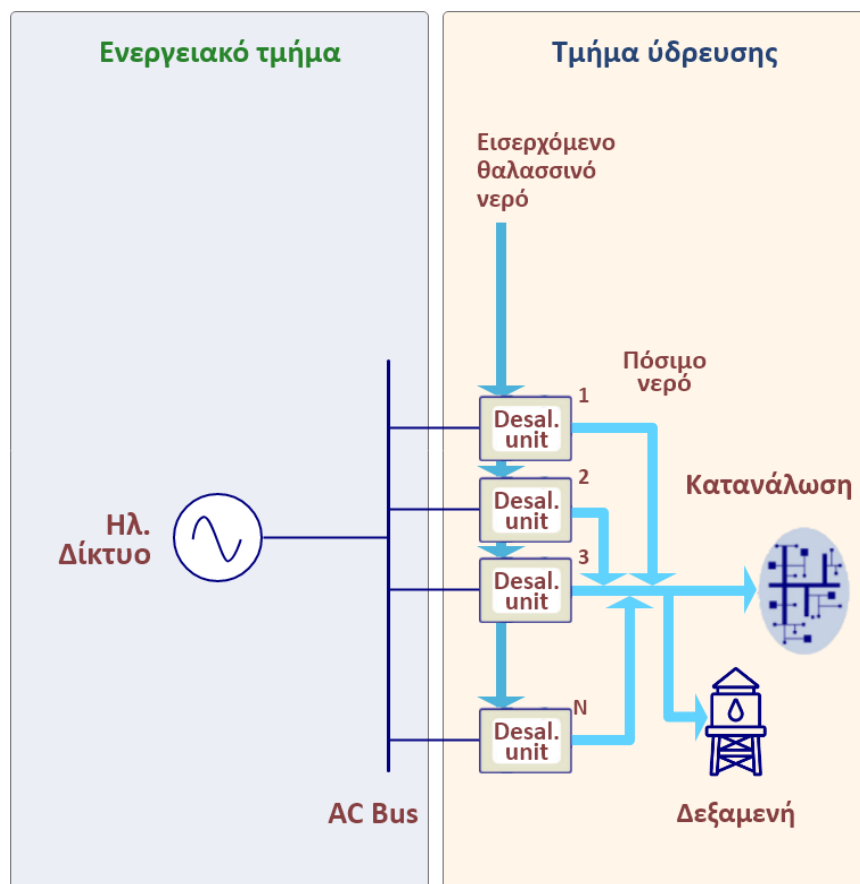
Το σύστημα αυτό τροφοδοτείται κατά κύριο λόγο από τους συνδεδεμένους κυματικούς μετατροπείς. Συνδέεται με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, ώστε να απορροφήσει όση ενέργεια χρειάζεται σε περίπτωση που η διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους μετατροπείς δεν επαρκεί. Εάν η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης, αποθηκεύεται ένα μέρος από το υπόλοιπο αυτής. Οι μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν ένα ποσό της παραγόμενης ενέργειας που περισσεύει και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί την ώρα της παραγωγής της για μετέπειτα χρήση. Εκτός από την παροχή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το δίκτυο προσφέρει τη δυνατότητα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όποτε η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι τόσο μεγάλη που περισσεύει. Κατά συνέπεια όση από αυτή δε μπορεί να αξιοποιηθεί από το σύστημα ή να αποθηκευτεί, πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι μονάδες αφαλάτωσης (Desalination Units) λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), οπότε συνδέεται ένας αντιστροφέας (inverter) στην τροφοδοσία εκάστης μονάδας αφαλάτωσης, με σκοπό τη μετατροπή του DC ρεύματος σε AC. Ο δίαυλος AC αναλαμβάνει τη διανομή του ρεύματος ανάμεσα στους μονάδες αφαλάτωσης. Το πόσιμο νερό που παράγουν οι μονάδες αφαλάτωσης αξιοποιείται με προτεραιότητα την κάλυψη της ζήτησης από την κατανάλωση. Σε περίπτωση που το παραγόμενο πόσιμο νερό υπερβαίνει της ζήτησης, το υπόλοιπο αποθηκεύεται στη δεξαμενή για μετέπειτα κατανάλωση. Αντίστροφα, αν το παραγόμενο νερό από τους μονάδες αφαλάτωσης δεν επαρκεί για την κάλυψη των καταναλωτών, το υπόλοιπο συμπληρώνεται από το διαθέσιμο στη δεξαμενή.





Σχήμα 2. Διάγραμμα αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης με κυματικούς μετατροπείς.

Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης, το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά με κυματικούς μετατροπείς και μπαταρίες. Η λειτουργία της αυτόνομης μονάδας αφαλάτωσης είναι όμοια με αυτή της διασυνδεδεμένης, με μόνη διαφορά την απουσία υποστήριξης που παρέχει το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα τροφοδοτείται αποκλειστικά από την ενέργεια που παράγουν οι κυματικοί μετατροπείς. Ως εκ τούτου, δεν υπάρχει δυνατότητα πώλησης ενέργειας στο δίκτυο, αλλά ούτε και υποστήριξη από αυτό σε περίπτωση μη επάρκειας της παραγόμενης κυματικής ενέργειας.



Σχήμα 3. Διάγραμμα συστήματος αφαλάτωσης χωρίς διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο Σχήμα 3 απεικονίζεται το σύστημα αφαλάτωσης, του οποίου την τροφοδοσία έχει αναλάβει εξ' ολοκλήρου το ηλεκτρικό δίκτυο (συμβατικό σύστημα αφαλάτωσης). Κατά συνέπεια, δε χρησιμοποιούνται ούτε μπαταρίες, αλλά ούτε και DC/AC μετατροπές, εφόσον οι μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν με AC ρεύμα. Η τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης παρέχεται κατευθείαν από το ηλεκτρικό δίκτυο και διανέμεται σε αυτούς μέσω του AC διαύλου. Στην περίπτωση του συστήματος χωρίς ΑΠΕ, είναι λογικό, ότι πραγματοποιείται μόνον αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο παροχής. Η πώληση ενέργειας δεν είναι εφικτή.

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι κυματικών μετατροπέων, που διαφέρουν στον τρόπο λειτουργίας τους. Κατά συνέπεια, ανάλογα με τον τύπο του μετατροπέα, αλλάζει και η μέγιστη δυνατή κυματική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί, πάντα σε συνάρτηση με τα κυματικά φαινόμενα. Γι' αυτό το λόγο επιλέγονται σε αυτή την εργασία τέσσερις

μετατροπείς κυματικής ενέργειας διαφορετικού τύπου, ούτως ώστε να μελετηθεί το βέλτιστο κόστος του συστήματος με κάθε έναν από αυτούς. Βασικός στόχος είναι να διερευνηθεί αν και πόσο μειώνεται το κόστος λειτουργίας ενός διασυνδεδεμένου ή αυτόνομου συστήματος με χρήση του εκάστοτε μετατροπέα, σε σύγκριση με ένα σύστημα που εξαρτάται πλήρως από το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε δεύτερη φάση, μελετάται κατά πόσο μπορούν να μειωθούν οι δαπάνες αγοράς ενέργειας.

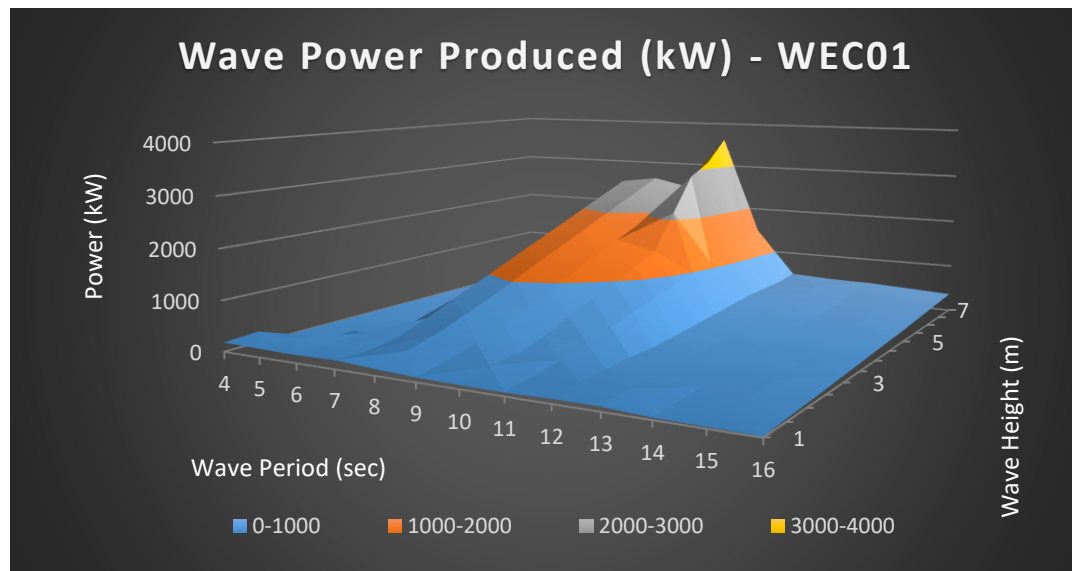
### **3.2 Παραγόμενη κυματική ενέργεια και μετατροπείς**

Όπως περιγράφεται παραπάνω, η κυματική ενέργεια που παράγει ένας κυματικός μετατροπέας εξαρτάται από τη συμπεριφορά των κυμάτων στην τοποθεσία εγκατάστασής του. Τα κύματα που αλληλεπιδρούν με αυτόν έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά, το ύψος (Wave Height) και την περίοδο (Wave Period). Αυτά τα στοιχεία καθορίζουν την κυματική ισχύ του μετατροπέα. Στην παρούσα εργασία, η παραγόμενη κυματική ισχύς βασίζεται στο ωριαίο ύψος και την ωριαία περίοδο κύματος  $W_h(t)$  και  $W_p(t)$  αντίστοιχα, με χρονικό βήμα  $\Delta t = 1$  ώρα. Παρακάτω φαίνονται οι πίνακες παραγόμενης κυματικής ισχύος για κάθε μετατροπέα ανάλογα με το ύψος και την περίοδο κύματος.

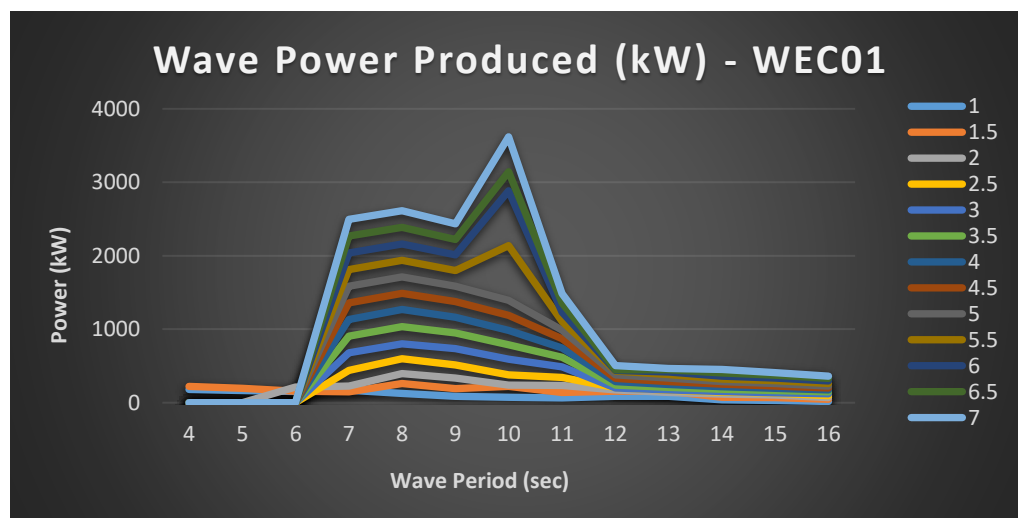
**Πίνακας 1. Παραγόμενη κυματική ισχύς (kW) από τον WEC01.**

Ύψος κύματος (m)	Περίοδος κύματος (sec)													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	1	180	166	153	171	125	87	72	65	85	85	37	29	16
	1.5	223	195	157	148	261	192	223	139	155	155	74	67	46
	2	0	0	214	227	396	335	237	235	172	138	115	105	70
	2.5	0	0	0	440	598	514	379	342	204	169	142	128	95
	3	0	0	0	681	801	735	594	486	199	174	151	134	121
	3.5	0	0	0	904	1035	949	788	617	239	209	183	164	146
	4	0	0	0	1131	1269	1163	982	743	285	248	216	195	175
	4.5	0	0	0	1358	1488	1374	1187	869	330	287	250	225	201
	5	0	0	0	1585	1712	1585	1392	988	380	334	285	263	226
	5.5	0	0	0	1812	1937	1798	2138	1107	429	381	323	301	261
	6	0	0	0	2040	2162	2010	2884	1234	439	416	361	336	295
	6.5	0	0	0	2267	2386	2221	3143	1360	449	450	406	372	329
7	0	0	0	2494	2611	2433	3619	1483	506	464	451	408	363	

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται η κυματική ισχύς  $P_{WEC1}$  (kW) που παράγει ο WEC01 [3]. Ο μετατροπέας αυτός ανήκει στην 4<sup>η</sup> από τις κατηγορίες που αναφέρονται παραπάνω, τους point absorbers, επομένως επηρεάζεται από κυματισμούς οποιασδήποτε κατεύθυνσης. Συγκεκριμένα, ονομάζεται Heave Buoy Array (Συστοιχία από Σημαδούρες). Η παραγόμενη ισχύς που δύναται να παράγει ο συγκεκριμένος μετατροπέας επηρεάζεται περισσότερο από το ύψος του κυματισμού παρά από την περίοδό του. Σύμφωνα με τον πίνακα, παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της παραγόμενης κυματικής ισχύος (3.619 kW) συμβαίνει όταν τα κύματα φτάνουν σε ύψος 7 m, με περίοδο 10 sec.



Σχήμα 4: 3D απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος του WEC01.



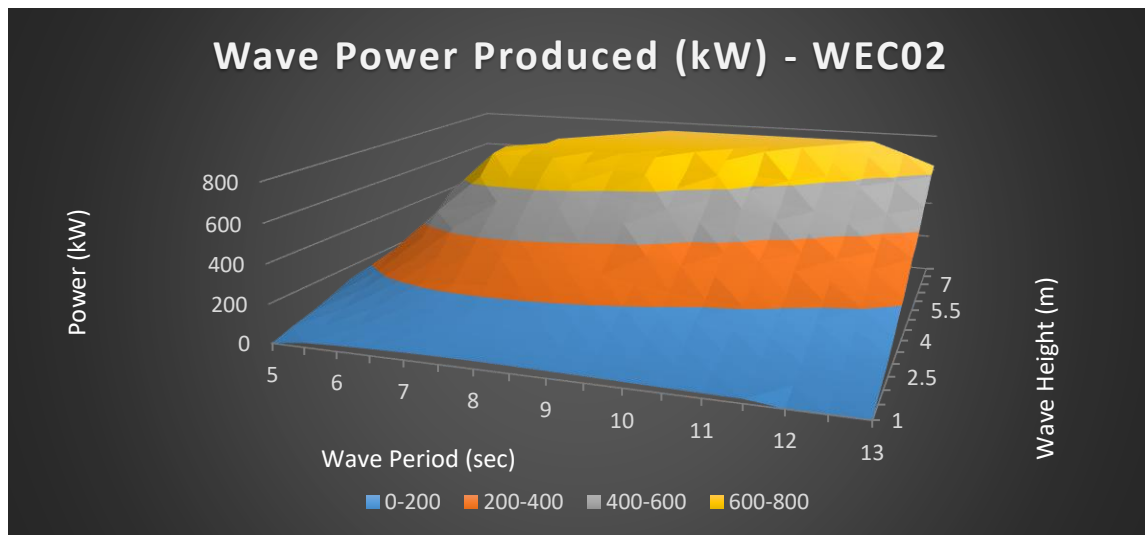
Σχήμα 5: Παραγόμενη ισχύς από τον WEC01.

Στα Σχήματα 4 και 5 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση της παραγόμενης ισχύος του WEC01, σύμφωνα με τον Πίνακα 1. Από τα παραπάνω σχήματα είναι ξεκάθαρο ότι η βέλτιστη απόδοση του μετατροπέα επιτυγχάνεται για κυματισμούς διάρκειας από 7 – 10 sec, με ύψος μεγαλύτερο από 5.5 m.

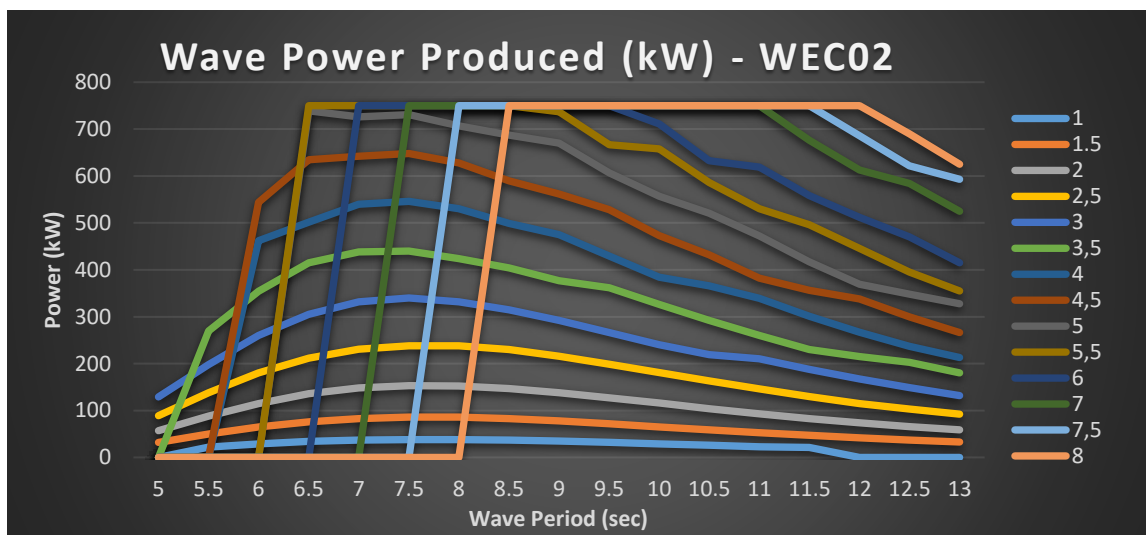
**Πίνακας 2. Παραγόμενη κυματική ισχύς (kW) από τον WEC02.**

		Περίοδος κύματος (sec)																
		5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
Ύψος κύματος (m)	1	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
	2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	115	103	92
	3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
	3.5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	203	180
	4	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213
	4.5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
	5	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
	5.5	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
	6	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
	6.5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481
	7	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7.5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Στον Πίνακα 2 απεικονίζεται η κυματική ισχύς που δύναται να παράξει ο WEC02,  $P_{WEC2}$  (kW), συναρτήσει του ύψους και της περιόδου των προσπιπτόντων σε αυτόν κυμάτων [3][5]. Ο WEC02 ονομάζεται Pelamis P2 και ανήκει στην κατηγορία των attenuators [5]. Η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται πλήρως από το συνδυασμό ύψους και περιόδου κύματος. Παρατηρείται ότι η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς είναι μικρότερη από αυτήν του WEC01, όπως και ο μέσος όρος αυτής. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 6 και 7, το peak της παραγωγής είναι τα 750 kW και συμβαίνει αφότου τα κύματα ξεπεράσουν τα 6.5 m ύψος και για περίοδο  $\geq 5.5$  sec. Μέσω του πίνακα αυτού, γίνεται επίσης αντιληπτό ότι για αυτόν το μετατροπέα είναι διαθέσιμη πολύ μεγαλύτερη δειγματοληψία σε σύγκριση με τους άλλους τρεις μετατροπείς.



Σχήμα 6: 3D απεικόνιση παραγόμενης ισχύος από τον WEC02.



Σχήμα 7: Παραγόμενη ισχύς από τον WEC02.

Στα Σχήματα 6 και 7 που απεικονίζονται παραπάνω, φαίνεται ότι ο WEC02, μπορεί να φτάσει στη μέγιστη δυνατή ισχύ ακόμη και κυματισμούς των οποίων το ύψος βρίσκεται στο μέσον της κλίμακας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μετατροπέας αυτός δίνει τη μέγιστη δυνατή ισχύ εξόδου για ένα σημαντικό εύρος ύψους και περιόδου κυμάτων, από 5.5 έως και 8.5 μέτρα και περίοδο από

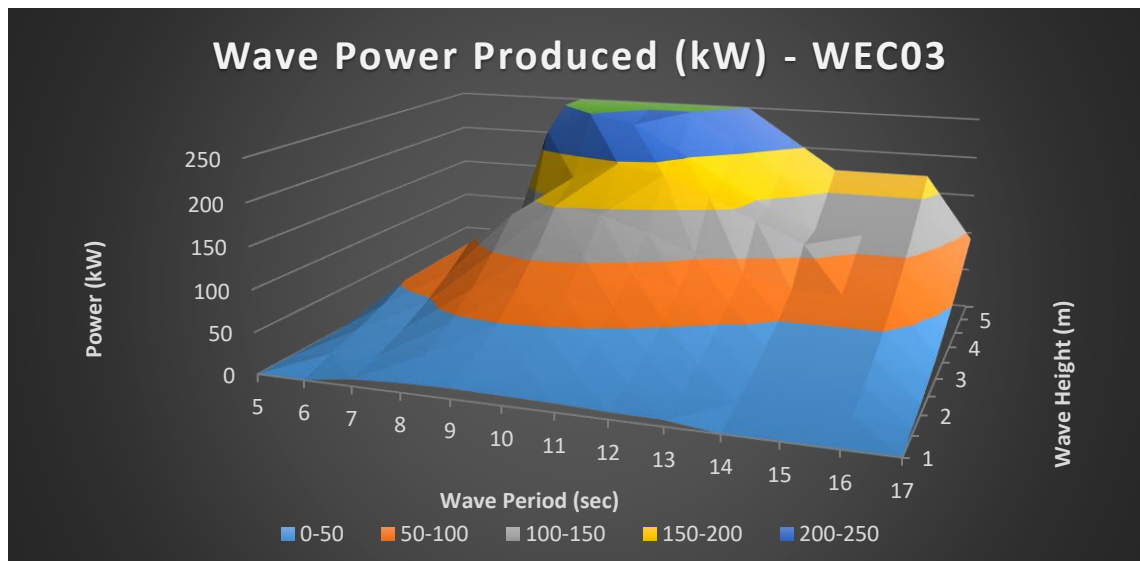
6.5 έως και 12 δευτερόλεπτα. Συνεπώς η πιθανότητα να λειτουργεί στη μέγιστη απόδοσή του είναι αρκετά αυξημένη σε σχέση με τους άλλους μετατροπείς.

Στον Πίνακα 3 απεικονίζεται ο πίνακας ισχύος εξόδου του WEC03,  $P_{WEC3}$  (kW) [6].

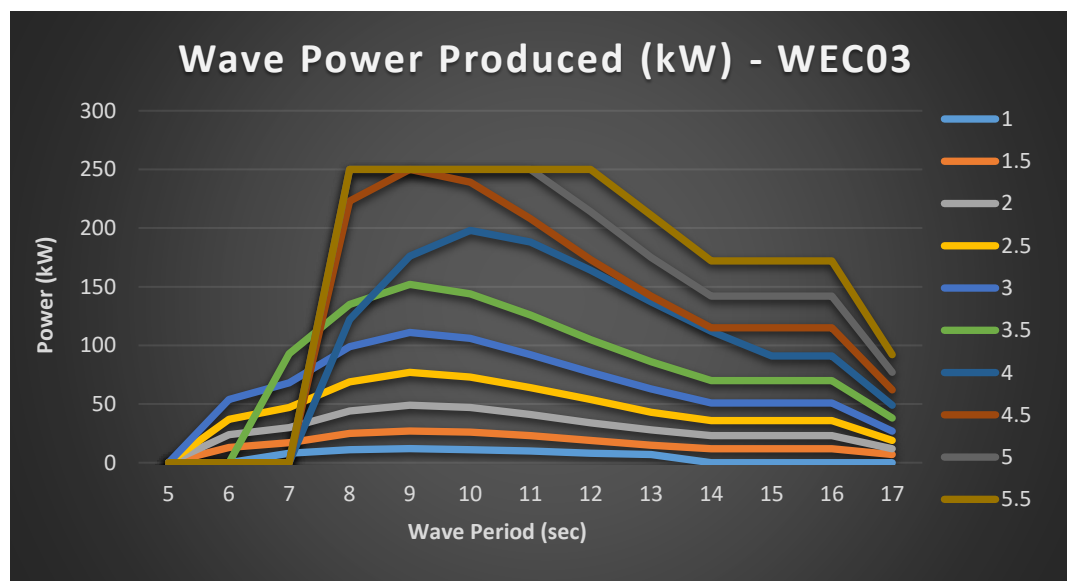
Πίνακας 3. Παραγόμενη κυματική ισχύς (kW) από τον WEC03.														
Ύψος κύματος (m)	Περίοδος κύματος (sec)													
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	1	0	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0
	1.5	0	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
	2	0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
	2.5	0	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
	3	0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
	3.5	0	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
	4	0	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
	4.5	0	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
	5	0	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77
	5.5	0	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι ο WEC03 (επονομαζόμενος AquaBuOY) έχει περιορισμένες δυνατότητες στην παραγωγή κυματικής ισχύος, παρόλα αυτά είναι ο οικονομικότερος από τους μετατροπείς που μελετώνται στην παρούσα εργασία. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας, όπως και ο WEC01, ανήκει στους point absorbers [4], είναι όμως πολύ οικονομικότερος στην αγορά, εγκατάσταση και συντήρησή του.





Σχήμα 8: 3D απεικόνιση παραγόμενης ισχύος από τον WEC03.



Σχήμα 9: Παραγόμενη ισχύς από τον WEC03.

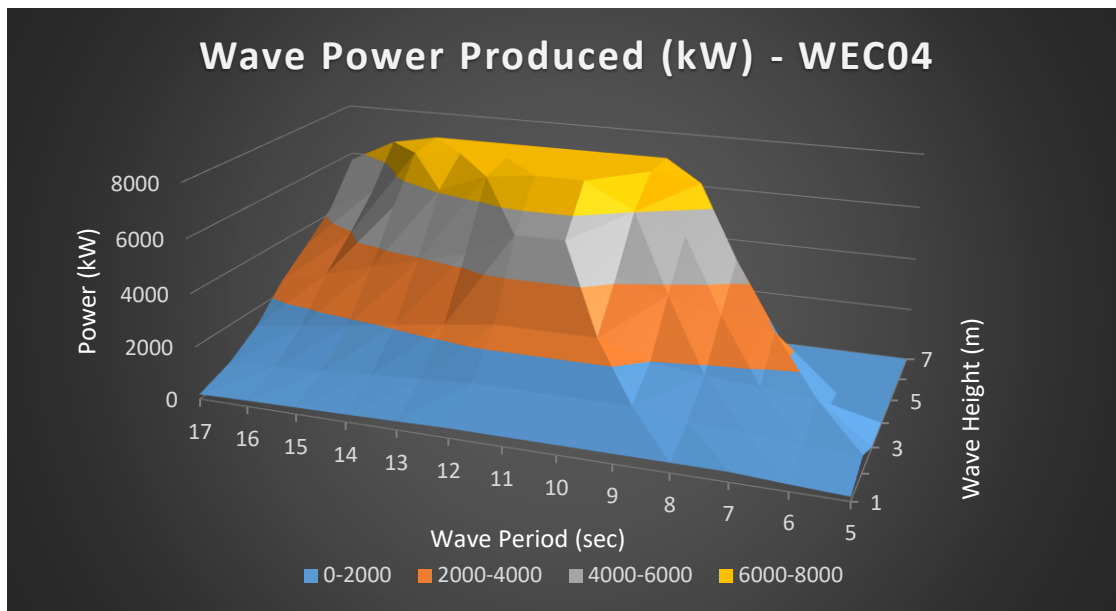
Στα Σχήματα 8 και 9 απεικονίζεται γραφικά η ισχύς εξόδου του WEC03. Όπως συμβαίνει και με τον WEC02, ο μετατροπέας αυτός φτάνει επίσης γρήγορα στο peak της ισχύος που δύναται να παράξει, παρόλα αυτά, είναι χαμηλότερο από αυτό του WEC02. Επίσης, σε αντίθεση με τον

WEC02, ο WEC03 διαθέτει μικρότερο «παράθυρο» όπου δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Η μέγιστη παραγωγή είναι τα  $250\text{ kW}$  και επιτυγχάνεται μόνο για κύματα ύψους 5 και 5.5 μέτρων και διάρκειας 8 ~12 sec.

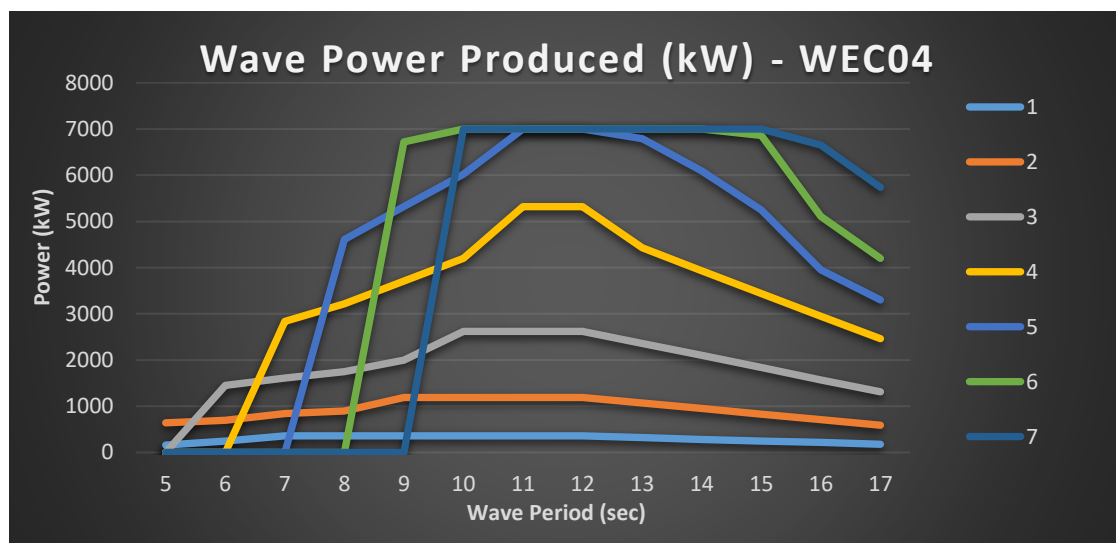
Τέλος, παρουσιάζεται ο πίνακας παραγωγής ισχύος του WEC04,  $P_{WEC4}$  (kW) [6].

