



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

«Σχεδιασμός Συστημάτων Αφαλάτωσης με Παροχή
Ισχύος από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Λειτουργία
στο Πλαίσιο Έξυπνων Δικτύων»

Μαλισόβας Αθανάσιος

Εξεταστική επιτροπή:

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Αναπλ. Καθηγήτρια Κολοκοτσά Διονυσία

Χανιά, Νοέμβριος 2020

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κο Κουτρούλη Ευτύχιο για την άψογη συνεργασία μας και την βοήθεια του καθ' όλη την υλοποίηση και εξέλιξη της παρούσας διατριβής, καθώς και τους κ. Κ. Καλαϊτζάκη και κα. Δ. Κολοκοτσά για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αδερφή μου και την μητέρα μου οι οποίες δεν σταμάτησαν να με υποστηρίζουν.

Περίληψη

Η αφαλάτωση νερού σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία για την αντιμετώπιση του προβλήματος της έλλειψης του πόσιμου νερού. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία για τον υπολογισμό της βέλτιστης δομής των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης οι οποίες τροφοδοτούνται από ΑΠΕ και συνεργάζονται με έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα. Η προτεινόμενη τεχνική λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ τριών εναλλακτικών βαθμών ελευθερίας στη λειτουργία του συνόλου της εγκατάστασης αφαλάτωσης, δηλαδή τις μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας, την αποθήκευση νερού και τη δυναμική ανταλλαγή ενέργειας με το έξυπνο δίκτυο. Τα σχεδιαστικά αποτελέσματα πιστοποιούν ότι οι βέλτιστες οικονομικά δομές που προκύπτουν από την εφαρμογή του προτεινόμενου σχεδιαστικού εργαλείου είναι ικανές να καλύψουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών σε νερό και να υποστηρίξουν τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, διαθέτοντας το πλεόνασμα ενέργειας που έχει παραχθεί από τις ΑΠΕ. Επίσης, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας επιτρέπει τη μείωση του συνολικού κόστους ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης κατά 60% σε σχέση με την αποκλειστική χρήση ηλεκτρική ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ακόμη, χρησιμοποιώντας το συνολικό κόστος ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ το οποίο θα είναι συνδεδεμένο σε δίκτυο, ως αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα βέλτιστης σχεδίασης, και με τη μείωση του κόστους και αύξηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, βελτιώνεται η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος αφαλάτωσης.

Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από αυτή τη διατριβή

- Athanasios Malisovas, Eftichios Koutroulis, “Design Optimization of RES-Based Desalination Systems Cooperating With Smart Grids”, *IEEE Systems Journal*, in press, pp. 1-12, 2020.
- Pierre Ailliot, Marie Boutigny, Eftichis Koutroulis, Athanasios Malisovas, Valérie Monbet, “Stochastic weather generator for the design and reliability evaluation of desalination systems with Renewable Energy Sources”, *Renewable Energy*, Vol. 158, pp. 541-553, 2020.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1. Γενικά.....	7
2. ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ	11
2. Γενικά.....	11
2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	11
2.1.1 Υλικό κατασκευής Φ/Β κυψέλης.....	13
2.1.2 Τοποθέτηση Φ/Β συστοιχιών.....	16
2.2 Ανεμογεννήτριες	20
2.3 Κυματικοί μετατροπείς ενέργειας	22
2.3.1 Ταξινόμηση και είδη κυματικών μετατροπών.....	23
2.4 Μπαταρίες	29
2.4.1 Μολύβδου – Οξέος.....	29
2.4.2 Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου.....	30
2.4.3 Ιόντων Λιθίου.....	30
2.4.4 Αζώτου – Θείου	30
2.4.5 Οξειδοαναγωγική μπαταρία Βαναδίου	31
2.5 Ρυθμιστές Φόρτισης Μπαταριών	31
2.6 Αντιστροφείς	33
2.6.1 Κατηγοριοποίηση Αντιστροφών	34
2.6.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας και απόδοσης.....	36
2.7 Συστήματα αφαλάτωσης.....	38
2.7.1 Μέθοδοι εξάτμισης/απόσταξης ή Θερμικές μέθοδοι.....	38
2.7.2 Μέθοδοι μεμβρανών.....	42
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	45
3. Γενικά.....	45
3.1 Εναλλακτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	47
3.1.1 Γενετικός αλγόριθμος - ΓΑ (Genetic Algorithm – GA).....	47
3.1.2 Διαφορική Εξέλιξη – ΔΕ (Differential Evolution – DE)	48
3.1.3 Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας (Firefly - FA)	48
3.1.4 Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO).....	48
4. Προσομοίωση Λειτουργίας Συστήματος Αφαλάτωσης με ΑΠΕ	51
4. Γενικά.....	51
4.1 Μοντελοποίηση του συστήματος	52

4.2 Προσομοίωση του συστήματος.....	58
5. Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Συστήματος Αφαλάτωσης με ΑΠΕ.....	63
5. Γενικά.....	63
5.1 Υπολογισμός συνολικού κόστους ζωής	63
5.2 Διαδικασία βελτιστοποίησης	68
5.3 Σχεδίαση εναλλακτικών συναρτήσεων βελτιστοποίησης	70
6. Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης.....	74
7. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	84
Βιβλιογραφία.....	85

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Γενικά

Περισσότερο από το 25% του παγκόσμιου πληθυσμού δεν έχει πρόσβαση σε πόσιμο νερό [1]. Επίσης, σημαντικό ποσοστό των φυσικών πόρων πόσιμου νερού καταναλώνονται για τη διαδικασία ψύξης των μονάδων παραγωγής θερμοηλεκτρικής ενέργειας [2]. Η συνολική ζήτηση για νερό και ηλεκτρισμό αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στα επόμενα χρόνια εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού και της συνεχούς οικονομικής ανάπτυξης. Ταυτόχρονα, η υποβάθμιση του περιβάλλοντος δημιουργεί πρόσθετες απειλές σχετικά με την ασφάλεια του παρεχόμενου νερού. Κάτι τέτοιο απαιτεί την εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών επεξεργασίας και διαχείρισης του νερού [3], [4]. Μεταξύ αυτών, η αφαλάτωση θεωρείται σήμερα μια σημαντική τεχνολογία για την αντιμετώπιση της έλλειψης πόσιμου νερού [5], [6]. Η εφαρμογή της υποστηρίζεται από τη αξιοσημείωτη μείωση του σχετικού κόστους εγκατάστασης και χρήσης της τα τελευταία χρόνια.

Η επιλογή χρήσης της αφαλάτωσης παγκοσμίως έχει αυξηθεί πάνω από δέκα φορές τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες σε περισσότερες από 120 χώρες [7]. Έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα σχετικά με την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των σταθμών αφαλάτωσης. Η χρήση των ΑΠΕ σε συστήματα αφαλάτωσης επιτρέπει τη μείωση των περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων των συμβατικών γεννητριών ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα [5], [8]. Ο ρόλος μιας τέτοιας σχέσης ενέργειας-νερού γίνεται ιδιαίτερα σημαντικός σε περιοχές που παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό σε ΑΠΕ και λίγους πόρους πόσιμου νερού (για παράδειγμα η περιοχή της Μεσογείου, η Μέση Ανατολή κλπ). Έως σήμερα, τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) και οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι τύποι ΑΠΕ σε εφαρμογές

αφαλάτωσης νερού, λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας των αντίστοιχων περιβαλλοντικών πόρων παγκοσμίως.

Τα συστήματα αφαλάτωσης αποτελούν ένα σύμπλεγμα συστημάτων που σχηματίζονται διασυνδέοντας υποδομές οι οποίες σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ύδρευσης. Η λειτουργία αυτών των δύο συστημάτων είναι αλληλοεξαρτώμενη, καθώς επηρεάζονται ταυτόχρονα από το περιβάλλον τους [2], [9]. Οι υπάρχουσες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τη σχεδίαση συστημάτων ΑΠΕ τα οποία εξυπηρετούν αποκλειστικά ηλεκτρικά φορτία (για παράδειγμα σε κτίρια, τηλεπικοινωνιακούς αναμεταδότες κλπ) δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές αφαλάτωσης που βασίζονται σε ΑΠΕ. Αυτό συμβαίνει επειδή η δεξαμενή αποθήκευσης νερού, η οποία συνήθως συμπεριλαμβάνεται στα συστήματα αφαλάτωσης, προσφέρει έναν επιπλέον βαθμό ελευθερίας όσον αφορά την ικανοποίηση της ζήτησης νερού του καταναλωτή. Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές σχεδιασμού συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού και υφάλμυρου νερού που τροφοδοτούνται από αυτόνομα συστήματα ΑΠΕ (δηλαδή δεν είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο). Στόχος αυτών είναι η μεγιστοποίηση της παραγωγής πόσιμου νερού, ή η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας απώλειας τροφοδοσίας ενέργειας, ή η ελαχιστοποίηση του κόστους του κύκλου ζωής του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η ικανοποίηση της ζήτησης του νερού προς κατανάλωση (για παράδειγμα [10] – [14]). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα τα οποία ενσωματώνουν ΑΠΕ. Σε αυτά, τόσο η ηλεκτρική ενέργεια όσο και δεδομένα / πληροφορίες ανταλλάσσονται μεταξύ καταναμημένων παραγωγών ενέργειας, καταναλωτών και μονάδων αποθήκευσης ενέργειας [15], [16]. Μέσω των έξυπνων ηλεκτρικών δικτύων ενισχύεται η αποτελεσματικότητα, η αξιοπιστία και η ποιότητα της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, και μειώνονται οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς [17] – [20]. Στις εφαρμογές αφαλάτωσης που βασίζονται σε ΑΠΕ, το έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να απορροφήσει οποιοδήποτε πλεόνασμα ΑΠΕ κατά τις περιόδους όπου υπάρχει χαμηλή ζήτηση σε νερό ή να καλύψει το έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης. Μια τέτοια δυναμική ανταλλαγή ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί μέσω κατάλληλου συνδυασμού ελέγχου / συντονισμού. Έτσι, προσφέρεται ένας τρίτος βαθμός ελευθερίας κατά τη σχεδίαση συστημάτων αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ που είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο, επιπροσθέτως των επιλογών αποθήκευσης μπαταρίας και νερού [21]. Όμως, απαιτείται η υιοθέτηση μιας τεχνικής σχεδιασμού η οποία επιτρέπει τη βέλτιστη εκμετάλλευση μιας τέτοιας δυνατότητας.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία για την βέλτιστη σχεδίαση μονάδων αφαλάτωσης τα οποία τροφοδοτούνται από Φ/Β, Α/Γ, και αποθηκευμένη ενέργεια σε μπαταρίες και είναι ικανά να ανταλλάξουν δυναμικά ηλεκτρική ενέργεια με ένα έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο. Η καινοτομία της προτεινόμενης τεχνικής είναι ότι, αντίθετα από τις υπάρχουσες μεθόδους σχεδιασμού συστημάτων αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ τα οποία είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο [22] – [28], περιλαμβάνει όλες τις ακόλουθες δυνατότητες σε μια ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδιασμού:

- Υπολογίζει τα βέλτιστα μεγέθη και δομές τόσο όσον αφορά την ενέργεια (παραγωγή και αποθήκευση) όσο και τα υποσυστήματα που σχετίζονται με το νερό, αντίστοιχα, της συνολικής μονάδας αφαλάτωσης, που απαιτούνται για την ικανοποίηση δεδομένης ζήτησης νερού με το ελάχιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του. Το σύστημα αφαλάτωσης θεωρείται εγκατεστημένο σε τοποθεσία καθορισμένη από το σχεδιαστή, αλλά και η διακύμανση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ κατά τη διάρκεια του χρόνου, η οποία επηρεάζεται από την τοποθεσία εγκατάστασης, επίσης λαμβάνεται υπόψη στην προτεινόμενη τεχνική.
- Αποδίδει τη βέλτιστη συνεργασία μεταξύ των τριών εναλλακτικών βαθμών ελευθερίας στη λειτουργία της συνολικής μονάδας αφαλάτωσης (δηλαδή αποθήκευση σε μπαταρία, αποθήκευση νερού και ανταλλαγή ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο).
- Αποδίδει τη βέλτιστη διαμόρφωση του συνολικού συστήματος αφαλάτωσης που βασίζεται σε ΑΠΕ. Αυτό υλοποιείται με τη διερεύνηση των ταυτόχρονων επιπτώσεων της τοποθεσίας και των δομών των στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και νερού, οι οποίες επιδρούν στο συνολικό κόστος ζωής του συστήματος αφαλάτωσης.

Η προτεινόμενη τεχνική βελτιστοποίησης περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο σχεδίασης που επιτρέπει στο σχεδιαστή να συμπεράνει τη βέλτιστη διαμόρφωση των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ οι οποίες θα συνδέονται σε ηλεκτρικό δίκτυο, πριν από την εγκατάστασή τους. Μια επιπλέον επιστημονική συμβολή της εργασίας είναι ότι για πρώτη φορά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία ενσωματώνονται εναλλακτικοί τύποι αντικειμενικών συναρτήσεων στη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδιασμού, και ερευνάται ο αντίκτυπος καθεμίας στα σχεδιαστικά αποτελέσματα. Παρουσιάζονται επίσης αριθμητικά αποτελέσματα τα οποία: 1) επαληθεύουν την ικανότητα των βελτιστοποιημένων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης να υποστηρίζουν τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου εισάγοντας σε αυτό σημαντικές ποσότητες ενεργειακού πλεονάσματος, και 2) παρουσιάζουν την επίδραση της τοποθεσίας εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης στην προκύπτουσα βέλτιστη δομή, στην ανταλλαγή της ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο και το κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος αφαλάτωσης.

Η υπόλοιπη εργασία οργανώνεται ως εξής: στο Κεφάλαιο 2 γίνεται βιβλιογραφική έρευνα και έρευνα αγοράς για τα επιμέρους στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα, και στο Κεφάλαιο 3 παρατίθενται τα ευρήματα που αφορούν αλγορίθμους βελτιστοποίησης, δίνοντας έμφαση στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης PSO, ο οποίος και χρησιμοποιείται στη συνέχεια. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η προτεινόμενη διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης ενός συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από ένα συνδυασμό Φ/Β και Α/Γ και συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδίασης και τα εναλλακτικά κριτήρια βελτιστοποίησης της συνολικής μονάδας αφαλάτωσης. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 6, αναλύονται τα αποτελέσματα του βελτιστοποιημένου σχεδιασμού, και, τέλος στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης και μελλοντικών επεκτάσεων της παρούσας εργασίας.

2. ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ

2. Γενικά

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν πολλά μεμονωμένα μέρη για την υλοποίηση του τελικού συστήματος. Τα μέρη αυτά έχουν το κάθε ένα τις δικές του ιδιότητες και τον δικό του τρόπο χρήσης ανάλογα το είδος του και την τεχνολογία κατασκευής του.

2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Η λειτουργία των Φ/Β στοιχείων βασίζεται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο** (δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση), το οποίο ανακαλύφθηκε από το Γάλλο φυσικό Becquerel το 1839. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1876, οι Adams και Day, παρατήρησαν ότι σημαντικό ρεύμα παραγόταν από το σελήνιο όταν αυτό εκτίθετο στο ηλιακό φως. Ύστερα, το 1918, ο Czochralski μελέτησε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα μετά από βελτιώσεις. Το 1949, οι Mott και Schottky ανέπτυξαν τη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης, ενώ την ίδια εποχή η κβαντική θεωρία έδωσε μεγάλη ώθηση και δημιουργήθηκαν οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές. Το 1954 κατασκευάστηκε το πρώτο ηλιακό στοιχείο στα εργαστήρια της Bell με απόδοση στο 6%. Χρειάστηκαν μόλις 4 χρόνια στη συνέχεια ώστε τα πρώτα Φ/Β στοιχεία να πάρουν θέση στα διαστημικά προγράμματα, όταν το 1954 τοποθετήθηκε το πρώτο αυτόνομο Φ/Β σύστημα στο δορυφόρο Vanguard I, το οποίο λειτούργησε επιτυχώς για 8 χρόνια. Με

κυριότερο πελάτη τη NASA, τα Φ/Β συστήματα αρχίζουν να εμφανίζονται σε πολλές άλλες εφαρμογές, αλλά ήταν περιορισμένες λόγω του κόστους τους [29].

Το κόστος των Φ/Β ανά μονάδα εγκατεστημένης ενέργειας το 1956 ξεκινούσε από 500 \$/Watt, και το 1973 έπεσε στα 50 \$/Watt, δηλαδή πήρε μόλις 17 χρόνια για να μειωθεί το κόστος τους κατά 90%, και άλλα 20 σχεδόν χρόνια να μειωθεί ακόμα περισσότερο, καθώς το 2004 η τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων είναι 6,5 €/Wp [29]. Σήμερα, για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, το κόστος έχει πέσει κάτω από 1,79 \$/Watt [30] ενώ υπάρχουν εφαρμογές όπου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με χρήση Φ/Β για 0,07 \$/KWh [31].

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να παρατεθούν κάποιοι ορισμοί των στοιχείων που συνθέτουν ένα Φ/Β σύστημα [32].

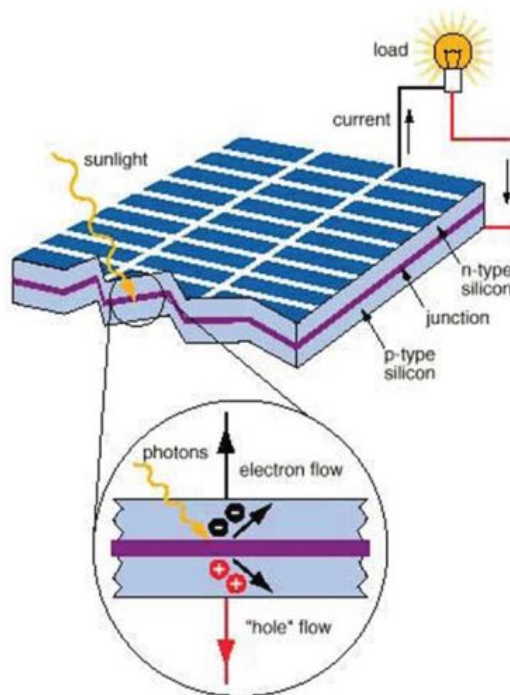
- **Φωτοβολταϊκό στοιχείο ή κύτταρο ή κυψέλη (PV cell):** η ηλεκτρονική διάταξη που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ενέργειας με χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό κατασκευής των Φ/Β συστημάτων μιας και το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται ορίζει την απόδοση του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται θα αναφερθούν και θα συγκριθούν στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.
- **Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module):** ένα σύνολο ηλεκτρικά συνδεδεμένων Φ/Β στοιχείων προκατασκευασμένο και συναρμολογημένο σε μια ενιαία κατασκευή, έτοιμη προς εγκατάσταση. Αποτελεί τη βασική μονάδα της Φ/Β γεννήτριας.
- **Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array):** ηλεκτρικά συνδεδεμένα Φ/Β πλαίσια, συνήθως τοποθετημένα σε κοινή βάση στήριξης.
- **Φωτοβολταϊκή γεννήτρια (PV generator):** Το σύνολο των προαναφερόμενων Φ/Β στοιχείων, όπου παράγεται συνεχές ρεύμα.
- **Ρυθμιστής φόρτισης (charge controller):** συσκευή που χρησιμοποιείται στα Φ/Β συστήματα για τη ρύθμιση της φόρτισης των μπαταριών (βλ. παράγραφο 2.5).
- **Αντιστροφέας (inverter):** ηλεκτρονική συσκευή μετατροπής του συνεχούς ρεύματος που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια σε εναλλασσόμενο (βλ. παράγραφο 2.6).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός Φ/Β συστήματος είναι το υλικό κατασκευής της Φ/Β κυψέλης (ως βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό), περιβαλλοντικοί παράγοντες [30] (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, περιβαλλοντική θερμοκρασία, ρύπανση/σκόνη) και η τοποθέτηση των συστοιχιών (ζητήματα προσανατολισμού, κλίσης, και σκίασης).

2.1.1 Υλικό κατασκευής Φ/Β κυψέλης

Το πιο σημαντικό στοιχείο μιας Φ/Β κυψέλης είναι τα δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού, κατά πλειοψηφία Πυρίτιο. Καθώς το Πυρίτιο δεν είναι πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, προστίθενται σε αυτό προσμίξεις. Στο κατώτερο στρώμα προστίθεται Βόριο το οποίο δημιουργεί δεσμό με το Πυρίτιο και προκαλεί την ανάπτυξη θετικού φορτίου (p). Στο ανώτερο στρώμα προστίθεται Φώσφορος, που αντίστοιχα προκαλεί την ανάπτυξη αρνητικού φορτίου (n). Έτσι, δημιουργείται η **επαφή p-n** (p-n junction) [31], [33].

Με την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας στο κελί, απελευθερώνονται ηλεκτρόνια στο ανώτερο και κατώτερο στρώμα Πυριτίου. Λόγω των διαφορετικών φορτίσεων των στρωμάτων, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προσπαθούν να μετακινηθούν από το ανώτερο (n) στο κατώτερο (p) αλλά η διέλευση εμποδίζεται από την επαφή. Μοναδική δίοδος ανάμεσα στα στρώματα είναι το κύκλωμα καλωδίων που υπάρχει κατά μήκος του στρώματος n, και η διέλευση των ηλεκτρονίων μέσα από αυτό προκαλεί δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα [33].



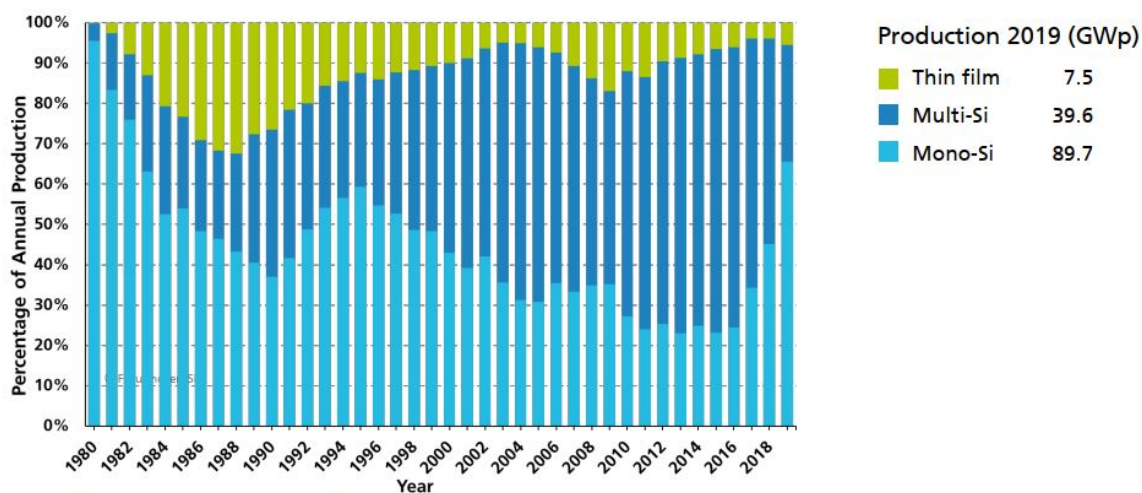
Σχήμα 2-1. Αναπαράσταση επαφής p-n κυψέλης Πυριτίου [31].

Οι κυψέλες, περιβάλλονται από μια λεπτή στρώση EVA (ethyl vinyl acetate). Στο πάνω μέρος τους τοποθετείται ενισχυμένο γυαλί με αντι-ανακλαστική στρώση και αυξημένη αντοχή και στο κάτω μέρος τους μία στρώση πολυβινυλοφθοριδίου (PVF). Στη συνέχεια ενθυλακώνεται σε πλαίσιο αλουμινίου και στο πίσω μέρος τοποθετείται ένα κουτί διακλάδωσης (junction box) για τη σύνδεση των καλωδίων [32].

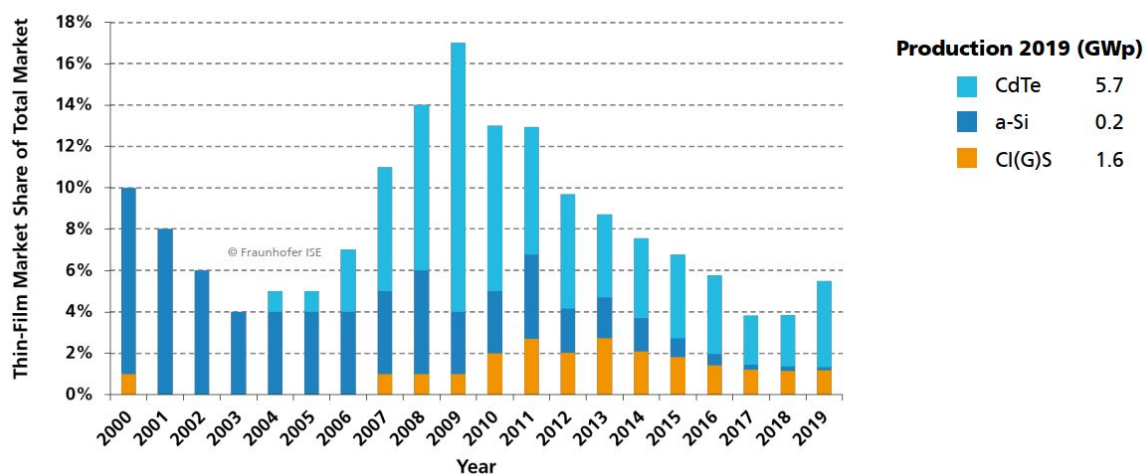
Οι κύριες τεχνολογίες Φ/Β κυττάρων που χρησιμοποιούνται περισσότερο σήμερα είναι οι εξής:

- μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (mono-Si)
- πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (poly-Si)
- λεπτού υμενίου (thin film)
 - άμορφου Πυριτίου (a-Si)
 - τελλουριούχου Καδμίου (CdTe)
 - δισεληνιούχου Χαλκοϊνδιογάλλιου (CIGS)

όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και θα αναλυθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 2-2. Παγκόσμια αγορά Φ/Β κυττάρων [34].



Σχήμα 2-3. Παγκόσμια παραγωγή κυψελών λεπτού υμενίου [34].

Κυψέλες μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (mono-Si)

Με τη μέθοδο που εισήγαγε ο Czochralski το 1918, και μετά από βελτιώσεις, οι κυψέλες αυτές κατασκευάζονται από ένα μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) Πυριτίου. Η απόδοσή τους είναι υψηλή (έως 26,7% [34]) αλλά έχουν αυξημένο κόστος. Το σχήμα του είναι κυκλικό, τετραγωνικό, εξαγωνικό, ή τετραγωνικό με στρογγυλεμένες άκρες. Εξ αυτών, οι κυκλικές είναι οι πιο φθηνές αλλά δε χρησιμοποιούνται συχνά λόγω της μη αποδοτικής χρήσης της επιφάνειας των πλαισίων εξαιτίας των κενών που αφήνει το σχήμα τους. Το χρώμα τους κυμαίνεται από σκούρο μπλε έως μαύρο, όταν χρησιμοποιείται αντι-ανακλαστική επίστρωση, ή γκρι[33].

Το γεγονός ότι κατασκευάζονται από την πιο καθαρή μορφή Πυριτίου αυξάνει την αποδοτικότητά τους σε σχέση με άλλου είδους κυψέλες. Έχουν μεγάλο κύκλο ζωής και μπορούν να λειτουργήσουν ακόμα και σε καταστάσεις χαμηλής ακτινοβολίας. Όμως, η λειτουργία τους επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η σκιά, η σκόνη ή η υγρασία [35].

Κυψέλες πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (poly-Si)

Πιο φθηνές από τις κυψέλες μονοκρυσταλλικού Πυριτίου αλλά λιγότερο αποδοτικές (έως 22,3% [34]). Κατασκευάζονται από δίσκους Πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένες ράβδους Πυριτίου και το σχήμα τους είναι τετραγωνικό. Στην αγορά κυκλοφορούν κυψέλες με αντι-ανακλαστική επίστρωση (μπλε χρώμα) ή χωρίς (γκρι-ασημί)[33].

Διακρίνονται από ευκολία στην εγκατάσταση και συντήρηση και υπάρχει μικρότερη απώλεια Πυριτίου κατά τη λειτουργία τους, κάτι που τις κάνει πιο οικονομικές, αλλά έχουν μεγαλύτερο εμβαδό, οπότε καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο στο πλαίσιο [35].

Κυψέλες λεπτού υμενίου

Πήραν το όνομά τους από τις πολύ λεπτές στρώσεις (1-4 μm) υλικού που τις συνθέτουν σε αντίθεση με τα στρώματα Πυριτίου που αναφέρθηκαν νωρίτερα, τα οποία έχουν πάχος περίπου 2 mm.

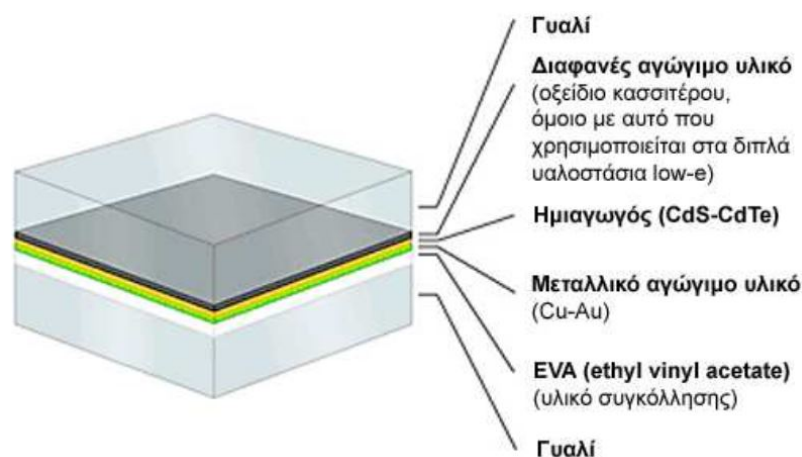
Κυψέλες άμορφου Πυριτίου (a-Si)

Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται Πυρίτιο για την κατασκευή της επαφής, αλλά όχι σε κρυσταλλική μορφή. Το άμορφο Πυρίτιο είναι η πιο συχνά ανεπτυγμένη και μια μη κρυσταλλική αλλοτροπική μορφή Πυριτίου και κάποια είδη της είναι: καρβίδιο άμορφου Πυριτίου (amorphous Silicon carbide – a-SiC), άμορφο Πυρίτιο Γερμάνιο (amorphous silicon germanium - a-SiGe), μικροκρυσταλλικό Πυρίτιο (microcrystalline silicon - $\mu\text{-Si}$), νιτρίδιο άμορφου Πυριτίου (amorphous silicon-nitride – a-SiN) [35].

Είναι λιγότερο αποδοτικές από τις κρυσταλλικές με απόδοση που κυμαίνεται στο εύρος 3-13,9%, και με μικρότερο κύκλο ζωής, αλλά με μικρότερο κόστος κατασκευής. Επίσης, δεν είναι τόσο εύθραυστες κατά τη μεταφορά ή την εγκατάσταση και η αποδοτικότητά τους αυξάνεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Κυψέλες Τελλουριούχου Καδμίου (CdTe)

Χωρίς χρήση πια του Πυριτίου, η επαφή *n* κατασκευάζεται από σουλφίδιο του Καδμίου (CdS) και η επαφή *p* από Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe). Η απόδοσή τους φτάνει το 21% [34]. Ενώ το Κάδμιο υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες, το Τελλούριο είναι αρκετά σπάνιο υλικό, κάτι που αποτελεί μειονέκτημα για αυτού του είδους τις κυψέλες. Επίσης, το Κάδμιο, πρέπει υποχρεωτικά να ανακυκλωθεί μετά το τέλος του κύκλου ζωής του καθώς είναι πολύ τοξικό και επικίνδυνο για το περιβάλλον ενώ ταυτόχρονα επιβάλλει μεγάλη προσοχή στο χειρισμό κατά την κατασκευή των κυψελών [33], [35]. Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία λεπτού υμενίου που χρησιμοποιείται σήμερα.



Σχήμα 2-4. Κυψέλη Τελλουριούχου Καδμίου [32].

Κυψέλες δισεληνιούχου χαλκοϊνδιογάλιου (CIGS)





Εδώ, για την επαφή *p* χρησιμοποιείται δισεληνιούχο χαλκοϊνδιογάλιο (CIGS) και για την επαφή *n* σουλφίδιο του Καδμίου (CdS) και η απόδοσή τους είναι 23,4% [34], την υψηλότερη από τις κυψέλες λεπτού υμενίου αλλά έχουν υψηλό κόστος κατασκευής. Όμως παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή στη θερμοκρασία σε σχέση με τις κυψέλες Πυριτίου [35].

2.1.2 Τοποθέτηση Φ/Β συστοιχιών

Υψίστης σημασίας παράγοντας όσον αφορά την απόδοση των Φ/Β, πέρα από την επιλογή του υλικού από το οποίο κατασκευάζονται, είναι η επιλογή της καταλληλότερης τοποθέτησης.

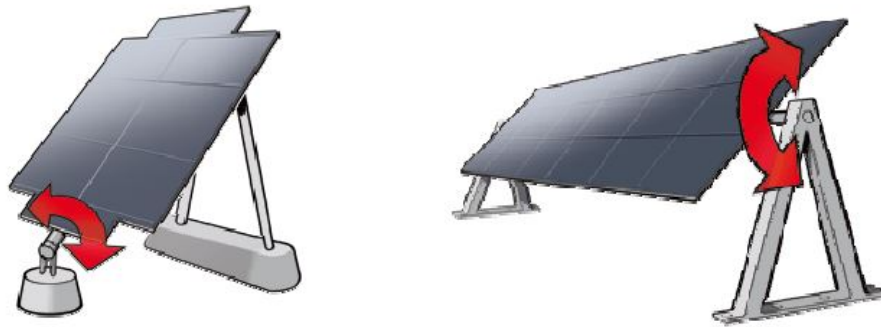
Για παράδειγμα, στην Ελλάδα η καταλληλότερη κλίση είναι 30° και ο προσανατολισμός πρέπει να είναι Νότιος, καθώς έτσι επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση που φτάνει το 100%, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2-1. Απόδοση ανάλογα με την τοποθέτηση των πάνελ [32].

Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο	Προσανατολισμός		
	Νότιος	Νοτιοανατολικός Νοτιοδυτικός	Ανατολικός Δυτικός
0° 	90%	90%	90%
15° 	98%	95%	88%
30° 	100%	95%	85%
90° 	60%	60%	50%

Η στήριξη των Φ/Β συστοιχιών γίνεται είτε σταθερά στο έδαφος ή με τη δυνατότητα περιστροφής σε ένα ή δύο άξονες για μεγαλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν πρόκειται για τοποθέτηση στο έδαφος, χρησιμοποιούνται βάσεις από σκυρόδεμα, βιδωτές αλουμιένιες ή γαλβανισμένες, ή πασσαλόμπηξη. Όταν είναι επιθυμητή η περιστροφή των πάνελ, χρησιμοποιούνται **ηλιοστάτες** (trackers) ενός ή δύο αξόνων, για να υπάρχει η

δυνατότητα ακολούθησης της πορείας του Ήλιου και να αυξήσουν την απόδοση κατά 25-40% (20-25% για μονού άξονα, 25-40% για διπλού άξονα), κάτι τέτοιο όμως αυξάνει το κόστος της κατασκευής και μειώνει το εμβαδό της ωφέλιμης επιφάνειας, καθώς θα χρειάζεται μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των πάνελ, ώστε να μειωθεί η πιθανότητα σκίασης [32], [33].



Παραδείγματα μονοαξονικών ηλιοστατών



Παραδείγματα διαξονικών ηλιοστατών

Σχήμα 2-5. Ηλιοστάτες [32].

Τέλος, ένα χρήσιμο εργαλείο μέτρησης της απόδοσης μιας Φ/Β εγκατάστασης παρέχεται από το Κέντρο Ερευνών της Ε.Ε. [36] όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει τα χαρακτηριστικά εγκατάστασης που τον ενδιαφέρει και να λάβει ως αποτέλεσμα την αποδοτικότητα του. Ενδεικτική εικόνα της διεπαφής παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Address: Lat/Lon:

Cursor:
 Selected: 35.517, 23.856
 Elevation (m): 28

Use terrain shadows:
☒ Calculated horizon
☐ Upload horizon file

Επιλογή αρχείου Δεν επιλέχθηκε κανένα αρχείο

GRID CONNECTED

TRACKING PV
 OFF-GRID
 MONTHLY DATA
 DAILY DATA
 HOURLY DATA
 TMY

PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV

Solar radiation database*

PV technology*

Installed peak PV power [kWp]*

System loss [%]*

Fixed mounting options

Mounting position*

Slope [°]*

Azimuth [°]*

☐ Optimize slope

☐ Optimize slope and azimuth

☐ PV electricity price

PV system cost (your currency)

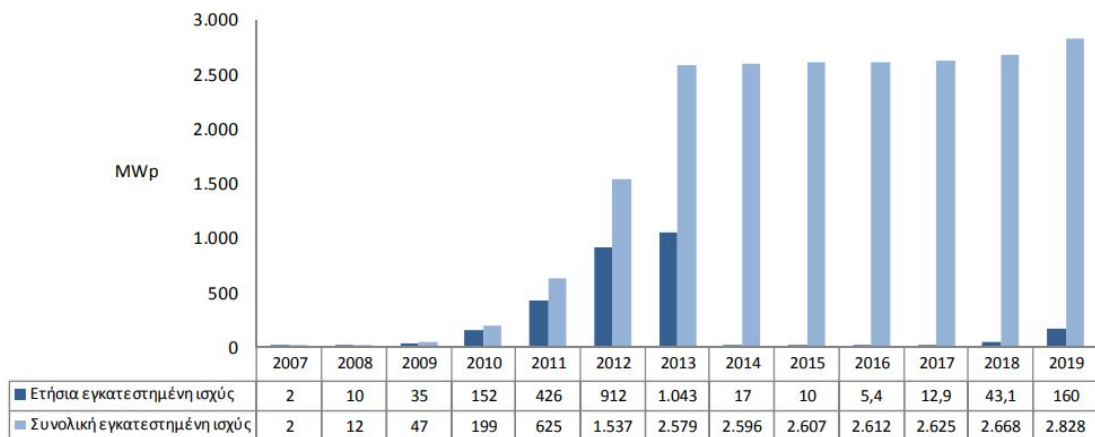
Interest [%/year]

Lifetime [years]

Σχήμα 2-6. Εργαλείο υπολογισμού απόδοσης Φ/Β εγκατάστασης [36].

Η χρήση των Φ/Β συστημάτων είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος χρήσης ΑΠΕ σήμερα στην Ελλάδα, τόσο για οικιακή όσο και εμπορική χρήση. Μέχρι το τέλος του 2019, στη χώρα, ήταν εγκατεστημένα 2.828 MWp Φ/Β, από τα οποία τα 2.255 MWp ήταν εγκατεστημένα στο

έδαφος και τα υπόλοιπα σε στέγες κτιρίων, και κάλυψαν περίπου το 7% των ενεργειακών αναγκών της χώρας [37].



Σχήμα 2.7. Ελληνική αγορά Φ/Β συστημάτων [37].

2.2 Ανεμογεννήτριες

Η τεχνολογία μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε κινητική και μηχανική μετρά περί τις 5 χιλιετίες προϊστορίας από τότε που για πρώτη φορά τοποθετήθηκαν πανιά σε πλοία, ενώ η μετατροπή της σε ηλεκτρική κάτι παραπάνω από 130 χρόνια όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ανεμογεννήτρια στην Γλασκώβη της Σκωτίας για να ηλεκτροδοτήσει μια οικία τον Ιούλιο του 1887. Σήμερα, οι ανεμογεννήτριες κυμαίνονται από μικρής έως μεγάλης ισχύος και χρησιμοποιούνται τόσο για να τροφοδοτήσουν με ρεύμα μικρές απομονωμένες περιοχές, όσο και για τη δημιουργία αιολικών πάρκων που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο κύριος διαχωρισμός των Α/Γ είναι σε οριζοντίου και καθέτου άξονα, με τις πρώτες να είναι οι πιο διαδεδομένες στην αγορά. Η ειδοποιός διαφορά τους, πέρα από την εμφάνιση, είναι το πλεονέκτημα των Α/Γ καθέτου άξονα να βρίσκονται πάντα κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου, οπότε δε δημιουργείται η ανάγκη για προσαρμογή σε αυτόν. Παρόλα αυτά, οι Α/Γ καθέτου άξονα είναι επικρατέστερες.

Η λειτουργία μιας Α/Γ μπορεί να απλοποιηθεί στη λειτουργία δύο αλληλένδετων συστημάτων μετατροπής ενέργειας, το μηχανικό και το ηλεκτρικό. Το πρώτο μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε μηχανική, και το δεύτερο τη μηχανική σε ηλεκτρική. Τα δύο αυτά συστήματα χωρίζονται σε επιμέρους στοιχεία, που παρουσιάζονται στη συνέχεια [38], [39]:

- **Πτερύγια:** Φτιαγμένα από ενισχυμένο πολυεστέρα με υαλονήματα, συνδέονται σταθερά ή με δυνατότητα προσαρμογής της γωνίας του ανέμου πάνω στην

πλήμνη και μπορούν να έχουν ενσωματωμένη αντικεραυνική προστασία. Μεταφέρουν την ισχύ του ανέμου στο ρότορα και ο αριθμός των πτερυγίων επηρεάζει την ταχύτητα περιστροφής αυτού. Οι Α/Γ χαμηλών ταχυτήτων διαθέτουν 12-24 πτερύγια και οι υψηλών ταχυτήτων 2-4.