Πίνακας 4. Παραγόμενη κυματική ισχύς (kW) από τον WEC04.														
Υψος κύματος (m)	Περίοδος κύματος (sec)													
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1		160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180
2		640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590
3		0	1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310
4		0	0	2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460
5		0	0	0	4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300
6		0	0	0	0	6720	7000	7000	7000	7000	7000	6860	5110	4200
7		0	0	0	0	0	7000	7000	7000	7000	7000	7000	6650	5740

Ο μετατροπέας WEC04 είναι ο Wave Dragon και ανήκει στην κατηγορία των overtopping devices, όπου το ύψος κύματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή ισχύος [5]. Παρατηρείται ότι αυτός ο κυματικός μετατροπέας έχει τη δυνατότητα να παράγει τη μέγιστη ισχύ, από όσους έχουν επιλεγεί για αυτήν την εργασία. Παρόλα αυτά, εκτός του ότι είναι ο ακριβότερος εκ των μετατροπέων που μελετώνται, είναι αυτός για τον οποίο διατίθεται η ελάχιστη δειγματοληψία.



Σχήμα 10: 3D απεικόνιση παραγόμενης ισχύος από τον WEC04.



Σχήμα 11: Παραγόμενη ισχύς από τον WEC04.

Στα Σχήματα 10 και 11 παραπάνω, παρατηρείται ότι ο WEC04 είναι ικανός να αποδώσει μεγάλη ποσότητα ισχύος ( $> 1000 \text{ kW}$ ) ακόμα και με μικρό ύψος κύματος (3 μέτρα). Όμοια με τον WEC02, ο WEC04 μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ισχύ εξόδου για ένα αξιόλογο εύρος

διάρκειας των κυματισμών  $10 \sim 15$  δευτερολέπτων, σε αντίθεση όμως με τον WEC02, αυτό συμβαίνει μόνο για πολύ υψηλούς κυματισμούς, ύψους 6 και 7 μέτρων.

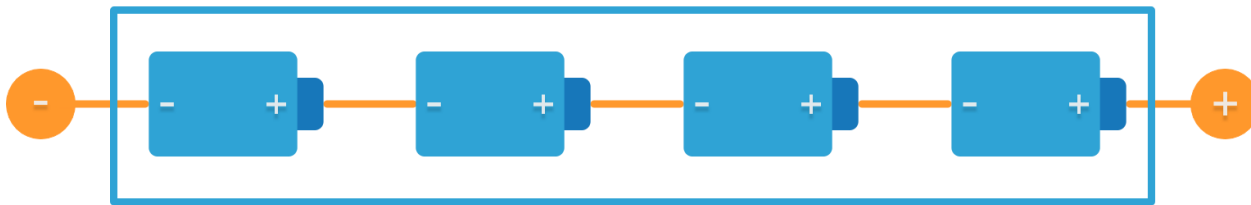
Οι Πίνακες 1 έως 4 αποτελούν πίνακες αναζήτησης (Lookup Tables), επομένως χρησιμοποιούνται ως εργαλεία για τον υπολογισμό της κυματικής ισχύος που παράγει κάθε μετατροπέας για κάθε είδος κύματος, ακόμα και αν τα χαρακτηριστικά του προσπίπτοντος κύματος υπό μελέτη (ύψος, περίοδος) δεν αναγράφονται στον πίνακά του. Επειδή η προσομοίωση πραγματοποιείται για ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, δεν είναι απαραίτητο η ωριαία περίοδος ή και το ύψος κύματος να υφίστανται στους παραπάνω πίνακες. Για αυτές τις περιπτώσεις, η ισχύς που παράγεται υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο bilinear interpolation [7], επάνω στον πίνακα του εκάστοτε μετατροπέα.

### 3.3 Συστοιχία μπαταριών

Η συστοιχία μπαταριών αποτελείται από έναν αριθμό συσσωρευτών, ομαδοποιημένους με μια συγκεκριμένη διάταξη. Οι συσσωρευτές που δομούν τη συστοιχία έχουν κατά προτίμηση τα ίδια χαρακτηριστικά, για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του. Ανάλογα με τη διάταξη με την οποία συνδέεται η συστοιχία των μπαταριών, επηρεάζεται η χωρητικότητα αλλά και η τάση της. Η διάταξη των μπαταριών έχει τρεις εκδοχές [8]:

- Σειριακή συνδεσμολογία

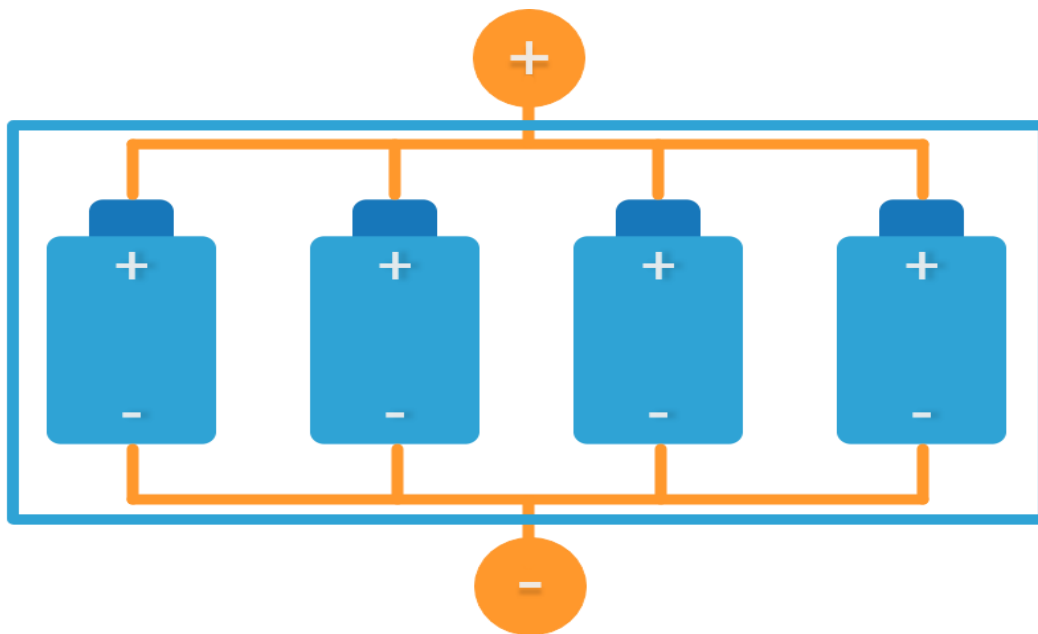
Στη σειριακή διάταξη, οι μπαταρίες ομαδοποιούνται με σύνδεση αντίθετης πολικότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, ο θετικός πόλος της 1<sup>ης</sup> μπαταρίας συνδέεται με τον αρνητικό της 2<sup>ης</sup>, ενώ ο θετικός της 2<sup>ης</sup> με το αρνητικό της 3<sup>ης</sup> και ούτω καθεξής. Με αυτή τη συνδεσμολογία η τάση εξόδου της συστοιχίας αποτελεί το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους συσσωρευτών, ενώ η συνολική χωρητικότητα του ισοδυναμεί με τη χωρητικότητα της μιας μπαταρίας (σε Ah).



Σχήμα 12: Σύνδεση μπαταριών σε σειρά.

- Παράλληλη συνδεσμολογία

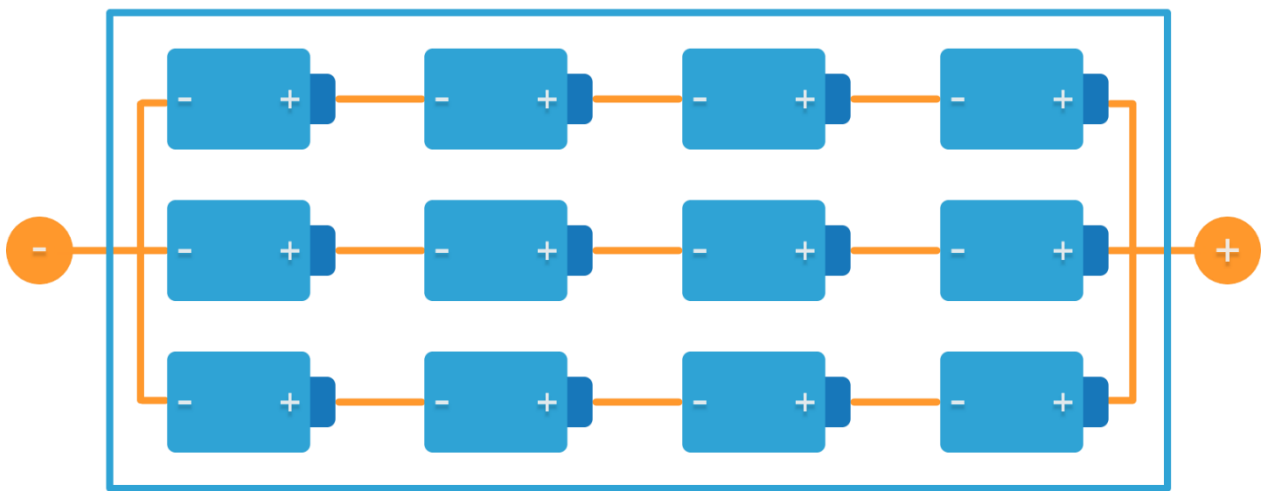
Με την παράλληλη σύνδεση, οι επιμέρους μπαταρίες συνδέονται μεταξύ τους ανά τον ίδιο πόλο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Συνδέονται όλοι οι αρνητικοί πόλοι των μπαταριών μεταξύ τους, και σε ξεχωριστή σύνδεση συνδέονται μεταξύ τους οι θετικοί πόλοι. Με αυτή τη διάταξη των συσσωρευτών σε μια συστοιχία, η συνολική χωρητικότητα προκύπτει αθροίζοντας τη χωρητικότητα κάθε μπαταρίας που την αποτελεί. Στην περίπτωση αυτή η τάση εξόδου ισούται με την τάση παροχής.



Σχήμα 13: Παράλληλη σύνδεση μπαταριών.

- Συνδυασμός σειριακής και παράλληλης διάταξης

Με αυτόν τον τρόπο συνδέονται οι συσσωρευτές στη συστοιχία μπαταριών της συγκεκριμένης εργασίας, όπως περιγράφεται παρακάτω. Σε αυτή την περίπτωση, η συστοιχία δομείται από παράλληλα συνδεδεμένες συστοιχίες εν σειρά μπαταριών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14. Όλες οι σειρές αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό συσσωρευτών. Η τάση στην έξοδο προκύπτει από το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους συσσωρευτών σε μια σειρά, ενώ η συνολική χωρητικότητα από το γινόμενο του πλήθους των παράλληλων σειρών με τη χωρητικότητα της μίας μπαταρίας [8].



Σχήμα 14: Συνδυασμός σειριακής και παράλληλης διάταξης μπαταριών.

### 3.4 Μοντελοποίηση του συστήματος αφαλάτωσης

Όπως περιγράφεται και παραπάνω θα πρέπει να δημιουργηθούν τρία διαφορετικά μοντέλα συστήματος, ανάλογα με την τροφοδοσία που χρησιμοποιείται. Το σύστημα με τα περισσότερα στοιχεία είναι το διασυνδεδεμένο, εφόσον ενσωματώνει και την εξωτερική τροφοδοσία από το ηλεκτρικό δίκτυο και κυματικούς μετατροπείς, αλλά και μπαταρίες. Για το διασυνδεδεμένο σύστημα, η μοντελοποίηση ξεκινάει με τον υπολογισμό της δομής της συστοιχίας συσσωρευτών, με βάση τον αριθμό των μπαταριών  $N_{BAT}$  που έχουν επιλεγεί για χρήση.

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι μπαταρίες καθορίζει την τάση και τη χωρητικότητα της συστοιχίας που δομούν. Στη σειριακή συνδεσμολογία, η συνολική χωρητικότητά της, είναι ίση

με αυτήν του ενός συσσωρευτή, ενώ η τάση που παράγεται αποτελεί άθροισμα των τάσεων των μπαταριών. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με την παράλληλη συνδεσμολογία.

Η συστοιχία αποτελείται από πολλαπλές σειριακές διατάξεις μπαταριών συνδεδεμένες παράλληλα. Το πλήθος των εν σειρά συσσωρευτών  $N_{s,b}$ , καθορίζεται από την τάση στον DC δίαυλο, όπως περιγράφεται από τη σχέση (3.1):

$$N_{s,b} = \text{ceil}\left(\frac{V_{BUS}}{V_B}\right) \quad (3.1)$$

όπου:

- $V_{BUS}$ , την τάση στο δίαυλο DC και
- $V_B$ , την ονομαστική τάση κάθε μπαταρίας που αποτελεί το bank.

Η τάση στο δίαυλο  $V_{BUS}$  αποτελεί την τάση εξόδου του ενσωματωμένου στον κάθε μετατροπέα φορτιστή και καθορίζεται από την επιλεγμένη δομή της συστοιχίας μπαταριών.

Από τη σχέση (3.1) προκύπτει ότι αν  $V_{BUS} = V_B$ , οι μπαταρίες που αποτελούν τη συστοιχία διατάσσονται όλες παράλληλα μεταξύ τους, καθώς κάθε παράλληλος κλάδος αποτελείται από μία μόνο μπαταρία.

Ο αριθμός των παράλληλων σειρών μπαταριών  $N_{s,p}$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{s,p} = \text{floor}\left(\frac{N_{BAT}}{N_{s,b}}\right) \quad (3.2)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας ( $C_n$  (Ah)), καθορίζεται από το πλήθος των παράλληλων σειρών που το αποτελούν.

$$C_n = N_{s,p} \cdot C_B \quad (3.3)$$

με  $C_B$  (Ah) την ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή που δομεί τη συστοιχία.

Η επόμενη σχέση περιγράφει την απαιτούμενη ισχύ για την άντληση θαλασσινού νερού,  $P_T$  (W).

$$P_T = H \cdot P_H \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} + E \cdot P_E \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} \quad (3.4)$$

όπου:

- $H$  (m), η ελάχιστη (οριζόντια) απόσταση της τοποθεσίας του συστήματος αφαλάτωσης από την ακτή,

- $P_H [W/(m \cdot L)]$ , η ισχύς που απαιτείται για την άντληση νερού ανά μέτρο (οριζοντίως) και λίτρο,
- $W_{d,n} (L/day)$ , η ημερήσια ονομαστική παραγωγή πόσιμου νερού κάθε μονάδας αφαλάτωσης,
- $E (m)$ , το υψόμετρο της θέσης εγκατάστασης του συστήματος σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας,
- $P_E [W/(m \cdot L)]$ , η ισχύς που απαιτείται για την άντληση νερού ανά μέτρο (ανύψωσης) και λίτρο.

Σε περίπτωση το σύστημα αφαλάτωσης έχει εγκατασταθεί την ακτή, η τιμή της σχέσης (3.4) είναι  $P_T = 0$ .

Για να γίνει η παραγωγή πόσιμου νερού πρέπει να ενεργοποιηθούν οι μονάδες αφαλάτωσης, οι οποίοι λειτουργούν με AC τροφοδοσία. Ωστόσο το ρεύμα που παράγεται και προορίζεται για την τροφοδοσία τους, είναι συνεχές. Γι' αυτό το λόγο μεσολαβούν αντιστροφείς μεταξύ της παροχής DC ρεύματος και των μονάδων αφαλάτωσης ώστε να μετατραπεί το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC). Το πλήθος των αντιστροφέων που απαιτείται για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης περιγράφεται από τη σχέση:

$$N_{INV} = \text{ceil}[\frac{N_{DU} \cdot P_U + P_T}{P_{INV}}] \quad (3.5)$$

όπου:

- $N_{DU}$ , ο αριθμός των μονάδων αφαλάτωσης,
- $P_U (W)$ , η ισχύς εισόδου κάθε μονάδας αφαλάτωσης,
- $P_{INV} (W)$ , η ονομαστική ισχύς κάθε αντιστροφέα.

Για να θεωρηθεί βιώσιμο το σύστημα, θα πρέπει να λειτουργήσει σωστά για μια μακροχρόνια περίοδο διάρκειας  $Y = 20$  ετών. Παρόλα αυτά, η ζήτηση για πόσιμο νερό μεταβάλλεται κάθε μια ώρα. Γι' αυτό το λόγο εξετάζονται οι ωριαίες τιμές παραγωγής ισχύος και πόσιμου νερού και επαληθεύονται για να διαπιστωθεί αν το σύστημα είναι ικανό να συνεχίσει τη λειτουργία του. Έτσι, για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος, το χρονικό βήμα ισούται με  $\Delta t = 1$  ώρα. Εφόσον ένας χρόνος συντίθεται από 8760 ώρες, το ωριαίο βήμα για ολόκληρη τη διάρκεια της προσομοίωσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $1 \leq t \leq 175200$ .



Η ωριαία DC ισχύς ( $W$ ) που μπορεί να παραχθεί από το σύνολο των κυματικών μετατροπέων που χρησιμοποιεί το σύστημα είναι:

$$P_{RE}(t) = N_{WEG} \cdot n_s \cdot P_{WEG}(t) \quad (3.6)$$

όπου:

- $N_{WEG}$  : ο αριθμός των κυματικών μετατροπέων,
- $n_s$  (%) : η απόδοση μετατροπής ισχύος των φορτιστών μπαταριών (battery chargers),
- $P_{WEG}(t)$  ( $W$ ) : η ωριαία παραγωγή κυματικής ισχύος καθενός από τους μετατροπείς.

Η σχέση (3.7) περιγράφει την επιθυμητή ισχύ παροχής στους DC / AC αντιστροφείς  $P_L$  ( $W$ ) με σκοπό την τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης:

$$P_L = (N_{DU} \cdot P_U + P_T) / n_i \quad (3.7)$$

όπου  $n_i$  (%) ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφών που χρησιμοποιούνται.

Στη συνέχεια μελετάται η συμπεριφορά φόρτισης / εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών. Την τροφοδοσία της συστοιχίας αναλαμβάνουν οι μετατροπείς μέσω του DC διαύλου, συνεπώς το ρεύμα φόρτισης / εκφόρτισης ορίζεται ως:

$$I_{B,C/D} = \frac{[P_{RE}(t) - P_L(t)]}{V_{BUS}} \quad (3.8)$$

όπου  $I_{B,C/D} > 0$  κατά τη διάρκεια της φόρτισης και  $I_{B,C/D} < 0$  κατά την εκφόρτιση και μετράται σε (A).

Οι μπαταρίες διαθέτουν προστασία υπερ(εκ)φόρτισης, κατά συνέπεια το πραγματικό ρεύμα εισόδου  $I_B(t)$  (A) προκύπτει έπειτα από έλεγχο και προσαρμόζεται στα εξής όρια:

$$I_B(t) = \begin{cases} I_{c,max}, & \text{αν } I_{B,C/D} > I_{c,max} \\ I_{B,C/D}, & \text{αν } I_{d,max} < I_{B,C/D} < I_{c,max} \\ I_{d,max}, & \text{αν } I_{B,C/D} < I_{d,max} \end{cases} \quad (3.9)$$

με  $I_{c,max} = \frac{C_n}{5 \text{ hours}}$  (A) και  $I_{d,max} = -\frac{C_n}{5 \text{ hours}}$  (A) το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα.

Η αρχική κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας, κατά την εκκίνηση δηλαδή της λειτουργίας του συστήματος, είναι, για  $t = 0$ :

$$C(0) = (1 - DOD/2) \cdot C_n \quad (3.10)$$

όπου  $DOD$  (%) το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό εκφόρτισης της συστοιχίας.

Το αποθηκευμένο φορτίο στη συστοιχία για κάθε βήμα  $\Delta t = 1$  ώρα της προσομοίωσης περιγράφεται ως εξής:

$$C(t) = \begin{cases} C(t-1) + n_B \cdot I_B(t) \cdot 1h, & \text{αν } C(t-1) + n_B \cdot I_B(t) \cdot 1h < C_n \\ C_n, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.11)$$

όπου:

- $C(t-1)$  (Ah), το φορτίο που είχε η συστοιχία μπαταριών την προηγούμενη ώρα  $t-1$ ,
- $n_B$  (%), ο συντελεστής απόδοσης φόρτισης.

Για κάθε ώρα λειτουργίας  $t$  των μονάδων αφαλάτωσης, ο συνολικός όγκος παραγόμενου πόσιμου νερού  $W_{RO}(t)$  περιγράφεται από τη σχέση:

$$W_{RO}(t) = N_{DU} \cdot W_U \quad (3.12)$$

όπου  $W_U$  (L) η ποσότητα πόσιμου νερού που παράγει ανά ώρα κάθε μια από τις μονάδες αφαλάτωσης.

Η ποσότητα πόσιμου νερού (L) που εισέρχεται στη δεξαμενή ή εξέρχεται από αυτήν, εξαρτάται όχι μόνο από την παραγόμενη, αλλά και από τη ζητούμενη για κάθε ώρα λειτουργίας. Υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta W(t) = W_{RO}(t) - W_D(t) \quad (3.13)$$

με  $W_D(t)$  (L) την τρέχουσα ζήτηση σε πόσιμο νερό για την ώρα  $t$ .

Η τιμή που προκύπτει από την σχέση (3.13) μπορεί να είναι είτε θετική, είτε αρνητική. Αν η ποσότητα παραγόμενου πόσιμου νερού για την τρέχουσα ώρα είναι μικρότερη από τη ζήτηση,  $\Delta W(t) < 0$ , θα χρειαστεί να γίνει εξαγωγή  $\Delta W(t)$  (L) νερού από τη δεξαμενή. Αντίθετα, αν ο όγκος του παραγόμενου νερού υπερσχύει της ζήτησης,  $\Delta W(t) > 0$ , τότε προστίθεται η διαφορά  $\Delta W(t)$  στη δεξαμενή.

Έτσι, για κάθε ώρα λειτουργίας, υπολογίζεται η τρέχουσα στάθμη της δεξαμενής για την ώρα  $t$ :

$$W_T(t) = \begin{cases} W_T(t-1) + \Delta W(t), & \text{αν } W_T(t-1) + \Delta W(t) < W_{T,n} \\ W_{T,n}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.14)$$

όπου  $W_{T,n}$ , η μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής σε L.

Τη στιγμή της εκκίνησης του συστήματος  $t = 0$ , η δεξαμενή θεωρείται ότι είναι κατά το ήμισυ γεμάτη:

$$W_T(0) = 0.5 \cdot W_{T,n} \quad (3.15)$$

## 3.5 Προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος αφαλάτωσης

### 3.5.1 Διασυνδεδεμένο ΑΠΕ Σύστημα αφαλάτωσης με σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο

Εδώ πραγματοποιείται η προσομοίωση του διασυνδεδεμένου συστήματος αφαλάτωσης για λειτουργία 20 ετών ή  $\Delta t = 175200$  ωρών. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την ισχύ που παράγουν οι κυματικοί μετατροπείς, εξετάζει αν η ενέργεια σε Wh επαρκεί για τη φόρτιση των μπαταριών και τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης και στη συνέχεια μεταβάλλει και παρακολουθεί τη στάθμη της δεξαμενής. Τέλος, υπολογίζει την ενέργεια προς αγορά ή πώληση στο δίκτυο και το ολικό κόστος του συστήματος. Βασική προϋπόθεση για να εξακολουθεί να εκτελείται ο αλγόριθμος, είναι στο τέλος κάθε επανάληψης η στάθμη του νερού της δεξαμενής να είναι υψηλότερα από την ελάχιστη επιτρεπτή  $W_{T,min}$  (L).

Η προσομοίωση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψιν τη σειρά προτεραιότητας για την κάλυψη της ζήτησης [9]:

- Προτεραιότητα 1<sup>η</sup>: Αφαλάτωση (ενεργοποίηση μονάδων αφαλάτωσης),
- Προτεραιότητα 2<sup>η</sup>: Κάλυψη με χρήση του διαθέσιμου όγκου νερού στη δεξαμενή,
- Προτεραιότητα 3<sup>η</sup>: Αγορά ρεύματος για τη λειτουργία του συστήματος, ώστε να καλυφθεί η ζήτηση.

Αναλυτικότερα, εκτελείται η εξής διαδικασία. Αρχικά υπολογίζεται η συνολική ισχύς που παράγουν οι κυματικοί μετατροπείς. Αμέσως προκύπτουν 2 πιθανά σενάρια:

1. Η παραγόμενη κυματική ισχύς επαρκεί για την τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης ( $P_{RE} \geq P_L$ )
2. Η παραγόμενη κυματική ισχύς δεν επαρκεί για την αφαλάτωση ( $P_{RE} < P_L$ )

Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση, το σύστημα λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη απόδοση. Η συστοιχία συσσωρευτών (αν δεν είναι πλήρως φορτισμένη) φορτίζεται, σύμφωνα με τη σχέση (3.9). Στη συνέχεια υπολογίζεται και η απαιτούμενη ισχύς για την ενεργοποίηση των μονάδων αφαλάτωσης (σχέση 3.7). Αν προκύψει περισσευούμενη ενέργεια, πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο και η ποσότητά της σε (Wh), υπολογίζεται παρακάτω:

$$E_G(t) = \begin{cases} [P_{RE}(t) - P_L(t) - V_{BUS} \cdot I_{CH}] \cdot \frac{n_i}{100} \cdot 1h, \\ \alpha \nu [P_{RE}(t) - V_{BUS} \cdot I_{CH}] \cdot \frac{n_i}{100} \leq N_{INV} \cdot P_{INV} \\ [N_{INV} \cdot P_{INV} - P_L(t) \cdot \frac{n_i}{100}] \cdot 1h, \text{ διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου  $I_{CH} = I_{B,C/D} - I_{C,max}(A)$ , το πλεόνασμα ρεύματος που προκύπτει από τη φόρτιση της συστοιχίας μπαταριών, εφόσον φυσικά  $I_{B,C/D} > I_{C,max}$ . Για σύστημα χωρίς χρήση μπαταριών,  $I_{CH} = 0$ . Έπειτα, ενεργοποιούνται οι μονάδες αφαλάτωσης, υπολογίζεται το παραγόμενο πόσιμο νερό (σχέση 3.12) και η διαφορά νερού  $\Delta W(t)$  (σχέση 3.13) που θα προστεθεί ή θα αφαιρεθεί από τη δεξαμενή. Τέλος, ανανεώνεται η στάθμη της (σχέση 3.14) και αν  $W_T(t) \geq W_{T,min}$ , η προσομοίωση προχωρά στην επόμενη ώρα ( $t = t + 1$ ).

Για τη 2<sup>η</sup> περίπτωση, θα πρέπει να εξεταστούν 2 υποπεριπτώσεις:

- α. Το σύστημα διαθέτει συστοιχία μπαταριών
- β. Το σύστημα λειτουργεί χωρίς τη χρήση μπαταριών

Για ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μπαταρίες, εφόσον η παραγόμενη ισχύς δεν επαρκεί για την λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης, αξιοποιείται η αποθηκευμένη στις μπαταρίες ενέργεια. Αρχικά λοιπόν, γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για το αν μπορεί να αξιοποιηθεί το αποθηκευμένο φορτίο στη συστοιχία, εφαρμόζοντας τη σχέση (3.11). Το αποτέλεσμα αξιολογείται σε σύγκριση με το ελάχιστο επιτρεπτό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας  $C_{B,min}(Ah)$ , το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{B,min} = (1 - DOD) \cdot C_B \cdot N_{s,p} \quad (3.17)$$

Εφόσον το διαθέσιμο φορτίο επιτρέπει την εκφόρτιση της συστοιχίας ( $C(t-1) - I_B(t) \geq C_{B,min}$ ) και αν  $|I_B(t)| < |I_{d,max}|$ , πραγματοποιείται η εκφόρτιση. Διαφορετικά, αν το φορτίο δεν επαρκεί ή αν το ρεύμα εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο επιτρεπτό ( $|I_B(t)| > |I_{d,max}|$ ), τότε η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- i. Το bank δεν εκφορτίζεται ( $C(t) = C(t-1)$ ).
- ii. Οι μονάδες αφαλάτωσης δε λειτουργούν ( $W_{RO}(t) = 0$ ).
- iii. Η κατανάλωση καλύπτεται αποκλειστικά από το διαθέσιμο νερό της δεξαμενής ( $W_T(t) = W_T(t-1) - W_D(t)$ ).

Η παραγόμενη ενέργεια δε χάνεται, αντίθετα αξιοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών (σχέση 3.9). Όμοια με την 1<sup>η</sup> περίπτωση, αν υπάρχει πλεόνασμα ρεύματος φόρτισης και φορτίου του bank, πωλείται στο δίκτυο.