- **Πλήμνη:** Κατασκευασμένη από χυτό σίδηρο, είναι το τμήμα της Α/Γ που συνδέει τα πτερύγια με το **Ρότορα** (ή Στροφέα). Το σύστημα πτερύγια-πλήμνη ονομάζεται **Δρομέας** και η διάμετρος του αποτελεί βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό. Στο εμπόριο, η διάμετρος του δρομέα κυμαίνεται από 60 έως 100 m ανάλογα τον τύπο και τις ενεργειακές ανάγκες που επιβάλλουν την επιλογή τύπου Α/Γ. Για εφαρμογές μεγάλης απόδοσης, συνήθως χρησιμοποιούνται δρομείς διαμέτρου 80 μέτρων.
- **Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων:** Συνδέει το ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων και συνήθως περιστρέφεται σε ταχύτητα 30-60 RPM.
- **Κιβώτιο Ταχυτήτων:** Συνδέει το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων με το **Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων** και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής περίπου 30 φορές, δηλαδή έως 1800 RPM. Επίσης, χρησιμοποιείται και για να αποσβέσει τις απότομες μεταβολές της ροπής.
- **Γεννήτρια:** Σύγχρονη ή ασύγχρονη (επαγωγική), μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στις Α/Γ μεγάλης απόδοσης συνήθως χρησιμοποιείται επαγωγική μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδοσίας.
- **Σύστημα πέδησης:** Τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας. Προστατεύει την Α/Γ από υψηλές ταχύτητες και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται έλεγχος και εργασίες συντήρησης.
- **Άτρακτος** (ή Κουβούκλιο, ή Θάλαμος): Περιέχει τα βασικά στοιχεία της Α/Γ και είναι προσβάσιμη από τον πύργο.
- **Πύργος Υποστήριξης:** Στηρίζει όλη την εγκατάσταση θεμελιωμένος στο έδαφος. Συνήθως είναι χαλύβδινος σωληνωτός και πολύ σπάνια από σκυρόδεμα. Το σχήμα του είναι κωνικό για αύξηση ευστάθειας και μείωση υλικού κατασκευής. Το ύψος του επηρεάζει ανάλογα το κόστος κατασκευής και αγοράς, αλλά και την απόδοση της Α/Γ, καθώς σε μεγαλύτερα ύψη, υπάρχουν μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Σε εφαρμογές μεγάλης απόδοσης το ύψος του πύργου κυμαίνεται από 80 έως 100 m.

- **Ανεμόμετρο** (ή Ανεμοδείκτης): έλεγχος έντασης και κατεύθυνσης ανέμου, εκκινεί και σταματά τη λειτουργία της Α/Γ ανάλογα με την ένταση και δίνει εντολή στο **Σύστημα Προσανατολισμού**, με πτερύγιο καθοδήγησης ή με αυτόματο έλεγχο μέσω αισθητήρων για τοποθέτηση της Α/Γ κάθετα με την κατεύθυνση του ανέμου.
- **Ηλεκτρονικά Συστήματα Ελέγχου Ασφαλούς Λειτουργίας**: Τοποθετούνται στη βάση του πύργου, και αποτελούνται από μικροελεγκτές για παρακολούθηση, συντονισμό και έλεγχο σωστής λειτουργίας Α/Γ.

Η ενεργειακή απόδοση μιας Α/Γ επηρεάζεται από την απόδοση των επιμέρους στοιχείων που την απαρτίζουν και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτής προσφέρονται από την εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρία. Έχουν τη μορφή καμπύλης της ισχύος (σε Watt) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου καθώς για πολύ χαμηλές ταχύτητες (μικρότερες από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας, V_{in}) ή για πολύ μεγάλες ταχύτητες (μεγαλύτερες από την ταχύτητα αποκοπής, V_{out}), η Α/Γ δε λειτουργεί, οπότε και δεν παράγεται ενέργεια. Η παραγόμενη ισχύς της μεγιστοποιείται σε ταχύτητα V_r , δηλαδή στην ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της, που είναι χαρακτηριστική τιμή της κάθε Α/Γ. Η απόδοσή της, όμως, εξαρτάται και από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το αιολικό δυναμικό της περιοχής και, όσον αφορά την τοποθέτηση, την τοπογραφία αυτής (δηλαδή ανώμαλο έδαφος, επιφανειακά εμπόδια, όπως κτίρια και δέντρα). Γι' αυτό το λόγο, μια ακόμη πληροφορία που παρέχεται από τους κατασκευαστές είναι η μέση μηνιαία παραγωγή ενέργειας (σε KWh) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μεθοδολογιών που αφορούν τη βέλτιστη τοποθέτηση των Α/Γ που λαμβάνουν υπόψη τα γεωμορφολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά [40], [41], [42], [43].

2.3 Κυματικοί μετατροπείς ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από τη θάλασσα προέρχεται από τις παρακάτω μορφές ωκεάνιας ενέργειας [44]:

- **Κυματική** (wave energy ή wave power), που αξιοποιεί την κίνηση των κυμάτων.
- **Παλιρροιακή** (tidal energy), μέσω της αυξομείωσης του ύψους της θαλάσσιας επιφάνειας.

- **Θερμική** (thermal energy), με την εκμετάλλευση της φυσικής αλλαγής θερμοκρασίας συναρτήσει του βάθους.
- **Θαλάσσιων υπόγειων ρευμάτων** (current energy), λόγω των κινήσεών τους.
- **Ωσμωτική** (osmotic energy), μέσω του χημικού και ηλεκτρικού δυναμικού που δημιουργείται εξαιτίας της διαφοράς αλατότητας θαλασσινού και πόσιμου νερού.

Σε αυτή την εργασία θα παρατεθούν τεχνολογίες σχετικά με την αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων.

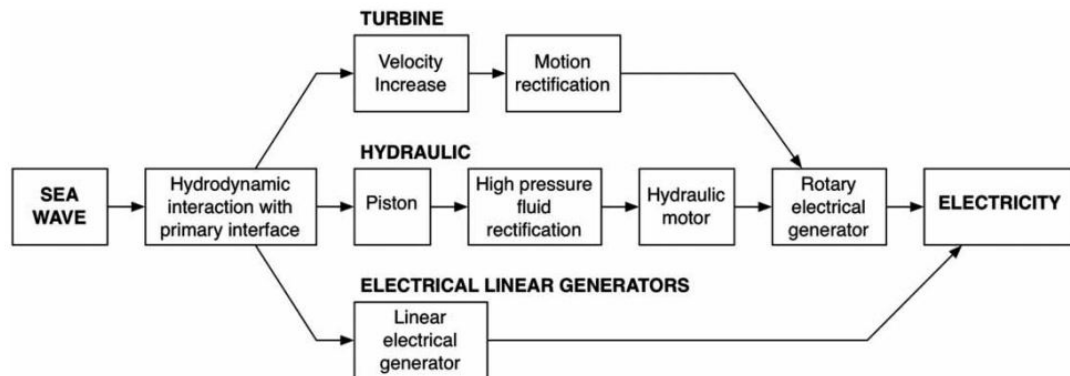
2.3.1 Ταξινόμηση και είδη κυματικών μετατροπών

Μια αρχική κατηγοριοποίηση των κυματικών μετατροπών αφορά το σημείο τοποθέτησης αυτών σε σχέση με την ακτή [44], [45], [46]:

- **Επάκτιοι** (on-shore): εγκαθίστανται πάνω στην ακτή, σε ρηχά νερά και συνήθως βρίσκονται σε φράγματα ή σε βράχους. Διακρίνονται για την εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση λόγω εγγύτητας σε χερσαίο έδαφος, και πιο οικονομικοί όσον αφορά το συνολικό μήκος των καλωδίων που απαιτούνται για τη μεταφορά της ενέργειας. Όμως, δεν είναι τόσο αποδοτικοί καθώς αξιοποιούν ενέργεια ρηχών νερών.
- **Παράκτιοι** (near-shore): εγκαθίστανται στον πυθμένα σε βάθος που δεν ξεπερνά τα 25 μέτρα ή είναι πλωτές και αγκυροβολούνται στον πυθμένα της θάλασσας. Πιο αποδοτικοί από τους επάκτιους αλλά απαιτείται μεγαλύτερη αντοχή εγκατάστασης λόγω αυξημένης κυματικής ενέργειας.
- **Υπεράκτιοι** (off-shore): ακόμα πιο μακριά από τις ακτές, τοποθετούνται στην ανοιχτή θάλασσα, ξανά είτε στον πυθμένα, είτε πλωτές και αγκυροβολημένες σε βάθος που ξεπερνά συνήθως τα 40 μέτρα. Μπορούν να παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας αλλά με μεγαλύτερο κόστος μεταφοράς, συντήρησης και εγκατάστασης.

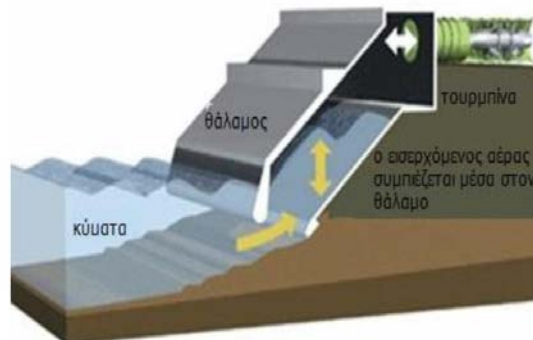
Η αρχή λειτουργίας των μετατροπών κυματικής ενέργειας δε διαφέρει πολύ σε σχέση με αυτή των Α/Γ που περιγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, με την έννοια ότι ένα είδος ΑΠΕ (εδώ κυματική, στις Α/Γ αιολική) μετατρέπεται σε μηχανική μέσω της παλινδρόμησης ή περιστροφής ενός μηχανισμού με χρήση συμπιεσμένου λαδιού, αέρα, ή νερού [47], που στη συνέχεια ενεργοποιεί μια γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ενώ στις Α/Γ η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι πρακτικά μία, στους κυματικούς μετατροπείς διακρίνονται οι

παρακάτω τεχνολογίες [44], [45], [46], [48] των οποίων ο τρόπος λειτουργίας συνοψίζεται στο διάγραμμα:



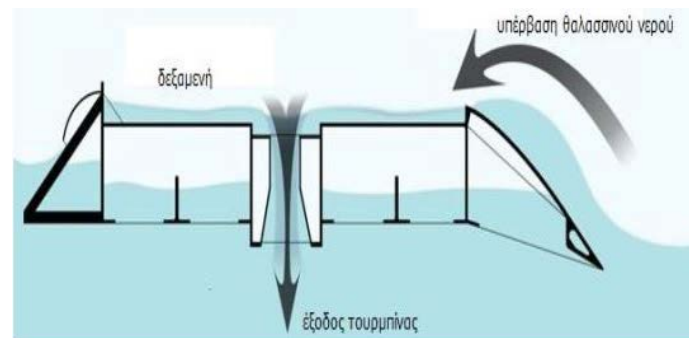
Σχήμα 2-8. Διαφορετικές συνδεσμολογίες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε κυματικούς μετατροπείς [46].

Ταλαντευόμενη στήλη ύδατος (oscillating water column): Σε αυτή την τεχνολογία χρησιμοποιείται ένας άδειος θάλαμος, κατασκευασμένος από σκυρόδεμα, ο οποίος είναι ανοιχτός από την κατώτερη πλευρά του για είσοδο του νερού των κυμάτων. Η αύξηση της στάθμης του νερού μέσα στον θάλαμο, προκαλεί συμπίεση του αέρα ο οποίος εξέρχεται του θαλάμου διαπερνώντας μία ή περισσότερες τουρμπίνες που είναι τοποθετημένες στο ανώτερο τοίχωμά του προκαλώντας την περιστροφή της.



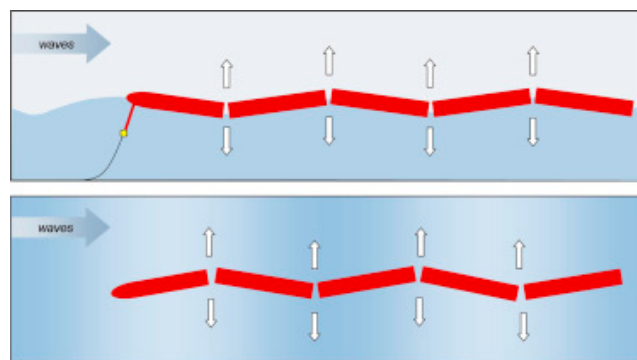
Σχήμα 2-9. Ταλαντευόμενη στήλη ύδατος [49].

Υπέρβασης κυμάτων (wave overtopping reservoir): Χρησιμοποιώντας την ταχύτητα των κυμάτων σε συνδυασμό με ανακλαστικούς βραχίονες, αυτού του είδους οι μετατροπείς, «παγιδεύουν» μια ποσότητα νερού σε μια δεξαμενή η οποία είναι τοποθετημένη πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας. Το νερό που βρίσκεται σε αυτή βρίσκει διέξοδο στη θάλασσα ξανά μέσω διόδων που βρίσκονται στο κατώτερο μέρος της δεξαμενής, οι οποίες περιλαμβάνουν τουρμπίνες που τίθενται σε περιστροφή με την έξοδο του νερού.



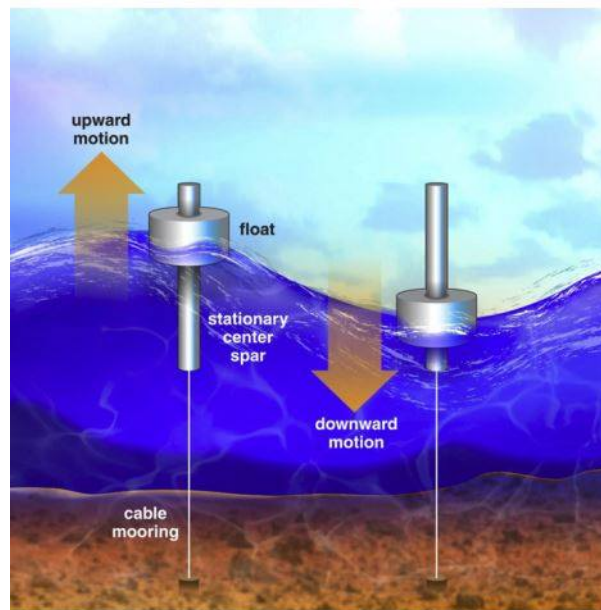
Σχήμα 2-10. Υπέρβαση κυμάτων [49].

Εξασθενητές (attenuators): πρόκειται για μακρόστενες αρθρωτές κατασκευές σειριακά τοποθετημένες κάθετα στον κυματισμό. Συνήθως είναι πλωτές αλλά υπάρχουν εφαρμογές όπου βρίσκονται πλήρως βυθισμένες. Χρησιμοποιούν την ενέργεια των κυμάτων ώστε να ταλαντευτούν και να μεταφέρουν την ταλάντωση αυτή και στα γειτονικά τμήματά τους και στα υδραυλικά έμβολα πάνω στα οποία είναι συνδεδεμένα. Τα έμβολα στη συνέχεια ωθούν υδραυλικά υγρά με πίεση σε έναν κινητήρα και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.



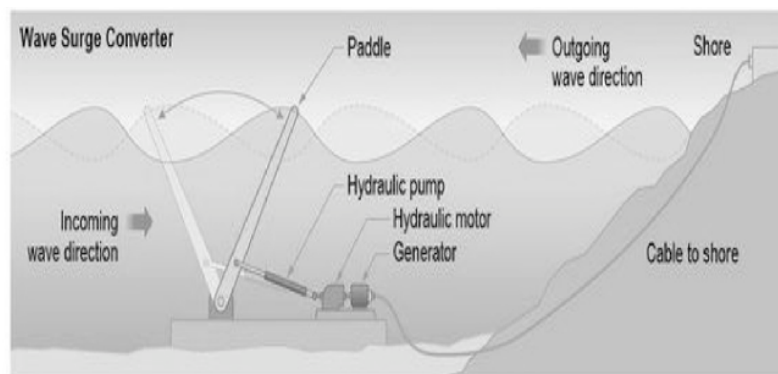
Σχήμα 2-11. Εξασθενητές [50].

Σημειακοί απορροφητές (point absorbers): παραπλήσια τεχνολογία με την παραπάνω, αποτελούνται από ένα κινητό και ένα σταθερό μέρος. Το κινητό επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας (σημαδούρα), έχει μικρές διαστάσεις και κινείται παρασυρόμενο από τη διέλευση των κυμάτων μεταφέροντας τη μετατόπιση σε ένα έμβολο το οποίο είναι συνδεδεμένο στο σταθερό μέρος που βρίσκεται πλήρως βυθισμένο και αγκυρωμένο στον πυθμένα της θάλασσας. Με τη σειρά του, το σταθερό τμήμα αξιοποιεί την κίνηση του κινητού μέρους, με χρήση γεννήτριας και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.



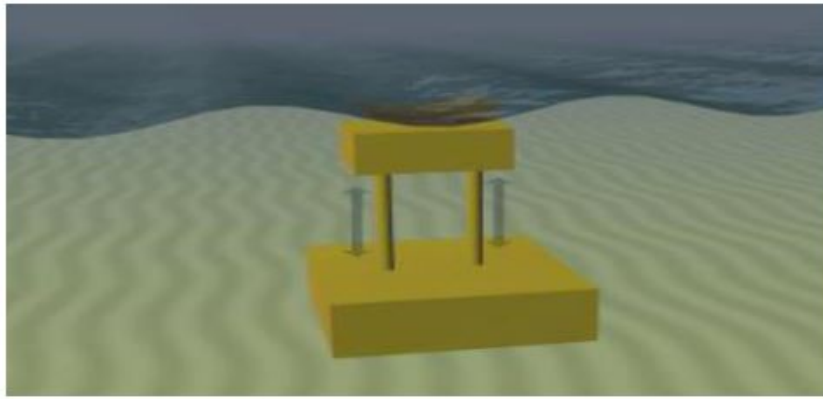
Σχήμα 2-12. Σημειακός απορροφητής [48].

Ταλαντευόμενοι μετατροπείς κυμάτων (oscillating wave surge converter): αυτές οι συσκευές βρίσκονται πακτωμένες στον πυθμένα της θάλασσας, και περιλαμβάνουν ένα κινητό μέρος (πτερύγιο, βραχίονα, ή μεμβράνη) που τοποθετείται κάθετα στα επερχόμενα κύματα. Το κινητό μέρος ταλαντεύεται λόγω των κυμάτων και η ταλάντωση αυτή μεταφέρεται στο σταθερό τμήμα, όπου και παράγεται η ενέργεια.



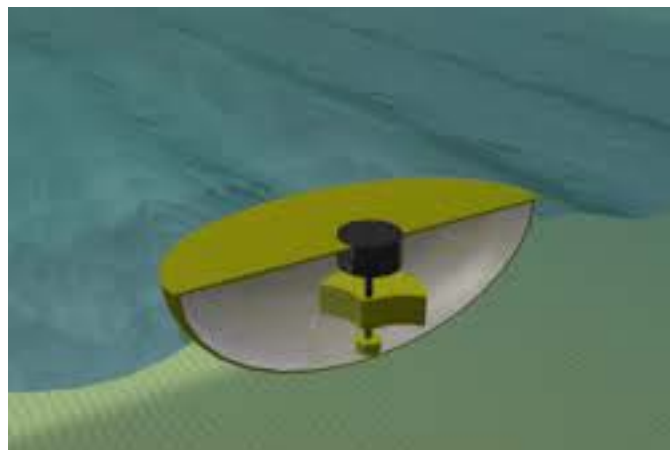
Σχήμα 2-13. Ταλαντευόμενος κυματικός μετατροπέας [50].

Διαφορικής πίεσης (pressure differential devices): Αποτελούν πλωτές ή υποβρύχιες κατασκευές στερεωμένες στον πυθμένα της θάλασσας. Και στις δύο περιπτώσεις εκμεταλλεύονται τη διαφορά υδροδυναμικής πίεσης που προκαλείται από τη διέλευση των κυμάτων, η οποία αυξομειώνει το ύψος του μη σταθερού τμήματος.



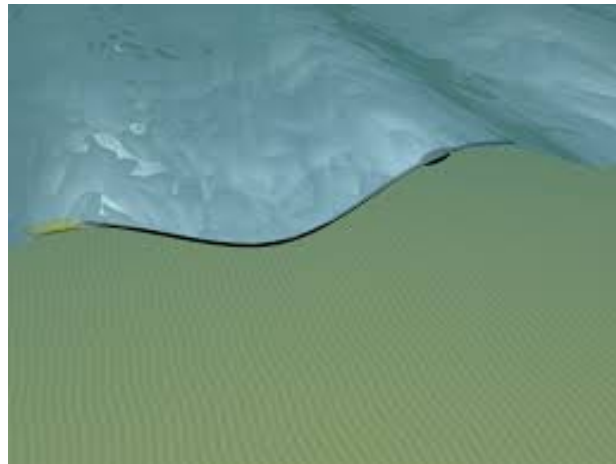
Σχήμα 2-14. Κυματικός μετατροπέας διαφορικής πίεσης [51].

Περιστρεφόμενης μάζας (rotating mass): Αποτελούν πλωτούς μηχανισμούς στους οποίους τα επερχόμενα κύματα αναγκάζουν την περιστροφή ενός κινητού μέρους, η οποία οδηγείται σε γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 2-15. Κυματικός μετατροπέας περιστρεφόμενης μάζας[52].

Εξέχοντος κυρτώματος (bulge wave): Αποτελείται από έναν εύκαμπτο ελαστικό σωλήνα που από τη μία πλευρά του είναι σταθερός στην ακτή και κατά μήκος επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας. Από το σταθερό άκρο του εισέρχεται νερό στο οποίο λόγω της κίνησης των κυμάτων μεταβάλλεται η πίεσή του και δημιουργούνται όγκοι που μεγαλώνουν κινούμενοι κατά μήκος του σωλήνα, έως ότου εξέλθουν από το άλλο άκρο του, όπου βρίσκεται μια μικρή τουρμπίνα. Το νερό στη συνέχεια επιστρέφει στη θάλασσα και η κίνηση της τουρμπίνας παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 2-16. Κυματικός μετατροπέας εξέχοντος όγκου [52].