Αν το αποθηκευμένο νερό στη δεξαμενή δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης θα πρέπει να ενεργοποιηθούν οι μονάδες αφαλάτωσης, επομένως ακολουθείται διαφορετική διαδικασία:

- i. Η συστοιχία μπαταριών εκφορτίζεται με ρεύμα  $I_B$  (A) έως ότου φτάσει στο ελάχιστο επιτρεπτό φορτίο  $C_{B,min}$  (Ah).
- ii. Αν το φορτίο της συστοιχίας φτάσει στο επίπεδο  $C_{B,min}$  (Ah), αλλά παρόλα αυτά το άθροισμα της ισχύος που προσέφερε και της παραγόμενης ισχύος ( $P_{RE}(t)$ ) δεν επαρκεί για την τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης, αγοράζεται η επιπρόσθετη απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Τέλος, η προσομοίωση περνάει στην επόμενη επανάληψη, μόνο εφόσον  $W_T(t) \geq W_{T,min}$ . Διαφορετικά, τερματίζεται διότι το σύστημα θεωρείται ανεπιτυχές και μη βιώσιμο.

Για την υποπερίπτωση (β), αν δεν υπάρχει συστοιχία συσσωρευτών, στη διαδικασία που ακολουθείται υπάρχουν 2 περιπτώσεις:

- i. Το νερό της δεξαμενής επαρκεί ( $W_T(t) - W_D(t) \geq W_{T,min}$ ) για την κάλυψη της ζητούμενης κατανάλωσης χωρίς τη χρήση των μονάδων αφαλάτωσης ( $W_{RO}(t) = 0$ ). Σε αυτήν την περίπτωση, ο όγκος της δεξαμενής μειώνεται κατά  $\Delta W = W_D(t)$  και όλη η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο.
- ii. Το νερό στη δεξαμενή δεν αρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Τότε, η διαφορά ισχύος που απαιτείται για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης αγοράζεται από το δίκτυο. Ο όγκος πόσιμου νερού στη δεξαμενή μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (3.13) και στο τέλος της τρέχουσας ώρας  $t$  εξετάζεται αν το επίπεδο νερού στη δεξαμενή είναι πάνω από το ελάχιστο επιτρεπτό. Αν η τελευταία συνθήκη δεν ισχύει, το σύστημα κρίνεται μη βιώσιμο και τερματίζεται η προσομοίωση.

Για τη διασφάλιση της κατανάλωσης καθαρού πόσιμου νερού, αλλά και για τη σωστή και ομαλή λειτουργία του συστήματος, είναι αναγκαίο να καθαρίζεται η δεξαμενή ανά τακτά διαστήματα. Ο καθαρισμός διαρκεί 1 ώρα και προγραμματίζεται στο τέλος κάθε εβδομάδας. Για να μπορέσει όμως να πραγματοποιηθεί, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Το νερό στη δεξαμενή να είναι αρκετό ούτως ώστε να μπορέσει να καλυφθεί όχι μόνο η διαδικασία του καθαρισμού, αλλά και η ζήτηση ύδρευσης των καταναλωτών.
- Η παραγόμενη ισχύς των μετατροπέων σε συνδυασμό με αυτήν που είναι αποθηκευμένη στους συσσωρευτές (αν οι τελευταίοι είναι διαθέσιμοι), να επαρκεί για τη διαδικασία αυτή.

Κατά τη διάρκεια καθαρισμού της δεξαμενής, διακόπτεται η λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης. Αν το σύστημα διαθέτει συστοιχία μπαταριών, αυτή αποφορτίζεται. Αν προκύψει περίσσεια από την κυματική ενέργεια, εκείνη χρησιμοποιείται για την φόρτιση της συστοιχίας, σύμφωνα με τα όρια φόρτισης που αναφέρονται στη σχέση (3.9). Αν  $I_{B,C/D} > I_{c,max}$  η διαφορά πωλείται στο δίκτυο. Αν η συστοιχία φορτίσει πλήρως και πάλι υπάρξει περίσσεια ρεύματος, αυτή επίσης πωλείται. Σε περίπτωση που δεν διατίθενται μπαταρίες, η παραγόμενη ενέργεια που απομένει μετά τη δέσμευση της απαιτούμενης ποσότητας για την αφαλάτωση, διατίθεται προς πώληση.

Σε περίπτωση που οι συνθήκες αυτές δεν ικανοποιούνται, ο προγραμματισμένος καθαρισμός αναβάλλεται για 72 ώρες αργότερα. Αν όμως δε μπορεί ούτε τότε να πραγματοποιηθεί, το σύστημα κρίνεται ανεπιτυχές και η προσομοίωση διακόπτεται.

Στο πέρας της 20ετούς προσομοίωσης, εξετάζονται οι παρακάτω συνθήκες:

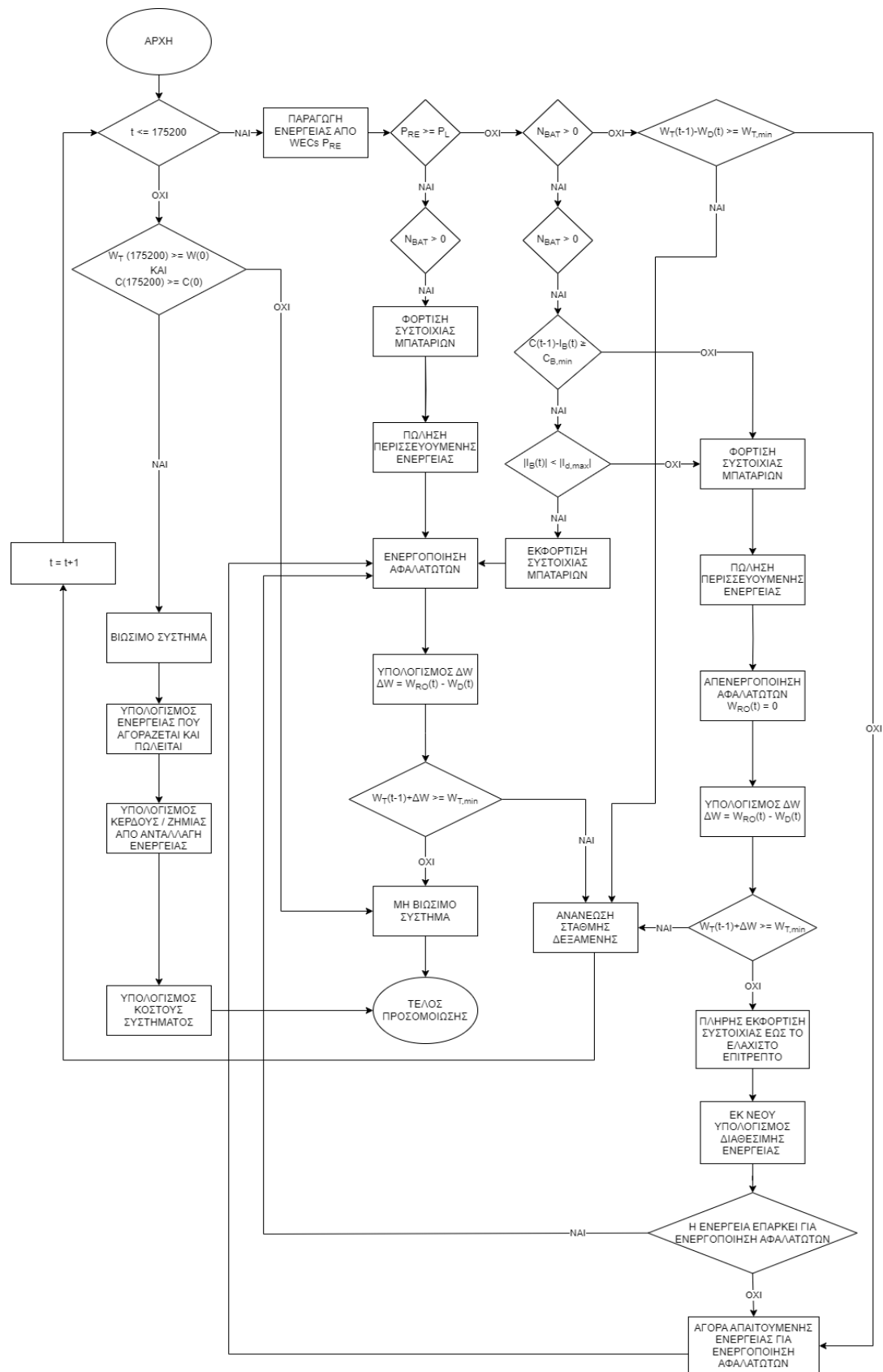
$$W_T(175200) \geq W_T(0) = 0.5 \cdot W_{T,n} \quad (3.18)$$

$$C(175200) \geq C(0) = (1 - DOD/2) \cdot C_n \quad (3.19)$$

Οι συνθήκες αυτές είναι οι προϋποθέσεις βιωσιμότητας του συστήματος. Η πρώτη προϋπόθεση είναι, ο όγκος του νερού της δεξαμενής την τελευταία ώρα προσομοίωσης να είναι μεγαλύτερος από τον όγκο που ήταν διαθέσιμος στην έναρξη της προσομοίωσης  $W_T(0)$  (σχέση 3.18). Η δεύτερη προϋπόθεση αφορά την τελική χωρητικότητα της συστοιχίας των μπαταριών, η οποία συγκεκριμένα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την αρχική  $C(0)$  (σχέση 3.19).

Αν οι παραπάνω βασικές προϋποθέσεις ικανοποιούνται στο τέλος της προσομοίωσης, το σύστημα θεωρείται πιθανή λύση της βελτιστοποίησης. Διαφορετικά, το σύστημα θεωρείται μη βιώσιμο και απορρίπτεται από προτεινόμενη λύση.

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει σχηματικά τη λειτουργία του διασυνδεδεμένου συστήματος αφαλάτωσης.



Σχήμα 15: Διάγραμμα ροής λειτουργίας διασυνδεδεμένου συστήματος αφαλάτωσης.

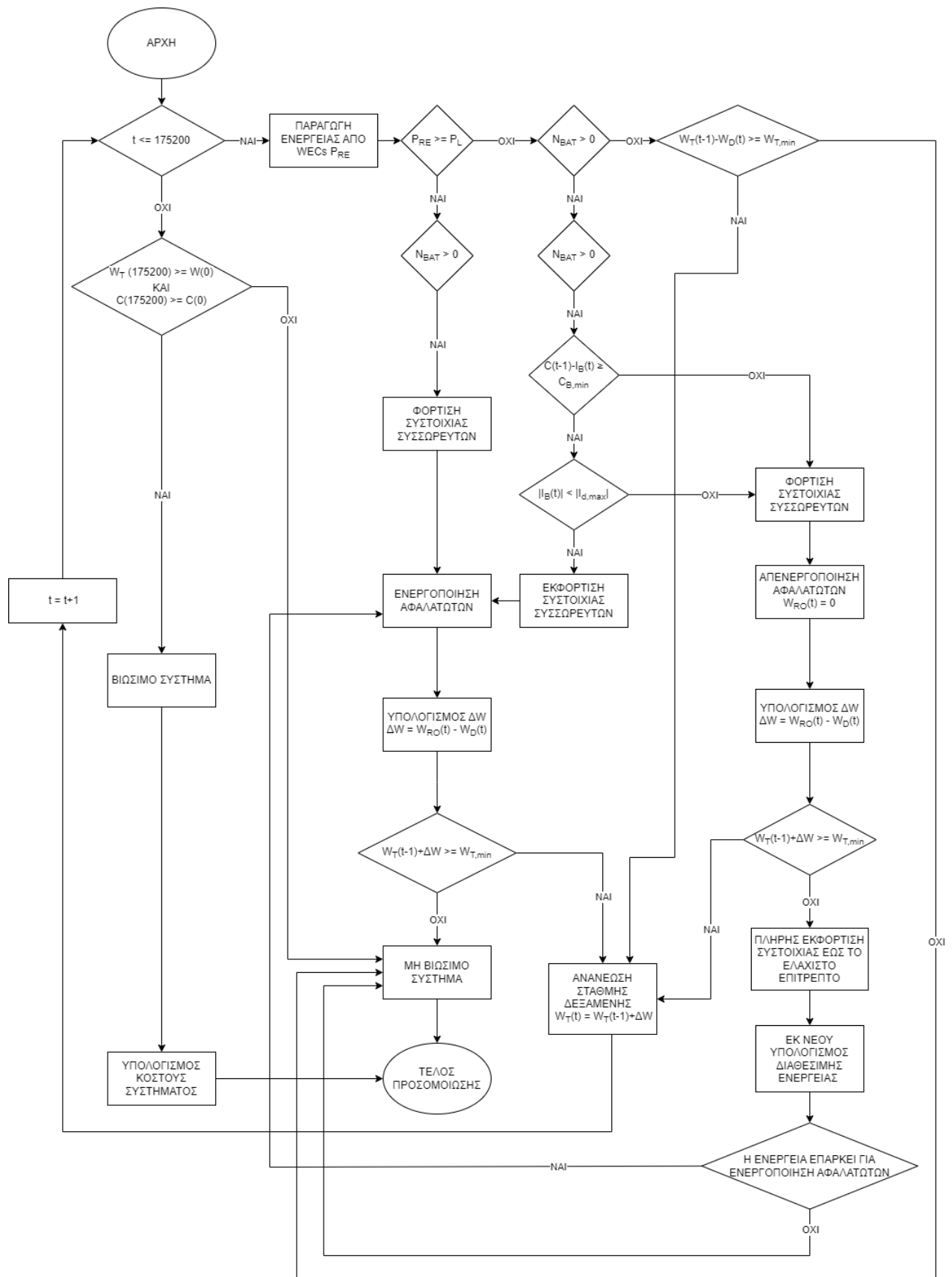


### 3.5.2 Αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης χωρίς σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο

Το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης λειτουργεί παρόμοια με το διασυνδεδεμένο, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος, δεν υπάρχει σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Βασίζεται πλήρως στην ενέργεια που παράγουν οι κυματικοί μετατροπείς και στην ενέργεια που μπορούν να παρέχουν οι μπαταρίες, στις περιπτώσεις που και η δεύτερη είναι απαραίτητη για την αφαλάτωση. Αυτό το γεγονός δημιουργεί τα εξής αποτελέσματα στην προσομοίωση:

- Η παραπλήσια ισχύς που παράγεται αλλά και το ρεύμα που περισσεύει  $I_{CH}$ , χάνονται, εφόσον δε μπορούν να πωληθούν στο δίκτυο.
- Σε περίπτωση που ο αποθηκευμένος όγκος πόσιμου νερού στη δεξαμενή αδυνατεί να καλύψει τη ζήτηση ( $W_T(t) - W_D(t) \leq W_{T,min}$ ), αλλά και η παραγόμενη ισχύς σε συνδυασμό με αυτήν που παρέχεται από τις μπαταρίες δεν επαρκούν για την τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης ( $P_{RE}(t) + I_{d,max} \cdot V_{BUS} < P_L$ ), το σύστημα αναγκαστικά αποτυγχάνει εφόσον δεν υπάρχει η υποστήριξη από το δίκτυο για παροχή επιπρόσθετης αναγκαίας ενέργειας.

Η αδυναμία πώλησης ρεύματος στο δίκτυο αποτελεί τροχοπέδη στη μείωση του αρχικού κόστους του συστήματος. Παρόλα αυτά, το σύστημα παράγει την ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσει χωρίς να εξαρτάται από το δίκτυο, το οποίο σε ρεαλιστικές συνθήκες δεν είναι πάντα αποδοτικό.

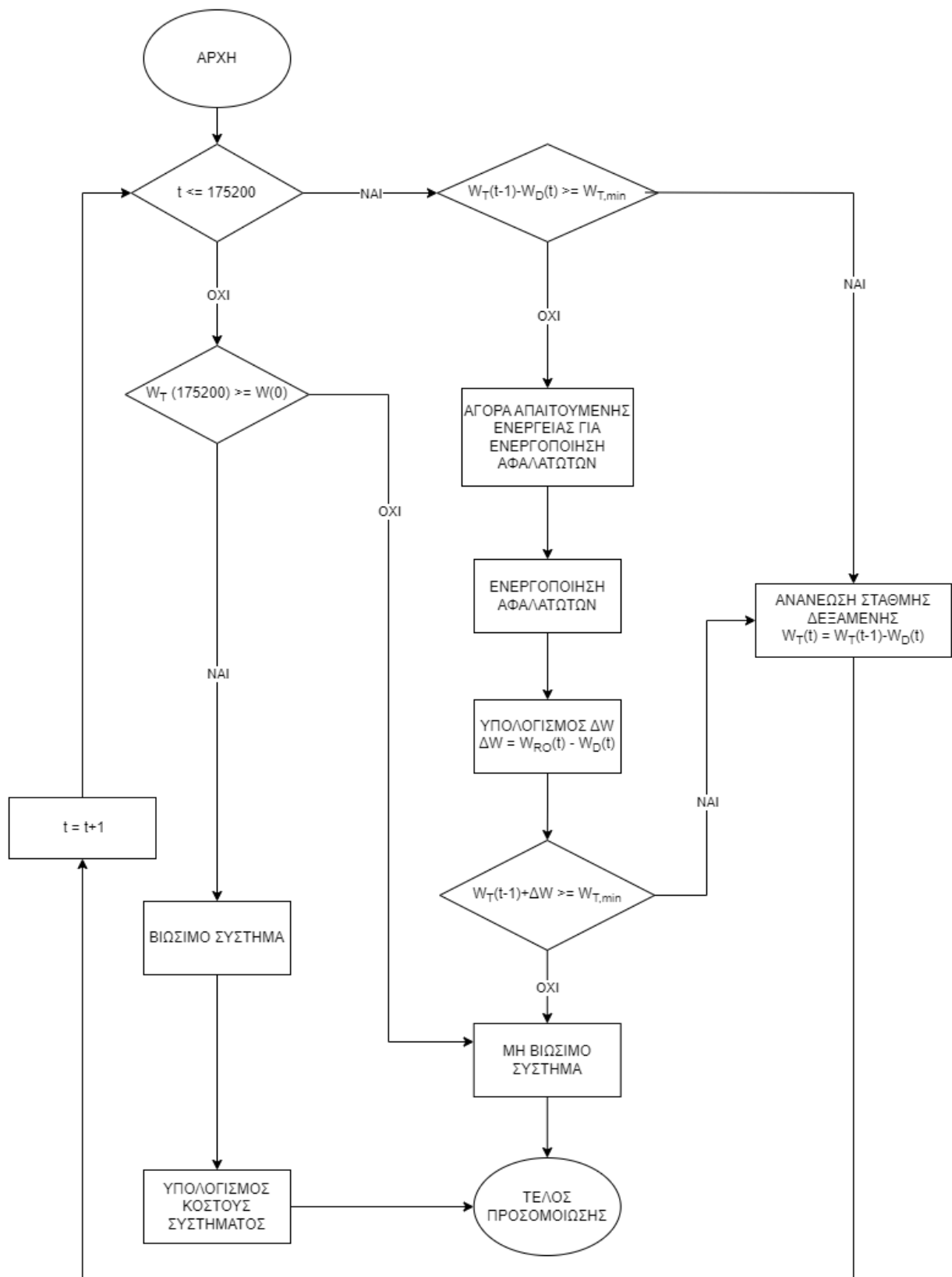


Σχήμα 16: Διάγραμμα ροής λειτουργίας αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης.

### 3.5.3 Σύστημα αφαλάτωσης χωρίς ΑΠΕ

Το σύστημα που τροφοδοτείται αποκλειστικά από το ηλεκτρικό δίκτυο διαφέρει πολύ στη λειτουργία του σε σχέση με τα δύο προηγούμενα. Δε χρησιμοποιεί κυματικούς μετατροπείς, και κατά συνέπεια ούτε μπαταρίες, εφόσον δε συντρέχει λόγος αποθήκευσης ενέργειας. Εφόσον το δίκτυο παρέχει συνεχές ρεύμα (AC), δεν απαιτείται ούτε η σύνδεση DC/AC αντιστροφείς στην τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης, αφού και αυτοί λειτουργούν με AC ρεύμα. Λόγω της απουσίας όλων αυτών των στοιχείων, ο σχεδιασμός και κατ' επέκτασιν αλγόριθμος προσομοίωσης είναι πολύ πιο απλός στη δομή του. Για τον περιορισμό του κόστους, οι μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν μόνο όταν το διαθέσιμο αποθηκευμένο νερό στη δεξαμενή δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης ( $W_T(t-1) < W_D$ ). Τέλος, το σύστημα αποτυγχάνει μόνο σε περίπτωση είτε που οποιαδήποτε ώρα  $t$ ,  $W_T(t) < W_{T,min}$ , είτε στο τέλος της προσομοίωσης, δεν πληρείται η δεύτερη βασική προϋπόθεση, που περιγράφεται στην (3.18).

Εφόσον ολοκληρωθεί επιτυχώς η προσομοίωση 20ετούς λειτουργίας του συστήματος και με την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι βιώσιμο (σχέσεις 3.18 ή και 3.19), γίνεται ο υπολογισμός του κόστους για το σύνολο της λειτουργίας. Ανάλογα με τον επιθυμητό στόχο βελτιστοποίησης, επιλέγεται και η αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Οι στόχοι βελτιστοποίησης και οι αντικειμενικές συναρτήσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία περιγράφονται παρακάτω.



Σχήμα 17: Διάγραμμα ροής λειτουργίας συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται πλήρως από το ηλεκτρικό δίκτυο.

# 4.

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

---

### 4.1 Εισαγωγή

Το σύστημα αφαλάτωσης θεωρείται αξιόπιστο, όταν ο συνδυασμός των διάφορων στοιχείων που το αποτελούν, είναι ικανός να παρέχει ομαλή λειτουργία στο σύστημα, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, δεδομένης της ζήτησης σε πόσιμο νερό. Το πρόβλημα που μελετάται σε αυτή την εργασία είναι η βελτιστοποίηση σχεδιασμού μιας μονάδας αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί ΑΠΕ και συγκεκριμένα μετατροπείς κυματικής ενέργειας. Οι στόχοι της βελτιστοποίησης αφορούν είτε το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος είτε το μέγιστο οικονομικό όφελος το οποίο μπορεί να αποφέρει έπειτα από πώληση περίσσειας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (Διασυνδεδεμένα συστήματα). Για κάθε μια από τις δομές του συστήματος αφαλάτωσης, μελετάται η βελτιστοποίηση δομών που αξιοποιούν τον εκάστοτε από τους τέσσερις κυματικούς μετατροπείς που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον γίνεται η σύγκριση με το κόστος λειτουργίας ενός συστήματος που δε χρησιμοποιεί ΑΠΕ, αλλά

εξαρτάται πλήρως από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO (Particle Swarm Optimization).

## 4.2 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης PSO

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με χρήση του αλγορίθμου PSO. Ο αλγόριθμος αυτός ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία για να καταλήξει στη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μια αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Η βέλτιστη λύση μπορεί να είναι είτε το ολικό μέγιστο, είτε το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης, ανάλογα με το ζητούμενο του προβλήματος.

Η PSO χρησιμοποιεί ένα σμήνος σωματιδίων (particle swarm) το οποίο «κινείται» μέσα στο χώρο του προβλήματος [10]-[11]. Τα σωματίδια αυτά έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν την θέση τους σε κάθε επανάληψη, ενώ κάθε ένα από αυτά, αποτελεί πιθανή βέλτιστη λύση του προβλήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση διαθέτει έναν αριθμό παραμέτρων, τις μεταβλητές σχεδίασης (design variables). Ο συνδυασμός των τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού αποτελεί το σετ «συντεταγμένων» ενός σωματιδίου στο χώρο, το οποίο αντιπροσωπεύεται ως ένα διάνυσμα  $\vec{X}$ . Σε κάθε επανάληψη το κάθε particle προσπαθεί να βρει τη δική του βέλτιστη λύση (τοπικό βέλτιστο - particle best), βασισμένο στην προηγούμενη λύση του (τη θέση του στο χώρο του προβλήματος) όπως και στην παρούσα θέση των άλλων σωματιδίων. Οι βέλτιστες λύσεις όλων των σωματιδίων συγκρίνονται στο τέλος κάθε επανάληψης για να εξακριβωθεί η καθολική βέλτιστη λύση του προβλήματος (global best).

Πιο συγκεκριμένα, ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου έχει τα εξής βήματα εκτέλεσης:

- i. Τα σωματίδια αποκτούν μια τυχαία ταχύτητα και θέση στο χώρο. Το κάθε σωματίδιο  $i$ , λοιπόν βρίσκεται αρχικά ( $t = 0$ ) στην τυχαία θέση:

$$X_i(0) = (x_{i1}(0), x_{i2}(0), x_{i3}(0), \dots, x_{iN}(0)) \quad (4.1)$$

Με ταχύτητα:

$$V_i(0) = (v_{i1}(0), v_{i2}(0), v_{i3}(0), \dots, v_{iN}(0)) \quad (4.2)$$

όπου  $N$  το πλήθος των μεταβλητών σχεδίασης [10].

- ii. Στη συνέχεια, για κάθε σωματίδιο γίνεται επίλυση της αντικειμενικής συνάρτησης  $f(\mathbf{X})$  με τις τιμές των συντεταγμένων του σωματιδίου.
- iii. Το κάθε σωματίδιο να υπολογίζει εάν η τρέχουσα λύση είναι η (προσωπική του) βέλτιστη μέχρι την επανάληψη αυτή.
- iv. Υπολογίζεται και ενημερώνεται το ολικό βέλτιστο, η βέλτιστη λύση ανάμεσα σε όλα τα σωματίδια.
- v. Με βάση το τοπικό βέλτιστο για κάθε σωματίδιο αλλά και το ολικό βέλτιστο, ενημερώνεται η ταχύτητά του και η θέση του για την επόμενη επανάληψη. Συνεπώς, η νέα θέση του σωματιδίου στην επόμενη επανάληψη θα είναι:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (4.3)$$

όπου:

$$\begin{aligned} V_i(t+1) = & w \cdot V_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (best_{p,i} - X_i(t)) \\ & + c_2 \cdot r_2 \cdot (best_{g,t} - X_i(t)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

είναι η ταχύτητα του σωματιδίου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t + 1$ .

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας  $V_i(t)$  (σχέση 4.4), χρησιμοποιούνται οι σταθερές  $w, c_1, c_2$  οι οποίες αποτελούν τις παραμέτρους του αλγορίθμου PSO, ενώ  $best_{p,i}$  και  $best_{g,t}$  το τοπικό (σωματιδίου) και το ολικό (επανάληψης) βέλτιστο, αντίστοιχα [10].

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου σταματήσει να προκύπτει νέο ολικό βέλτιστο ή εφόσον εξαντληθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που έχουν οριστεί αρχικά.

## 4.3 Οι βελτιστοποιήσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία

### 4.3.1 Γενικά

Οι παράμετροι που συνθέτουν το διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού (design variables)  $\vec{X}$  είναι τέσσερις:

Πίνακας 5. Μεταβλητές σχεδιασμού.	
$N_{BAT}$	Πλήθος μπαταριών που δομούν τη συστοιχία
$W_{T,n}$	Χωρητικότητα δεξαμενής (L)
$N_{DU}$	Πλήθος μονάδων αφαλάτωσης
$N_{WEG}$	Πλήθος Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας

Κατά συνέπεια, ορίζεται το βασικό διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού (διάνυσμα θέσης) με τη μορφή  $\vec{X} = [N_{BAT}|W_{T,n}|N_{DU}|N_{WEG}]$  [9]. Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, ο 4<sup>ος</sup> στόχος βελτιστοποίησης αφορά σύστημα πλήρως εξαρτώμενο από το ηλεκτρικό δίκτυο, χωρίς ΑΠΕ. Επειδή στο σύστημα που δε χρησιμοποιεί ΑΠΕ και κατ' επέκτασιν κυματικούς μετατροπείς, δεν υπάρχουν ούτε μπαταρίες και φορτιστές, αλλά ούτε και αντιστροφείς, αξιοποιείται μια παραλλαγή του διανύσματος  $\vec{X}$ . Το προσαρμοσμένο διάνυσμα συντίθεται αποκλειστικά από τις μεταβλητές που περιγράφουν τη χωρητικότητα της δεξαμενής και το πλήθος των μονάδων αφαλάτωσης και ως εκ τούτου είναι της μορφής  $\vec{X}_1 = [W_{T,n}|N_{DU}]$ . Το ζητούμενο λοιπόν της εργασίας είναι να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων του διανύσματος που βελτιστοποιούν τον εκάστοτε στόχο.

Σε αυτήν την εργασία εξετάζονται οι 4 στόχοι βελτιστοποίησης:

1. Ελάχιστο ολικό κόστος [ $\min_{\mathbf{X}} \{C_{total}(\mathbf{X})\}$ ],
2. Ελάχιστο καθαρό κόστος [ $\min_{\mathbf{X}} \{C_{net}(\mathbf{X})\}$ ],
3. Μέγιστο οικονομικό όφελος [ $\max_{\mathbf{X}} \{C_{rev}(\mathbf{X})\}$ ],
4. Ελάχιστο κόστος συστήματος χωρίς ΑΠΕ [ $\min_{\mathbf{X}_1} \{C_{eg}(\mathbf{X}_1)\}$ ].

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο στόχος #3 διαφέρει από τους υπόλοιπους διότι αφορά την αναζήτηση του σχεδιασμού που αποφέρει το μέγιστο οικονομικό όφελος μέσω πώλησης ενέργειας και σε καμία περίπτωση δεν αφορά το κόστος λειτουργίας του συστήματος. Σε κάθε έναν από αυτούς τους στόχους αντιστοιχεί μια αντικειμενική συνάρτηση, για την οποία αναζητείται η βέλτιστη λύση. Για την κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους θα πρέπει να συμπεριληφθούν οι παρακάτω δαπάνες:



- Το κόστος διασύνδεσης του συστήματος αφαλάτωσης με το δίκτυο διανομής πόσιμου νερού,
- Το κόστος διασύνδεσης του συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο,
- Τα έξοδα αγοράς και εγκατάστασης των αγωγών μεταφοράς θαλασσινού νερού για αφαλάτωση,
- Η τρέχουσα τιμή κιλοβατώρας για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας,
- Τη συνολική δαπάνη που προκύπτει από την εγκατάσταση και συντήρηση του κάθε στοιχείου της μονάδας χωριστά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης,
- Το κόστος αντικατάστασης διαφόρων στοιχείων της μονάδας, που υπόκεινται σε φθορές λόγω μακροχρόνιας χρήσης (μπαταρίες, αντιστροφείς).