Από τις προαναφερόμενες τεχνολογίες η πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιημένη είναι αυτή των σημειακών απορροφητών μετρώντας το 40% των υπαρχόντων εφαρμογών. Ακολουθούν οι εξασθενητές (23%), οι ταλαντευόμενοι μετατροπείς κυμάτων (19%), οι ταλαντευόμενοι στήλης ύδατος (7%), περιστρεφόμενης μάζας (7%), οι υπέρβασης κυμάτων (3%), και τέλος οι εξέχοντος όγκου με μόλις 1% των εφαρμογών [45].

Σήμερα, η κυματική ενέργεια δεν είναι τόσο διαδεδομένη, παρά το γεγονός ότι είναι πιο αποδοτική από άλλες μορφές ΑΠΕ, λόγω της αυξημένης πυκνότητας της ενέργειας σε σχέση με την αιολική ή την ηλιακή ($1 \text{ KW}/\text{m}^2$ για την ηλιακή και την αιολική σε βέλτιστες συνθήκες, $25 \text{ KW}/\text{m}$ για την κυματική [44]). Στα πλεονεκτήματα της χρήσης της περιλαμβάνονται η μηδενική ή ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και η μηδενική εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη τροφοδοσίας με ενέργεια. Είναι πολύ πιο αξιόπιστη από τις άλλες μορφές ΑΠΕ λόγω των μικρών ενεργειακών απωλειών επειδή είναι αξιοποιήσιμη έως 90% του έτους ενώ η ηλιακή και αιολική μόνο το 20-30%, κάτι που την κάνει πιο προβλέψιμη. Επιπλέον δεν απαιτεί δέσμευση γης για την εγκατάσταση, και μικρή οπτική ή ακουστική όχληση [44], [46], [53].

Από την άλλη πλευρά, αν και το κόστος λειτουργίας είναι πολύ μικρό, το κόστος εγκατάστασης απαιτεί μεγάλη αρχική επένδυση, και η συντήρηση δυσκολεύει ειδικά στις περιπτώσεις των υπεράκτιων εφαρμογών. Μια πλήρως βυθισμένη κατασκευή μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για μεγάλα θηλαστικά ή ψάρια, τα οποία θα είναι ευάλωτα σε ακουστικές οχλήσεις ή επιπτώσεις λόγω των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που προκαλούν τα υποθαλάσσια καλώδια μεταφοράς ενέργειας. Τέλος, επειδή η κατεύθυνση των κυμάτων σε βάθος άνω των 40 μέτρων αλλάζει διαρκώς, πιθανώς να υπάρχει ανάγκη ευθυγράμμισης των κυματικών

μετατροπών για μεγιστοποίηση απορρόφησης ενέργειας [53], όπως ακριβώς συμβαίνει και στις Α/Γ που πρέπει να βρίσκονται πάντα κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου.

2.4 Μπαταρίες

Ως μπαταρίες ορίζονται οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα αφαλάτωσης, στους οποίους θα αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω των ΑΠΕ, και θα τροφοδοτεί με ενέργεια το σύστημα αφαλάτωσης.

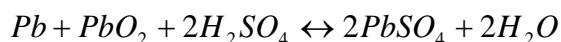
Τα χαρακτηριστικά των μπαταριών που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή χρήσης τους σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση ΑΠΕ είναι τα εξής [54]:

- χαμηλό κόστος (αγοράς, συντήρησης, αντικατάστασης)
- υψηλή αποδοτικότητα ενέργειας και χαμηλός ρυθμός αυτό-εκφόρτισης
- μεγάλη διάρκεια ζωής
- μικρή ανάγκη για συντήρηση
- απλότητα λειτουργίας.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι συσσωρευτών που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο για την κάλυψη διαφορετικών αναγκών, και παρακάτω θα αναφερθούν οι πιο διαδεδομένοι σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

2.4.1 Μολύβδου – Οξέος

Ο τύπος ενέργειας που αποθηκεύεται σε αυτού του είδους μπαταρίες είναι χημική η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της παρακάτω αναστρέψιμης αντίδρασης [55]:



Η τάση της σχετίζεται με το άθροισμα των δυναμικών οξείδωσης και αναγωγής και επηρεάζεται από την κατάσταση φόρτισης, τη χωρητικότητά της, το ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης, την περιβαλλοντική θερμοκρασία, και την ηλικία και διάρκεια ζωής της [56].

Οι μπαταρίες Μολύβδου – οξέος είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μπαταρίες σε εφαρμογές ΑΠΕ λόγω της ευρείας διάδοσης και της χαμηλής τιμής τους [55], [57]. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι η λειτουργία τους δεν είναι αποδοτική σε χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν χαμηλή ανθεκτικότητα, και μικρή σχέση ενέργειας – βάρους [58], που κυμαίνεται από 30 έως 40 Wh/Kg. Επίσης, ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η χρήση του Μολύβδου, η οποία μπορεί να

επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον [59]. Η διάρκεια ζωής τους κυμαίνεται από 4 έως 5 χρόνια, ή για 400-1200 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης [60].

2.4.2 Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου

Αποτελούν εξέλιξη των μπαταριών Νικελίου – Καδμίου [61], των οποίων η χρήση έχει απαγορευτεί στην Ευρώπη από το 2006 [59]. Χρησιμοποιώντας μη τοξικά υλικά, αποτελεί μια πιο οικολογική επιλογή που, όμως, βασίζεται στη χρήση σπάνιων υλικών και έχει υψηλό ρυθμό αυτό-εκφόρτισης και η χρήση της δεν ενδείκνυται σε περιβάλλοντα με ακραίες θερμοκρασίες [58]. Αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους μπαταριών σε φορητές συσκευές, με σχέση ενέργειας – βάρους 60-120 Wh/Kg. Έχουν χρόνο ζωής 2-4 χρόνια και αντέχουν 500-1200 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης [60].

2.4.3 Ιόντων Λιθίου

Κυρίως χρησιμοποιούνται για μικρές συσκευές, έχουν μεγάλη απόδοση, αξιοπιστία, και σχέση ενέργειας – βάρους 100-265 Wh/Kg, ενώ έχουν μικρό ρυθμό αυτό-εκφόρτισης και μεγάλο κύκλο ζωής (7 χρόνια και 1200 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης [60]), αλλά το κόστος τους είναι απαγορευτικό σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές [59], [62], [63]. Επίσης, το Λίθιο αναφλέγεται κατά την επαφή με τον αέρα, γεγονός που αυξάνει τα μέτρα προστασίας που πρέπει να ληφθούν κατά τη χρήση τους. Με την χρήση της τεχνικής της σύνδεσης με παρεμβολή είναι δυνατή η δημιουργία καθόδου μπαταρίας με οξείδια μετάλλου και Λιθίου και ανόδου με Άνθρακα και Λίθιο. Με αυτόν τον τρόπο, μειώθηκε ο κίνδυνος ανάφλεξης, ειδικά στις περιπτώσεις χρήσης οξειδίου του Λιθιούχου Μαγγανίου (LMO) ή οξειδίου του Λιθιούχου Νικελομαγγανιοκοβαλτίου (NMC), ενώ ταυτόχρονα βελτιώθηκε ο κύκλος ζωής, αλλά με μικρότερη σχέση ενέργειας – βάρους.

2.4.4 Αζώτου – Θείου

Οι μπαταρίες Αζώτου – Θείου αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία μπαταριών οι οποίες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες που φτάνουν τους 300 βαθμούς. Στα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνονται η γρήγορη αντιστρεψιμότητα από φόρτιση σε αποφόρτιση, η αποδοτική λειτουργία, η χαμηλή ανάγκη για συντήρηση, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η υψηλή σχέση ενέργειας – βάρους. Όμως, αυτό-εκφορτίζεται άμεσα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας [59] και έχει υψηλό κόστος αγοράς [58].

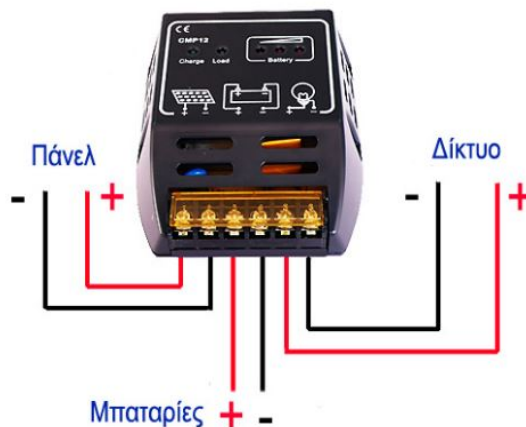
2.4.5 Οξειδοαναγωγική μπαταρία Βαναδίου

Η τεχνολογία των οξειδοαναγωγικών μπαταριών Βαναδίου μετρά περίπου 40 έτη ζωής. Ο τρόπος λειτουργίας τους είναι διαφορετικός από τους προαναφερθέντες τύπους μπαταριών, μιας και αποτελούν μπαταρίες ροής. Αυτό σημαίνει ότι δύο υγροί καταλύτες αποθηκεύονται σε διαφορετικές δεξαμενές οι οποίες δημιουργούν δύο ξεχωριστά ημικελιά, και με την κυκλοφορία των καταλυτών μέσω μίας μεμβράνης όπου μεταφέρονται ιόντα υδρογόνου, εκτελείται η οξειδοαναγωγή και κατά συνέπεια δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των μπαταριών είναι ο μεγάλος κύκλος ζωής, η ανεξάρτητη δημιουργία ενέργειας, η μικρή σχέση ενέργειας – βάρους (10-30 Wh/Kg), η μέτρια αποδοτικότητα και κόστος, αλλά και η έλλειψη αυτό-εκφόρτισης. Επίσης, η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι σχετικά χαμηλή, 10-35° C, γεγονός που την καθιστά ευάλωτη στην θερμοκρασία περιβάλλοντος [64].

2.5 Ρυθμιστές Φόρτισης Μπαταριών

Καθώς οι μπαταρίες λαμβάνουν και αποθηκεύουν το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από ΑΠΕ, πρέπει να είναι συνδεδεμένες και με ένα ρυθμιστή φόρτισης (charge controller ή charge regulator), ο οποίος περιορίζει το ρυθμό με τον οποίο φορτίζονται και εκφορτίζονται, καθώς η συνηθέστερη διακοπή λειτουργίας, συγκεκριμένα των Φ/Β συστημάτων, οφείλεται σε δυσλειτουργία των μπαταριών [65]. Με αυτή τη λειτουργία, προστατεύει τους συσσωρευτές, αυξάνοντας τη διάρκειά ζωής τους [66]. Ταυτόχρονα, παρακολουθούν και τη θερμοκρασία λειτουργίας των μπαταριών για να αποτρέψουν την υπερθέρμανσή τους [67]. Τέλος, σε περιπτώσεις όπου οι συσσωρευτές αυτο-εκφορτίζονται ενώ είναι πλήρως φορτισμένοι, οι ρυθμιστές ξεκινούν πάλι τη διαδικασία φόρτισης ώστε να βρίσκεται πάντα στη μέγιστη δυνατή τάση, ενώ μπορούν να εκτρέψουν το πλεόνασμα της ενέργειας εάν είναι πλήρως φορτισμένοι.



Σχήμα 2-17. Παράδειγμα ρυθμιστή φόρτισης [68].

Οι δύο κύριοι και πιο αποδοτικοί τύποι ρυθμιστών φόρτισης συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σήμερα τόσο για αυτόνομα όσο και για συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα ΑΠΕ είναι οι Διαμόρφωσης Παλμικού Εύρους (Pulse-Width Modulation – PWM) και Ανίχνευσης Σημείου Μεγίστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking – MPPT) [69].

Οι PWM φροντίζουν για τη σωστή φόρτιση των μπαταριών, διαμορφώνοντας την τάση με τη οποία φορτίζονται και τη διατηρούν στη βέλτιστη κατάσταση φόρτισης. Η φόρτιση των μπαταριών γίνεται σε 3 στάδια:

- Υψηλού ρυθμού (bulk): η μπαταρία είναι αφόρτιστη, οπότε διοχετεύεται όσο ρεύμα είναι διαθέσιμο.
- Απορρόφησης (absorption): μείωση του ρυθμού φόρτισης καθώς η μπαταρία φτάνει σε επίπεδο πλήρους φόρτισης.
- Ηρεμίας (float): η μπαταρία έχει φορτιστεί πλήρως και διατηρείται στο επίπεδο αυτό όταν αυτο-εκφορτίζεται.

Συχνά αναφέρεται και 4^ο στάδιο, αυτό της «εξισορρόπησης (equalization)», όπου σε τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται αύξηση θερμοκρασίας της μπαταρίας για αποφυγή θείκωσης.

Οι ρυθμιστές MPPT είναι στη ουσία μετατροπείς DC/DC οποίοι είναι συνδεδεμένοι ανάμεσα στη Φ/Β γεννήτρια ή Α/Γ και στο συσσωρευτή, αλλά συμπεριλαμβανομένου και ενός ελεγκτή, ο οποίος ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος των Φ/Β ή της Α/Γ μέσω ενός αλγορίθμου ώστε να εξάγουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια κάθε φορά συναρτήσει των περιβαλλοντικών συνθηκών λειτουργίας [70], [71]. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι MPPT που χρησιμοποιούνται, ενδεικτικά παρατίθενται οι αναφορές των Hiwale et.

Al [72] και Bendib et. Al [73]. Ως αποτέλεσμα, όπως και οι PWM, αυξάνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας κρατώντας τη στη βέλτιστη κατάσταση φόρτισης στη λιγότερη δυνατή διάρκεια φόρτισης αλλά, κυρίως, γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας [74]. Είναι πιο ακριβοί από τους PWM αλλά αυξάνουν την απόδοση των Φ/Β συστημάτων κατά περίπου 20%.

Τα βασικά χαρακτηριστικά για την επιλογή του καταλληλότερου ρυθμιστή φόρτισης είναι η τάση και η ισχύς του εγκατεστημένου συστήματος, τα είδη και μεγέθη των μπαταριών που θα χρησιμοποιηθούν, ο αλγόριθμος ρύθμισης και αποσύνδεσης φορτίου, οι περιβαλλοντικές συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί το σύστημα, και ζητήματα αγοράς, όπως το κόστος και η εγγύηση που εξαρτάται από τον κατασκευαστή [75].

Τα πιο σημαντικά εξ αυτών είναι η ένταση λειτουργίας του ρυθμιστή όπου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος (χρήση συντελεστή ασφάλειας $I_{x1,3}$ [76]) για να καλύψει τις διακυμάνσεις της παραγόμενης ενέργειας και η τάση του να είναι ίδια με αυτή των μπαταριών που χρησιμοποιούνται.

2.6 Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγουν οι ΑΠΕ σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Μιας και το υπό μελέτη σύστημα αφαλάτωσης βασισμένο σε ΑΠΕ και συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο θα τοποθετηθεί σε Ελληνικό έδαφος, θα πρέπει να παρατεθούν και οι προδιαγραφές λειτουργίας των αντιστροφέων όπως ακριβώς τους θέτει η ΔΕΗ [77] ώστε να χρησιμοποιηθούν, σύμφωνα με το Ν. 3468/2006:

- Για σταθμούς ισχύος έως 100kW προβλέπεται η σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Όταν η ισχύς είναι έως 5 kW η σύνδεση γίνεται μέσω μονοφασικής παροχής ενώ αν η ισχύς είναι από 5 έως 100 kW γίνεται μέσω τριφασικής.
- Οι προβλεπόμενες τιμές ρυθμίσης των επιπέδων προστασίας των ορίων τάσης και συχνότητας απαιτείται να είναι σύμφωνες με τον Πίνακα 2-2 που ακολουθεί.

Πίνακας 2-2. Τιμές ρύθμισης προστασίας ορίων τάσης και συχνότητας[77].

	Διασυνδεδεμένο σύστημα	Μη διασυνδεδεμένα Νησιά
Τάση	-20% έως +15% της ονομαστικής	
Συχνότητα	$\pm 0,5 \text{ Hz}$	51 Hz – 47,5 Hz

- Η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion – THD) του ρεύματος των αντιστροφών θα πρέπει να μην ξεπερνάει το 5%.
- Αν δεν υπάρχει μετασχηματιστής απομόνωσης στον αντιστροφέα, η έγχυση συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να μην ξεπερνά το 0,5% του ονομαστικού.
- Απαιτείται υποχρεωτικά η ύπαρξη προστασίας από το φαινόμενο της νησιδοποίησης. Είναι απαραίτητη η περιγραφή της μεθόδου, η οποία πρέπει να συνάδει σύμφωνα με το πρότυπο VDE 0126.
- Όλες οι παραπάνω προστασίες θα πρέπει να εμφανίζονται γραπτώς ή στα τεχνικά εγχειρίδια των αντιστροφών ή στα πιστοποιητικά τους.

2.6.1 Κατηγοριοποίηση Αντιστροφών

Υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις αντιστροφών ανάλογα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά [33].

Ανάλογα με την παραγόμενη τάση

Ανάλογα με την τάση που παράγουν, διακρίνονται σε:

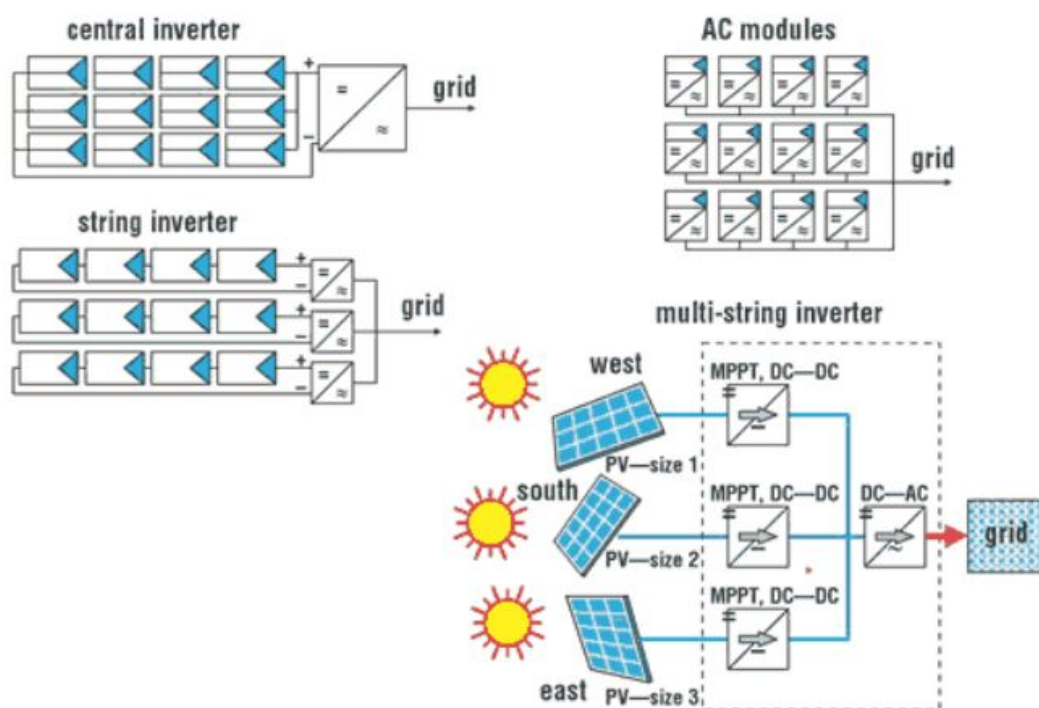
- Μονοφασικούς, με ισχύ μικρότερη των 11KW.
- Τριφασικούς, με ισχύ από 6-7 KW έως και 1 MW.

Ανάλογα με τη χρήση μετασχηματιστή

Ανάλογα με την ύπαρξη μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση ανάμεσα στην είσοδο συνεχούς ρεύματος από τα Φ/Β πάνελ και της εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος προς το δίκτυο, διακρίνονται σε [78]:

- Αντιστροφείς με μετασχηματιστή
- Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές μπορεί να είναι χαμηλής (50 Hz) ή υψηλής συχνότητας (10-15 KHz) για μικρότερη ισχύ. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των αντιστροφών με μετασχηματιστή είναι η αύξηση του κόστους ανά μονάδα ισχύος και η αύξηση των απωλειών έως και 4%, και το γεγονός ότι είναι πιο ογκώδεις. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή δεν παρουσιάζουν απώλειες, ειδικά στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται μετατροπείς ανύψωσης τάσης (DC/DC), εάν η τάση των πάνελ δεν είναι αρκετά υψηλότερη από το πλάτος της τάσης του ηλεκτρικού δικτύου. Επίσης, η έλλειψη μετασχηματιστή, αυξάνει τις απαιτήσεις ασφαλείας έναντι στις διαρροές και ασυμμετρίες. Γενικά, οι αντιστροφείς με μετασχηματιστή αυξάνουν την ασφάλεια του συστήματος και έχουν μεγάλο κύκλο ζωής.



Σχήμα 2-18. Ταξινόμηση αντιστροφών ανάλογα με τον τρόπο διασύνδεσης στα Φ/Β πάνελ [33].

Ανάλογα με τη διασύνδεση

Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)

Η χρήση των κεντρικών αντιστροφών είναι η πιο διαδεδομένη στους σταθμούς μεγάλης ισχύος αλλά στη δεύτερη θέση στο σύνολο των εφαρμογών (44% της συνολικής αγοράς για όλα τα μεγέθη εφαρμογών [34]) καθώς εμφανίζουν ισχύ έως και 2 MW και είναι σχεδιασμένοι για εξωτερική χρήση. Σε μερικές περιπτώσεις, οι αντιστροφείς συνοδεύονται και από μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης (0,4/20 KV) ώστε να συνδέονται απευθείας με το δίκτυο Μέσης Τάσης της ΔΕΗ και έχουν μικρό αριθμό εισόδων συνεχούς ρεύματος (1-2). Η απόδοσή

τους κυμαίνεται από 95 έως 98% [79], και είναι οι πιο οικονομικοί αναλογικά με την τάση τους, αλλά παρουσιάζονται συχνά απώλειες λόγω αναντιστοιχίας της τάσης κυρίως εξαιτίας της προσαρμογής στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) των Φ/Β στοιχείων. Επίσης, το μεγάλο τους μέγεθος δεν αφήνει περιθώρια ευελιξίας στην τοποθέτησή τους [78].

Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)

Είναι η πιο διαδεδομένη κατηγορία στο σύνολο των εφαρμογών και χρησιμοποιείται κυρίως για σταθμούς χαμηλής ή μέσης τάσης. Η λειτουργία τους βασίζεται στην σύνδεση ενός αριθμού στοιχειοσειρών στις αντίστοιχες εισόδους του αντιστροφέα (πχ. 2-8). Υπάρχουν αντιστροφείς κλάδων με μετασχηματιστή και χωρίς, και για μονοφασική και τριφασική σύνδεση [33], [78].

Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters)

Χρησιμοποιούνται όταν τα Φ/Β πάνελ που πρέπει να συνδεθούν είναι διαφορετικού τύπου και επηρεάζεται η παραγωγή ενέργειάς τους από χαρακτηριστικά όπως η ονομαστική ισχύς, η κλίση, η σκίαση, και καθένα απαιτεί διαφορετικό ελεγκτή και μετατροπέα ισχύος [33]. Αποτελεί ένα συνδυασμό του κεντρικού αντιστροφέα και του αντιστροφέα κλάδων και είναι εύκολα επεκτάσιμος προσθέτοντας νέες στοιχειοσειρές για τη σύνδεση νέων πάνελ [78].

Ενσωματωμένοι σε Φ/Β πάνελ (module integrated inverters).

Αποτελούν αντιστροφείς χαμηλής ισχύος και βρίσκονται ενσωματωμένοι σε κάθε Φ/Β πάνελ ξεχωριστά. Κυρίως χρησιμοποιούνται για μικρές οικιακές εγκαταστάσεις.

2.6.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας και απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα $\eta(\%)$ ορίζεται ως εξής:

$$\eta(\%) = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (2.1)$$

όπου:

P_{AC} η ισχύς εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος του αντιστροφέα

P_{DC} η ισχύς εισόδου συνεχούς ρεύματος του αντιστροφέα

Αναπαριστά το ποσοστό μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και είναι σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό που παρέχεται από τον κατασκευαστή. Σαφώς είναι ενδεικτικό και των απωλειών μετατροπής ισχύος λόγω των ωμικών αντιστάσεων των ηλεκτρονικών συστημάτων, του αερισμού, κλπ. Σημαντικότερος παράγοντας μείωσης της απόδοσης είναι η ύπαρξη μετασχηματιστή απομόνωσης (για αντιστροφείς με μετασχηματιστή

χαμηλής συχνότητας αντιστοιχεί τυπική απόδοση 92-94%, για υψηλής συχνότητας 94-96%, και για αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή 96-98,5%) εφόσον θεωρηθεί ότι υπάρχει ίδιο ποσό φόρτισης του αντιστροφέα, δηλαδή ο λόγος της ισχύος εισόδου του αντιστροφέα προς την ονομαστική ισχύ εισόδου ή την ισχύ εξόδου εκφρασμένος σε ποσοστό (επίσης τεχνικό χαρακτηριστικό) [33].

Ο βαθμός απόδοσης καθαυτός, όμως, δεν είναι το μοναδικό κριτήριο για την επιλογή του καταλληλότερου αντιστροφέα, αλλά πρέπει να υπολογιστεί και η ονομαστική ισχύς των συνδεδεμένων σε αυτόν Φ/Β πάνελ. Εάν ο αντιστροφέας είναι σχεδιασμένος για υψηλότερη τάση από αυτή που εισάγεται σε αυτόν από τα πάνελ, τότε θα λειτουργεί σε σχετικά χαμηλά φορτία, όπου δε θα μπορέσει να επιτύχει τη βέλτιστη απόδοση, και θα υπάρχει και απώλεια κεφαλαίου, μιας και οι υψηλής ισχύος αντιστροφείς κοστίζουν περισσότερο. Αντίστοιχα, αν ο αντιστροφέας έχει σχεδιαστεί για μικρότερη ισχύ από αυτή που τον τροφοδοτούν τα πάνελ, δε θα μπορέσει να ξεπεράσει την ανώτερη ισχύ του για λόγους ασφαλείας, γεγονός που οδηγεί σε απώλεια ενέργειας. Ιδανικά, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο μεσοσταθμισμένος βαθμός απόδοσης (διαφέρει συνήθως από τη μέγιστη απόδοση κατά 1-2%) που χρησιμοποιεί την απόδοση του αντιστροφέα σε μερικά φορτία της τάξης του 5%, 10%, 20%, 30%, 50% και 100%, και είναι ο εξής:

$$\eta_E = 0,03\eta_{5\%} + 0,06\eta_{10\%} + 0,13\eta_{20\%} + 0,1\eta_{30\%} + 0,48\eta_{50\%} + 0,2\eta_{100\%} \quad (2.2)$$

Ο παραπάνω “Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης” αποτελεί ένα ακόμα τεχνικό χαρακτηριστικό.

Επίσης, μια ακόμα σημαντική παράμετρος είναι η ικανότητα του αντιστροφέα να προσαρμόζεται στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας (Maximum Power Point – MPP) των Φ/Β [80]. Γι’ αυτό το λόγο, παρέχεται από τους κατασκευαστές και η απόδοση της παρακολούθησης του MPP, ως ο λόγος του ποσού της ενέργειας που δέχεται ο αντιστροφέας από τα Φ/Β πάνελ προς το ποσό μέγιστης ενέργειας που δύναται να λάβει για μια καθορισμένη χρονική περίοδο:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^t P_{DC}(t)dt}{\int_0^t P_{MAX}(t)dt} \quad (2.3)$$

Τέλος, ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό επιλογής αντιστροφέων είναι ο βαθμός προστασίας τους (IP class) που προσδιορίζει το χώρο τοποθέτησής τους. Όσο πιο υψηλός είναι ο βαθμός, τόσο πιο προστατευμένοι είναι από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και οι καιρικές συνθήκες, οπότε είναι δυνατή η τοποθέτησή τους σε εξωτερικό χώρο, αλλά γενικά συνιστάται η αποφυγή απευθείας έκθεσης στον Ήλιο [33].

2.7 Συστήματα αφαλάτωσης

Αφαλάτωση ονομάζεται η διαδικασία αφαίρεσης των αλάτων από μία παροχή νερού, θαλασσινό ή υφάλμυρο, με σκοπό να παραχθεί πόσιμο νερό. Αποτελεί την πιο πρώιμη διαδικασία επεξεργασίας νερού η οποία κατάφερε να μειώσει το πρόβλημα της λειψυδρίας σε περιοχές όπου η βροχόπτωση είναι ανεπαρκής [81].

Αυτή τη στιγμή χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι μεθόδων στα συστήματα αφαλάτωσης:

- **Θερμικές μέθοδοι:** Πολυβάθμια απόσταξη (MED), Πολυβάθμια εκτόνωση (MSF), Απόσταξη με επανασυμπύεση ατμών (VCD), Ηλιακή απόσταξη (SD) και
- **Μέθοδοι μεμβράνης:** Αντίστροφη ώσμωση (RO), Ηλεκτροδιάλυση (ED).

Οι τεχνικές αυτές θα αναλυθούν στη συνέχεια. Φυσικά υπάρχουν και υβριδικές μέθοδοι που συνδυάζουν τις παραπάνω μεθόδους και τεχνολογίες για αύξηση της απόδοσής τους.

2.7.1 Μέθοδοι εξάτμισης/απόσταξης ή Θερμικές μέθοδοι

Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των μεθόδων είναι η αλλαγή μορφής του νερού μέσω εξάτμισης και συμπύκνωσης των υδρατμών μέσω διαφορετικών τεχνικών. Με την εξάτμιση του θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του καθαρού νερού από τα απόβλητα αφαλάτωσης (άλατα, βαρέα μέταλλα). Επίσης, αξιοποιείται η ικανότητα του νερού να έρχεται σε σημείο βρασμού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όταν μειώνεται η πίεση που του ασκείται.

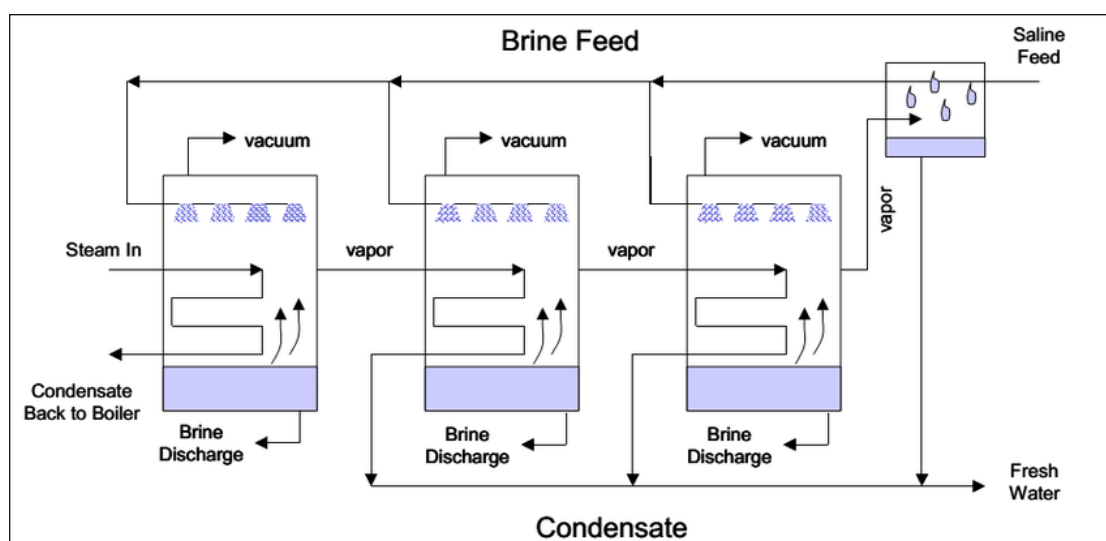
Πολυβάθμια απόσταξη (Multi-effect distillation, MED)

Στη διαδικασία πολυβάθμιας απόσταξης, ατμός που έχει θερμανθεί στους 70° C διαπερνά μέσω οριζόντιων ή καθέτων σωλήνων σειριακά τοποθετημένους συμπυκνωτές με συνεχώς μειωμένη θερμοκρασία και πίεση. Κάθε τμήμα του σωλήνα που βρίσκεται μέσα σε αυτούς ψεκάζεται με θαλασσινό νερό το οποίο εξατμίζεται άμεσα. Μέρος του εξατμισμένου νερού συμπυκνώνεται και συλλέγεται ως απόσταγμα, ενώ το υπόλοιπο περνά στον επόμενο θάλαμο όπου θερμαίνει με τη σειρά του το θαλασσινό νερό και συνεχίζεται ένας κύκλος εξάτμισης και συμπύκνωσης και τα απόβλητα αφαλάτωσης επιστρέφουν στη θάλασσα [82]. Κάθε διαδοχικός θάλαμος έχει, όπως προαναφέρθηκε, χαμηλότερη πίεση από τον προηγούμενο και ως αποτέλεσμα μειώνεται η θερμοκρασία βρασμού του θαλασσινού νερού και έτσι επιτυγχάνεται η

εξάτμισή του ακόμα και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Μοναδικός περιορισμός του αριθμού των κύκλων αυτών είναι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον ατμό και στο θαλασσινό νερό και η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στους διαδοχικούς συμπυκνωτές, αλλά λόγω της επίτευξης χαμηλότερης απώλειας θερμοκρασίας μπορούν να συνδεθούν σειριακά έως και 16 βαθμίδες [83].

Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας και των χρόνων εξέλιξης της μεθόδου, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των επιμέρους εξαρτημάτων είναι πια οικονομικά και ανθεκτικά: κράμα αλουμινίου για τους σωλήνες μεταφοράς θερμότητας, σύστημα σωληνώσεων από πλαστικό και περιβλήματα από ανθρακούχο χάλυβα εποξειδικής βαφής που προστατεύουν από διάβρωση όταν συνδυαστούν με κράματα αλουμινίου ή τιτανίου [83], κάτι που αποτελεί μαζί με τη συγκέντρωση επικαθίσεων αλάτων ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της μεθόδου [84]. Από την άλλη πλευρά, στα πλεονεκτήματά της περιλαμβάνονται επιπλέον: χαμηλή κατανάλωση θερμικής ενέργειας, αξιοπιστία συστήματος, υψηλή ποιότητα αφαλατωμένου νερού, και μη ύπαρξη ανάγκης για προεργασία του προς αφαλάτωση νερού [85]. Τέλος, είναι ιδανική για συνδυασμό παροχής ενέργειας από ΑΠΕ [86].

Παραλλαγές της πολυβάθμιας απόσταξης σχετίζονται με τη κατεύθυνση της ροής του ατμού σε σχέση με τη ροή της άλμης. Έτσι υπάρχουν συστήματα εμπρόσθιας τροφοδοσίας (ομορορή), οπίσθιας (αντιρορή), παράλληλης, ή συνδυασμό αυτών. Στην επιστημονική βιβλιογραφία γίνεται λόγος για αύξηση της απόδοσης του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση αντιροής [87]. Επίσης, η απόδοσή της αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των βαθμίδων, αλλά κάτι τέτοιο αυξάνει και το κόστος του συστήματος [87], [88].

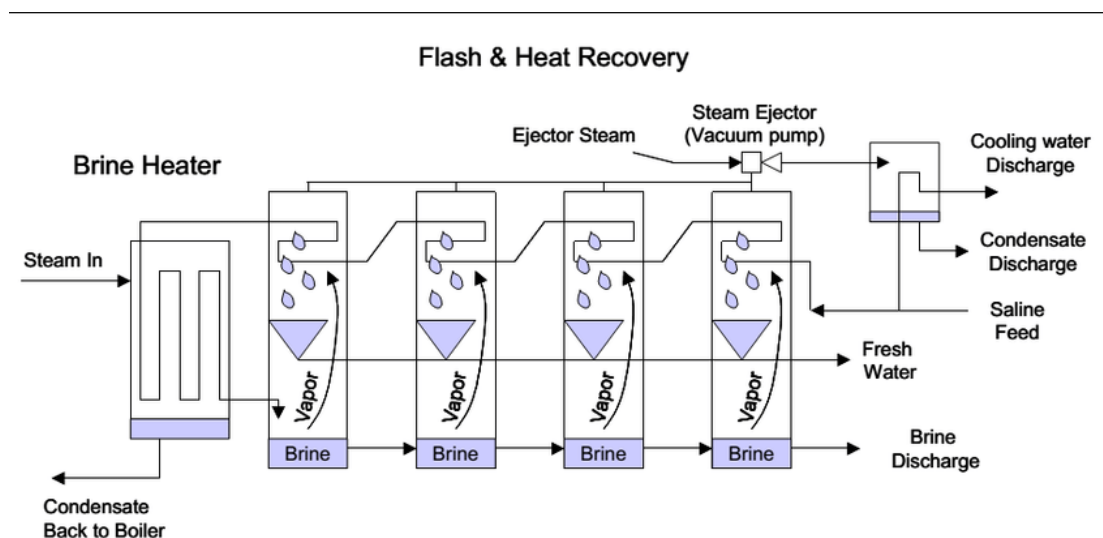


Σχήμα 2-19. Πολυβάθμια απόσταξη [89].

Πολυβάθμια εκτόνωση (Multi-stage Flash Distillation, MSF)

Αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου πολυβάθμιας απόσταξης με παρόμοιο τρόπο λειτουργίας, όπου το προς αφαλάτωση νερό θερμαίνεται λίγο πριν το σημείο βρασμού και στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα θάλαμο, ο οποίος χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη πίεση, γεγονός που αναγκάζει το νερό να εξατμιστεί. Ο ατμός ερχόμενος σε επαφή με τους σωλήνες κρύου θαλασσινού νερού ψύχεται, υγροποιείται και συλλέγεται ως καθαρό νερό. Οι υδρατμοί που απομένουν περνούν στην επόμενη βαθμίδα – θάλαμο όπου επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις οπότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Η αύξηση του αριθμού των σταδίων αυξάνει και την απόδοση του συστήματος αλλά και το κόστος αυτού, το οποίο βέβαια έχει μειωθεί αρκετά κατά την τελευταία δεκαετία [90]. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και η λειτουργία της είναι πιο αξιόπιστη από την MED, ενώ προσφέρει εξίσου υψηλής ποιότητας αφαλατωμένο νερό. Μπορεί να επεξεργαστεί νερό οποιασδήποτε ποιότητας και αλατότητας (έως και 70.000 mg/lit) και δεν απαιτείται, ή απαιτείται ελάχιστη, προεργασία. Όμως, η λειτουργία ενός συστήματος MSF παράγει περισσότερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα απ' ό,τι η MED και τη χαρακτηρίζει η υψηλή κατανάλωση ενέργειας ($3\text{--}5 \text{ kWh/m}^3$) και το υψηλό κόστος κατασκευής του συστήματος. Τέλος, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας υπόκειται σε κίνδυνο διάβρωσης και επικαθίσεων αλάτων [85], [86].



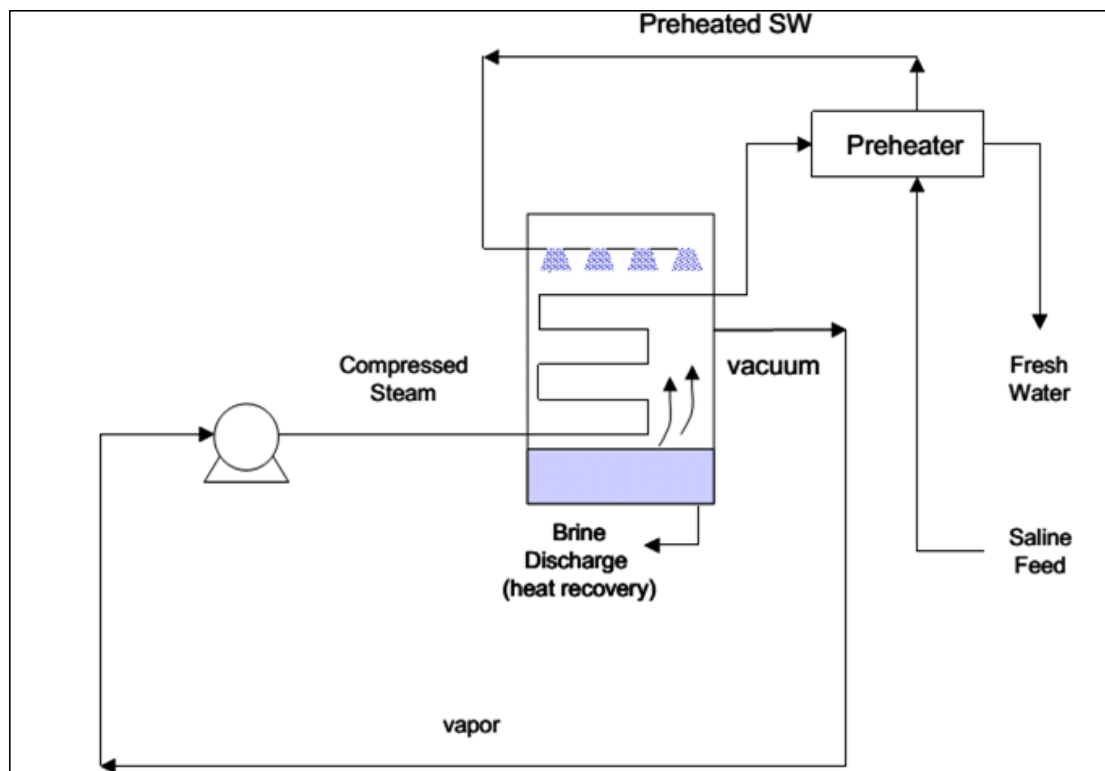
Σχήμα 2-20. Πολυβάθμια εκτόνωση [89].

Απόσταξη με επανασυμπίεση ατμών (Vapor Compression Distillation, VCD)

Με αυτή τη μέθοδο, υδρατμοί συμπυκνώνονται με τη χρήση ενός συμπυκνωτή ο οποίος αυξάνει τη θερμοκρασία και την πίεσή τους. Οι πεπιεσμένοι υδρατμοί συμπυκνώνονται και

δημιουργούν καθαρό νερό, ενώ η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη συμπύκνωση χρησιμοποιείται για την εξάτμιση επιπρόσθετου νερού. Η διαφορά αυτής της μεθόδου από τις δύο προηγούμενες είναι ο τρόπος εξάτμισης του νερού, που επιτυγχάνεται μέσω μείωσης της πίεσης με χρήση ενός συμπιεστή ατμού (μηχανικού – MVC, ή θερμικού – TVC) και όχι με χρήση λέβητα, καθώς λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος [88].