Το ολικό κόστος διασύνδεσης του τμήματος παραγωγής νερού με το δίκτυο διανομής  $c_w$  (€), υπολογίζεται ως εξής:

$$c_w = c_{wnet} \cdot \max \{W_D(t) |_{t=1}^{t=8760}\} \quad (4.5)$$

όπου  $c_{wnet}$  (€/L) το κόστος διασύνδεσης ανά λίτρο νερού που μεταφέρεται κάθε ώρα. Όπως παρατηρείται, η τιμή του  $c_w$  εξαρτάται άμεσα από την τοποθεσία εγκατάστασης της μονάδας αλλά και από τη ζήτηση νερού. Συγκεκριμένα, εξαρτάται από την απόστασή της από το δίκτυο διανομής πόσιμου νερού.

Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση υπολογίζεται το ολικό κόστος διασύνδεσης της μονάδας με το ηλεκτρικό δίκτυο  $c_e$  (€):

$$c_e = c_{enet} \cdot N_{INV} \cdot P_{INV} \quad (4.6)$$

όπου  $c_{enet}$  (€/W) το κόστος σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο ανά Watt, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών διάφορων δομών που απαιτούνται, όπως καλωδιώσεις και υποσταθμοί. Όμοια με την τιμή του  $c_w$ , έτσι και η τιμή του  $c_e$ , εξαρτάται από την απόστασή της από το ηλεκτρικό δίκτυο, όπως και από το πλήθος και τον τύπο αντιστροφέων ( $N_{INV}$ ) που έχουν εγκατασταθεί.

Το κόστος που αφορά τους αγωγούς μεταφοράς θαλασσινού νερού από τη θάλασσα στους μονάδες αφαλάτωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$c_T = \begin{cases} 0, & \text{αν η μονάδα βρίσκεται στην ακτή} \\ H \cdot c_H \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} + E \cdot c_E \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου:

- $c_H [(\text{€}/m \cdot L)]$ , το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του δικτύου μεταφοράς νερού ανά μέτρο οριζόντιας απόστασης και ημερήσιου όγκου σε λίτρα αντίστοιχα,
- $c_E [(\text{€}/m \cdot L)]$ , το αντίστοιχο κόστος που αφορά την υψομετρική απόσταση.

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι η τιμή του  $c_T$ , εξαρτάται από τη δομή του συστήματος, με αναφορά στο πλήθος των μονάδων αφαλάτωσης ( $N_{DU}$ ) που απαρτίζουν το σύστημα. Το πλήθος αυτό αποτελεί μια από τις μεταβλητές σχεδιασμού και προκύπτει από την εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Οι μπαταρίες, οι φορτιστές και οι αντιστροφείς φθείρονται όταν λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για να μπορέσει να συνεχίσει να λειτουργεί η μονάδα αφαλάτωσης χωρίς προβλήματα, θα πρέπει τα στοιχεία που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους να αντικαθίστανται με καινούρια. Το κόστος της αντικατάστασης κάθε στοιχείου επηρεάζεται άμεσα από τις μεταβολές του πληθωρισμού και του επιτοκίου που συμβαίνουν κάθε έτος. Οι σχέσεις που περιγράφουν τα κόστη αντικατάστασης των στοιχείων αυτών φαίνονται παρακάτω:

$$R_{BAT} = N_{BAT} \cdot C_{BAT} \cdot \left[ \sum_{j=Y1^*}^{\infty} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \quad (4.8)$$

$$R_{CH} = N_{CH} \cdot C_{CH} \cdot \left[ \sum_{j=Y2^*}^{\infty} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \quad (4.9)$$

$$R_{INV} = N_{INV} \cdot C_{INV} \cdot \left[ \sum_{j=Y3^*}^{\infty} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \quad (4.10)$$

όπου:

- $C_{BAT}$ ,  $C_{CH}$ ,  $C_{INV}$ : το κόστος αγοράς και εγκατάστασης μιας μπαταρίας, φορτιστή και αντιστροφέα αντίστοιχα,
- $Y1^*$ ,  $Y2^*$ ,  $Y3^*$ : το έτος για το οποίο απαιτείται η αντικατάσταση του στοιχείου,
- $g$  (%) και  $i$  (%): τα ποσοστά ετήσιου πληθωρισμού και επιτοκίου αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση για το ολικό κόστος  $C_{total}(X)$  (€), έχει την εξής σύνθεση:

$$\begin{aligned}
 C_{total}(\mathbf{X}) = & c_w + c_e + c_T + N_{BAT} \cdot C_{BAT} + N_{CH} \cdot C_{CH} + W_{T,n} \cdot C_T + N_{DU} \cdot C_{DU} + N_{INV} \cdot C_{INV} \\
 & + N_{WEG} \cdot C_{WEG} + \sum_{j=1}^Y \left[ \begin{array}{l} E_p(j) \cdot c_p + N_{WEG} \cdot M_{WEG} + W_{T,n} \cdot M_T \\ + N_{DU} \cdot M_{DU} + N_{BAT} \cdot M_{BAT} \\ + N_{CH} \cdot M_{CH} + N_{INV} \cdot M_{INV} \end{array} \right] \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \\
 & + R_{BAT} + R_{CH} + R_{INV} + D \cdot C_{w/l} \cdot N_{weg} \cdot P_{nom}^{WEG}
 \end{aligned}
 \quad (4.11)$$

όπου:

- $C_{WEG}$  (€), οι δαπάνες που απαιτούνται για την αγορά και εγκατάσταση των κυματικών μετατροπέων.
- $C_{DU}$  (€), το κόστος αγοράς και εγκατάστασης κάθε μονάδας αφαλάτωσης, αλλά και επιμέρους δαπάνες που τις αφορούν, όπως φίλτρα, μικροδεξαμενές και άλλα εξαρτήματα. Σε αυτό το κόστος επίσης συμπεριλαμβάνονται οι αγωγοί νερού.
- $M_{BAT}$ ,  $M_{CH}$ ,  $M_{DU}$ ,  $M_{INV}$ ,  $M_{WEG}$ , τα κόστη συντήρησης του κάθε ενός στοιχείου που αποτελεί τη μονάδα αφαλάτωσης, εκτός της δεξαμενής, ανά έτος σε €.
- $C_T$ , το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης της δεξαμενής σε €/L.
- $M_T$ , η ετήσια δαπάνη που απαιτείται για τη συντήρηση της δεξαμενής σε €/L.
- $Y$ , η διάρκεια ζωής της μονάδας (20 έτη) και  $j$  το τρέχον έτος προσομοίωσης.
- $E_p(j)$  (kWh), η συνολική ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο για κάθε έτος  $j$  διάρκειας ζωής της μονάδας.
- $c_p$  (€/kWh), η τρέχουσα τιμή αγοράς κιλοβατώρας.
- $D$  (m), η απόσταση των κυματικών μετατροπέων από τις μονάδες αφαλάτωσης.
- $C_{w/l}$  (€/W · m), το κόστος καλωδίωσης για τη σύνδεση των κυματικών μετατροπέων με τη μονάδα.
- $P_{nom}^{WEG}$  (kW), η ονομαστική ισχύς που δύναται να παράξει ο κυματικός μετατροπέας.

Το ολικό κόστος που υπολογίζεται με τη σχέση (4.11) μας δείχνει το συνολικό ύψος της δαπάνης που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ο 20ετής κύκλος ζωής της μονάδας αφαλάτωσης, η οποία χρησιμοποιεί κυματικούς μετατροπείς για την τροφοδοσία των στοιχείων και την επιτυχή λειτουργία της, σε συνδυασμό με την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Παρόλα αυτά, η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο δίνει τη δυνατότητα πώλησης ενέργειας με σκοπό τη μείωση της συνολικής δαπάνης. Το καθαρό κόστος  $C_{net}(\mathbf{X})$  (€) που προκύπτει έπειτα από την αξιοποίηση

της δυνατότητας αυτής, υπολογίζεται αφαιρώντας το σύνολο του συνολικού τζίρου πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από το ολικό κόστος, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$C_{net}(X) = C_{total}(X) - \sum_{j=1}^Y E_s(j) \cdot c_s \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (4.12)$$

όπου:

- $E_s(j)$  (kWh) : η συνολική ενέργεια που πωλήθηκε το έτος  $j$  της προσομοίωσης.
- $c_s$  (€/kWh) : η τιμή πώλησης κιλοβατώρας.

Ο τρίτος στόχος βελτιστοποίησης αναζητεί το συνδυασμό μεταβλητών σχεδιασμού που επιτυγχάνει το μέγιστο σύνολο εσόδων  $C_{rev}(X)$  (€) από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος:

$$C_{rev}(X) = \sum_{j=1}^Y E_s(j) \cdot c_s \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (4.13)$$

Για τη βελτιστοποίηση του συστήματος ως προς το κέρδος πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, θα πρέπει να περιοριστεί στο 1/3 η ολική ονομαστική παραγόμενη ισχύς από τους κυματικούς μετατροπείς σε σχέση με τη μελέτη προς βελτιστοποίηση των στόχων 1 και 2 [σχέσεις (4.11) και (4.12)].

Για τον τελευταίο στόχο της βελτιστοποίησης, το διάνυσμα μεταβλητών σχεδίασης τροποποιείται σε απλούστερη μορφή  $\bar{X}_1 = [W_{T,n} | N_{DU}]$ , εφόσον δε χρησιμοποιούνται ούτε κυματικοί μετατροπείς, αλλά ούτε και μπαταρίες. Το κόστος ζωής ενός συστήματος χωρίς ΑΠΕ  $C_{eg}(X_1)$  (€) υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} C_{eg}(X_1) = & c_w + c_e + c_T + W_{T,n} \cdot C_T + N_{DU} \cdot C_{DU} \\ & + \sum_{j=1}^Y [E_p(j) \cdot c_p + W_{T,n} \cdot M_T + N_{DU} \cdot M_{DU}] \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η συνάρτηση ολικού κόστους  $C_{total}(X)$  (4.11) παρουσιάζει μεγάλες ομοιότητες με τη συνάρτηση (4.14), αν από τον υπολογισμό εξαιρεθεί ο συνυπολογισμός οποιουδήποτε κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και αντικατάστασης το οποίο αφορά μπαταρίες, φορτιστές μπαταριών, μετατροπέων και αντιστροφών [10].

### 4.3.2 Βελτιστοποίηση #1

Η πρώτη βελτιστοποίηση που επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί, γίνεται για να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος με βάση τη δομή της συστοιχίας μπαταριών και για κάλυψη οικισμού 175 κατοικιών, με μέση κατανάλωση πόσιμου νερού τα  $25 L/h$  για κάθε κατοικία [12]. Το σύστημα είτε αυτόνομο (Α/Σ), είτε διασυνδεδεμένο (Δ/Σ) μπορεί να τροφοδοτείται μέσω ενός από τους τέσσερις μετατροπείς που αναλύθηκαν παραπάνω. Η βελτιστοποίηση γίνεται για κάθε στόχο, αξιοποιώντας κάθε έναν από τους μετατροπείς. Τέλος, η βέλτιστη σύνθεση που ικανοποιεί τον κάθε στόχο ΑΠΕ συστήματος συγκρίνεται με τη βέλτιστη σύνθεση συστήματος χωρίς ΑΠΕ.

### 4.3.3 Βελτιστοποίηση #2

Στη 2<sup>η</sup> βελτιστοποίηση, εξετάζονται και πάλι οι δομές συστήματος που επιτυγχάνουν τους τέσσερις προαναφερθέντες στόχους, με τη μόνη διαφορά στο μέγεθος του πληθυσμού. Συγκεκριμένα, η μελέτη πραγματοποιείται για έναν οικισμό αποτελούμενο από 375 νοικοκυριά. Στο σενάριο αυτό για άλλη μια φορά μελετώνται οι βέλτιστες δομές για κάθε έναν από τους 4 μετατροπείς της παρούσας εργασίας. Στην τελική φάση, όμοια με τη βελτιστοποίηση #1, γίνεται σύγκριση των βέλτιστων συνθέσεων ΑΠΕ συστημάτων με τη βέλτιστη δομή συμβατικού μη-ΑΠΕ συστήματος.

# 5.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

---

### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τρία συστήματα αφαλάτωσης που διαφέρουν στη μέθοδο τροφοδοσίας τους και είναι τα εξής:

- Σύστημα χωρίς ΑΠΕ, με τροφοδοσία αποκλειστικά από το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Αυτόνομο σύστημα, τροφοδοτούμενο αποκλειστικά από κυματική ενέργεια.
- Διασυνδεδεμένο σύστημα, τροφοδοτούμενο συνδυαστικά από την ενέργεια που παράγουν οι κυματικοί μετατροπείς και εκείνη που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο εφόσον κρίνεται αναγκαίο.

Όλες οι βελτιστοποιήσεις έγιναν με χρήση του αλγορίθμου PSO. Έπειτα από πολλές δοκιμές, κρίθηκε ότι το σμήνος σωματιδίων που αποδίδει περισσότερο στη βελτιστοποίηση, ανάλογα με την ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι αυτό των 500 σωματιδίων για 80 επαναλήψεις. Το πλήθος αυτό, χρησιμοποιήθηκε για κάθε στόχο

βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση καταλήγει στη λύση είτε όταν εκτελεστούν και οι 80 επαναλήψεις, είτε όταν για 10 συνεχόμενες επαναλήψεις η διαφορά στη βέλτιστη τιμή είναι μικρότερη από  $10^{-6}$ .

Κάθε μια από τις βελτιστοποιήσεις, εφαρμόστηκε για κάθε έναν από 4 κυματικούς μετατροπείς διαφορετικών χαρακτηριστικών τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις έγιναν και για διαφορετικές συνδεσμολογίες μπαταριών, σειριακής και παράλληλης διάταξης. Στους παρακάτω πίνακες (6 έως 10) αναγράφονται τα χαρακτηριστικά όλων των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δόμηση των συστημάτων που μελετήθηκαν.

## 5.2 Χαρακτηριστικά συστήματος

Στον Πίνακα 6 εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων που χρησιμοποιήθηκαν στα συστήματα [13].

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά των κυματικών μετατροπέων.		
WEC	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Κόστος συντήρησης (€)
1	4265600	340000
2	2084940	108720
3	653200	3850
4	22338400	109420

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο μετατροπέας με το μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης είναι ο WEC04, παρόλα αυτά ο WEC01 έχει το μεγαλύτερο κόστος συντήρησης. Ο WEC03 είναι ο οικονομικότερος από αυτούς, με το μικρότερο κόστος για την εγκατάσταση και τη συντήρησή του. Ο κάθε μετατροπέας διαθέτει ενσωματωμένο φορτιστή μπαταριών. Η ισχύς εξόδου του φορτιστή αυτού, υπολογίζεται στον 93% της ισχύος εξόδου του μετατροπέα στον οποίο είναι ενσωματωμένος.

<b>Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά μπαταρίας.</b>	
Κόστος Εγκατάστασης (€)	100
Κόστος συντήρησης (€)	1
Ονομαστική χωρητικότητα (Ah)	185
Ονομαστική τάση λειτουργίας (V)	12
Μέγιστο όριο εκφόρτισης DOD (%)	80
Διάρκεια ζωής (κύκλοι)	1400

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του τύπου μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε για τη δόμηση της συστοιχίας μπαταριών, στα συστήματα όπου αυτή απαιτείται. Σε σχέση με το κόστος για τον εκάστοτε μετατροπέα, το κόστος της μπαταρίας φαίνεται αμελητέο. Παρόλα αυτά η συστοιχία μπορεί να αποτελέσει κοστοβόρο στοιχείο εάν αποτελείται από μεγάλο αριθμό μπαταριών, λαμβάνοντας υπόψιν και τις πιθανές αντικαταστάσεις που θα πρέπει να γίνουν για κάθε μπαταρία που ολοκληρώνει τη διάρκεια ζωής της. Η τάση λειτουργίας του τύπου μπαταρίας που χρησιμοποιείται ως δομικό στοιχείο στην κατασκευή της συστοιχίας στην παρούσα εργασία, είναι τα 12 V. Στην εργασία αυτή μελετάται ο ένας εκ των τριών τρόπων δόμησης της συστοιχίας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, μελετάται η σειριακή και η υβριδική συνδεσμολογία.



Στους Πίνακες 8 και 9 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των αντιστροφών και μονάδων αφαλάτωσης που αξιοποιούνται στο σχεδιασμό του συστήματος.

<b>Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά αντιστροφέα DC/AC.</b>	
Κόστος Εγκατάστασης (€)	650.30
Κόστος συντήρησης (€)	65.03
Απόδοση (%)	83
Ονομαστική ισχύς (Watt)	5600
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (ώρες)	40000
Εύρος τάσης εισόδου (V)	230

<b>Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά μονάδας αφαλάτωσης.</b>	
Κόστος Εγκατάστασης (€)	4667.97
Κόστος συντήρησης (€)	466.80
Ημερήσιος όγκος παραγόμενου πόσιμου νερού (L)	18925
AC ισχύς εισόδου (Watt)	5219
Απαιτούμενος όγκος νερού για πλύση (L)	126.50
Απαιτούμενη ισχύς για πλύση (Watt)	730.20

Ο αριθμός των μονάδων αφαλάτωσης που απαιτούνται καθορίζει το πλήθος των αντιστροφών που θα χρησιμοποιηθούν, ενώ το πλήθος μετατροπών (σύστημα ΑΠΕ) και μονάδων αφαλάτωσης αποτελούν μεταβλητές σχεδίασης της βελτιστοποίησης, επομένως προκύπτουν κατά το πέρας αυτής. Όσον αφορά τους αντιστροφείς, παρατηρείται ότι παρουσιάζονται τρεις τύποι. Ανάλογα με τάση στο δίκτυο DC, ο οποίος τους τροφοδοτεί, επιλέγεται ο κατάλληλος

αντιστροφείας που μπορεί να δεχθεί την τάση αυτή, ώστε στη συνέχεια να την αντιστρέψει με σκοπό τη μετέπειτα τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης.

<b>Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά δεξαμενής.</b>	
Κόστος εγκατάστασης (€/L)	0.35
Κόστος συντήρησης (€/L)	0.0035

Ο Πίνακας 10 απεικονίζει το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης της δεξαμενής ανά λίτρο χωρητικότητάς της. Το μέγεθός της αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού και προκύπτει ως λύση της βελτιστοποίησης.

<b>Πίνακας 11. Παράμετροι συστήματος αφαλάτωσης.</b>	
$P_H$	$0.0075 \text{ W}/(m \cdot m^3)$
$P_E$	$0.15 \text{ W}/(m \cdot m^3)$
$c_H$	$3.04 \cdot 10^{-6} \text{ €/}(m \cdot m^3)$
$c_E$	$2.567 \cdot 10^{-3} \text{ €/}(m \cdot m^3)$
$C_{w/l}$	$8.5 \cdot 10^4 \text{ €/}(W \cdot m)$
Πληθωρισμός ( $g$ )	1.02 %
Επιτόκιο ( $i$ )	3 %

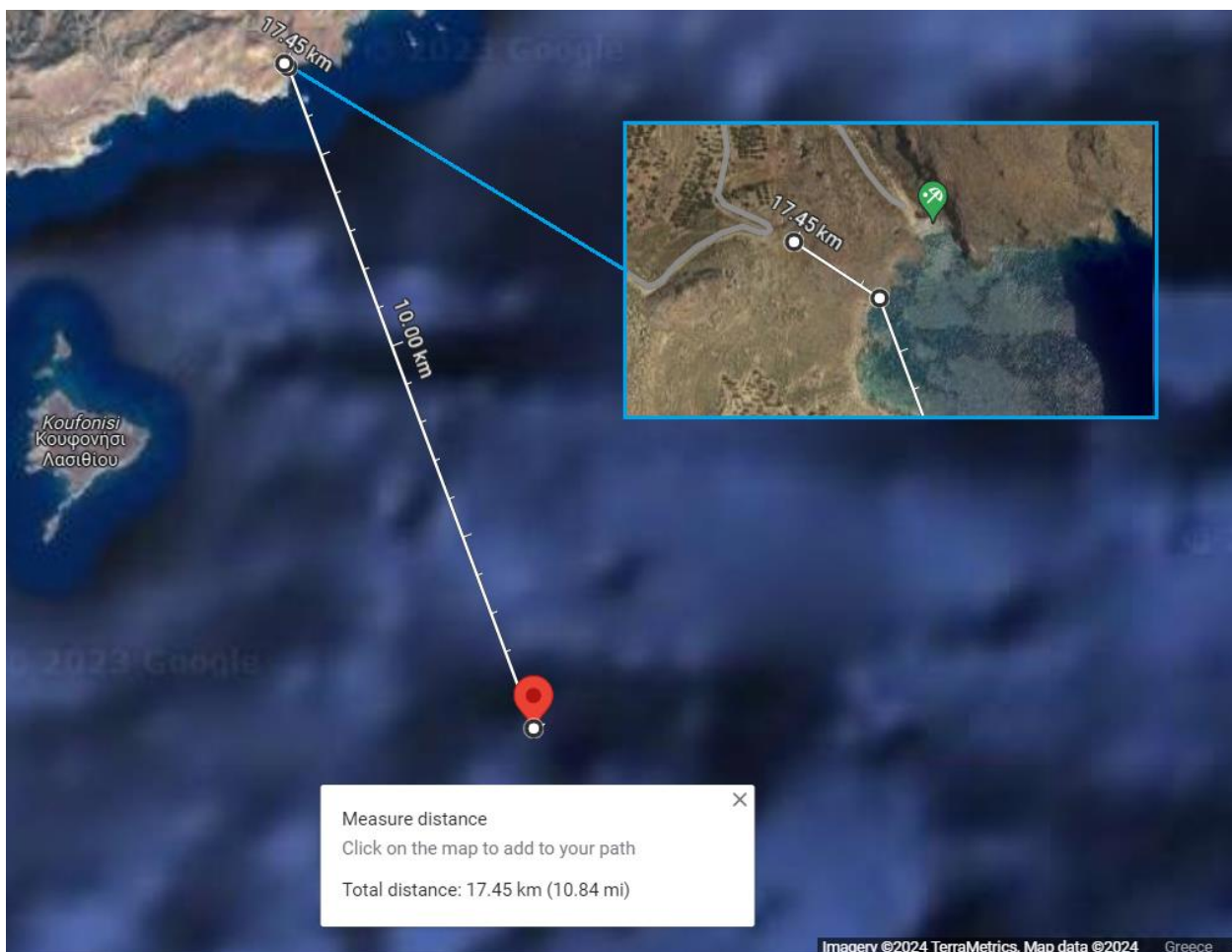
Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι παράμετροι που έχουν οριστεί για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος άντλησης θαλασσινού νερού  $P_T$  (σχέση 3.4) και του κόστους των υδροφόρων αγωγών,  $c_T$  (σχέση 4.7), καθώς και ενδεικτικές ποσοστιαίες τιμές που αντιστοιχούν στον πληθωρισμό και το επιτόκιο.

Όσον αφορά την τοποθεσία του συστήματος, στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι οι κυματικοί μετατροπείς εγκαθίστανται μέσα στη θάλασσα σε απόσταση 17 km από την ακτή όπου το μέσο

ύψος κύματος για τα 20 έτη της προσομοίωσης είναι τουλάχιστον 1 μέτρο [14], έτσι ώστε να παράγεται επαρκής κυματική ενέργεια. Η γεωγραφική τοποθεσία εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης ορίστηκε στις αποστάσεις που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα, έτσι ώστε να βρίσκεται κοντά στην ακτή και δίπλα σε οδικό δίκτυο.

Πίνακας 12. Τοποθεσία εγκατάστασης μονάδας.	
Απόσταση από την ακτή $H$ (m)	450
Υψόμετρο $E$ (m)	56.9

Οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 αφορούν τη θέση μελέτης για την εγκατάσταση του συστήματος και χρησιμοποιούνται επίσης για τον υπολογισμό των σχέσεων (3.4) και (4.7) της παρούσας εργασίας.

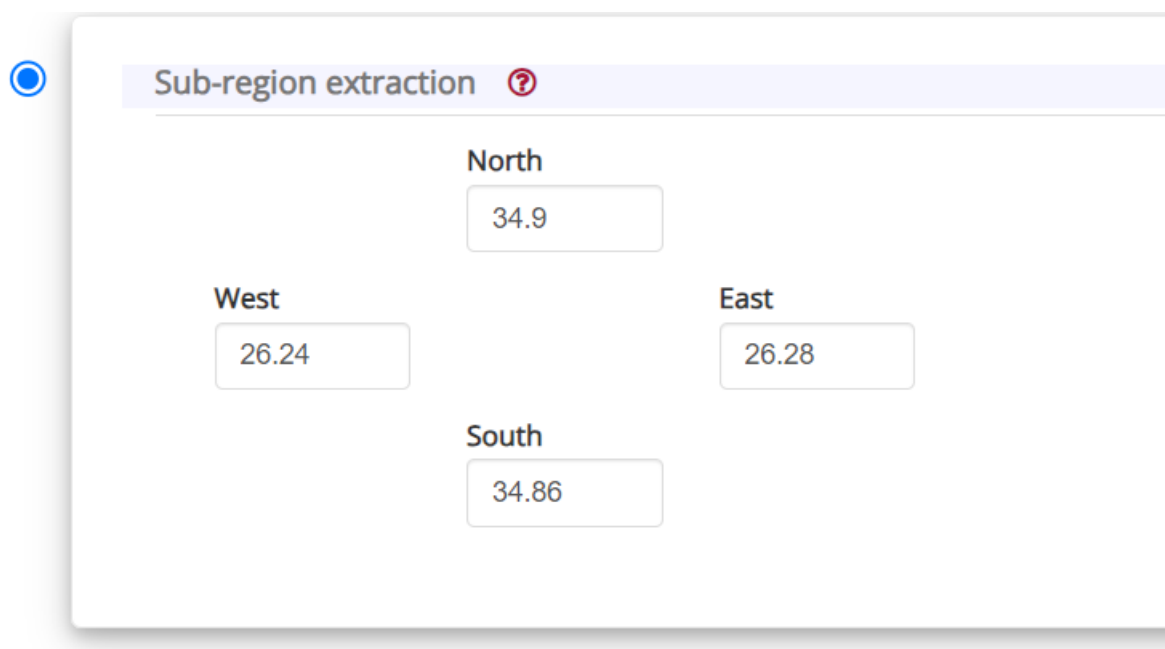


Σχήμα 18: Τοποθεσία εγκατάστασης μετατροπέων και μονάδας αφαλάτωσης.



Σχήμα 19: Υψόμετρο εγκατάστασης μονάδας αφαλάτωσης.

Στα Σχήματα 18 και 19, παρουσιάζεται η γεωγραφική θέση και το υψόμετρο εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης, σύμφωνα και με τα δεδομένα του Πίνακα 12. Η τοποθεσία εγκατάστασης βρίσκεται στη νοτιοανατολική Κρήτη. Το κόκκινο σημείο στο χάρτη του Σχήματος 18 (Google Maps) απεικονίζει τη θέση των κυματικών μετατροπέων ενώ το μπλε στο χάρτη του Σχήματος 19 (Elevation Finder) απεικονίζει τη θέση και το υψόμετρο εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης. Η γεωγραφική τοποθεσία των κυματικών μετατροπέων παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή παραγωγική τους ικανότητα, καθώς αυτή εξαρτάται πλήρως από τα κυματικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής. Η τοποθεσία που έχει επιλεγεί βρίσκεται στις συντεταγμένες με γεωγραφικό μήκος  $34.876^{\circ}$  και πλάτος  $26.261^{\circ}$ . Οι συντεταγμένες αυτές χρησιμοποιούνται για την εύρεση των ιστορικών κυματικών δεδομένων που παρέχει το σύστημα Copernicus CDS [14]. Για την απόκτηση των δεδομένων αυτών εισήχθη η περιοχή με συντεταγμένες που απεικονίζονται στο Σχήμα 20.