Ως μέθοδος είναι αρκετά αποδοτική, απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, και είναι ιδανική για μικρής κλίμακας εφαρμογές, καθώς το μέγεθος της μονάδας αφαλάτωσης περιορίζεται από το μέγεθος του συμπυκνωτή. Το νερό τροφοδοσίας δε χρειάζεται πολύ προεργασία, και προσφέρει υψηλής ποιότητας πόσιμο νερό. Βέβαια, ο κίνδυνος διάβρωσης και επικαθίσεων αλάτων υπάρχει και σε αυτή τη μέθοδο, ενώ παράλληλα έχει υψηλό κόστος κατασκευής και το κόστος ανά μονάδα παραγόμενου νερού είναι υψηλότερο από τις προηγούμενες δύο μεθόδους [85].



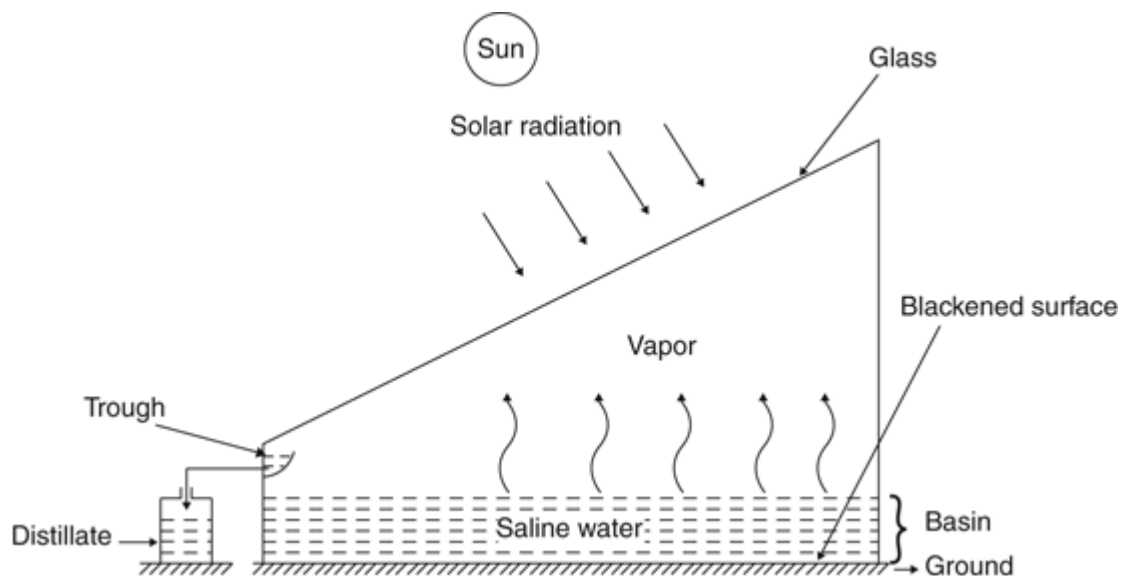
Σχήμα 2-21. Απόσταξη με επανασυμπίεση ατμών [89].

Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation, SD)

Αποτελεί την απλούστερη, οικονομικότερη και φιλικότερη προς το περιβάλλον θερμική μέθοδο αφαλάτωσης [86], η οποία χρησιμοποιεί αυτούσια την ηλιακή θερμότητα για απόσταξη πόσιμου νερού [88]. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, οι ακτίνες του Ήλιου διέρχονται από μια γυάλινη κεκλιμένη οροφή, και ποσότητα αλμυρού ή υφάλμυρου νερού συγκεντρώνονται σε μια

δεξαμενή ή λεκάνη, η οποία είναι καλυμμένη με θερμοαπορροφητικό υλικό, θερμαίνεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι το σημείο εξάτμισης. Ο ατμός ανυψώνεται και συμπυκνώνεται στη γυάλινη επιφάνεια, και στη συνέχεια συλλέγεται ως καθαρό νερό απαλλαγμένο από άλατα και βαρέα μέταλλα.

Παρά τα πλεονεκτήματα που διαθέτει αυτή η μέθοδος, ένα σημαντικό μειονέκτημά της είναι ότι δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική, καθώς αξιοποιεί μόνο το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [91] και μπορεί να παράγει έως $2\text{--}3 \text{ lt/m}^2$ αφαλατωμένο νερό την ημέρα [85] το οποίο δεν είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς, οπότε χρειάζεται περεταίρω επεξεργασία, ώστε να καταστεί πόσιμο. Αν και αποτελεί την πιο οικονομική και απλή μέθοδο, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπου οι απαιτήσεις των καταναλωτών είναι πολύ μεγάλες. Χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακές εφαρμογές και περισσότερο για άρδευση.



Σχήμα 2-22. Ηλιακή Απόσταξη [90].

2.7.2 Μέθοδοι μεμβρανών

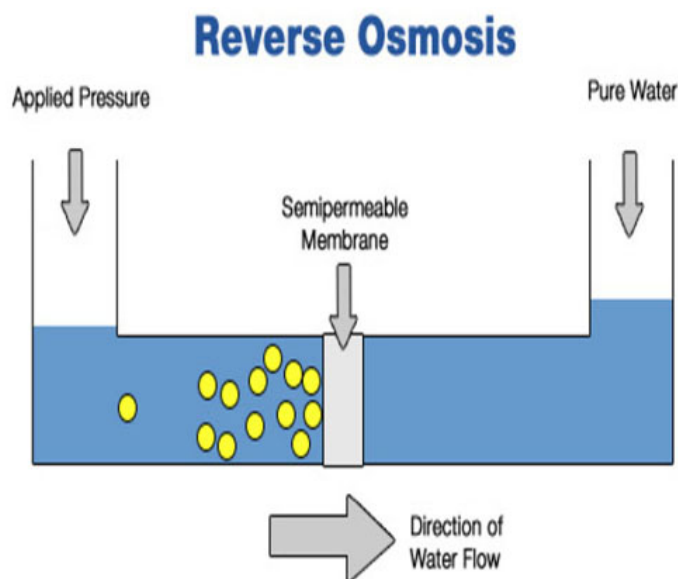
Σε αντίθεση με τις μεθόδους θερμικής απόσταξης όπου το νερό αλλάζει φυσική κατάσταση ώστε να αφαιρεθούν τα απόβλητα αφαλάτωσης, με τις μεθόδους μεμβρανών το νερό παραμένει σε υγρή μορφή καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO)

Η λειτουργία της είναι η εξής: θαλασσινό νερό μεταφέρεται με αντλία υψηλής πίεσης σε μια δεξαμενή, ώστε να διαπεράσει μια λεπτή ημιπερατή μεμβράνη, η οποία είναι επικολλημένη σε μια διάτρητη πλάκα ή σε ένα σωλήνα και επιτρέπει στα μόρια του νερού να τη διαπεράσουν, όπου και συλλέγονται, αλλά όχι τα στερεά που είναι διαλυμένα σε αυτό [91]. Με τη συνεχή

τροφοδοσία νερού τα υπολείμματα της αφαλάτωσης παραμένουν στη δεξαμενή χωρίς να έχουν τη δυνατότητα να διαπεράσουν τη μεμβράνη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού αλάτων και την αύξηση της ωσμωτικής πίεσης κατά μήκος της μεμβράνης, οπότε το υψηλό σε αλατότητα διάλυμα (απόβλητα αφαλάτωσης) αποσύρεται από τη δεξαμενή.

Η αντίστροφη ώσμωση αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο σήμερα [92], σε αντίθεση με 25 χρόνια πριν που αριθμούσε κάτι λιγότερο από το 25% των εφαρμογών αφαλάτωσης [84]. Επίσης, είναι η πιο οικονομική μέθοδος ανά m^3 παραγόμενου πόσιμου νερού, τόσο όσον αφορά την αφαλάτωση θαλασσινού όσο και υφάλμυρου νερού [88] με κόστος 2-5 kWh/m^3 ανάλογα την αλατότητα του προς επεξεργασία νερού [81], με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται σύστημα ανάκτησης ενέργειας [92] και απαιτείται μικρότερο αρχικό κεφάλαιο σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους (περίπου 25% λιγότερο) [86]. Επίσης, είναι ικανή να επεξεργαστεί επιτυχώς θαλασσινό νερό σε επίπεδα αλατότητας έως και 30.000 mg/l [93].



Σχήμα 2-23. Αντίστροφη Όσμωση [94].

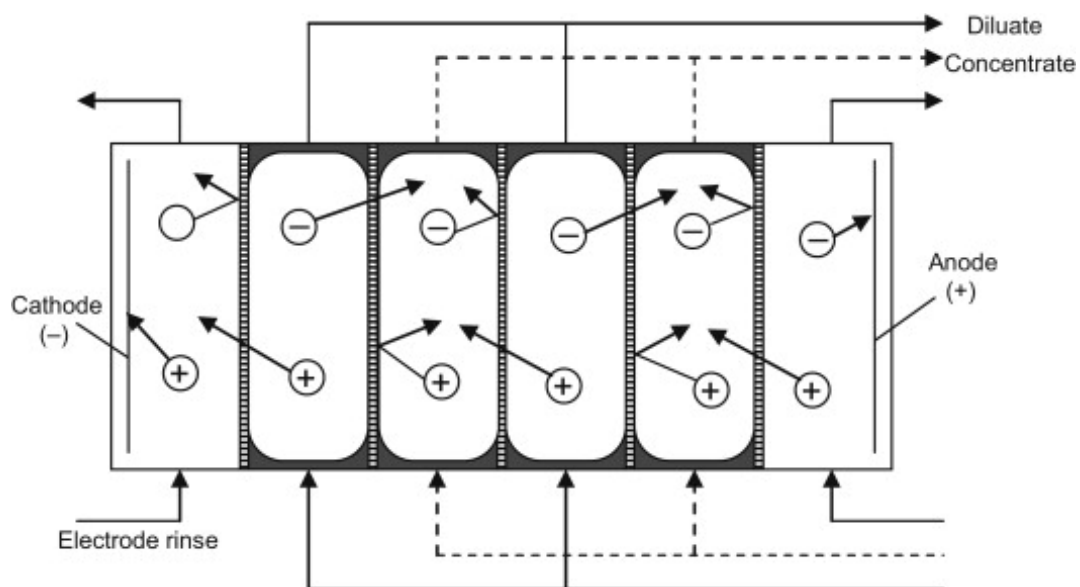
Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED)

Κατά την ηλεκτροδιάλυση, το προς αφαλάτωση νερό περνά από μια αλληλουχία φορτισμένων μεμβρανών που διαχωρίζει τα ιόντα των διαλυμένων αλάτων από το καθαρό νερό. Οι μεμβράνες τοποθετούνται εναλλάξ και είναι διαπερατές μόνο από ανιόντα (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) ή κατιόντα (Na^+ , K^+ , NH_4^+) κάθε φορά. Με αυτό τον τρόπο τα ιόντα διαχωρίζονται ξεχωριστά από το νερό και δημιουργούνται δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις, μία για το καθαρό νερό και μία για τα απόβλητα της αφαλάτωσης. Περιοδικά αντιστρέφεται η ροή του νερού μέσα

από τις μεμβράνες ή και η πολικότητα των μεμβρανών, ώστε να προστατευτούν από επικαθίσεις αλάτων.

Χρησιμοποιείται σε εργοστάσια αφαλάτωσης με δυνατότητα παραγωγής 100-20.000 m^3 /ημέρα και για επίπεδα αλατότητας υφάλμυρου νερού 1.000-5.000 mg/lit [88]. Όμως, είναι πιο οικονομική από τη μέθοδο RO έχοντας μικρότερο κόστος κεφαλαίου, το οποίο είναι περίπου 546 €/m³/ημέρα για την ED και 794-1800 €/m³/ημέρα για την RO [95].

Ένα μεγάλο της πλεονέκτημα είναι η ικανότητά της να συνδυαστεί με παροχή ενέργειας από ΑΠΕ μιας και μπορεί να λειτουργήσει σε ευρεία κλίμακα τάσεων εναλλασσόμενου ρεύματος [96].



Σχήμα 2-24. Ηλεκτροδιάλυση [97].

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

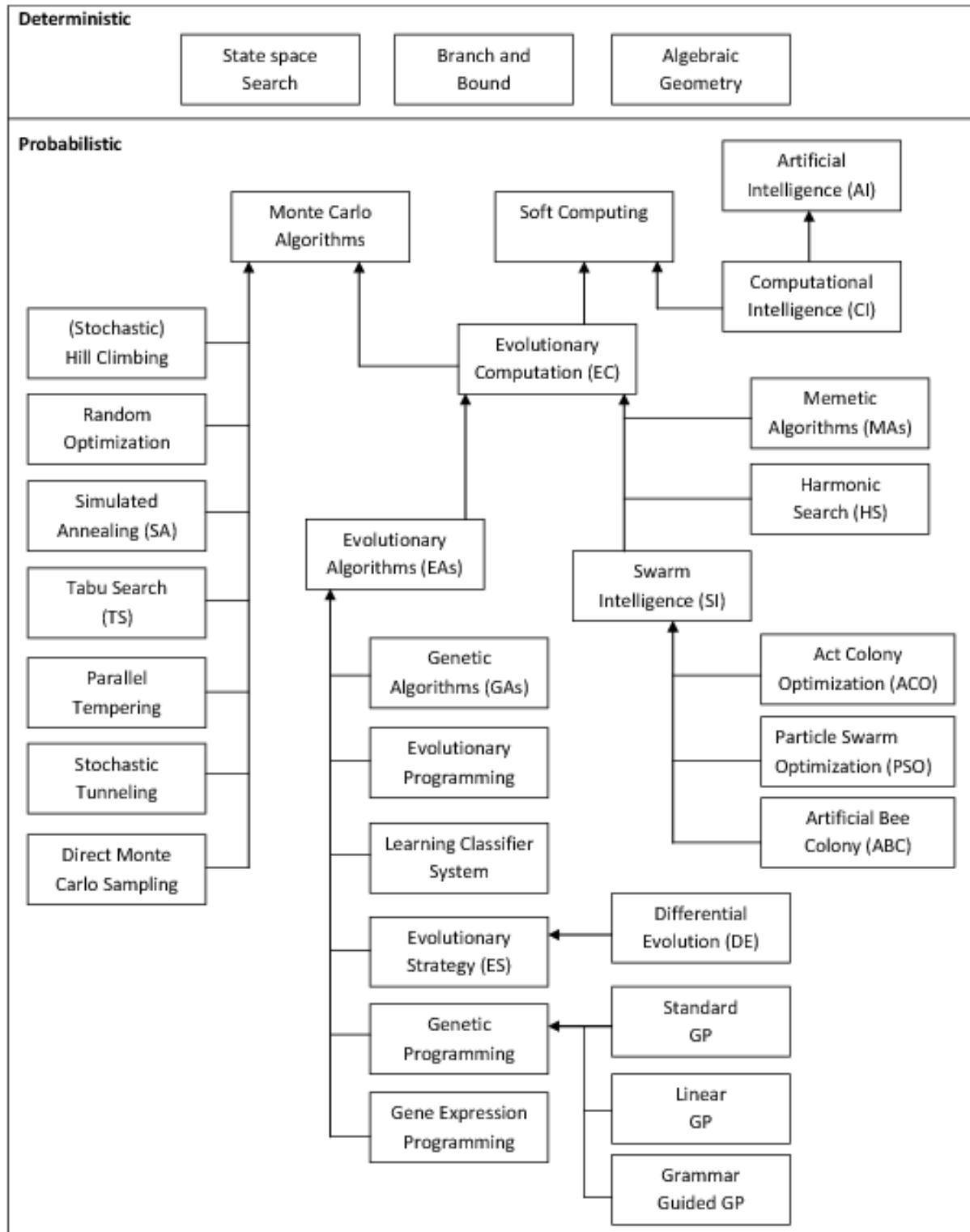
3. Γενικά

Ως Βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης, από το σύνολο των εφικτών λύσεων, σε ένα πρόβλημα με βάση τους περιορισμούς που τίθενται. Το πρόβλημα παρουσιάζεται με τη μορφή μιας αντικειμενικής συνάρτησης για την οποία καλείται να βρεθεί το ολικό μέγιστο ή ολικό ελάχιστο, κυρίως όσον αφορά τις τιμές των μεταβλητών της συνάρτησης που θα δώσουν τη βέλτιστη τιμή. Κατά συνέπεια, ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης περιγράφει μια μέθοδο, ένα σύνολο βημάτων, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Τα χαρακτηριστικά ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου είναι τα εξής [98]:

- το πλήθος των μεταβλητών της αντικειμενικής συνάρτησης
- ο τύπος των μεταβλητών (συνεχείς ή διακριτές)
- ο βαθμός μη γραμμικότητας της αντικειμενικής συνάρτησης
- οι υπάρχοντες περιορισμοί
- το πλήθος των ακρότατων (ελάχιστο ή μέγιστο ανάλογα με τη φύση του προβλήματος)
- το πλήθος των κριτηρίων βελτιστοποίησης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολυάριθμοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα [99], και στις επόμενες παραγράφους θα παρατεθούν κάποιοι από τους πιο διαδεδομένους.



Σχήμα 3-1. Ταξινόμηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης [99].

3.1 Εναλλακτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

3.1.1 Γενετικός αλγόριθμος - ΓΑ (Genetic Algorithm – GA)

Ο ΓΑ είναι εξελικτικός στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης βασισμένος στις αρχές του Δαρβίνου περί φυσικής επιλογής και επιβίωσης του δυνατότερου, και προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Holland το 1975 [100].

Ο αλγόριθμος ξεκινά αρχικοποιώντας ένα σύνολο λύσεων, που ονομάζονται **χρωμοσώματα**, με τη μορφή συμβολοσειρών, αποτελούμενες από στοιχεία, ονόματι **γονίδια**, τα οποία αναπαριστούν τιμές για κάθε παράμετρο του προβλήματος βελτιστοποίησης [101]. Στη συνέχεια, κάθε χρωμόσωμα αξιολογείται βάσει της συνάρτησης καταλληλότητας, και όσα έχουν καλύτερη τιμή διασταυρώνονται (γίνονται **γονείς**), ανταλλάσσοντας τις πληροφορίες που συνέλλεξαν, και δίνουν νέες λύσεις (**απογόνους**) σε κάθε γενιά. Ενώ η διασταύρωση αποτελεί τον κύριο μηχανισμό εύρεσης βέλτιστων λύσεων, συχνά δεν είναι αρκετή, μιας και δε μπορεί να παράγει πληροφορία η οποία δεν υπάρχει ήδη στο χρωμόσωμα των γονέων. Έτσι, εισάγεται και η έννοια της μετάλλαξης, όπου τυχαία αλλάζουν τιμές στις παραμέτρους των απογόνων, στην προσπάθεια να εξερευνηθούν περισσότερες επιλογές [102]. Στη συνέχεια, οι απόγονοι παίρνουν τη θέση των γονέων και ξεκινά ένας ακόμα κύκλος επιλογής, διασταύρωσης, και μετάλλαξης μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού και να δοθεί η βέλτιστη λύση, δηλαδή το καλύτερο χρωμόσωμα [100].

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός ΓΑ είναι το μέγεθος του πληθυσμού των χρωμοσωμάτων, ο αριθμός των γενεών (επαναλήψεων), ο ρυθμός διασταύρωσης, και ο ρυθμός μετάλλαξης. Με την αύξηση του πληθυσμού και των γενεών, αυξάνεται και η πιθανότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης, αλλά, ταυτόχρονα, αυξάνεται και ο χρόνος επεξεργασίας [101].

Ένας ΓΑ είναι αποδοτικός σε εφαρμογές όπου το εύρος ελέγχου είναι πολύπλοκο ή δεν είναι γνωστό, εάν δεν υπάρχει μαθηματική ανάλυση, και όταν δε μπορεί να περιοριστεί ο χώρος αναζήτησης λύσεων. Παρόλα αυτά, ένα μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι η τάση του να συγκλίνει προς τοπικά βέλτιστα παρά ολικά, κάτι που θα μπορούσε να αποφευχθεί με αύξηση της διαφορετικότητας των χρωμοσωμάτων [103] ή με αύξηση του ρυθμού μετάλλαξης, που γενικά είναι πολύ πιο χαμηλός σε σχέση με το ρυθμό διασταύρωσης [101]. Τέλος, είναι δύσκολη η λειτουργία του με χρήση δυναμικών συνόλων δεδομένων [100].

3.1.2 Διαφορική Εξέλιξη – ΔΕ (Differential Evolution – DE)

Άλλος ένας αλγόριθμος εμπνευσμένος από τη θεωρία της εξέλιξης, προτάθηκε από τους Storn και Price το 1995. Μοιάζει αρκετά με τη φιλοσοφία των ΓΑ, καθώς οι λύσεις αναπαρίστανται ως διανύσματα στον πολυδιάστατο χώρο, αλλά οι μεταλλάξεις γίνονται σε κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος πριν τη διασταύρωση [104]. Έτσι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων, συμβαίνουν περισσότερες μεταλλάξεις στην προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης λύσης [105].

Στα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου περιλαμβάνονται η ευκολία εφαρμογής, καθώς απαιτεί μικρή ρύθμιση των παραμέτρων, και γενικά θεωρείται αξιόπιστος, ακριβής, και γρήγορος [100].

3.1.3 Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας (Firefly - FA)

Ο αλγόριθμος Πυγολαμπίδας προτάθηκε από τον Yang το 2008 και, όπως περιγράφεται από την ονομασία του, πηγή έμπνευσής του ήταν οι πυγολαμπίδες και, συγκεκριμένα, η εκπομπή φωτός, που είναι και χαρακτηριστικό τους. Έχει αρκετά κοινά με τον PSO με την έννοια ότι οι πυγολαμπίδες κινούνται στον πολυδιάστατο χώρο ελκυσόμενες από αυτή που παρουσιάζει τη, μέχρι τώρα, καλύτερη λύση στο προς βελτιστοποίηση πρόβλημα, επικοινωνώντας μέσω της έντασης της λάμψης της – όσο καλύτερη η λύση, τόσο πιο λαμπερή.