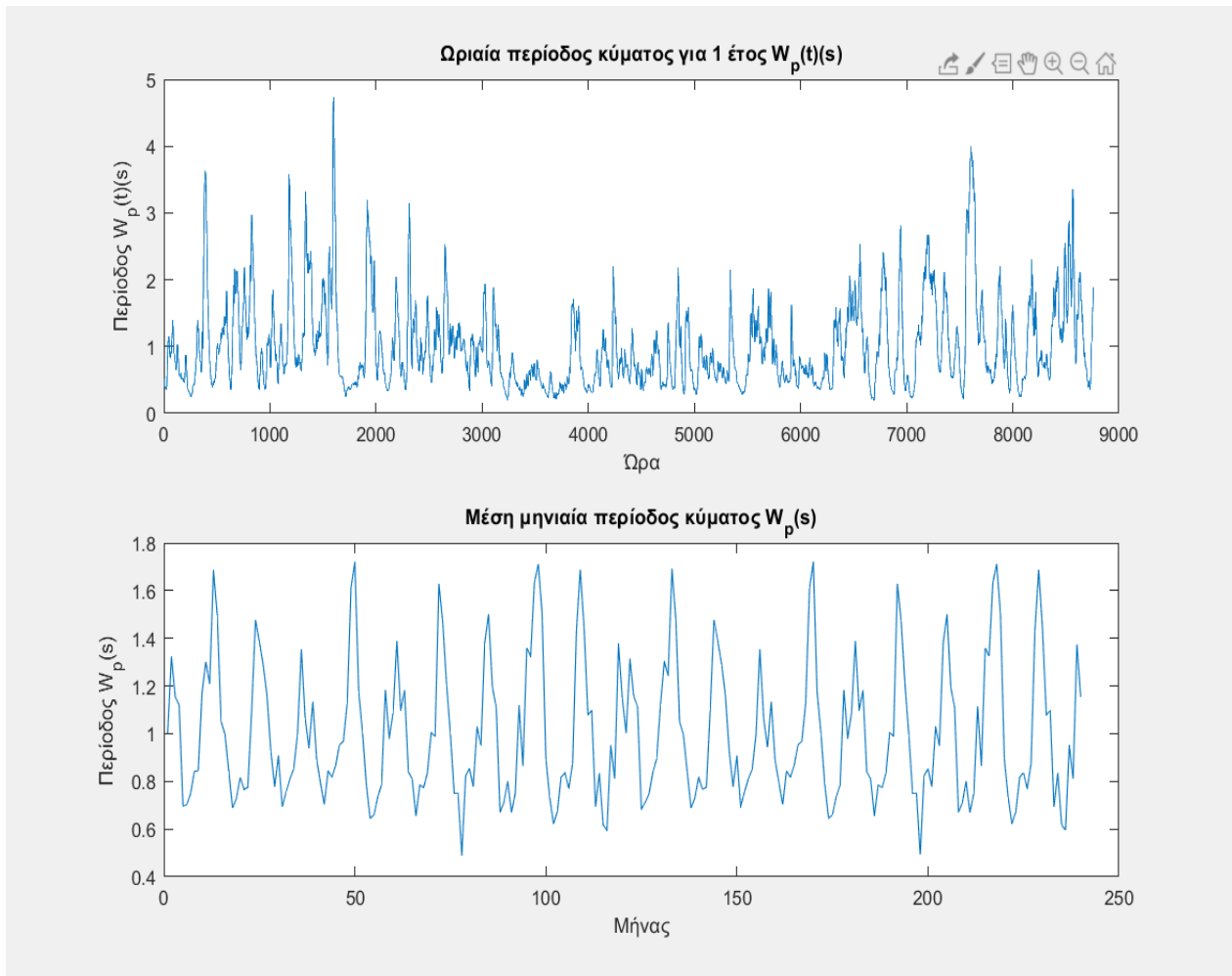


Σχήμα 20: Περιοχή αναζήτησης ιστορικών κυματικών δεδομένων στο σύστημα Copernicus CDS.

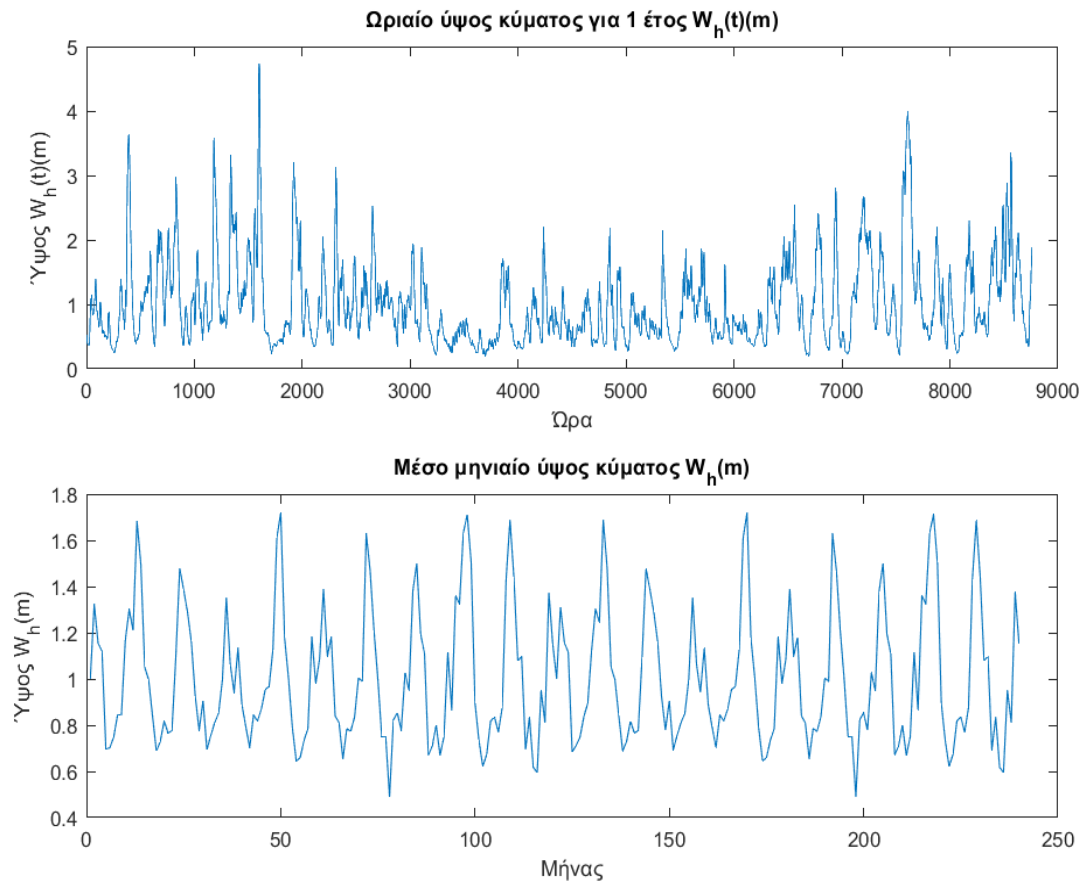
Στο Σχήμα 20 απεικονίζονται οι συντεταγμένες που καλύπτουν την περιοχή που δόθηκε στο σύστημα Copernicus CDS για την εύρεση των ιστορικών κυματικών δεδομένων. Επιλέχθηκε η εύρεση μέσης ωριαίας περιόδου και ωριαίου σημαντικού ύψους κυμάτων για τη χρονική περίοδο από το 2011 έως το 2020 [15]. Τα δεδομένα αυτά με αναγωγή στην 20ετία αποτελούν τα δεδομένα που αξιοποιούνται στην εργασία αυτήν.

Η ωριαία ζήτηση πόσιμου νερού έχει παραχθεί με χρήση αλγορίθμου υπολογισμού κατανάλωσης νερού από ένα άτομο με κριτήρια την ώρα της ημέρας και την εποχή του χρόνου, με μικρές μεταβολές ανά έτος. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η μέση ημερήσια ζήτηση σε πόσιμο νερό για ένα τετραμελές νοικοκυριό είναι περίπου 600 L/ημέρα, υπολογίζεται ότι τα ωριαία δείγματα της ζήτησης αντιστοιχούν σε περίπου 275 νοικοκυριά για την βελτιστοποίηση #1 και 875 νοικοκυριά για τη βελτιστοποίηση #2 [12].

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών των κυμάτων.



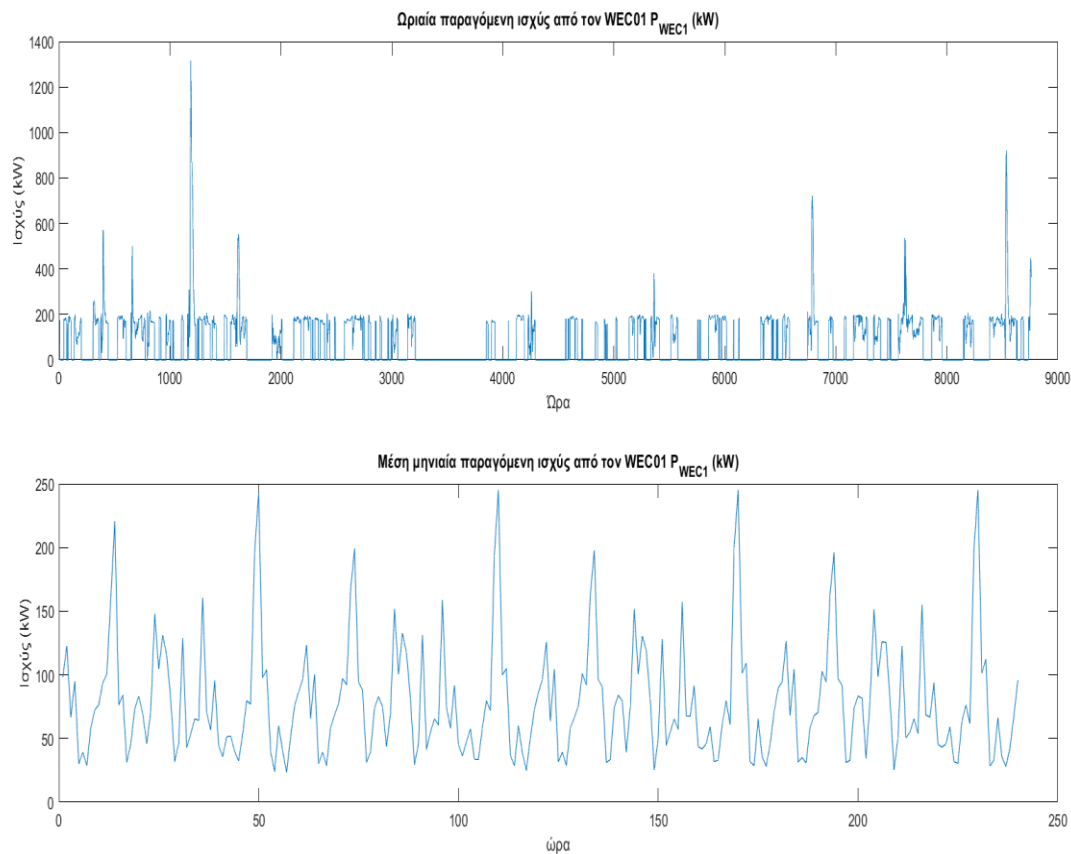
Σχήμα 21: Περίοδος κύματος.



Σχήμα 22: Ύψος κύματος.

Από τα γραφήματα των Σχημάτων 21 και 22, παρατηρείται ότι κατά τους χειμερινούς μήνες υπάρχει αυξημένο ύψος κύματος αλλά και περίοδος κύματος στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Αυτό σημαίνει ότι κατά τους μήνες αυτούς δύναται η παραγωγή περισσότερης κυματικής ενέργειας. Στον Πίνακα 13 αναφέρονται η ελάχιστη, η μέγιστη και η μέση τιμή των κυματικών δεδομένων.

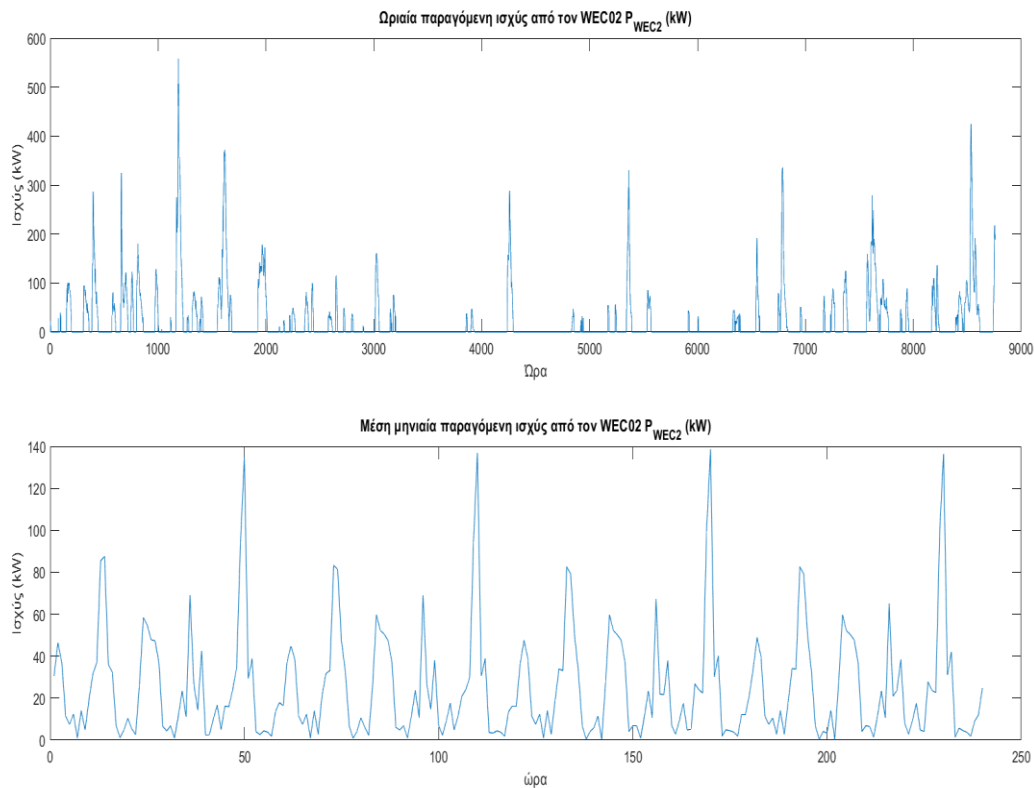
Επειδή οι κυματικοί μετατροπείς προς μελέτη είναι τέσσερις, και ο καθένας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και δυνατότητες, οι χρονοσειρές παραγόμενης ενέργειας που προκύπτουν, απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 23: Παραγόμενη κυματική ισχύς από τον WEC01.

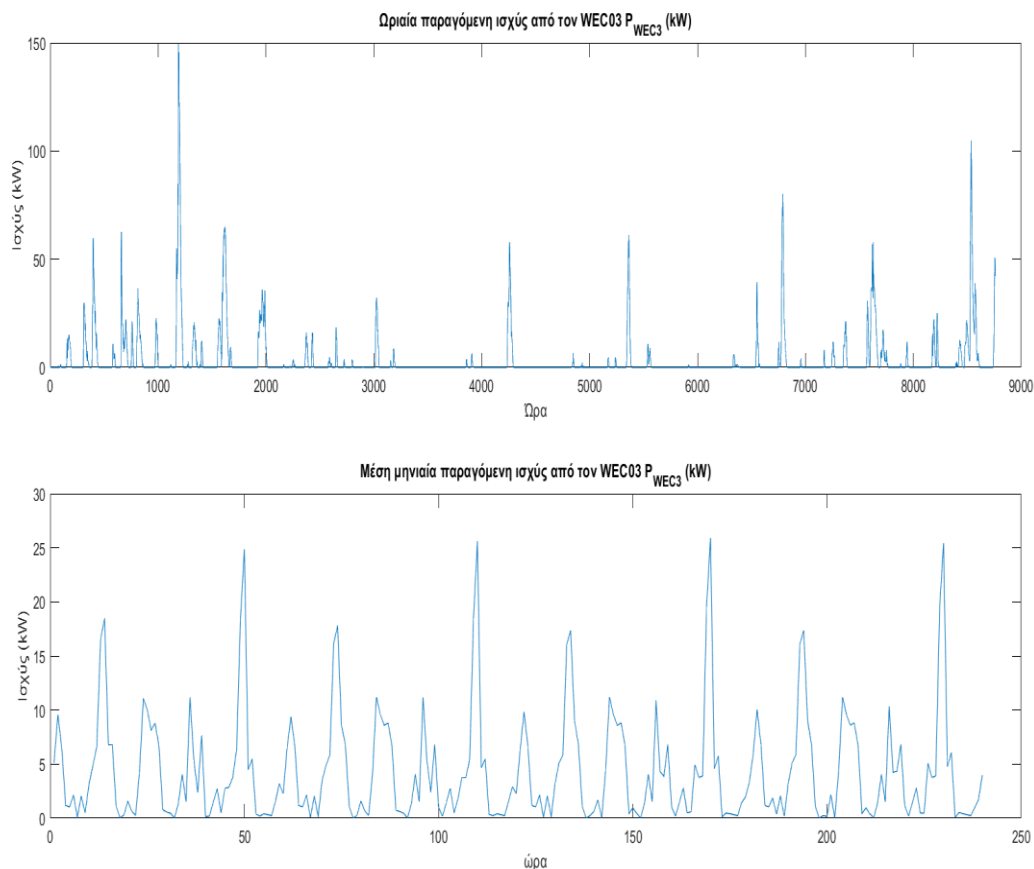
Η ισχύς που παράγει ο μετατροπέας WEC01 απεικονίζεται στο Σχήμα 23. Τις ώρες κατά τις οποίες οι κυματισμοί είναι μη παραγωγικοί, η παραγόμενη ενέργεια είναι μηδενική. Προκύπτει από υπολογισμούς ότι με τις ίδιες καιρικές συνθήκες, ο μετατροπέας παράγει ισχύ σε ποσοστό 41.6 % των ωρών λειτουργίας της 20ετούς προσομοίωσης. Επιπλέον, το 40.1 % των ωρών η ισχύς που παράγεται είναι πάνω από το μέσο όρο.





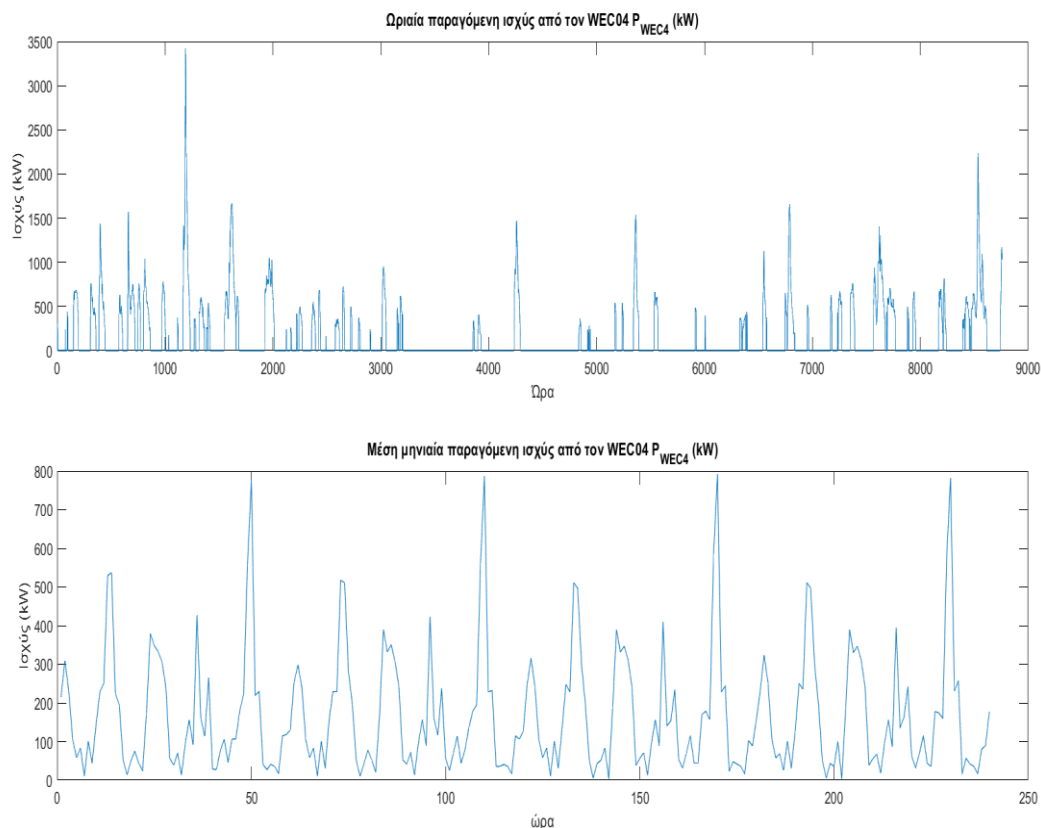
Σχήμα 24: Παραγόμενη κυματική ισχύς από τον WEC02.

Στο Σχήμα 24 απεικονίζεται η παραγόμενη από τον WEC02 ισχύς. Παρατηρείται ότι με τους κυματισμούς οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, ο WEC02 επιτυγχάνει το μέγιστο της απόδοσής του με μεγάλη συχνότητα. Παράλληλα όμως υπάρχουν πολλά διαστήματα κατά τα οποία δεν παράγει ισχύ. Αυτό διαπιστώνεται και από την καταμέτρηση της συνολικής χρονικής διάρκειας κατά την οποία παράγει ισχύ, η οποία υπολογίζεται μόλις στο 25.2 % των ωρών της προσομοίωσης. Το 22.9 % των ωρών, η ισχύς που παράγει υπερβαίνει τη μέση τιμή της.



Σχήμα 25: Παραγόμενη κυματική ενέργεια από τον WEC03.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 25, ο WEC03 έχει χαμηλότερο peak παραγωγής ισχύος σε σχέση με τους δύο προηγούμενους μετατροπείς. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση του WEC02, παρουσιάζονται συχνά κενά διαρκείας στην απόδοση ισχύος. Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν, οι συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες δεν ευνοούν τη χρήση ούτε αυτού του μετατροπέα. Το χρονικό ποσοστό διάρκειας παραγωγής ισχύος είναι 25.2 % επί του συνόλου των ωρών λειτουργίας, ακριβώς ίδιο με εκείνο του WEC02, ενώ μόλις το 16.9 % των ωρών, η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το μέσο όρο της παραγωγής.



Σχήμα 26: Παραγόμενη κυματική ισχύς από τον WEC04.

Από το Σχήμα 26 παρατηρείται ότι ο WEC04 δύναται να παράγει τη μέγιστη ποσότητα ισχύος σε σχέση με τους τρεις προηγούμενους. Για την ακρίβεια, όπως φαίνεται και παρακάτω, η μέγιστη απόδοση ισχύος για το συγκεκριμένο μετατροπέα, είναι περισσότερη από τη διπλάσια ικανή παραγωγή του WEC01. Με υπολογισμούς διαπιστώνεται ότι η συνολική χρονική διάρκεια παραγωγής ισχύος με αυτές τις μετεωρολογικές συνθήκες είναι ακριβώς ίδια με εκείνη των δύο προηγούμενων μετατροπέων και συγκεκριμένα φθάνει στο 25.2 % του συνόλου των ωρών της προσομοίωσης. Επιπλέον, η παραγόμενη ισχύς υπερβαίνει τη μέση τιμή για κάθε ώρα.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι, για τα δεδομένα της παρούσας εργασίας, ο WEC01 επιτυγχάνει τη μέγιστη χρονική διάρκεια παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη, ο WEC04 έχει τη μέγιστη παραγωγική ικανότητα ανάμεσα στους τέσσερις μετατροπείς, τις ώρες που και εκείνος μπορεί να αποδώσει. Η παραγωγική ικανότητα του κάθε μετατροπέα παίζει σημαντικό ρόλο στην

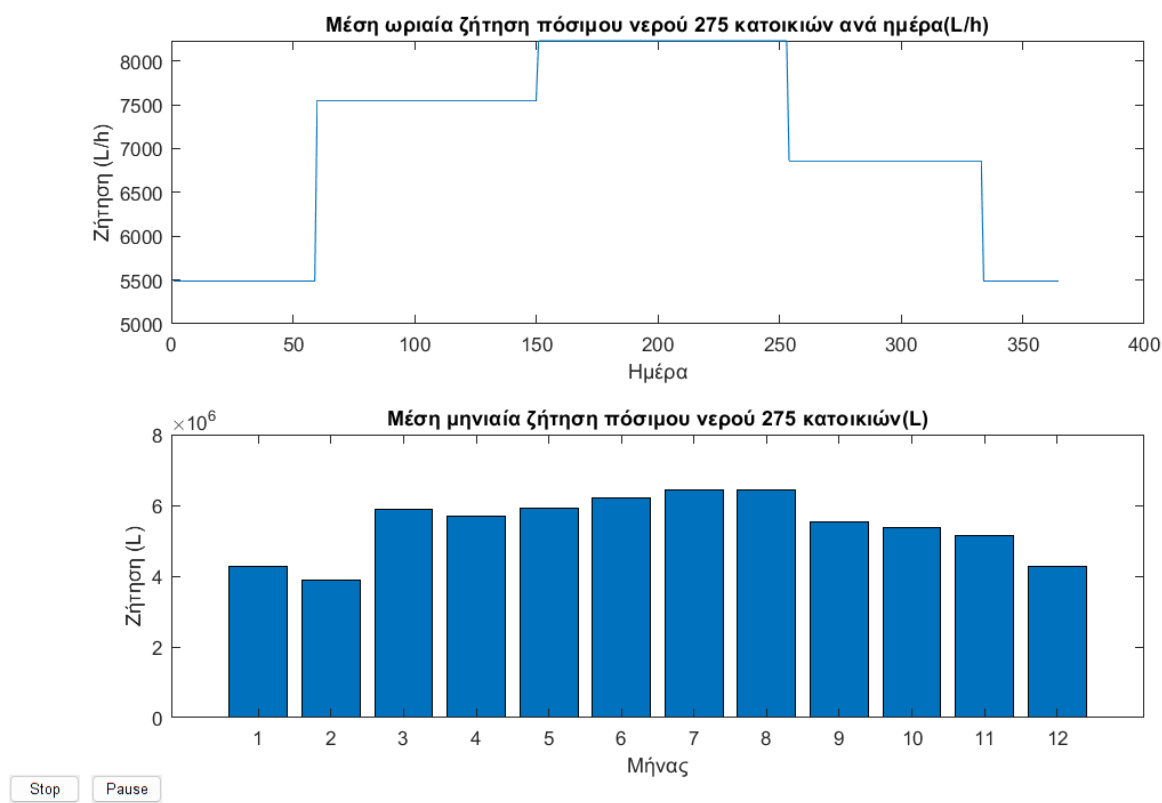
επίτευξη του εκάστοτε στόχου βελτιστοποίησης, παρόλα αυτά δεν είναι η μόνη παράμετρος που καθορίζει αν η σύνθεση στην οποία βασίζεται ο καθένας είναι η βέλτιστη.

<b>Πίνακας 13. Ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές χαρακτηριστικών κυμάτων και παραγωγής ισχύος.</b>			
	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Ωριαία περίοδος κύματος $W_p(t)$ (s)	2.18	4.63	9.01
Ωριαίο ύψος κύματος $W_h(t)$ (m)	0.09	1.02	4.83
Ωριαία παραγόμενη ενέργεια από WEC01 (kW)	0.00	78.71	1616
Ωριαία παραγόμενη ενέργεια από WEC02 (kW)	0.00	24.94	690.14
Ωριαία παραγόμενη ενέργεια από WEC03 (kW)	0.00	4.35	230.86
Ωριαία παραγόμενη ενέργεια από WEC04 (kW)	0.00	165.76	4301.08

Στον Πίνακα 13 φαίνονται συνοπτικά η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή για κάθε μια από τις σειρές που αναλύθηκαν προηγούμενα. Από αυτόν τον πίνακα διαπιστώνεται και πειραματικά ότι ο WEC04, ο οποίος είναι και ο ακριβότερος από τους μετατροπείς, είναι ικανός να παράξει μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος ανάμεσα σε όλους τους μετατροπείς, στις ίδιες καιρικές συνθήκες. Αντίθετα ο WEC03, ο οποίος είναι και ο οικονομικότερος, είναι ο μετατροπέας που παράγει τη μικρότερη ποσότητα ισχύος.

### 5.3 Βελτιστοποίηση #1

Η πρώτη βελτιστοποίηση που επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί, γίνεται για να μελετηθεί η συμπεριφορά κάθε συστήματος με βάση τη δομή της συστοιχίας συσσωρευτών και για κάλυψη οικισμού 275 κατοικιών, με μέση κατανάλωση πόσιμου νερού τα 25 L/h για κάθε κατοικία. Αποτελείται από τρία σενάρια, ένα για κάθε επιλογή δομής της συστοιχίας μπαταριών, όπως αναλύεται παρακάτω. Συνολικά, ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης επαναλήφθηκε 37 φορές για την κάλυψη κάθε σεναρίου και τύπου συστήματος. Συγκεκριμένα, επαναλήφθηκε για κάθε έναν από τους τέσσερις μετατροπείς που επιλέχθηκαν, κάθε τύπο συστήματος και δομή συστοιχίας όπως αναλύθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 27: Μέση ζήτηση πόσιμου νερού.

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται η μέση ζήτηση νερού, η οποία έχει οριστεί για τη βελτιστοποίηση #1. Παρατηρείται ότι, όπως είναι αναμενόμενο, οι ανάγκες παροχής πόσιμου νερού αυξάνονται την περίοδο Μαρτίου – Αυγούστου κατά 33.14 % περίπου, ως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας. Η ωριαία ζήτηση κυμαίνεται μεταξύ 0 και 13610 L, με μέση τιμή τα 7430 L/h, ενώ ετησίως η μέση κατανάλωση υπολογίζεται στα 65087705 L/έτος.

Όσον αφορά τη συστοιχία μπαταριών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συγκροτείται από έναν συγκεκριμένο τύπο μπαταρίας με συγκεκριμένη τάση και χωρητικότητα.

Για να μπορέσουν να καλυφθούν οι ανάγκες του συστήματος σε αποθήκευση ενέργειας, θα πρέπει οι μπαταρίες να έχουν μια μορφή παράλληλης συνδεσμολογίας, είτε με μία μπαταρία σε κάθε παράλληλο κλάδο, είτε με περισσότερες. Εφόσον ο αριθμός των μπαταριών που αποτελούν τη συστοιχία αποτελεί τη μία από τις τέσσερις μεταβλητές σχεδιασμού, η δομή της συστοιχίας στις προσομοιώσεις καθορίζεται από την επιλογή της τάσης εξόδου του ενσωματωμένου στον εκάστοτε μετατροπέα φορτιστή μπαταριών και κατ' επέκταση στην επιλογή της τάσης του DC διαύλου. Ο τρόπος διαμοιρασμού των μπαταριών που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της εκάστοτε βελτιστοποίησης, στις παράλληλες συστοιχίες της συστοιχίας ορίζεται από την τάση στο δίαυλο DC (σχέση 3.1).

Επειδή οι μετατροπείς δε λειτουργούν στην ονομαστική τους τάση, ο κατάλληλος δίαυλος DC που επιλέχθηκε έχει τάση 2.2 kV [16]. Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση (3.1), ο ελάχιστος αριθμός μπαταριών που αποτελούν τη συστοιχία είναι 184, συνδεδεμένες σε σειρά. Αν απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός μπαταριών, εκείνες μοιράζονται σε παράλληλους κλάδους 184 μπαταριών. Το πλήθος των παράλληλων κλάδων εξαρτάται από τον αριθμό συσσωρευτών που προκύπτουν από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1. Η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων έχει γίνει με βάση τον τύπο συστήματος (αυτόνομο, διασυνδεδεμένο και σύστημα χωρίς ΑΠΕ), αλλά και ανά κυματικό μετατροπέα. Για τα αυτόνομα συστήματα (Α/Σ), η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει μόνο με στόχο το βέλτιστο ολικό κόστος  $C_{total}$ , για το λόγο ότι δεν υπάρχει σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Για τα διασυνδεδεμένα συστήματα (Δ/Σ), οι δυνατές βελτιστοποιήσεις γίνονται με βάση τους στόχους  $C_{total}$ ,  $C_{net}$  και  $C_{rev}$ , ενώ για το σύστημα χωρίς ΑΠΕ η μόνη δυνατή είναι με στόχο το  $C_{eg}$ .

Για διευκόλυνση του αλγορίθμου έχουν τεθεί όρια στις τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα όρια αυτά, για κάθε έναν από τους στόχους της βελτιστοποίησης.

Πίνακας 14. Όρια μεταβλητών σχεδιασμού 1 <sup>ης</sup> βελτιστοποίησης.			
Στόχος	Μεταβλητή	Ελάχιστο	Μέγιστο
$C_{total} - C_{net}$	$N_{BAT}$	0	$\infty$
	$W_{T,n}$	5000	$\infty$
	$N_{DU}$	1	$\infty$
	$N_{WEG}$	1	$\infty$
$C_{rev}$	$N_{BAT}$	0	2000
	$W_{T,n}$	5000	50000000
	$N_{DU}$	1	800
	$N_{WEG}$	1	5000
$C_{eg}$	$W_{T,n}$	5000	$\infty$
	$N_{DU}$	1	$\infty$

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού παραμένουν ίδια για τους στόχους βελτιστοποίησης 1. ( $C_{total}$ ) και 2. ( $C_{net}$ ). Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγιστο για κάθε μια από τις μεταβλητές έχει οριστεί στο  $\infty$ . Επιπλέον, για τον στόχο 4. ( $C_{eg}$ ) οι μόνες μεταβλητές σχεδιασμού που περιλαμβάνονται στη βέλτιστη λύση είναι ο όγκος στις δεξαμενής  $W_{T,n}$  και το πλήθος των μονάδων αφαλάτωσης  $N_{DU}$ . Τα όρια των δύο αυτών μεταβλητών ταυτίζονται με αυτά των 2 προηγούμενων στόχων. Όσον αφορά το στόχο 3. ( $C_{rev}$ ) έχουν τεθεί ως ανώτατα όρια εκείνα που εμφανίζονται. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σκοπός της οριοθέτησης είναι η διευκόλυνση της εκτέλεσης του αλγορίθμου και όχι η καθοδήγηση του αλγορίθμου προς τυχόν επιθυμητά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτόν, τα ελάχιστα όρια για κάθε μια από αυτές είναι αρκετά χαμηλά, ενώ τα άνω όρια, όσον αφορά τους στόχους 1., 2. και 4. είναι όλα  $\infty$ . Ο στόχος 3., εκτός από χαμηλά ελάχιστα όρια, διαθέτει και υψηλά μέγιστα όρια.

Στην περίπτωση που τα μέγιστα όρια για τον προαναφερθέντα στόχο ήταν επίσης όλα στο  $\infty$ , ο αλγόριθμος δε θα λειτουργούσε σωστά. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από τη φύση του αλγορίθμου PSO, ο οποίος έχει σχεδιαστεί με τελικό σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης, η οποία είναι η ελάχιστη τιμή που επιλύει την αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση όμως του στόχου 3., αναζητείται η μέγιστη λύση η οποία επιλύει το πρόβλημα. Γι' αυτό το λόγο η αντικειμενική συνάρτηση έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιστρέφει αρνητική λύση με σκοπό την «παραπλάνηση» του αλγορίθμου, κατά τη διάρκεια αναζήτησης της ελάχιστης τιμής. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος σε κάθε επανάληψη κρατάει τη χαμηλότερη αρνητική τιμή. Η πραγματική λύση προκύπτει από την αντιστροφή του τελικού (βέλτιστου) αποτελέσματος. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ανώτατων ορίων για τις μεταβλητές σχεδιασμού στη βελτιστοποίηση με στόχο την εύρεση μεγίστου.

### 5.3.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης #1

#### I. Συμβατικό σύστημα χωρίς ΑΠΕ (Σ/Σ)

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης #1 για το αμιγώς τροφοδοτούμενο από το δίκτυο σύστημα.

<b>Πίνακας 15. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για σύστημα με τροφοδοσία αποκλειστικά από το δίκτυο.</b>	
$C_{eg}$ (€)	6806303.06
$W_{T,n}$ (L)	16778.27
$N_{DU}$	19
Εαγορά (kWh)	24227291.88

Το σύστημα αυτό αποτελεί μέτρο σύγκρισης και αξιολόγησης σχετικά με την αποδοτικότητα των συστημάτων που αξιοποιούν ΑΠΕ, για τον εκάστοτε στόχο που τα αφορά. Το κόστος της σύνθεσης που προκύπτει ανέρχεται στα 6.8 εκ. €, με το μεγαλύτερο κόστος να αποτελούν οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες φθάνουν τα 6.57 εκ. €.



Παρακάτω απεικονίζονται οι ετήσιες αγορές ενέργειας από το δίκτυο για το συμβατικό, χωρίς ΑΠΕ σύστημα.



Σχήμα 28: Ετήσιες αγορές ενέργειας από το βέλτιστο συμβατικό σύστημα.

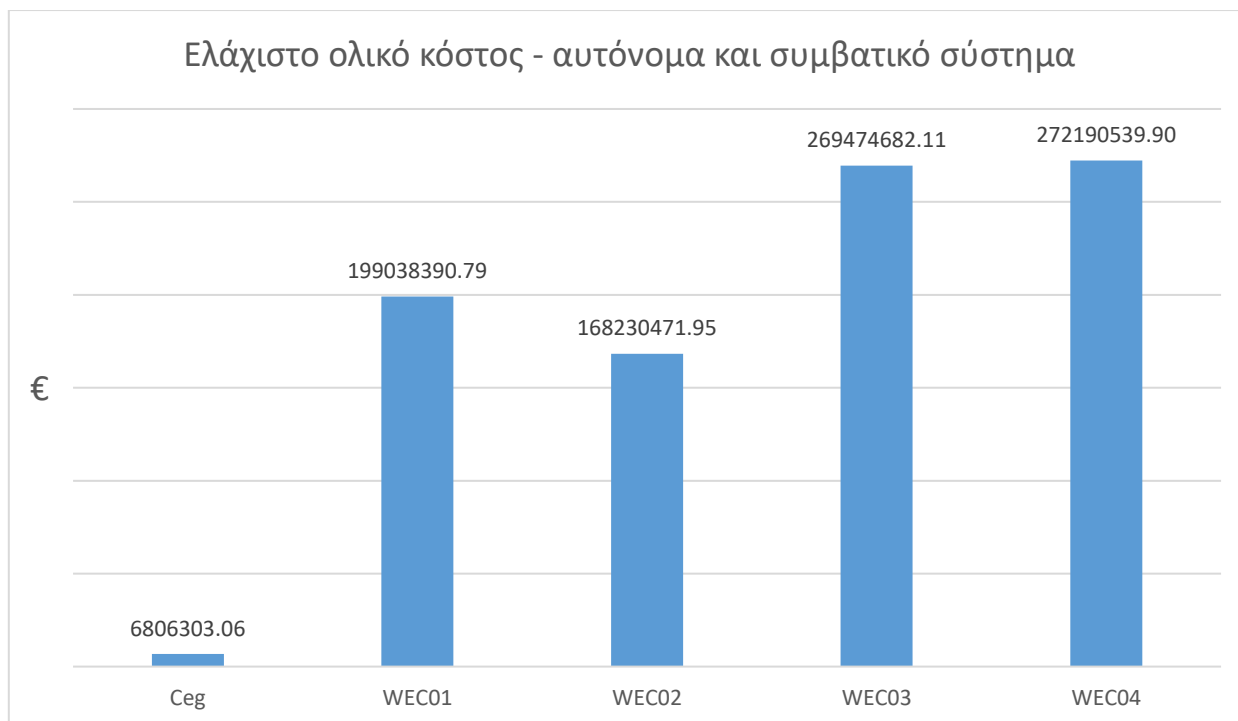
Στο σύνολό της η αξία της ενέργειας αυτής ανέρχεται στα 6.57 εκ. €, με αποτέλεσμα η εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος να αξίζει περίπου 239700 €. Από το σχήμα φαίνεται ότι οι ετήσιες αγορές εμφανίζουν διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή περίπου στις 1.21 GWh.

## II. Αυτόνομο σύστημα (A/Σ)

Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για αυτόνομα συστήματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι το ελάχιστο ολικό κόστος συστήματος  $C_{total}$ .

<b>Πίνακας 16. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης αυτόνομων συστημάτων.</b>					
WEC	Βέλτιστη λύση (€)	$N_{bat}$	$W_{T,n} (L)$	$N_{DU}$	$N_{WEG}$
WEC01	199038390.79	184	22929837.28	27	3
WEC02	168230471.95	1288	41949819.85	126	10
WEC03	269474682.11	1472	49907987.60	134	56
WEC04	272190539.90	736	36932309.52	105	2

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνεται ότι το ελάχιστο ολικό κόστος επιτυγχάνεται από το συνδυασμό που αξιοποιεί τις δυνατότητες 10 WEC02 μετατροπέων για την τροφοδοσία του συστήματος, με ολικό κόστος  $C_{total} (A/\Sigma) = 168230471.95$  €. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η σύνθεση αυτή κοστίζει λιγότερο από τις συνθέσεις των WEC01 και WEC04, παρόλο που απαιτεί περισσότερους πόρους. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι η μέγιστη ικανότητα παραγωγής των WEC01 και WEC04 είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του WEC02, με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ ακριβότερη καλωδίωση για τη σύνδεση μεταξύ μετατροπέων και μονάδας αφαλάτωσης. Από την άλλη, ο συνδυασμός που χρησιμοποιεί τον WEC04 είναι εκείνος για τον οποίο προκύπτει το υψηλότερο ελάχιστο ολικό κόστος σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συνδυασμούς. Παρόλα αυτά, ο συνδυασμός που αξιοποιεί το μεγαλύτερο αριθμό πόρων είναι εκείνος που τροφοδοτείται από τον WEC03, ο οποίος απαιτεί 1472 μπαταρίες, 134 μονάδες αφαλάτωσης και 56 μετατροπείς για την κάλυψη της ζήτησης και του στόχου.



Σχήμα 29: Ολικό κόστος βέλτιστων Α/Σ ανά κυματικό μετατροπέα σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα.

Ένα συμπέρασμα της βελτιστοποίησης #1 που αφορά το ολικό κόστος Α/Σ είναι ότι ένα συμβατικό σύστημα είναι πολύ οικονομικότερο στη λειτουργία του, από ένα ΑΠΕ σύστημα για την τροφοδοσία 275 κατοικιών με πόσιμο νερό. Το γεγονός αυτό αναπαρίσταται γραφικά στο Σχήμα 29. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η οικονομικότερη αυτόνομη δομή είναι εκείνη που τροφοδοτεί ο WEC02. Παρόλα αυτά η δομή αυτή δεν επιτυγχάνει να αποτελέσει την πλέον οικονομικά συμφέρουσα λύση ανάμεσα σε όλες τις μελετώμενες συνθέσεις, αφού το συμβατικό σύστημα έχει κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας σχεδόν 25 φορές μικρότερο.

### III. Διασυνδεδεμένο σύστημα ( $\Delta/\Sigma$ )

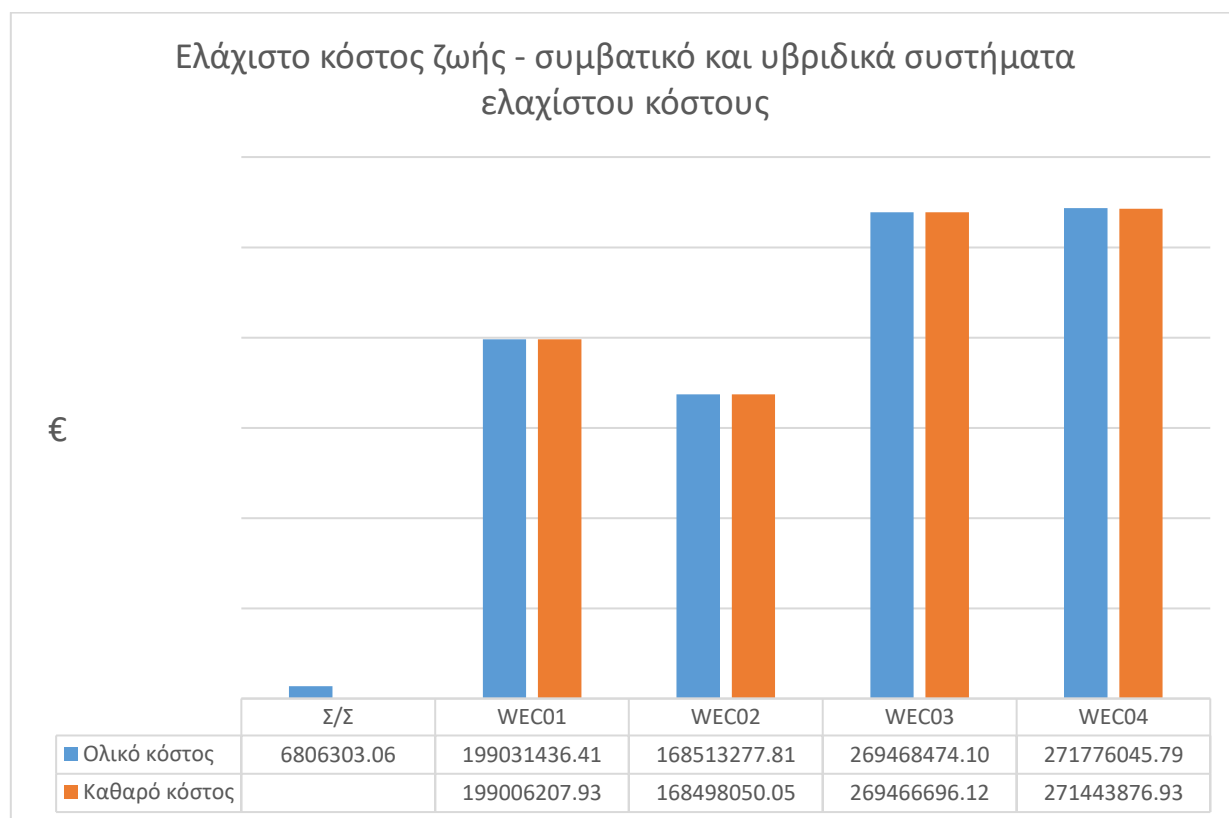
Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για διασυνδεδεμένα συστήματα αφαλάτωσης.

Πίνακας 17. Αποτελέσματα βελτιστοποιήσεων διασυνδεδεμένων συστημάτων.							
Στόχος	Λύση (€)	$N_{bat}$	$W_{T,n}$ (L)	$N_{DU}$	$N_{WEG}$	Εαγορά (kWh)	Επώληση (kWh)
WEC01							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	199031436.41	184	22909837.28	27	3	171.71	423229.36
$C_{net}$	199006207.93						
$C_{rev}$	28746839.94	1104	50000000	550	148	116922.84	483432272.46
WEC02							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	168513277.81	1104	44137748.77	112	10	1426.71	258369.09
$C_{net}$	168498050.05						
$C_{rev}$	8000705.82	1472	49450992.50	550	246	0	134705596.76
WEC03							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	269468474.10	1472	49889504.99	134	56	980.95	29571.25
$C_{net}$	269466696.12						
$C_{rev}$	5346647.71	1656	500000000	550	696	0	89972424.90
WEC04							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	271776045.79	552	37560399.02	90	2	2586.53	5607134.42
$C_{net}$	271443876.93						
$C_{rev}$	10893282.40	1472	49545746.53	550	38	104934.15	183405222.19

Για τους στόχους  $C_{total}(\Delta/\Sigma)$  και  $C_{net}$  χρησιμοποιείται ακριβώς η ίδια δομή συστήματος, με τη μόνη διαφορά στον υπολογισμό του κόστους, όπου στο καθαρό κόστος συνυπολογίζονται και τα έσοδα πώλησης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Παρατηρείται ότι ανάμεσα σε αυτά τα συστήματα, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους στον κυματικό μετατροπέα που έχει επιλεγεί, εκείνα με τους 10 WEC02 μετατροπείς επιτυγχάνουν να καλύψουν την 20ετή λειτουργία του συστήματος με το ελάχιστο δυνατό ολικό και καθαρό κόστος με τιμές  $C_{total}(\Delta/\Sigma) = 168513277.81 \text{ €}$  και  $C_{net} = 168498050.05 \text{ €}$  αντίστοιχα. Διακρίνεται επίσης ότι ο πλέον παραγωγικός μετατροπέας εκ των τεσσάρων είναι ο WEC01, καθώς η σύνθεση που τον αξιοποιεί, απαιτεί μόλις 3 εξ' αυτών και με μόλις 184 συσσωρευτές για υποβοήθηση.

Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο για τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που στοχεύει στο μέγιστο κέρδος, καθώς η σύνθεση που αποδεικνύεται πλέον αποδοτική είναι εκείνη που δομείται με τους μετατροπείς WEC01. Οι μέγιστες εισφορές που δύναται να αποφέρει η σύνθεση αυτή είναι  $C_{rev} = 28746839.94 \text{ €}$ , αξιοποιώντας 148 μετατροπείς και 1104 μπαταρίες. Το γεγονός αυτό βέβαια έχει αντίκτυπο στο κόστος του συστήματος αυτού, το οποίο περιγράφεται αναλυτικότερα παρακάτω. Εδώ αξίζει να σημειωθεί η παρατήρηση ότι ο αλγόριθμος επιδιώκει την αξιοποίηση των περισσότερων στοιχείων που μπορεί, όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση των ορίων της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι οι παραπάνω συνθέσεις χρησιμοποιούν 550 μονάδες αφαλάτωσης, που είναι και το μέγιστο επιτρεπόμενο που έχει τεθεί για το στόχο αυτόν, όπως επίσης και μεγάλο αριθμό μπαταριών, κοντά στο όριο των 2000. Ένα παρόμοιο μοτίβο παρατηρείται και στα επόμενα αποτελέσματα. Σε περίπτωση που τα όρια θα ήταν μεγαλύτερα, τα έσοδα από τα συστήματα που προκύπτουν θα ήταν επίσης μεγαλύτερα, αλλά τα κόστη υλοποίησης και λειτουργίας θα ήταν πολύ υψηλά. Σε κάθε περίπτωση, τα κόστη των συστημάτων αυτών είναι ιδιαίτερα αυξημένα, καθώς, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι κυματικοί μετατροπείς αποδίδουν στο 1/3 της παραγωγικής τους ικανότητας.

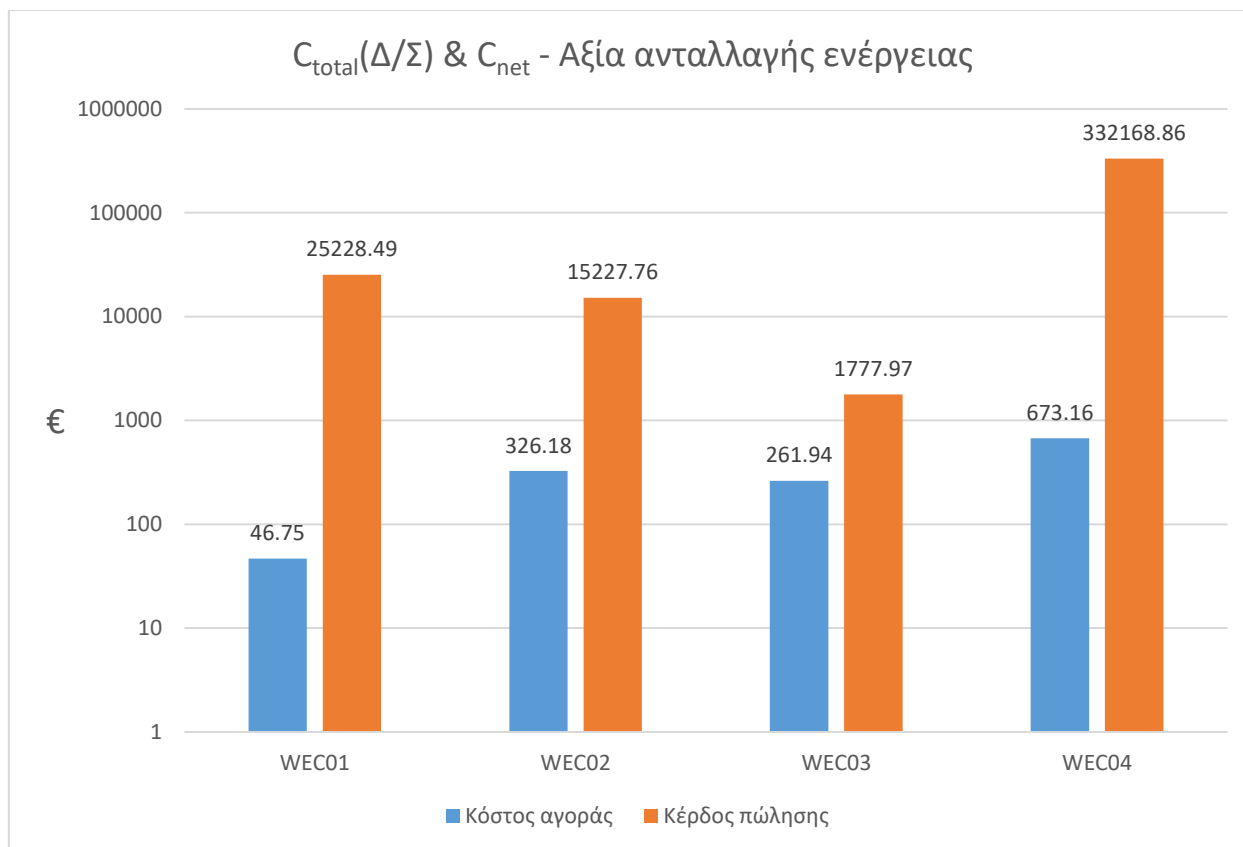
Όσον αφορά τις αγορές ενέργειας, οι βέλτιστες συνθέσεις κόστους που αξιοποιούν τους WEC02 και WEC03 μετατροπείς είναι οι μόνες που δεν πραγματοποιούν αγορές ενέργειας, καθώς χρησιμοποιούν και το μεγαλύτερο αριθμό μπαταριών. Οι συνθέσεις που αξιοποιούν τους λιγότερους κυματικούς μετατροπείς είναι εκείνες που τροφοδοτούν οι WEC01 και WEC04, πράγμα που συμβαίνει και με τα αυτόνομα συστήματα. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι προαναφερθέντες δύο μετατροπείς είναι περισσότερο παραγωγικοί κατά ένα σημαντικό βαθμό, από τους υπόλοιπους δύο.



*Σχήμα 30: Ολικό κόστος βέλτιστων Δ/Σ για το στόχο  $C_{total}$  ανά κυματικό μετατροπέα σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα.*

Στο Σχήμα 30 φαίνονται γραφικά τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1 για το ελάχιστο ολικό κόστος των διασυνδεδεμένων συστημάτων σε σύγκριση με το συμβατικό. Όπως και με τα αυτόνομα συστήματα, έτσι και εδώ, τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας των Δ/Σ φαίνονται πολύ πιο υψηλά από το κόστος του συστήματος που δε χρησιμοποιεί κυματικούς μετατροπείς. Το κόστος αυτό είναι αυξημένο κατά 29 – 40 φορές.

Εδώ γίνεται περισσότερο ξεκάθαρο το υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης ενός WEC04 μετατροπέα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους. Η σύνθεση που αξιοποιεί μόλις δύο μετατροπείς WEC04 έχει το μεγαλύτερο κόστος σχεδιασμού. Το κόστος αυτό είναι ανάλογο της σύνθεσης που αξιοποιεί 1472 WEC03 μετατροπείς, οι οποίοι όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι οι οικονομικότεροι.



Σχήμα 31: Αξία αγοραπωλησίας ενέργειας των βέλτιστων  $\Delta/\Sigma$  για τους στόχους  $C_{total}$  και  $C_{net}$ .

Στο Σχήμα 31 απεικονίζεται η αξία της ενέργειας που αγοράζεται και πωλείται από το κάθε βέλτιστο  $\Delta/\Sigma$  ελαχίστου κόστους. Τις μεγαλύτερες πωλήσεις τις πραγματοποιεί το σύστημα με τους δύο μετατροπείς WEC04, παράλληλα όμως οι αγορές του ίδιου συστήματος είναι οι υψηλότερες. Η συγκεκριμένη δομή επιτυγχάνει επίσης το μεγαλύτερο καθαρό όφελος αγοραπωλησίας ενέργειας ανάμεσα σε όλες αυτές τις δομές.

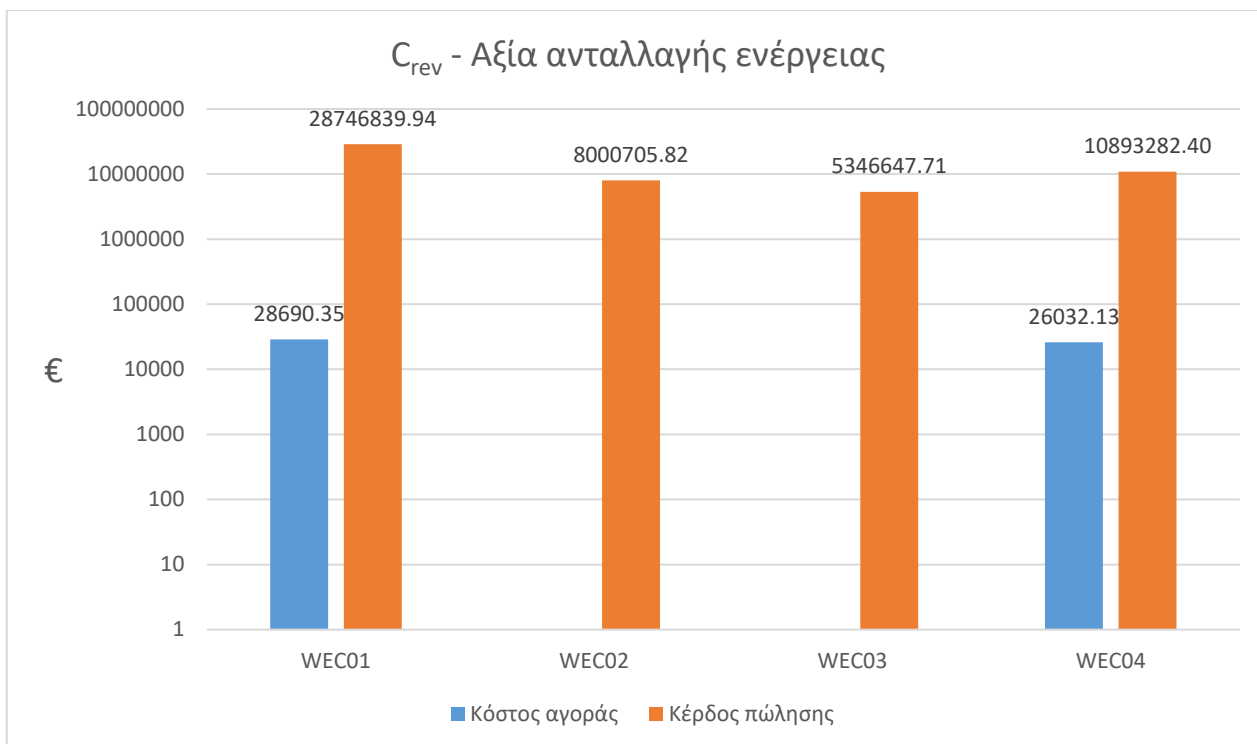
Τις χαμηλότερες πωλήσεις αλλά και αγορές πραγματοποιεί η σύνθεση που τροφοδοτούν οι 1656 WEC03 μετατροπείς. Σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα (δηλαδή χωρίς κυματικούς μετατροπείς), οι αγορές ενέργειας που πραγματοποιούν τα συγκεκριμένα διασυνδεδεμένα συστήματα είναι τουλάχιστον 9700 φορές λιγότερες, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 32: Καθαρό κόστος βέλτιστων Δ/Σ για το στόχο  $C_{rev}$  ανά κυματικό μετατροπέα σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα.

Στο Σχήμα 32 απεικονίζονται τα κόστη των Δ/Σ που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση με στόχο το μέγιστο κέρδος. Το κόστος της βέλτιστης σύνθεσης για το στόχο αυτόν, εκείνη που τροφοδοτούν οι 148 WEC01 μετατροπείς, φθάνει κοντά στα 9.39 δις € και είναι 2-3 φορές μεγαλύτερο από αυτό των υπολοίπων δομών. Φαίνεται ότι τα συστήματα για το συγκεκριμένο στόχο, είναι από 12 έως 47 φορές ακριβότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ελαχίστου κόστους που προέκυψαν και κατά 480 – 1380 ακριβότερα σε σχέση με το συμβατικό σύστημα.