Οι βασικές αρχές του αλγορίθμου είναι οι εξής [100], [105]:

- οι πυγολαμπίδες δεν έχουν φύλο, οπότε ο μοναδικός λόγος έλξης είναι η ένταση του φωτός.
- ο βαθμός έλξης μιας πυγολαμπίδας είναι ανάλογος με την ένταση του φωτός. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση αυτή μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ δύο πυγολαμπίδων και στην περίπτωση που δύο πυγολαμπίδες φαίνονται εξίσου λαμπερές, άρα και ελκυστικές, μια πυγολαμπίδα θα επιλέξει να κινηθεί τυχαία σε μία από τις δύο.
- η φωτεινότητα εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ως αποτέλεσμα, μια λιγότερο λαμπερή πυγολαμπίδα θα κινηθεί πάντα προς μια πιο λαμπερή, που στη ουσία σημαίνει ότι θα κινηθεί στο χώρο των λύσεων που βρίσκεται η βέλτιστη.

3.1.4 Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)

Η φιλοσοφία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, PSO, προκύπτει από τη μελέτη συμπεριφοράς κοινωνιών βιολογικών οργανισμών στην προσπάθειά τους να

επιλύσουν ένα πρόβλημα, κυρίως αυτό της εύρεσης τροφής. Προτάθηκε, αρχικά, από τους Kennedy και Eberhart το 1995, παρατηρώντας την ομαδική συμπεριφορά σμήνους πουλιών [106]. Αποτελεί τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος της παρούσας εργασίας.

Σε αυτόν τον αλγόριθμο, κάθε πιθανή λύση θεωρείται ως ένα σημείο στο N-διάστατο χώρο αναζήτησης, το οποίο ονομάζεται **σωματίδιο**, και κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό καταλληλότητας, ο οποίος καθορίζεται από την αντικειμενική συνάρτηση. Ο PSO αρχικοποιείται με μια ομάδα τυχαίων σωματιδίων, τα οποία αναπαριστούν τυχαίες λύσεις, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τα χρωμοσώματα στους ΓΑ, με τη διαφορά ότι σε κάθε σωματίδιο ανατίθεται αρχικά και μια τυχαία ταχύτητα με την οποία κινείται στο χώρο λύσεων [107] ώστε να ελέγξει για τη βέλτιστη λύση. Σε κάθε επανάληψη, κάθε σωματίδιο ενημερώνεται λαμβάνοντας υπόψη δύο βέλτιστες τιμές: 1) τη βέλτιστη τιμή που το ίδιο έχει επιτύχει μέχρι στιγμής (**personal best**, **pbest**), και 2) τη βέλτιστη τιμή που έχει επιτύχει όλος ο πληθυσμός (**global best**, **gbest**) [108], η θέση των οποίων ορίζεται ως εξής [109]:

$$pbest(i,t) = \arg \min_{k=1,...,t} \{f[P_i(k)]\} \text{ με } i \in \{1,2,...,N_p\} \quad (3.1)$$

$$gbest(t) = \arg \min_{\substack{i=1,...,N_p \\ k=1,...,t}} \{f[P_i(k)]\} \quad (3.2)$$

όπου,

i το σωματίδιο

N_p ο συνολικός αριθμός των σωματιδίων

t ο αριθμός της επανάληψης

f η συνάρτηση καταλληλότητας

P η θέση του σωματιδίου.

Αφού λάβει τις βέλτιστες τιμές, κινείται στον πολυδιάστατο χώρο, ενημερώνοντας την ταχύτητα (V) και την τοποθεσία του (P) με βάση τις παρακάτω εξισώσεις [109], [110]:

$$V_i(t+1) = \omega \cdot V_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [pbest(i,t) - P_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [gbest(t) - P_i(t)] \quad (3.3)$$

$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.4)$$

όπου,

ω ο συντελεστής αδράνειας

r_1, r_2 τυχαίες μεταβλητές που ανήκουν στο διάστημα [0,1]

c_1, c_2 θετικές σταθερές που ονομάζονται συντελεστές επιτάχυνσης.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου εκπληρωθεί το κριτήριο τερματισμού, το οποίο συνήθως είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ή μια αρκετά ικανοποιητική τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας (αντικειμενική συνάρτηση).

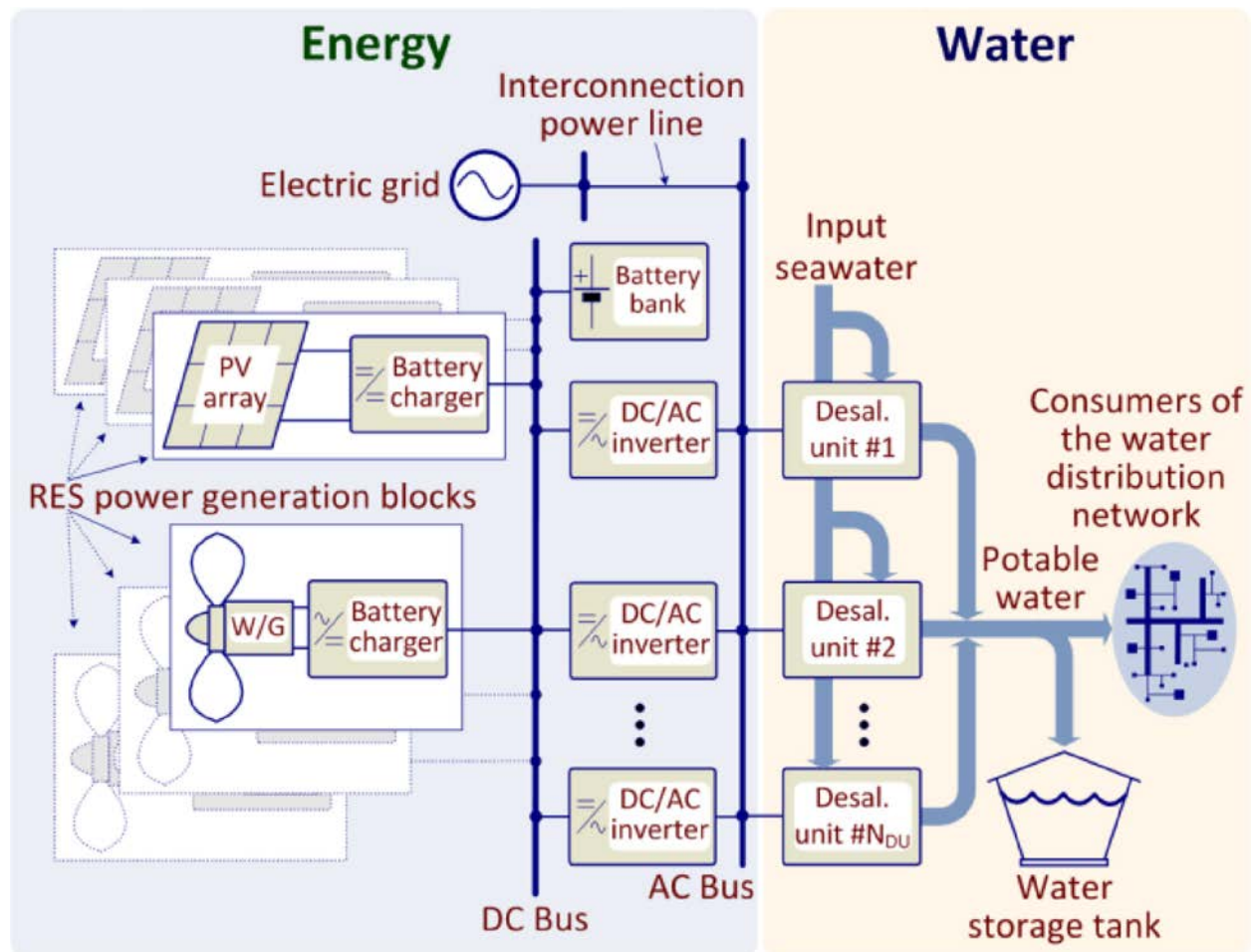
Τα πλεονεκτήματα του PSO έναντι των ΓΑ είναι: 1) η ευκολία εφαρμογής και ο μικρότερος αριθμός παραμέτρων που πρέπει να προσαρμοστούν [111], 2) η αποτελεσματικότερη ικανότητα μνήμης, και 3) η αποδοτικότητα διατήρησης της διαφορετικότητας των σωματιδίων, καθώς όλα τα σωματίδια χρησιμοποιούν τη θέση των πιο «επιτυχημένων» σωματιδίων ώστε να βελτιώσουν τη θέση τους, ενώ στους ΓΑ, οι λιγότερο επιθυμητές τιμές αντικαθίστανται από τις βέλτιστες [100]. Επίσης, σε σύγκριση με άλλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών [107].

4. Προσομοίωση Λειτουργίας Συστήματος Αφαλάτωσης με ΑΠΕ

4. Γενικά

Η υπό μελέτη εγκατάσταση αφαλάτωσης τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από ένα υβριδικό σύστημα ΑΠΕ το οποίο είναι συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στόχος της είναι να παράγει αρκετό πόσιμο νερό, ώστε να ικανοποιήσει μια προκαθορισμένη ζήτηση των καταναλωτών από το δίκτυο ύδρευσης. Ένα διάγραμμα του συνολικού συστήματος αφαλάτωσης που βασίζεται σε ΑΠΕ απεικονίζεται στο Σχήμα 4-1. Το σύστημα τροφοδοσίας που βασίζεται σε ΑΠΕ περιλαμβάνει πολλαπλές συστοιχίες Φ/Β και Α/Γ για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης. Χρησιμοποιείται επίσης μια συστοιχία μπαταριών για την αποθήκευση του πλεονάσματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και πολλαπλοί αντιστροφεείς συνεχούς / εναλλασσόμενου ρεύματος για την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος που απαιτείται από τις μονάδες αφαλάτωσης. Επιπλέον, ο δίαυλος εναλλασσόμενου ρεύματος του συστήματος τροφοδοσίας που βασίζεται σε ΑΠΕ συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο για την πώληση / αγορά οποιουδήποτε ενεργειακού πλεονάσματος / ελλείμματος. Οι συσκευές ΑΠΕ σε συνδυασμό με τις μπαταρίες και οι μονάδες αφαλάτωσης μπορεί να είναι εγκατεστημένες είτε στην ίδια τοποθεσία, είτε σε διαφορετικές, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Το σύστημα αφαλάτωσης περιλαμβάνει, επίσης, μια δεξαμενή νερού για την αποθήκευση του πλεονάσματος νερού που παράγεται από τις μονάδες αφαλάτωσης. Η

μαθηματική μοντελοποίηση και η προσομοίωση του συστήματος αφαλάτωσης που βασίζεται σε ΑΠΕ παρουσιάζονται στις ακόλουθες ενότητες.



Σχήμα 4-1. Διάγραμμα συνολικού συστήματος αφαλάτωσης μαζί με τις ΑΠΕ.

4.1 Μοντελοποίηση του συστήματος

Κάθε Φ/Β συστοιχία αποτελείται από N_s Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και N_p , Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα. Ένας φορτιστής μπαταρίας Φ/Β είναι συνδεδεμένος στην έξοδο κάθε Φ/Β μονάδας με σκοπό: 1) τη διασύνδεση της ισχύος που παράγεται από αυτή με την συστοιχία μπαταριών και 2) τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από μια Φ/Β μονάδα εφαρμόζοντας την τεχνική ελέγχου Ανίχνευσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking – MPPT), μεγιστοποιώντας έτσι την εκμετάλλευση της εγκατεστημένης ισχύος [112]. Η τιμή του N_p υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$N_p = \text{floor}\left(\frac{P_{CH}}{N_s \cdot V_{M,STC} \cdot I_{M,STC}}\right) \quad (4.1)$$

όπου:

P_{CH} (W) η ονομαστική ισχύς του Φ/Β φορτιστή μπαταρίας

$V_{M,STC}$ (V) η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP)

$I_{M,STC}$ (A) η ένταση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) κάθε Φ/Β μονάδας σε τυπικές συνθήκες δοκιμής (STC).

Οι τιμές των P_{CH} , $V_{M,STC}$ και $I_{M,STC}$ αναγράφονται στις παρεχόμενες πληροφορίες από τους κατασκευαστές του φορτιστή και της Φ/Β μονάδας, αντίστοιχα.

Η συστοιχία μπαταριών αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία μπαταρίας τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα, $N_{s,p}$, και το καθένα αποτελείται από $N_{s,b}$ μπαταρίες οι οποίες συνδέονται σε σειρά. Η τιμή του $N_{s,b}$ δίνεται από τον τύπο:

$$N_{s,b} = \text{ceil}\left(\frac{V_{BUS}}{V_B}\right) \quad (4.2)$$

όπου:

V_{BUS} (V) το ονομαστικό επίπεδο της τάσης εξόδου συνεχούς ρεύματος των Φ/Β φορτιστών μπαταρίας

V_B (V) η ονομαστική τάση κάθε μπαταρίας.

Οι τιμές αυτές παρέχονται από τους κατασκευαστές.

Ο συνολικός αριθμός στοιχείων μπαταρίας που συνδέονται παράλληλα υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{s,p} = \text{floor}\left(\frac{N_{BAT}}{N_{s,b}}\right) \quad (4.3)$$

όπου:

N_{BAT} ο συνολικός αριθμός των μπαταριών που συνθέτουν τη συστοιχία μπαταριών.

Ο συνολικός αριθμός των αντιστροφέων συνεχούς/εναλλασσόμενου ρεύματος που απαιτούνται για τη λειτουργία των υποσυστημάτων της διαδικασίας αφαλάτωσης δίνεται από τον τύπο:

$$N_{INV} = \text{ceil}\left(\frac{N_{DU} \cdot P_U + P_T}{P_{INV}}\right) \quad (4.4)$$

όπου:

N_{DU}	ο συνολικός αριθμός μονάδων αφαλάτωσης
P_U (W)	η εναλλασσόμενη ισχύς που απαιτείται για κάθε μονάδα αφαλάτωσης
P_T (W)	η συνολική ισχύς που απαιτείται για την άντληση θαλασσινού νερού από τη θάλασσα στο σημείο εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης και της απόρριψης των αποβλήτων του συστήματος αφαλάτωσης πίσω σε αυτή, αντίστοιχα
P_{INV} (W)	η ονομαστική εναλλασσόμενη ισχύς κάθε αντιστροφέα.

Όταν το σύστημα αφαλάτωσης είναι εγκατεστημένο στην ακτογραμμή, η τιμή του P_T στη σχέση (4) ισούται με μηδέν. Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς που απαιτείται για την άντληση θαλασσινού νερού προς το σύστημα αφαλάτωσης και της απόρριψης απορριμμάτων αφαλάτωσης, αντίστοιχα, συμπεριλαμβάνεται στην τιμή του P_U . Για τοποθεσίες εγκατάστασης μακριά από την ακτογραμμή, η τιμή του P_T υπολογίζεται ως εξής [113]:

$$P_T = H \cdot P_H \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} + E \cdot P_E \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} \quad (4.5)$$

όπου:

H (m)	η συντομότερη οριζόντια απόσταση της τοποθεσίας εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης από την ακτογραμμή
E (m)	το υψόμετρο του σημείου εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης
$W_{d,n}$ (lt/day)	η ονομαστική ημερήσια παραγωγή κάθε μονάδας αφαλάτωσης
P_H, P_E [W/(m*lt)]	οι τιμές ισχύος του συστήματος άντλησης ανά μέτρο οριζόντιας απόστασης και υψόμετρου, αντίστοιχα, και ανά λίτρο ονομαστικής παραγωγής νερού κάθε μονάδας αφαλάτωσης.

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδίασης, εξασφαλίζεται ότι η ζήτηση σε νερό από τον καταναλωτή καλύπτεται πλήρως καθ' όλο το κύκλο ζωής του συστήματος αφαλάτωσης (όπου Y τα έτη). Γι' αυτό το σκοπό, η λειτουργία του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ και είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο προσομοιώνεται για κάθε ώρα t κάθε έτους λειτουργίας (δηλαδή με βήμα 1 ώρας όπου $1 \leq t \leq 8760 \cdot Y$). Κατά τη διάρκεια αυτής της προσομοίωσης λαμβάνονται υπόψη οι εξής διαδικασίες: 1) η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες ΑΠΕ και στο ηλεκτρικό δίκτυο, αντίστοιχα, προς τις μονάδες αφαλάτωσης, και 2) η ροή του πόσιμου νερού από τις μονάδες αφαλάτωσης και τη δεξαμενή αποθήκευσης προς τον καταναλωτή. Γι' αυτό το λόγο, η ισχύς του σημείου μεγίστης ισχύος [112], που παράγεται από κάθε Φ/Β συστοιχία σε χρόνο t (όπου $1 \leq t \leq 8760 \cdot Y$) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{PV}(t) = N_s \cdot N_p \cdot V_{OC}(t) \cdot I_{SC}(t) \cdot FF(t) \cdot [1 - r_d \cdot (y - 1)] \quad (4.6)$$

όπου:

$V_{oc}(t)$ (V) η τάση ανοιχτού κυκλώματος κάθε συστοιχίας Φ/Β σε χρόνο t

$I_{sc}(t)$ (A) το ρεύμα βραχυκύκλωσης κάθε συστοιχίας Φ/Β σε χρόνο t

$FF(t)$ ο συντελεστής πλήρωσης κάθε συστοιχίας Φ/Β σε χρόνο t

r_d (%) ο ρυθμός ετήσιας υποβάθμισης της απόδοσης των Φ/Β μονάδων λόγω γήρανσης

y ο αριθμός του έτους ($1 \leq y \leq Y$).

Οι τιμές των $FF(t)$, $V_{oc}(t)$ και $I_{sc}(t)$ υπολογίζονται σύμφωνα με το [114] ως συνάρτηση των εξής παραμέτρων:

- Των λειτουργικών χαρακτηριστικών των Φ/Β μονάδων κάτω από τυπικές συνθήκες δοκιμής,
- Της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας $T_A(t)$ ($^{\circ}\text{C}$),
- Της ηλιακής ακτινοβολίας, $G(t)$ (W/m^2) που προσπίπτει στις Φ/Β μονάδες κατά την ώρα t .

Η τιμή του $G(t)$ εξαρτάται από τη γωνία κλίσης κατά την οποία έχει εγκατασταθεί η Φ/Β μονάδα, β ($^{\circ}$). Η τιμή της υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα μοντέλα που περιγράφονται στο [114] και από τις χρονοσειρές της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για κάθε ώρα t κατά τη διάρκεια ενός έτους, τις οποίες εισάγει ο σχεδιαστής, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Επιπροσθέτως, υπολογίζεται η τάση του σημείου μεγίστης ισχύος για κάθε Φ/Β συστοιχία κατά την ώρα t , $V_{pv}(t)$. Εάν $V_{pv}(t) < V_{MPP,min}$, όπου $V_{MPP,min}$ είναι η ελάχιστη λειτουργική τάση του σημείου μεγίστης ισχύος του φορτιστή μπαταρίας Φ/Β, τότε η ισχύς που παράγεται από κάθε συστοιχία Φ/Β ορίζεται ίση με το μηδέν κατά την αντίστοιχη ώρα. Επίσης, εάν $P_{pv}(t) > P_{CH}$, τότε η ισχύς εξόδου των Φ/Β συστοιχιών ορίζεται ίση με τη μέγιστη ισχύ λειτουργίας P_{CH} (W), του φορτιστή.

Η ισχύς που εισάγεται στο δίαυλο συνεχούς ρεύματος του συστήματος τροφοδοσίας σε χρόνο t από το μετατροπέα που συνδέεται σε κάθε Α/Γ, $P_{wg}(t)$ (W), υπολογίζεται για κάθε ώρα του κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης. Η τιμή του $P_{wg}(t)$ υπολογίζεται σε συνάρτηση του ύψους του πύργου εγκατάστασης $l_{w/G}$ (m), και της αντίστοιχης ταχύτητας ανέμου, $v(t)$ (m/s), στην τοποθεσία εγκατάστασης. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο πίνακας

αντιστοίχισης ισχύος εξόδου με την ταχύτητα του ανέμου για την Α/Γ, που παρέχεται από τον κατασκευαστή, σύμφωνα με την εργασία [115].

Η συνολική ισχύς που παράγεται από όλες τις γεννήτριες ΑΠΕ του συστήματος αφαλάτωσης για κάθε ώρα t (όπου $1 \leq t \leq 8760 \cdot Y$) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{RE}(t) = N_{PVA} \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot P_{PV}(t) + N_{WG} \cdot P_{WG}(t) \quad (4.7)$$

όπου:

N_{PVA} ο συνολικός αριθμός των Φ/Β συστοιχιών (που ισούται με τον συνολικό αριθμό των φορτιστών N_{CH}),

n_1 η αποδοτικότητα της μετατροπής ισχύος των φορτιστών που είναι συνδεδεμένοι στην έξοδο κάθε συστοιχίας Φ/Β,

n_2 η αποδοτικότητα εύρεσης του σημείου μεγίστης ισχύος από κάθε φορτιστή

N_{WG} ο συνολικός αριθμός Α/Γ με ενσωματωμένους φορτιστές, που συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα τροφοδοσίας με χρήση ΑΠΕ του συστήματος αφαλάτωσης.