Σχήμα 33: Αξία αγοραπωλησίας ενέργειας των βέλτιστων Δ/Σ για το στόχο  $C_{rev}$ .

Το Σχήμα 33 απεικονίζει την αξία της ενέργειας που αγοράζεται και πωλείται από το κάθε σύστημα μεγίστου κέρδους. Για τις βέλτιστες συνθέσεις αυτού του στόχου που αξιοποιούν τους λιγότερους κυματικούς μετατροπείς, δεν απαιτούνται αγορές ενέργειας από το δίκτυο. Ανάμεσα στις δύο παραπάνω δομές που αγοράζουν ενέργεια, εκείνη που προκύπτει ως βέλτιστη για το στόχο με τις μεγαλύτερες πωλήσεις, πραγματοποιεί και τις μεγαλύτερες αγορές, όχι όμως με μεγάλη διαφορά.

### 5.3.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης #1

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για η κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό ενός μικρής κλίμακας οικισμού 275 κατοικιών είναι εφικτή είτε με αυτόνομο σύστημα είτε με διασυνδεδεμένο με βάση έναν αριθμό κυματικών μετατροπών.

Ο πίνακας που ακολουθεί συγκεντρώνει τις βέλτιστες συνθέσεις ανά στόχο που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση #1.

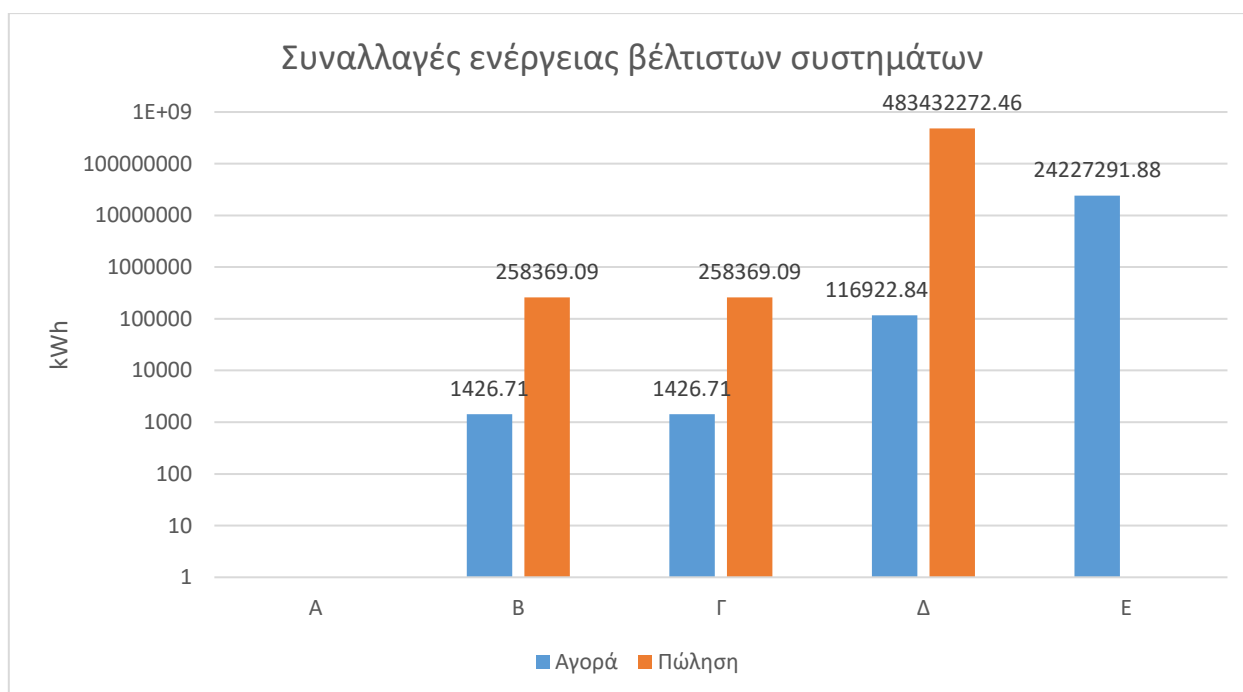
Πίνακας 18. Σύνοψη αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης #1.							
Σύνθεση	Στόχος	Βέλτιστη λύση (€)	$N_{bat}$	$W_{T,n} (L)$	$N_{DU}$	$N_{WEG}$	WEC
A	$C_{total} (A/\Sigma)$	168230471.95	1288	41949819.85	126	10	WEC02
B	$C_{total} (\Delta/\Sigma)$	168513277.81	1104	44137748.77	112	10	WEC02
Γ	$C_{net}$	168498050.05					
Δ	$C_{rev}$	28746839.94	1104	50000000	550	148	WEC01
E	$C_{eg}$	6806303.06	-	16778.27	19	-	-

Στον Πίνακα 18 έχουν συγκεντρωθεί όλα τα βέλτιστα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1.

Παρατηρείται ότι το ελάχιστο κόστος ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης επιτυγχάνεται με χρήση 10 WEC02 μετατροπών σε συνδυασμό με 126 μονάδες αφαλάτωσης και 1288 μπαταρίες. Το μέγιστο κέρδος από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με χρήση 148 WEC01 μετατροπών σε συνδυασμό 1104 συσσωρευτές και 550 μονάδες αφαλάτωσης. Σε σύγκριση με το βέλτιστο συμβατικό σύστημα, τα βέλτιστα ΑΠΕ συστήματα κόστους είναι τουλάχιστον 24 φορές ακριβότερα.

Το μέγεθος της δεξαμενής για το συμβατικό σύστημα είναι πολύ μικρότερο σε σύγκριση με αυτό ενός ΑΠΕ συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι στα ΑΠΕ συστήματα, δεν είναι εγγυημένη η παραγωγή ενέργειας για κάθε ώρα, πράγμα που δε συμβαίνει στο συμβατικό σύστημα. Για αυτό

το λόγο τοποθετούνται και μπαταρίες στην κάθε ΑΠΕ εγκατάσταση, που όμως και εκείνες αποθηκεύουν ενέργεια που έχει παραχθεί από τους κυματικούς μετατροπείς. Στο Σ/Σ έχει ληφθεί υπόψιν ότι η ενέργεια που απαιτείται κάθε ώρα αγοράζεται από το δίκτυο και δεν υπάρχουν μέσα αποθήκευσης (συσσωρευτές) ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι μονάδες αφαλάτωσης θα λειτουργήσουν έτσι ώστε να προστίθεται νερό στη δεξαμενή για να καλύπτεται κάθε ωριαία ζήτηση.

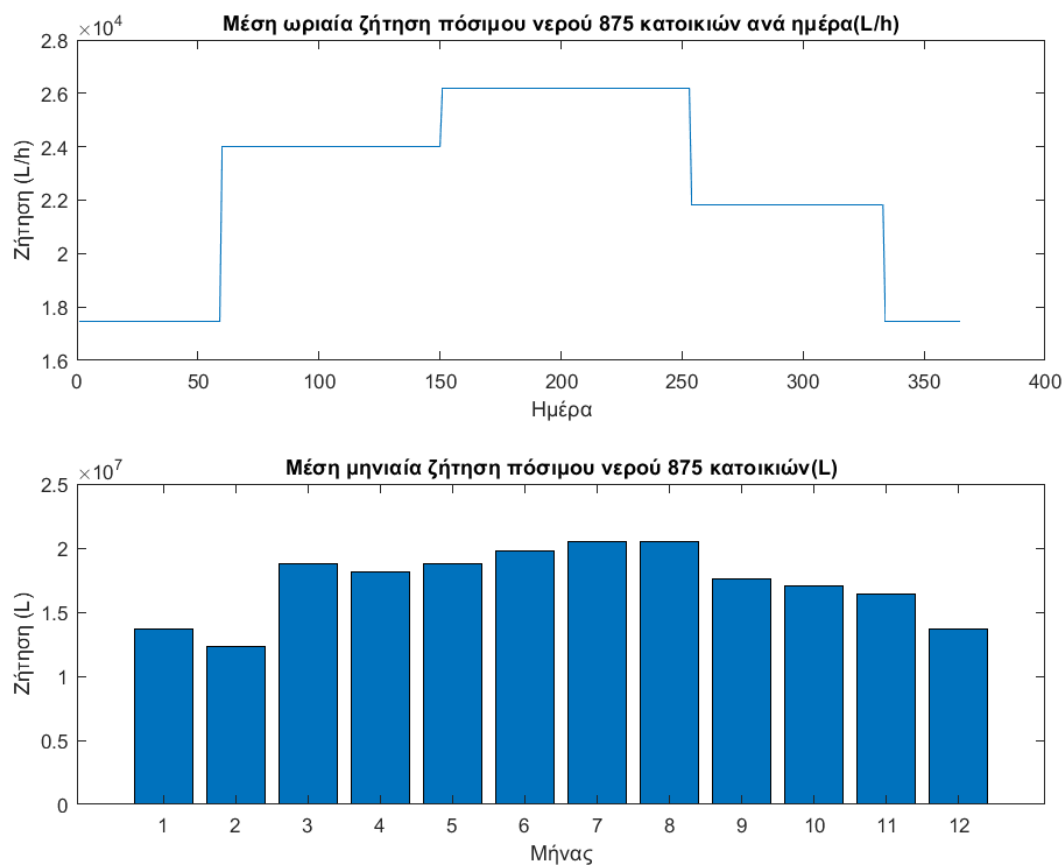


Σχήμα 34: Συναλλαγές ενέργειας βέλτιστων συστημάτων βελτιστοποίησης #1.

Στο Σχήμα 34 απεικονίζονται οι συναλλαγές ενέργειας σε  $kWh$  για τις βέλτιστες συνθέσεις που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση #1. Παρατηρείται ότι οι αγορές των διασυνδεδεμένων συστημάτων είναι ιδιαίτερα χαμηλές, πράγμα που δείχνει ότι θα μπορούσαν σε βάθος χρόνου να αντικαταστήσουν συμβατικά συστήματα αφαλάτωσης νερού, αν ο σκοπός είναι η μείωση ή ο εκμηδενισμός της εξάρτησης από το δίκτυο παροχής ενέργειας για την τροφοδοσία των μονάδων αφαλάτωσης και της μονάδας διανομής. Μπορεί η σύνθεση Γ να αποφέρει έσοδα ύψους 29 εκ. € κατά τη διάρκεια της 20ετίας, αλλά το καθαρό κόστος συστήματος είναι τόσο υψηλό που δεν αποτελεί οικονομικά συμφέρουσα λύση.

## 5.4 Βελτιστοποίηση #2

Στη 2<sup>η</sup> φάση βελτιστοποιήσεων, εξετάζονται και πάλι οι δομές συστήματος που επιτυγχάνουν τους τέσσερις προαναφερθέντες στόχους, με τη μόνη διαφορά στο μέγεθος του πληθυσμού. Συγκεκριμένα, η μελέτη που ακολουθεί πραγματοποιείται πάνω σε έναν οικισμό αποτελούμενο από 875 νοικοκυριά. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η τρέχουσα ζήτηση για πόσιμο νερό.



Σχήμα 35: Μέση ζήτηση πόσιμου νερού.

Στο Σχήμα 35 φαίνεται η μέση κατανομή της ζήτησης πόσιμου νερού κατά τη διάρκεια μιας ημέρας αλλά και η μέση ζήτηση ανά μήνα για μια 20ετία. Στην προκειμένη περίπτωση, η μέση

κατανάλωση είναι τα 23687 L/h, με τη μέγιστη ζήτηση να φθάνει τα 50896 L. Επίσης, μέσω υπολογισμών, προκύπτει ότι η ετήσια ζήτηση κυμαίνεται μεταξύ 246 και 409 ML/έτος, με μέσο όρο τα 20.9 ML/έτος. Συγκριτικά με την προηγούμενη βελτιστοποίηση, παρατηρείται μια αύξηση κατά 3.18 φορές στη ζήτηση, η οποία αντιστοιχεί με τον αυξημένο πληθυσμό της παρούσας βελτιστοποίησης.

Πίνακας 23. Όρια μεταβλητών σχεδιασμού 2 <sup>ης</sup> βελτιστοποίησης.			
Στόχος	Μεταβλητή	Ελάχιστο	Μέγιστο
$C_{total} - C_{net}$	$N_{BAT}$	0	$\infty$
	$W_{T,n}$	5000	$\infty$
	$N_{DU}$	1	$\infty$
	$N_{WEG}$	1	$\infty$
$C_{rev}$	$N_{BAT}$	0	20000
	$W_{T,n}$	5000	200000000
	$N_{DU}$	1	1150
	$N_{WEG}$	1	900
$C_{eg}$	$W_{T,n}$	5000	75000
	$N_{DU}$	1	500

Στον Πίνακα 23 αναγράφονται τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού της 2<sup>ης</sup> βελτιστοποίησης. Τα άνω όρια των μεταβλητών για τη βελτιστοποίηση ως προς τις μέγιστες εισφορές ( $C_{rev}$ ), τοποθετήθηκαν έτσι ώστε ο αλγόριθμος να μην εκτελείται απεριόριστα, όμοια με τη βελτιστοποίηση #1. Σε αντίθεση όμως με την 1<sup>η</sup> βελτιστοποίηση ορίστηκε η μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής για το στόχο  $C_{rev}$  με βάση τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα στις βελτιστοποιήσεις των στόχων που αφορούν τα κόστη των συστημάτων ( $C_{total}$  και  $C_{net}$ ).

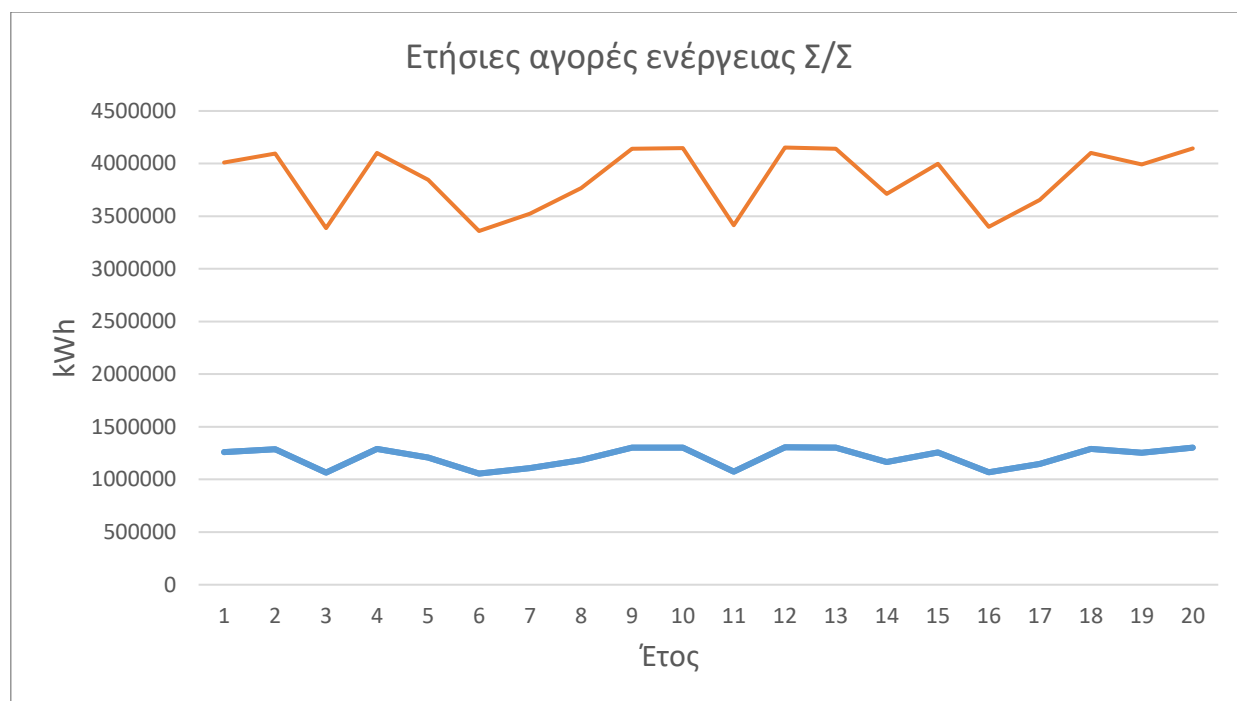
### 5.4.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης #2

#### I. Συμβατικό σύστημα χωρίς ΑΠΕ (Σ/Σ)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για ένα σύστημα που δε χρησιμοποιεί κυματικούς μετατροπείς, η βελτιστοποίηση γίνεται για την επίτευξη του στόχου #4. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αυτής, με πληθυσμό 875 κατοικιών, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>Πίνακας 24. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για συστήματα με τροφοδοσία ηλεκτρικού δικτύου.</b>	
$C_{eg}$ (€)	21668306.86
$W_{T,n}$ (L)	65899.29
$N_{DU}$	61
$E_{αγορά}(kWh)$	77089862.78

Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #2 για σύστημα δίχως κυματικούς μετατροπείς. Το βέλτιστο κόστος ζωής για την 20ετή λειτουργία του συστήματος προκύπτει ίσο με  $C_{eg} = 21668306.86$  €, ενώ απαιτείται τριπλάσιος αριθμός μονάδων αφαλάτωσης σε σχέση με τα αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> βελτιστοποίησης, συγκεκριμένα 61. Συνολικά, το κόστος αγοράς ενέργειας ανέρχεται στα 20894524.54 €. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με εκείνα της 1<sup>ης</sup> βελτιστοποίησης, παρατηρείται μια αύξηση σε όλες τις τιμές των απαιτούμενων πόρων κατά 3.2 - 3.9 % περίπου, η οποία είναι ανάλογη της αύξησης της ζήτησης.



Σχήμα 36: Αγορές ενέργειας ανά έτος, συμβατικού συστήματος χωρίς ΑΠΕ.

Στο Σχήμα 36 απεικονίζονται οι ετήσιες αγορές ενέργειας που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία του συστήματος χωρίς ΑΠΕ και την κάλυψη της ζήτησης του οικισμού σε πόσιμο νερό. Είναι εμφανές ότι οι αγορές σε ενέργεια παρουσιάζουν διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή, η οποία φθάνει τις 3.85 GWh, όμοια με την περίπτωση κάλυψης 275 κατοικιών. Για την αυξημένη ζήτηση στην προκειμένη περίπτωση, υφίσταται αύξηση στις ετήσιες αγορές ενέργειας κατά περίπου 3.18 φορές. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι αγορές σε ηλεκτρική ενέργεια φθάνουν στα 21 εκ. €. Το ποσό αυτό αποτελεί το 96.5 % του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης του συστήματος.

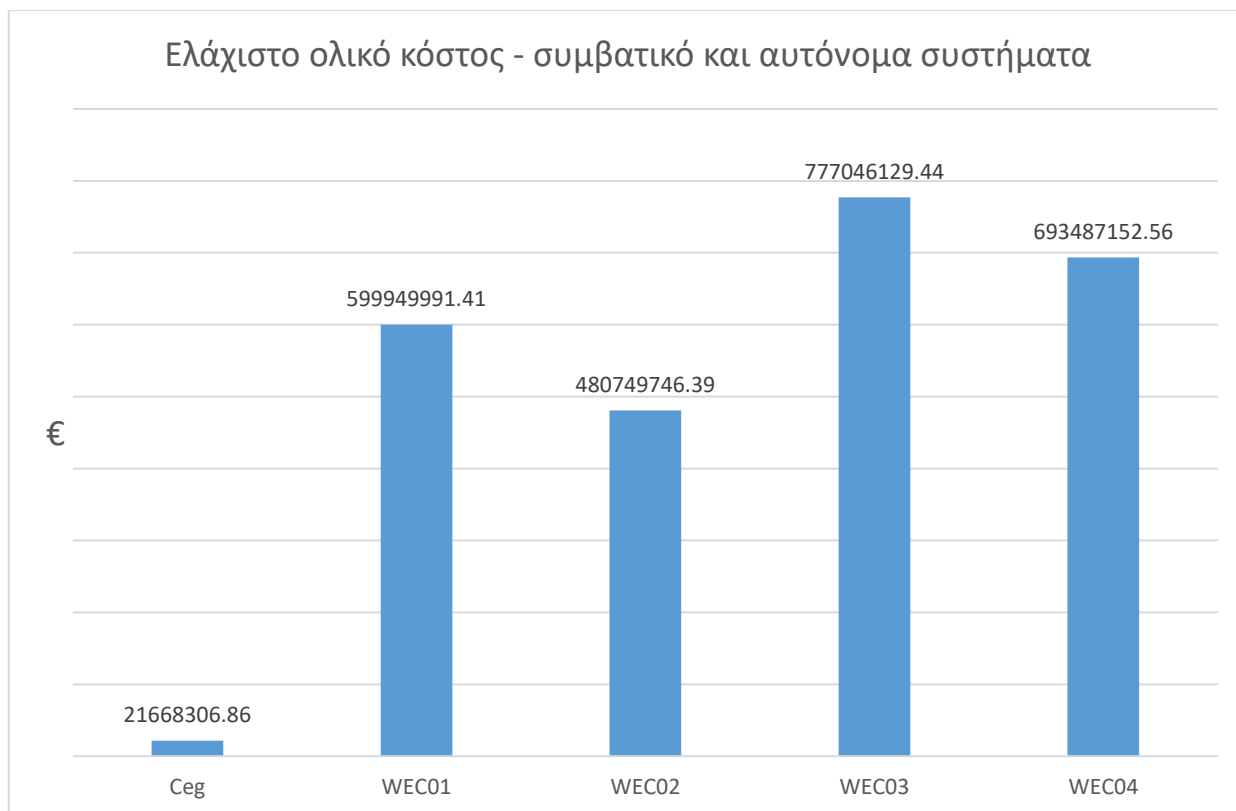
## II. Αυτόνομο σύστημα (A/Σ)

Στον Πίνακα 25, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για τις συνθέσεις A/Σ που βασίζονται σε κάθε έναν από τους μετατροπείς που εξετάζονται.

Πίνακας 25. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για αυτόνομο σύστημα.					
WEC	Λύση (€)	$N_{bat}$	$W_{T,n} (L)$	$N_{DU}$	$N_{WEG}$
WEC01	599949991.41	920	75630518.64	83	9
WEC02	480749746.39	4048	184880997.73	382	27
WEC03	777046129.44	4784	194902249.2	455	157
WEC04	693487152.56	2576	123037668	309	5

Φαίνεται ότι στην περίπτωση της αυξημένης ζήτησης παρατηρείται ένα παρόμοιο μοτίβο αποτελεσμάτων. Το αυτόνομο σύστημα που επιτυγχάνει να την καλύψει με το ελάχιστο κόστος μεταξύ αυτών είναι πάλι εκείνο που τροφοδοτούν οι WEC02 μετατροπείς. Το κόστος αυτό ανέρχεται στα  $C_{total}(A/\Sigma) = 480749746.39$  €, αξιοποιώντας 27 μετατροπείς στην προκειμένη περίπτωση και 4048 συσσωρευτές. Η αμέσως ακριβότερη σύνθεση είναι εκείνη που βασίζεται στον WEC01, με εννέα μετατροπείς και το μικρότερο αριθμό μπαταριών ανάμεσα στις παραπάνω συνθέσεις. Συγκριτικά με τη βελτιστοποίηση #1, κάθε μια από τις παραπάνω βέλτιστες συνθέσεις εμφανίζουν διαφορετική αύξηση στον αριθμό των μετατροπέων, ως συνάρτηση της διαφορετικής παραγωγικής ικανότητας του καθενός. Ως εκ τούτου, συμβαίνει το ίδιο και με τα υπόλοιπα στοιχεία που αποτελούν την κάθε σύνθεση. Σε αντίθεση με την προηγούμενη βελτιστοποίηση για αυτόνομα συστήματα, η ακριβότερη εκ των τεσσάρων βέλτιστη δομή που προκύπτει, βασίζεται στον WEC03.





Σχήμα 37: Βέλτιστες λύσεις Α/Σ ανά στόχο βελτιστοποίησης και κυματικό μετατροπέα.

Στο Σχήμα 37 παρουσιάζονται γραφικά, τα βέλτιστα ολικά κόστη των Α/Σ της βελτιστοποίησης #2. Όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα, η ακριβότερη με διαφορά σύνθεση είναι εκείνη που αξιοποιεί WEC03 μετατροπείς, ενώ η οικονομικότερη αυτή που τροφοδοτούν οι WEC02. Συγκριτικά με το συμβατικό σύστημα, η πλέον συμφέρουσα σύνθεση ΑΠΕ είναι κατά 22 περίπου φορές περισσότερο δαπανηρή από το συμβατικό σύστημα. Η αύξηση στο κόστος των ΑΠΕ συστημάτων σε σύγκριση με την 1<sup>η</sup> βελτιστοποίηση δεν είναι ίδια για κάθε ένα από αυτά. Συγκεκριμένα οι αυξήσεις που παρατηρούνται, υπολογίζονται σε 3, 2.8, 2.8 και 2.5 φορές αντίστοιχα για το καθένα από τα παραπάνω συστήματα. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στη διαφορετική παραγωγική ικανότητα του καθενός από τους μελετώμενους μετατροπείς που τροφοδοτούν τις συνθέσεις αυτές, καθώς η τοποθεσία εγκατάστασης των μετατροπέων παραμένει η ίδια ανάμεσα στις βελτιστοποιήσεις, ενώ αυξάνεται η ζήτηση σε πόσιμο νερό που καλείται να καλύψει το κάθε σύστημα.

### III. Διασυνδεδεμένο σύστημα ( $\Delta/\Sigma$ )

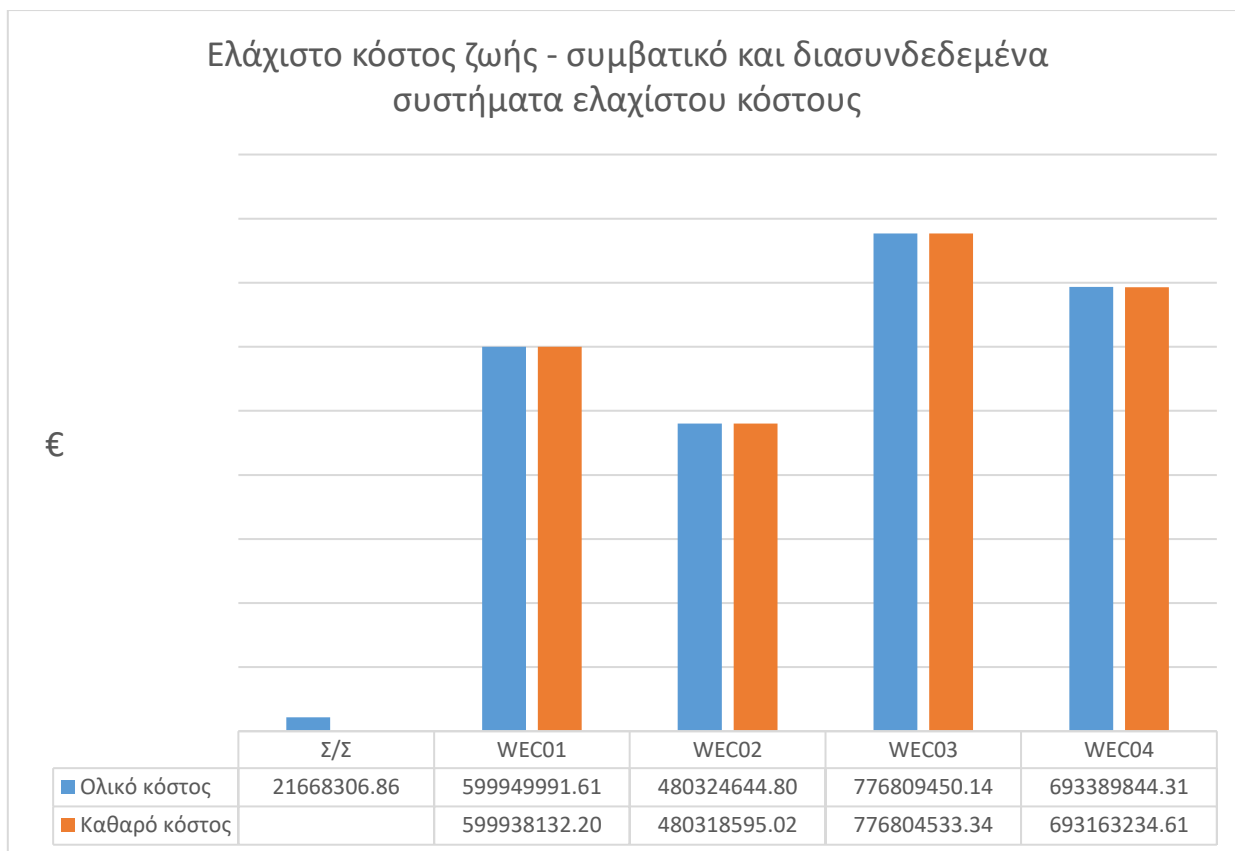
Στον Πίνακα 26 απεικονίζονται ομαδοποιημένα κατά μετατροπέα, οι συνθέσεις που αποδίδουν τις βέλτιστες λύσεις ανά στόχο που αναλογεί σε  $\Delta/\Sigma$ .

Πίνακας 26. Αποτελέσματα βελτιστοποιήσεων διασυνδεδεμένων συστημάτων.							
Στόχος	Βέλτιστη λύση (€)	$N_{bat}$	$W_{T,n}$ (L)	$N_{DU}$	$N_{WEG}$	Εαγορά (kWh)	Επώληση (kWh)
WEC01							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	599949991.61	920	75630519.21	83	9	0	198604.64
$C_{net}$	599938132.20						
$C_{rev}$	59978691.30	2392	697882475.33	1150	309	0	1008650800.57
WEC02							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	480324644.80	3864	184864777.02	371	27	4869.09	101947.20
$C_{net}$	480318595.02						
$C_{rev}$	16804710.70	2944	2000000000	1150	516	0	282934862.50
WEC03							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	776809450.14	4600	196572277.40	424	157	2342.32	82773.59
$C_{net}$	776804533.34						
$C_{rev}$	5871314.68	10672	1995425516.84	902	900	33846.69	98815905.52
WEC04							
$C_{total}$ ( $\Delta/\Sigma$ )	693389844.31	2576	122758777.58	309	5	1395.85	3830877.34
$C_{net}$	693163234.61						
$C_{rev}$	22882918.30	2944	1828556982.39	1150	79	0	385281024.80

Μελετώντας τα αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Πρώτον, οι συνθέσεις που ικανοποιούν την 20ετή ζήτηση με τις ελάχιστες δαπάνες (ολικό και καθαρό κόστος), είναι

εκείνες που αξιοποιούν τους μετατροπείς WEC02, όπως συμβαίνει και με τα αυτόνομα συστήματα της παρούσας βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, η σύνθεση που δομείται με τον προαναφερθέντα μετατροπέα, απαιτεί ολικό κόστος  $C_{total} (\Delta/\Sigma) = 480324644.80 \text{ €}$ , και καθαρό κόστος, έπειτα από το συνυπολογισμό της αξίας πώλησης ενέργειας,  $C_{net} = 480318595.02 \text{ €}$ . Η μόνη σύνθεση η οποία δεν πραγματοποιεί αγορές ενέργειας είναι εκείνη που αξιοποιεί 9 WEC01 μετατροπείς. Οι ακριβότερες συνθέσεις που προκύπτουν είναι εκείνες που δομούνται με τους WEC03 μετατροπείς, οι οποίες είναι 1.6 φορές ακριβότερες. Μελετώντας την ενέργεια που πωλείται ανάμεσα στις συνθέσεις με το ελάχιστο κόστος ζωής, φαίνεται ότι η σύνθεση με τους 5 WEC04 κυριαρχεί με εξαγωγές που φθάνουν τις 3.83 GWh, παρόλα αυτά το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των συστημάτων ελάχιστου ολικού και καθαρού κόστους που αξιοποιεί αυτούς τους μετατροπείς είναι κατά 1.44 φορές αυξημένο σε σχέση με τις αντίστοιχες οικονομικότερες συνθέσεις που αξιοποιούν τους WEC02 μετατροπείς.

Όσον αφορά τα μέγιστα έσοδα, η βέλτιστη σύνθεση που ικανοποιεί το στόχο αυτό, είναι επίσης εκείνη που αξιοποιεί τους WEC01, με συνολικά έσοδα  $C_{rev} = 59978691.30 \text{ €}$ . Για τον ίδιο στόχο, η μόνη σύνθεση που πραγματοποιεί αγορές ενέργειας είναι εκείνη που παράγουν ενέργεια 900 WEC03 μετατροπείς.

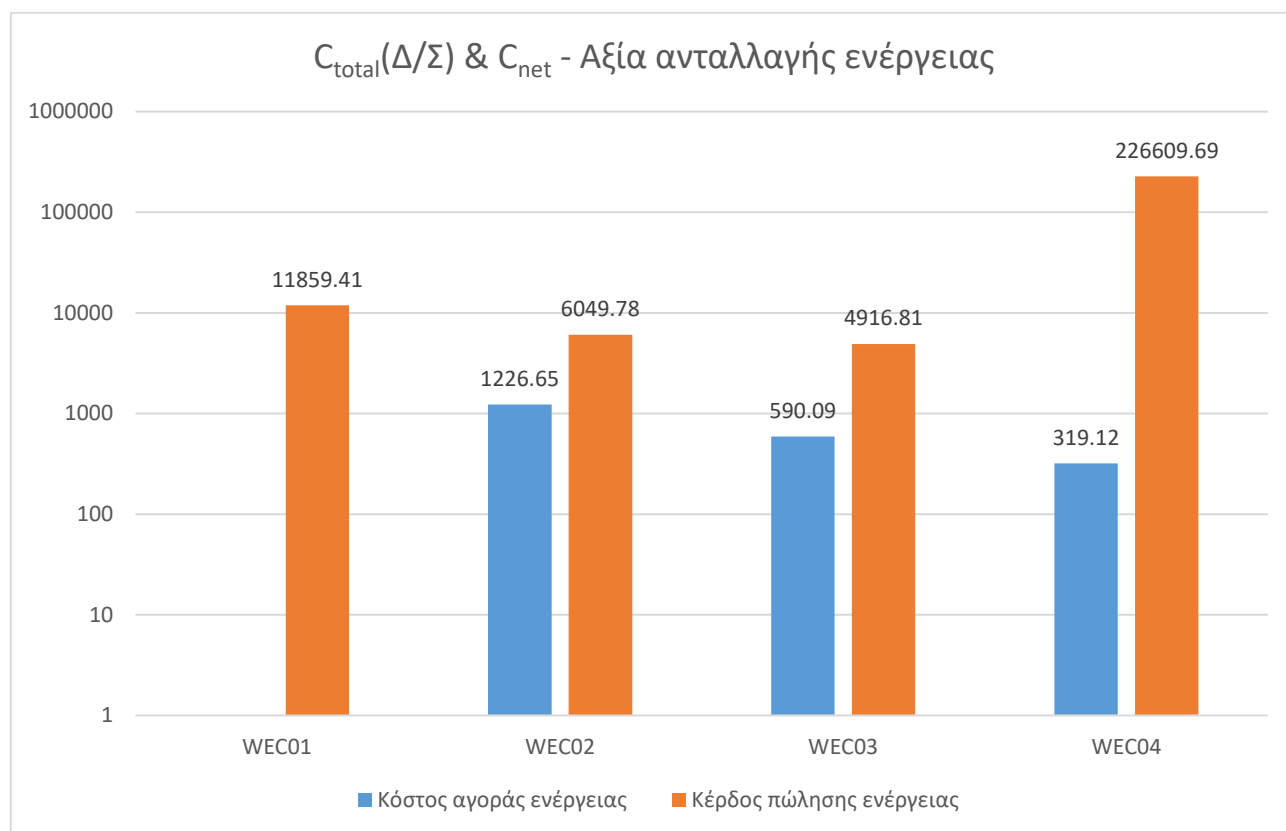


Σχήμα 38: Ολικό κόστος  $\Delta/\Sigma C_{total}$  ανά κυματικό μετατροπέα.

Το Σχήμα 38 παρουσιάζει το απαιτούμενο κόστος υλοποίησης και λειτουργίας των διασυνδεδεμένων συστημάτων ελάχιστου (ολικού και καθαρού) κόστους με τις βέλτιστες λύσεις της 2<sup>ης</sup> βελτιστοποίησης. Είναι εμφανώς διακριτή η διαφορά στο κόστος των συστημάτων που τροφοδοτούνται από WEC03 μετατροπείς έναντι των υπολοίπων συστημάτων. Ανατρέχοντας στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1, με την αξιοποίηση των WEC04 μετατροπέων, στην προκείμενη βελτιστοποίηση παρουσιάζονται οι μικρότερες αυξήσεις στο κόστος σχεδιασμού, οι οποίες υπολογίζονται περίπου 2.5 φορές. Από την άλλη, η χρήση των WEC01, WEC02 και WEC03 έχει ως αποτέλεσμα αυξήσεις κατά 3, 2.85 και 2.88 φορές αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα του Πίνακα 26, αυτό οφείλεται στην αναγκαία αγορά και εγκατάσταση μεγαλύτερου πλήθους μετατροπέων WEC02 και WEC03, αλλά και στο μεγάλο κόστος αγοράς και εγκατάστασης πολλαπλών WEC01 μετατροπέων.

Όπως και στην 1<sup>η</sup> βελτιστοποίηση, οι συνθέσεις με το μικρότερο αριθμό κυματικών μετατροπέων είναι εκείνες που τροφοδοτούν οι WEC01 και WEC04. Το πλήθος των

αξιοποιούμενων μετατροπέων είναι μονοψήφιο στις δύο αυτές συνθέσεις και πολύ μικρότερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες δύο. Συμπέρασμα αυτού είναι ότι οι μετατροπείς WEC01 και WEC04 είναι πολύ αποδοτικότεροι σε σύγκριση με τους άλλους δύο μετατροπείς για τα κυματικά δεδομένα που συνδέονται με την τοποθεσία εγκατάστασης των βελτιστοποιημένων συστημάτων.



Σχήμα 39: Αξία αγοραπωλησίας ενέργειας των βέλτιστων Δ/Σ για τους στόχους  $C_{total}$  και  $C_{net}$ .

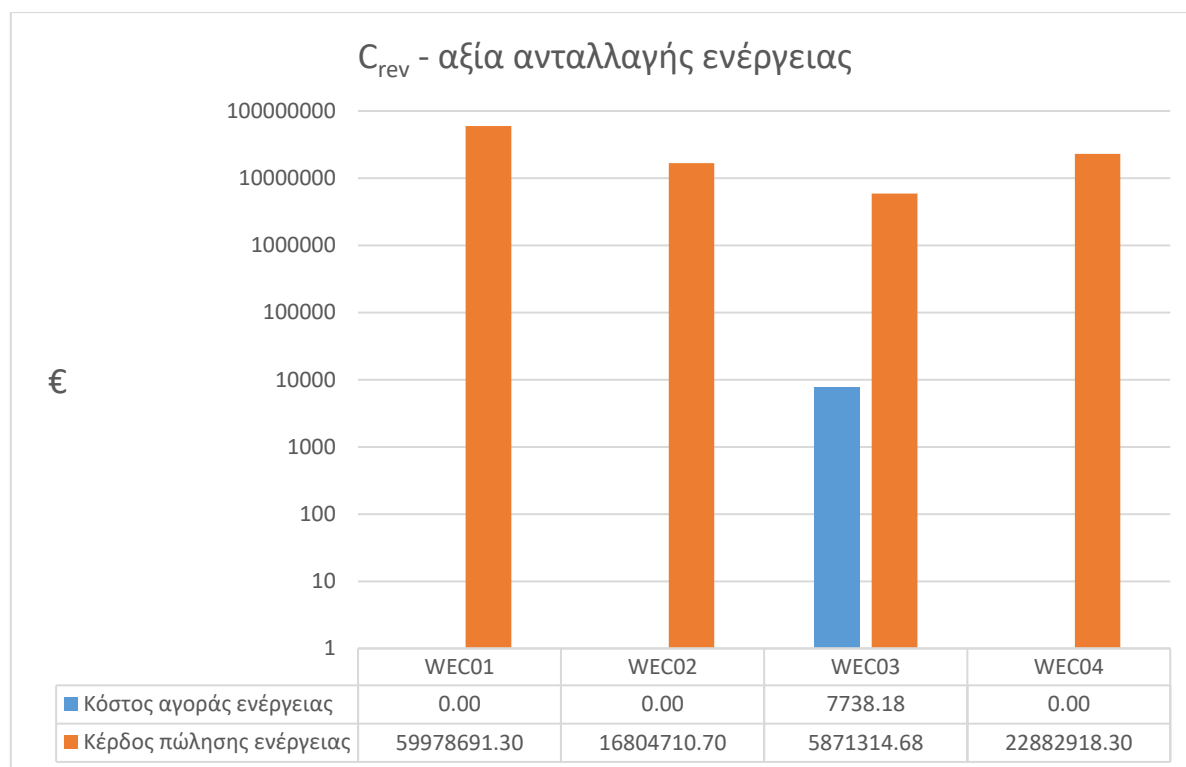
Στο Σχήμα 39 παρουσιάζεται η χρηματική αξία της αγοραπωλησίας ενέργειας που πραγματοποιεί το καθένα από τα διασυνδεδεμένα συστήματα ελάχιστου κόστους. Διακρίνεται καθαρά ότι η δομή που τροφοδοτούν πέντε WEC04 μετατροπείς είναι εκείνη που επιτυγχάνει να πραγματοποιήσει τις μεγαλύτερες πωλήσεις ενέργειας. επίσης, η δομή αυτή επιτυγχάνει και το μεγαλύτερο όφελος από την αγοραπωλησία ενέργειας. Η μόνη δομή που δεν πραγματοποιεί αγорές ενέργειας είναι εκείνη που αξιοποιεί εννέα WEC01 μετατροπείς.

Η μόνη σύνθεση που πραγματοποιεί μεγαλύτερες πωλήσεις από την αντίστοιχή της για την 1<sup>η</sup> βελτιστοποίηση, είναι εκείνη που αξιοποιεί τους WEC03 μετατροπείς.



*Σχήμα 40: Καθαρό κόστος βέλτιστων Δ/Σ για το στόχο  $C_{rev}$  ανά κυματικό μετατροπέα σε σύγκριση με το συμβατικό.*

Το Σχήμα 40 απεικονίζει το καθαρό κόστος υλοποίησης και λειτουργίας των Δ/Σ μέγιστου κέρδους. Παρατηρείται ότι τα κόστη αυτά είναι πολύ υψηλά, της τάξεως των δις €. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανάγκη χρήσης πολύ περισσότερων συσκευών σε αντίθεση με τα διασυνδεδεμένα συστήματα ελαχίστου κόστους. Η βέλτιστη σύνθεση, η οποία αποφέρει και τα μεγαλύτερα έσοδα εκ των τεσσάρων, αποτελεί επίσης και την περισσότερο κοστοβόρα εξ' αυτών. Τέλος, αναφέρεται ότι το κόστος ζωής του βέλτιστου συμβατικού συστήματος είναι κατά τουλάχιστον 216 φορές χαμηλότερο.



Σχήμα 41: Αξία αγοραπωλησίας ενέργειας των βέλτιστων Δ/Σ για το στόχο  $C_{rev}$ .

Στο Σχήμα 41 απεικονίζεται το οικονομικό όφελος έπειτα από την αγοραπωλησία ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο, των βέλτιστων συστημάτων που έχουν σχεδιαστεί για να αποφέρουν το μέγιστο κέρδος. Όπως περιγράφεται παραπάνω, η σύνθεση που τροφοδοτούν οι WEC01 μετατροπείς επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη ροή εσόδων ανάμεσα στις συνθέσεις. Η μόνη δομή που αγοράζει ενέργεια είναι εκείνη που αξιοποιεί τους WEC03 μετατροπείς, παρόλα αυτά η αξία της αποτελεί το 0.001 % της ενέργειας που η ίδια δομή ανταλλάσσει με το ηλεκτρικό δίκτυο.

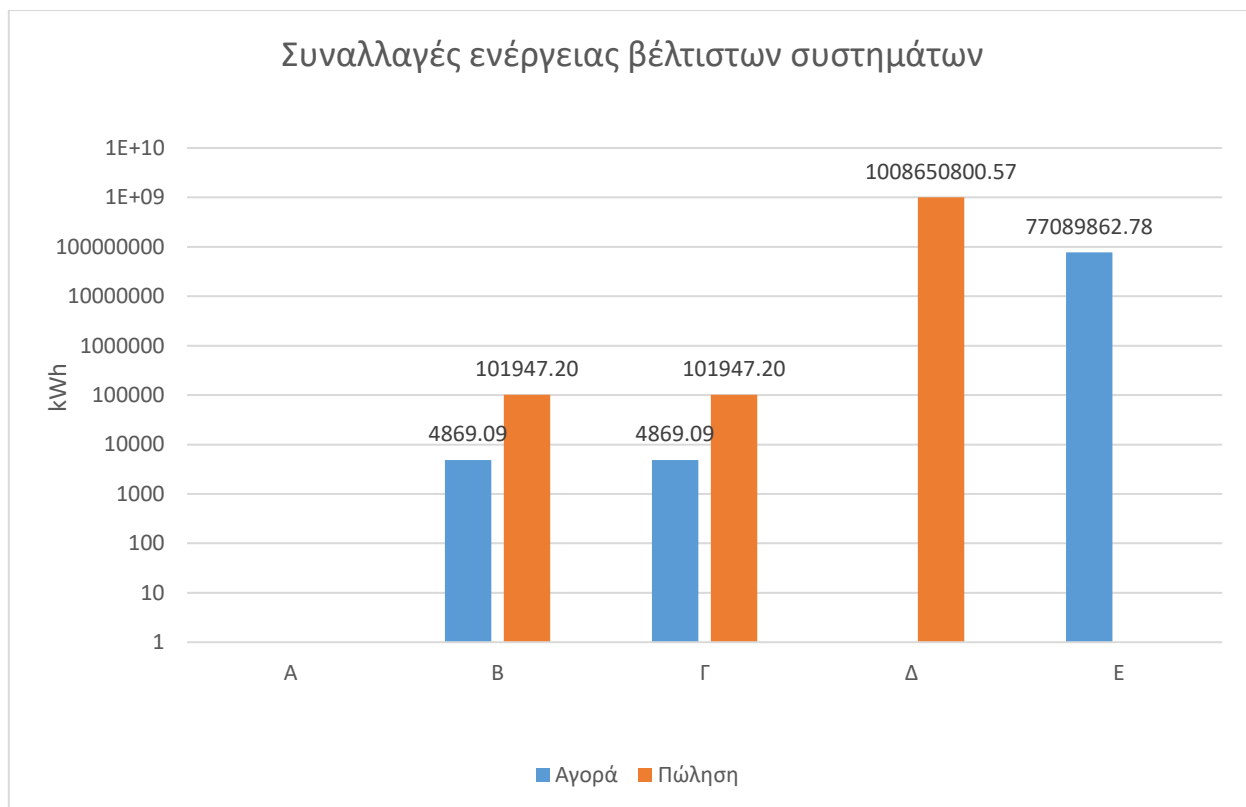
## 5.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης #2

Συγκρίνοντας και συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> βελτιστοποίησης, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

Πίνακας 27. Βέλτιστες συνθέσεις βελτιστοποίησης #2.							
Σύνθεση	Στόχος	Βέλτιστη λύση (€)	$N_{bat}$	$W_{T,n}$ (L)	$N_{DU}$	$N_{WEG}$	WEC
A	$C_{total}(A/\Sigma)$	480749746.39	4048	184880997.73	382	27	WEC02
B	$C_{total}(\Delta/\Sigma)$	480324644.80	3864	184864777.02	371	27	WEC02
Γ	$C_{net}$	480318595.02					
Δ	$C_{rev}$	59978691.30	2392	697882475.33	1150	309	WEC01
E	$C_{eg}$	21668306.86	-	65899.29	61	-	-

Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βέλτιστες συνθέσεις που ικανοποιούν κάθε έναν από τους στόχους της βελτιστοποίησης #2. Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση αυτή, είναι ότι για τις συγκεκριμένες κυματικές συνθήκες της τοποθεσίας που επιλέχθηκε, για σχετικά μεγαλύτερη ζήτηση πόσιμου νερού συμφέρει περισσότερο η χρήση του κυματικού μετατροπέα WEC02, αν ο στόχος είναι οι μικρότερες δαπάνες. Τη μέγιστη κερδοφορία την επιτυγχάνει το σύστημα με τροφοδοσία των WEC01 παρόλο που το κόστος ζωής του είναι πολύ υψηλό.





*Σχήμα 42: Συναλλαγές ενέργειας βέλτιστων συστημάτων βελτιστοποίησης #2.*

Στο Σχήμα 42 απεικονίζεται η αγορασμένη και πωλούμενη ενέργεια ανά βέλτιστη σύνθεση της 2<sup>ης</sup> βελτιστοποίησης. Σε αντίθεση με την 1<sup>η</sup> βελτιστοποίηση, η σύνθεση Δ δεν πραγματοποιεί καμία αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον η πωλούμενη ενέργεια των συνθέσεων Β και Γ έχει μειωθεί στο μισό περίπου, ενώ η αγορασμένη ενέργεια είναι κατά τρεις φορές αυξημένη.

# 6.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Η αξιοποίηση της κυματικής ως εναλλακτική μορφή ανανεώσιμης ενέργειας αποτελεί αδιαμφισβήτητα ένα επιπλέον βήμα προς ένα οικολογικότερο μέλλον, όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας. Ένα σημαντικό ποσοστό της απαιτούμενης καταναλισκόμενης ενέργειας θα μπορούσε να παράγεται με την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας των κυμάτων και υδάτινων ρευμάτων. Από τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι ένα αυτόνομο ΑΠΕ σύστημα αφαλάτωσης νερού είναι απόλυτα εφικτό στην κατασκευή και τη λειτουργία του. Εκτός αυτού προσφέρει τη δυνατότητα ενοποίησης του σκοπού και της τροφοδοσίας του συστήματος, αφού τα τμήματα της μονάδας αφαλάτωσης μπορούν να εγκατασταθούν σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους.

Παρόλα αυτά, το κόστος για την κατασκευή και συντήρηση ενός συστήματος αφαλάτωσης που αξιοποιεί κυματικούς μετατροπείς είναι αρκετά υψηλό, είτε πρόκειται για αυτόνομο είτε για μη αυτόνομο σύστημα. Και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού οφείλεται κυρίως στην αγορά, εγκατάσταση και συντήρηση ενός κυματικού μετατροπέα, πόσο μάλλον περισσότερων. Το κόστος διασύνδεσης των κυματικών μετατροπέων με τα υπόλοιπα τμήματα της μονάδας, αποτελεί επίσης μεγάλο παράγοντα κόστους. Η υποβρύχια διασύνδεση μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα δαπανηρή, ανάλογα με την απαιτούμενη ενέργεια και την απόσταση στην οποία αυτή πρέπει να μεταφερθεί. Αντίθετα, για ένα σύστημα αφαλάτωσης που δε χρησιμοποιεί κυματικούς μετατροπείς, δεν έχουμε υψηλό κόστος εγκατάστασης, αλλά ούτε και συντήρησης διότι στο

μεγαλύτερο ποσοστό, οι υποδομές τροφοδοσίας υπάρχουν ήδη. Για έναν μικρό οικισμό οι δαπάνες αγοράς ενέργειας αξιοποιώντας συγκεκριμένες συνθέσεις διασυνδεδεμένων συστημάτων είναι ελάχιστες. Αυτό το γεγονός είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα που δίδει η αξιοποίηση ΑΠΕ.

Για μικρούς και μεσαίους οικισμούς η επιλογή του μετατροπέα WEC02 για την ηλεκτροδότηση της μονάδας αποτελεί την οικονομικότερη δυνατή επιλογή. Η διαφορά κόστους ζωής ενός διασυνδεδεμένου ή αυτόνομου συστήματος με τον WEC02 είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με τη συμβατική επιλογή συστήματος χωρίς κυματικούς μετατροπείς. Παρόλα αυτά, οι αγορές ενέργειας που πραγματοποιούνται από το Διασυνδεδεμένο σύστημα είναι ελάχιστες. Επιπλέον, η δυνατότητα που προσφέρεται με τα διασυνδεδεμένα συστήματα, της πώλησης περίσσειας παραγόμενης ενέργειας, μπορεί να βοηθήσει στην κάλυψη ενός ποσοστού των δαπανών. Το ποσοστό αυτό είναι μικρό σε σύγκριση με το κόστος εγκατάστασης μιας τέτοιας μονάδας. Επομένως, ανάλογα με την αξιοπιστία των κυματικών μετατροπέων, οι οποίοι αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό δαπάνης κατασκευής, είναι θεωρητικά εφικτή η απόσβεσή της, σε μακροχρόνια όμως βάση.

Το κόστος όμως ενός συστήματος που τροφοδοτείται από κυματικούς μετατροπείς εξαρτάται άμεσα και από τη θέση εγκατάστασής τους, καθώς η ισχύς που παράγουν εξαρτάται άμεσα από τα κυματικά φαινόμενα της τοποθεσίας. Αν η επιλεγμένη περιοχή δεν έχει έντονα κυματικά φαινόμενα, η παραγωγή ενέργειας είναι μειωμένη. Η παραγωγή ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ανάγκη αποθήκευσής της, καθώς και με την ανάγκη αποθήκευσης του αφαλατωμένου, πόσιμου νερού. Αποτέλεσμα, λοιπόν, της χαμηλής παραγωγής ενέργειας είναι η ανάγκη χρήσης μεγαλύτερου αριθμού μπαταριών και χωρητικότητας δεξαμενής, ώστε τις ώρες που παράγεται αρκετή ενέργεια να αποθηκεύονται ενέργεια και πόσιμο νερό για μετέπειτα χρήση. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας αύξησης των δαπανών είναι η ηλεκτρική διασύνδεση των μετατροπέων με την υπόλοιπη μονάδα. Για τους λόγους αυτούς απαιτείται μελέτη της γεωγραφικής τοποθεσίας εγκατάστασης των κυματικών μετατροπέων πριν την έναρξη κατασκευής του συστήματος.

Μελλοντικά θα μπορούσε να γίνει μελέτη βελτιστοποίησης σχεδιασμού για μεγαλύτερους οικισμούς ή και ολόκληρες πόλεις, αλλά και με χρήση μετατροπέων διαφορετικών τύπων ακόμα και στην ίδια σύνθεση. Ένα εναλλακτικό σενάριο θα μπορούσε να περιλαμβάνει μονάδες αφαλάτωσης σε περιοχές που υπάρχει δυνατότητα να εγκατασταθούν και Φ/Β αλλά και Α/Γ,

ώστε να συνδυάζονται οι ΑΠΕ. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω μείωσης του κόστους σχεδιασμού ενός συστήματος, αντικαθιστώντας ένα μέρος των δαπανηρών μετατροπών με άλλους, οικονομικότερους.

# 7.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Ντάβαλης , Γ. (2016). Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό, Διπλωματική Εργασία.  
<http://ikee.lib.auth.gr/record/294389/files/Ntavalis-WaveEnergy.pdf>
- [2] Veerabhadrapa, K., Suhas, B. G., Mangrulkar, C. K., Kumar, R. S., Mudakappanavar, V. S., Narahari, & Seetharamu, K. N. (2022). Power Generation Using Ocean Waves: A Review. *Global Transitions Proceedings*, 3(2), 359–370.  
<https://doi.org/10.1016/j.gltp.2022.05.001>
- [3] Reikard, G., Robertson, B., & Bidlot, J.-R. (2017). Wave energy worldwide: Simulating wave farms, forecasting, and calculating reserves. *International Journal of Marine Energy*, 17, 156–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.01.004>
- [4] UNIVERSITY OF STRATHCLYDE. (n.d.). *Point Absorber - Analysis of Cost Reduction Opportunities in the Wave Energy Industry*. [www.esru.strath.ac.uk](http://www.esru.strath.ac.uk). Ανακτήθηκε στις 20 Δεκεμβρίου 2022, από την ιστοσελίδα [https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/14-15/Wave\\_Energy/point-absorber.html](https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/14-15/Wave_Energy/point-absorber.html)
- [5] Lian, J., Wang, X., Wang, X., & Wu, D. (2024). Research on Wave Energy Converters. *Energies*, 17(7), 1577. <https://doi.org/10.3390/en17071577>

- [6] Castro-Santos, L., Silva, D., Bento, A., Salvação, N., & Guedes Soares, C. (2018), Economic Feasibility of Wave Energy Farms in Portugal. *Energies*, 11(11), 3149. <https://doi.org/10.3390/en11113149>
- [7] Pradhan, P., Hatalis, K., Kishore, S., Blum, R. S., & Lamadrid, A. J. (2014). Prospects of wave power grid integration. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. <https://doi.org/10.1109/pesgm.2014.6939366>
- [8] Sauer, D. (2020). Series, Parallel or Series and Parallel Battery Banks. [https://assets.discoverbattery.com/documents/09\\_discover-general/885\\_product\\_application\\_literature/gui-battery-banks-connections-configurations.pdf](https://assets.discoverbattery.com/documents/09_discover-general/885_product_application_literature/gui-battery-banks-connections-configurations.pdf)
- [9] Malisovas, A., Koutroulis, E. (2020). Design Optimization of RES-Based Desalination Systems Cooperating With Smart Grids. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 14(4). <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2968842>
- [10] Almeida, B. S. G. de, & Leite, V. C. (2019). Particle Swarm Optimization: A Powerful Technique for Solving Engineering Problems. In *www.intechopen.com*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/69586>
- [11] Χριστόπουλος, Μ. (2015). Εφαρμογές του αλγόριθμου “Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων” σε προβλήματα ταξινόμησης και ομαδοποίησης, Διπλωματική Εργασία. <https://pergamos.lib.uoa.gr/uoa/dl/object/1317481/file.pdf>
- [12] Λόντρα, Π. Α., & Londra, P. Α. (2014, July 31). Διαστασιολόγηση δεξαμενών όμβριων υδάτων στην Ελλάδα για αστική χρήση. *Dspace.lib.ntua.gr*. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/39581>
- [13] Koutroulis, E. et al. (2019). Geo-Informatics for Optimal Design of Desalination Plants Using Renewable Energy Sources: The DESiRES Platform Paradigm. In: El-Askary, H., Lee, S., Heggy, E., Pradhan, B. (eds) *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications*. CAJG 2018. *Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_13)
- [14] *Global Ocean L 4 Significant Wave Height From Nrt Satellite Measurements*. (n.d.). *Data.marine.copernicus.eu*. Retrieved December 14, 2023, from:

[https://data.marine.copernicus.eu/product/WAVE\\_GLO\\_PHY\\_SWH\\_L4\\_NRT\\_014\\_003/description](https://data.marine.copernicus.eu/product/WAVE_GLO_PHY_SWH_L4_NRT_014_003/description)

- [15] *Copernicus Climate Data Store / Copernicus Climate Data Store*. (n.d.). Cds.climate.copernicus.eu. Retrieved December 14, 2023, from:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#>

- [16] Roshanfekar, P., Thiringer, T., Lundmark, S., & Alatalo, M. (2014). DC-link voltage selection for a multi-MW wind turbine. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 33(5), 1722–1740.

<https://doi.org/10.1108/compel-09-2013-0301>