Η αποδοτικότητα εύρεσης του σημείου μεγίστης ισχύος n_2 καθορίζει την απόκλιση μεταξύ της πραγματικής παραγόμενης ισχύος από τις Φ/Β συστοιχίες από τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να εξαχθεί, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση (4.6) [116].

Η ισχύς που πρέπει να διατεθεί στις εισόδους συνεχούς ρεύματος των αντιστροφέων συνεχούς/εναλλασσόμενου ρεύματος όταν οι μονάδες αφαλάτωσης είναι σε λειτουργία δίνεται από τον τύπο:

$$P_L(t) = \frac{N_{DU} \cdot P_U + P_T}{n_i} \quad (4.8)$$

όπου:

n_i (%) η αποδοτικότητα μετατροπής ισχύος των αντιστροφέων συνεχούς/εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, $I_{B,C/D}$ (Α), εξαρτάται από τη ροή ισχύος στο δίαυλο συνεχούς ρεύματος και η τιμή του δίνεται από τον τύπο:

$$I_{B,C/D} = \frac{P_{RE}(t) - P_L(t)}{V_{BUS}} \quad (4.9)$$

όπου $I_{B,C/D} > 0$ κατά τη φόρτιση και $I_{B,C/D} < 0$ κατά την εκφόρτιση.

Για την προστασία των μπαταριών από υπερφόρτιση και υπερ-εκφόρτιση, αντίστοιχα, το πραγματικό ρεύμα της συστοιχίας μπαταριών υπολογίζεται ως εξής:

$$I_B(t) = \begin{cases} I_{c,\max} & \alpha\nu \quad I_{B,C/D} > I_{c,\max} \\ I_{B,C/D} & \alpha\nu \quad I_{d,\max} < I_{B,C/D} < I_{c,\max} \\ I_{d,\max} & \alpha\nu \quad I_{B,C/D} < I_{d,\max} \end{cases} \quad (4.10)$$

όπου $I_{c,\max}$ και $I_{d,\max}$ είναι οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης, αντίστοιχα, οι οποίες έχουν οριστεί ίσες με $I_{c,\max} = -I_{d,\max} = \frac{C_n}{5h}$, όπου C_n (Ah) είναι η συνολική ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών.

Σε κάθε χρονικό βήμα, το ηλεκτρικό φορτίο που είναι αποθηκευμένο στη συστοιχία μπαταριών, C_t (Ah), υπολογίζεται ως εξής:

$$C_t = \begin{cases} C(t-1) + n_B \cdot I_B(t) \cdot 1h & \alpha\nu \quad C(t-1) + n_B \cdot I_B(t) \cdot 1h < N_{s,p} \cdot C_B \\ N_{s,p} \cdot C_B & \alpha\lambda\lambda\iota\omega\varsigma \end{cases} \quad (4.11)$$

όπου:

$C(t-1)$ (Ah) η ονομαστική χωρητικότητα κάθε μπαταρίας

n_B η συνολική αποδοτικότητα φόρτισης - εκφόρτισης της μπαταρίας (round-trip efficiency, δηλαδή, $n_B = 0,8$ κατά τη φόρτιση και $n_B = 1$ κατά την αποφόρτιση).

Η αρχική κατάσταση φόρτισης ορίζεται ίση με:

$$C(0) = \left(1 - \frac{DOD}{2}\right) \cdot C_n \quad (4.12)$$

όπου DOD (%) είναι το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης των μπαταριών που συγκροτούν τη συστοιχία μπαταριών.

Εάν οι μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν κατά την ώρα t (ανάλογα με τη διαθεσιμότητα ενέργειας όπως περιγράφεται παρακάτω), τότε ο συνολικός όγκος νερού που παράγουν, $W_{RO}(t)$ (lt), υπολογίζεται από τον τύπο:

$$W_{RO}(t) = N_{DU} \cdot W_U \quad (4.13)$$

όπου W_U (lt) είναι η ωριαία παραγωγή νερού κάθε μονάδας αφαλάτωσης, η οποία είναι καθορισμένη από τον κατασκευαστή της.

Η ποσότητα νερού που βρίσκεται στη δεξαμενή αποθήκευσης κατά την ώρα t , $W_T(t)$ (lt), υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη ότι εάν η τιμή υπερβαίνει τη χωρητικότητα της δεξαμενής, τότε οποιαδήποτε περαιτέρω προσθήκη νερού στη δεξαμενή σταματά και το πλεόνασμα νερού δε χρησιμοποιείται. Η τιμή της $W_T(t)$ δίνεται ως ακολούθως:

$$W_T(t) = \begin{cases} W_T(t-1) + \Delta W(t) & \text{αν } W_T(t-1) + \Delta W(t) < W_{T,n} \\ W_{T,n} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.14)$$

όπου:

$W_{T,n}$ ο συνολικός όγκος της δεξαμενής νερού

$\Delta W(t) = W_{RO}(t) - W_D(t)$ (lt) η ποσότητα νερού που προστίθεται [αν $\Delta W(t) > 0$] ή αφαιρείται [αν $\Delta W(t) < 0$] από τη δεξαμενή.

Η τιμή του $\Delta W(t)$ εξαρτάται από τη ζήτηση νερού του καταναλωτή, $W_D(t)$ (lt), για τη χρονική στιγμή t όπως αναλύεται στη συνέχεια. Η αρχική τιμή του όγκου του νερού που περιέχεται στη δεξαμενή ορίζεται ίση με το 50% της χωρητικότητας της δεξαμενής, δηλαδή $W_T(0) = 0,5W_{T,n}$.

4.2 Προσομοίωση του συστήματος

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία, οι ροές ενέργειας και νερού στη μονάδα αφαλάτωσης που βασίζεται σε ΑΠΕ υπολογίζονται για κάθε ώρα t (όπου $1 \leq t \leq 8760 \cdot Y$) του κύκλου ζωής ως εξής:

Περίπτωση 1: Η παραγωγή ενέργειας των γεννητριών ΑΠΕ είναι αρκετή για να καλύψει τις απαιτήσεις της μονάδας αφαλάτωσης [δηλαδή $P_{RE}(t) \geq P_L(t)$]. Σε αυτή την περίπτωση, εάν υπάρχει διαθέσιμη συστοιχία μπαταριών (ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος που εξετάζεται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, ο οποίος θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο) τότε αυτή φορτίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.10) και αν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας, τότε αυτό πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ποσότητα ενέργειας που πωλείται, $E_G(t)$ (Wh), υπολογίζεται ως εξής:

$$E_G(t) = \begin{cases} \left[P_{RE}(t) - P_L(t) - V_{BUS} \cdot I_{CH} \right] \cdot \frac{n_i}{100} \cdot 1h & \text{αν } \left[P_{RE}(t) - V_{BUS} \cdot I_{CH} \right] \cdot \frac{n_i}{100} \leq N_{INV} \cdot P_{INV} \\ \left[N_{INV} \cdot P_{INV} - P_L(t) \right] \cdot \frac{n_i}{100} \cdot 1h & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.15)$$

Η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών τροποποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.11). Εάν φορτιστεί πλήρως πριν το τέλος της ώρας t , τότε το πλεόνασμα ενέργειας πωλείται και αυτό στο ηλεκτρικό δίκτυο. Εάν δεν περιέχονται μπαταρίες στο σύστημα παροχής ενέργειας που βασίζεται σε ΑΠΕ, τότε το πλεόνασμα ενέργειας που πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο

υπολογίζεται θέτοντας $I_{CH} = 0$ στη συνάρτηση (4.15). Επίσης, η ποσότητα νερού που αποθηκεύεται στη δεξαμενή τροποποιείται κατά $\Delta W(t)$ σύμφωνα με τη σχέση (4.14). Όμως, αν ο αποθηκευμένος όγκος νερού στη δεξαμενή $W_T(t)$ που προκύπτει είναι μικρότερος από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο, $W_{T,\min} = 0.1 \cdot W_{T,n}(t)$, τότε η λειτουργία του συστήματος θεωρείται ανεπιτυχής.

Περίπτωση 2: Η παραγωγή ενέργειας των γεννητριών που βασίζονται σε ΑΠΕ δεν είναι επαρκής για να καλύψει τις απαιτήσεις των μονάδων αφαλάτωσης [δηλαδή $P_{RE}(t) < P_L(t)$]. Τότε, με σκοπό να εκμεταλλευθούν πλήρως οι διαθέσιμες χωρητικότητες της συστοιχίας μπαταριών και της δεξαμενής νερού εισάγοντας την ελάχιστη δυνατή ποσότητα ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο, εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία διαχείρισης ενέργειας και νερού.

Περίπτωση 2.1: Εάν υπάρχει διαθέσιμη συστοιχία μπαταριών, τότε το ρεύμα αποφόρτισης αυτής υπολογίζεται αρχικά σύμφωνα με τη συνάρτηση (4.10). Η διαθέσιμη ενέργεια στη συστοιχία μπαταριών είναι επαρκής εάν η στάθμη φόρτισής της δεν πέφτει κάτω από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο, $C_{B,\min} = (1 - DOD) \cdot C_B \cdot N_{s,p}$ (Ah), πριν το τέλος της ώρας t . Αυτή η προϋπόθεση τίθεται για να εξεταστούν οι περιορισμοί της λειτουργίας της συστοιχίας μπαταριών, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Εάν $|I_B(t)| < |I_{d,\max}|$ και είναι διαθέσιμη αρκετή ενέργεια στη συστοιχία μπαταριών, τότε αυτή εκφορτίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.10) με σκοπό να λειτουργήσουν οι μονάδες αφαλάτωσης (*προτεραιότητα #1*). Εάν δεν είναι διαθέσιμη αρκετή ενέργεια στη συστοιχία μπαταριών για την εκτέλεση της προηγούμενης διαδικασίας, ή αν η τιμή της έντασης αποφόρτισης είναι μεγαλύτερη από $|I_{d,\max}|$, τότε:

- η συστοιχία μπαταριών δεν εκφορτίζεται
- οι μονάδες αφαλάτωσης δε λειτουργούν
- η απαίτηση νερού του καταναλωτή καλύπτεται αποκλειστικά από τη δεξαμενή νερού (*προτεραιότητα #2*).

Όλη η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ χρησιμοποιείται για να φορτίσει τη συστοιχία μπαταριών, με όριο έντασης ρεύματος το $I_{c,\max}$. Ταυτόχρονα, το πλεονάζον ρεύμα που παράχθηκε από ΑΠΕ πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών τροποποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.11). Εάν είναι πλήρως φορτισμένη στο τέλος της ώρας t , τότε το πλεόνασμα ενέργειας πωλείται και αυτό στο ηλεκτρικό δίκτυο. Εάν το νερό στη δεξαμενή δεν είναι αρκετό για την εκτέλεση αυτής της διαδικασίας, τότε θέτονται σε

λειτουργία οι μονάδες αφαλάτωσης. Επίσης, η συστοιχία μπαταριών εκφορτίζεται κατά ποσότητα ρεύματος ίση με I_B από τη σχέση (4.11), έως ότου φτάσει στο ελάχιστο επιτρεπτό όριο φόρτισης $C_{B,\min} = (1 - DOD) \cdot C_B \cdot N_{s,p}$. Σε αυτή την περίπτωση, η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσουν οι μονάδες αφαλάτωσης αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο (προτεραιότητα #3). Στις προτεραιότητες #1 και #3 που περιγράφηκαν παραπάνω, η αποθηκευμένη ποσότητα νερού στη δεξαμενή τροποποιείται κατά $W_T(t)$ σύμφωνα με τη σχέση (4.14). Εάν η ποσότητα που προκύπτει είναι μικρότερη από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο [δηλαδή εάν $W_T(t) < W_{T,n}$] τότε η λειτουργία του συστήματος θεωρείται ανεπιτυχής.

Περίπτωση 2.2: εάν δεν υπάρχει διαθέσιμη συστοιχία μπαταριών, τότε:

- αν η ποσότητα νερού που είναι αποθηκευμένη στη δεξαμενή είναι αρκετή για να καλύψει αυτόνομα τις απαιτήσεις των καταναλωτών χωρίς τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης, τότε α) η ποσότητα νερού στη δεξαμενή μειώνεται κατά $W_D(t)$ [δηλαδή θέτοντας $W_{RO}(t) = 0$ στη συνάρτηση (4.14)] και β) όλη η ενέργεια που παράχθηκε από ΑΠΕ πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- αν η αποθηκευμένη ποσότητα νερού στη δεξαμενή δεν είναι αρκετή ώστε να καλύψει αυτόνομα τις απαιτήσεις του καταναλωτή χωρίς τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης, τότε α) η επιπλέον ενέργεια που απαιτείται για να τεθούν οι μονάδες σε λειτουργία (σε συνδυασμό με την ενέργεια που παράχθηκε από ΑΠΕ) αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και β) η ποσότητα του αποθηκευμένου νερού στη δεξαμενή τροποποιείται κατά $\Delta W(t)$ σύμφωνα με τη σχέση (4.14). Όμως, εάν ο όγκος αποθηκευμένου νερού που προκύπτει στη δεξαμενή είναι μικρότερος από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο [δηλαδή εάν $W_T(t) > W_{T,n}$] τότε η λειτουργία του συστήματος θεωρείται ανεπιτυχής.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις όπου η λειτουργία του συστήματος είναι ανεπιτυχής, η αντίστοιχη δομή του συστήματος αφαλάτωσης που βασίζεται σε ΑΠΕ δε θεωρείται αποδεκτή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης σχεδίασης.

Στο τέλος κάθε εβδομάδας θεωρείται ότι εκτελείται μια διαδικασία καθαρισμού της μεμβράνης αντίστροφης όσμωσης των μονάδων αφαλάτωσης (εάν απαιτείται από την τεχνολογία αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται) διάρκειας 1 ώρας. Αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό επειδή δεν είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας ή νερού, τότε εκτελείται στην πρώτη διαθέσιμη χρονική στιγμή μετά το τέλος της εβδομάδας, όπου

καλύπτονται όλες οι ακόλουθες προϋποθέσεις: 1) η απαιτούμενη ποσότητα νερού για να καλύψει τόσο τις απαιτήσεις του καταναλωτή όσο και τη διαδικασία καθαρισμού είναι διαθέσιμη στη δεξαμενή αποθήκευσης, και 2) είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας από τις γεννήτριες ΑΠΕ και/ή από τη συστοιχία μπαταριών (με ρεύμα αποφόρτισης μικρότερο από $C_n/5h$). Εάν δεν ικανοποιούνται αυτές οι συνθήκες μέσα σε 72 ώρες μετά το τέλος της εβδομάδας, τότε η συγκεκριμένη δομή της εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ δε θεωρείται αποδεκτή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης σχεδίασης. Η παραγωγή νερού από τις μονάδες αφαλάτωσης αναστέλλεται κατά τις ώρες όπου εκτελείται η διαδικασία καθαρισμού της μεμβράνης. Εάν υπάρχουν διαθέσιμες μπαταρίες και η διαδικασία καθαρισμού εκτελείται χρησιμοποιώντας ενέργεια από μπαταρία, τότε η συστοιχία μπαταριών εκφορτίζεται. Αν η ενέργεια που παράχθηκε από ΑΠΕ είναι περισσότερη από αυτή που απαιτείται για τον καθαρισμό, τότε η εναπομένουσα ενέργεια χρησιμοποιείται για να φορτίσει τη συστοιχία μπαταριών με όριο ρεύματος φόρτισης μπαταρίας $C_n/5h$. Επιπλέον, εάν υπάρχει επιπλέον ρεύμα άνω του $C_n/5h$ τότε αυτό πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών τροποποιείται σύμφωνα με την (4.11). Εάν η συστοιχία μπαταριών είναι πλήρως φορτισμένη πριν το τέλος της ώρας t , τότε η επιπλέον ενέργεια πωλείται και αυτή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μπαταρίες στο σύστημα αφαλάτωσης, τότε το οποιοδήποτε πλεόνασμα ενέργειας από ΑΠΕ πάνω από την ποσότητα που απαιτείται για τη διαδικασία καθαρισμού της μεμβράνης αντίστροφης όσμωσης, πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, η δεξαμενή νερού προμηθεύει τόσο το νερό που απαιτείται για τον καθαρισμό, όσο και το νερό που απαιτείται από τον καταναλωτή. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία καθαρισμού, συνεχίζεται η κανονική λειτουργία του συστήματος αφαλάτωσης, όπως περιγράφεται παραπάνω. Η στάθμη φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών και ο όγκος νερού που είναι αποθηκευμένος στη δεξαμενή στο τέλος της διαδικασίας προσομοίωσης πρέπει να είναι υψηλότερα από τις αρχικές τιμές τους, δηλαδή

$$W_T(8760 \cdot Y) \geq W_T(0) = 0.5 \cdot W_{T,n} \quad (4.16)$$

$$C(8760 \cdot Y) \geq C(0) = (1 - DOD/2) \cdot C_n \quad (4.17)$$

Εάν οι (4.16) και (4.17) δεν ισχύουν, τότε η δομή του συστήματος με χρήση ΑΠΕ και συνδεδεμένου στο δίκτυο θεωρείται λειτουργικά ανεπιτυχής.

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδίασης, οι τιμές των παραμέτρων N_S , N_{PVA} , N_{BAT} , β , $W_{T,n}$, N_{DU} , N_{WG} και $I_{W/G}$ υπολογίζονται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης όπως αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

5. Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Συστήματος Αφαλάτωσης με ΑΠΕ

5. Γενικά

Η βελτιστοποίηση σχεδίασης της εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ απαιτεί τον υπολογισμό του συνολικού κόστους ζωής αυτού και την εφαρμογή της διαδικασίας βελτιστοποίησης σχεδίασης, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

5.1 Υπολογισμός συνολικού κόστους ζωής

Οι μεταβλητές απόφασης (σχεδιασμού) της προτεινόμενης διαδικασίας σχεδίασης είναι οι παράμετροι N_S , N_{PVA} , N_{BAT} , β , $W_{T,n}$, N_{DU} , N_{WG} και $l_{W/G}$, οι οποίες έχουν οριστεί στο Κεφάλαιο 4. Αυτές οι παράμετροι αφορούν τα υποσυστήματα που σχετίζονται με την ενέργεια και το νερό της υπό μελέτης εγκατάστασης αφαλάτωσης και συνθέτουν το διάνυσμα των παραμέτρων σχεδίασης $X = [N_S | N_{PVA} | N_{BAT} | \beta | W_{T,n} | N_{DU} | l_{W/G}]$.

Ο στόχος της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι να εξάγει τη βέλτιστη τιμή του X η οποία ελαχιστοποιεί την παρούσα τιμή του συνολικού κόστους ζωής της υπό σχεδίασης εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ, $C_{total}(X)$ (€), δηλαδή:

$$\min_X \{C_{total}(X)\} \quad (5.1)$$

Οι περιορισμοί των σχεδιαστικών μεταβλητών είναι οι εξής:

$$0 \leq N_S \leq \left\lfloor \frac{V_{MPP,max}}{\max[V_{MPP}(t)]} \right\rfloor \quad \begin{matrix} t = 8760 \cdot Y \\ t = 1 \end{matrix} \quad (5.2)$$

με $N_{PVA} \geq 0, N_{BAT} \geq 0, 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ, W_{T,n} \geq 0, N_{DU} \geq 1, N_{WG} \geq 0, 9 \leq l_{W/G} \leq 15$, όπου $V_{MPP,max}$ (V) είναι το μέγιστο επίπεδο τάσης του σημείου μεγίστης ισχύος του φορτιστή μπαταρίας των Φ/Β συστοιχιών.

Για να ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ που συνεργάζεται με το ηλεκτρικό δίκτυο, η τιμή της $C_{total}(X)$ υπολογίζεται ως το άθροισμα των παρακάτω συνιστωσών:

- Τα κόστη της σύνδεσης της εγκατάστασης αφαλάτωσης με το δίκτυο ύδρευσης πόσιμου νερού και το ηλεκτρικό δίκτυο, αντίστοιχα.
- Το συνολικό κόστος των σωληνώσεων μεταφοράς θαλασσινού νερού στην εγκατάσταση αφαλάτωσης και απόρριψης απορριμμάτων αφαλάτωσης στη θάλασσα, αντίστοιχα.
- Το κόστος εγκατάστασης και τα κόστη συντήρησης εφ' όρου ζωής των συσκευών που συνθέτουν όλο το σύστημα αφαλάτωσης.
- Το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Τα κόστη αντικατάστασης των μπαταριών και των ηλεκτρονικών μετατροπέων ενέργειας εξαιτίας βλαβών τους για το σύνολο του κύκλου ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης.

Ως εκ τούτου, στην προτεινόμενη μεθοδολογία, η τιμή της C_{total} στη σχέση (5.1) υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} C_{total}(X) = & c_w + c_e + c_T + N_{PV} \cdot C_{PV} + N_{BAT} \cdot C_{BAT} + N_{CH} \cdot C_{CH} + W_{T,n} \cdot C_T \\ & + N_{WG} \cdot (C_{WG} + (h \cdot C_h)) + N_{DU} \cdot C_{DU} + N_{INV} \cdot C_{INV} + \\ & \sum_{j=1}^Y \left[\begin{aligned} & E_p(j) \cdot c_p + N_{PV} \cdot M_{PV} + W_{T,n} \cdot M_T \\ & + N_{DU} \cdot M_{DU} + N_{WG} \cdot (M_{WG} + M_h \cdot h) \\ & + N_{BAT} \cdot M_{BAT} + N_{CH} \cdot M_{CH} + N_{INV} \cdot M_{INV} \end{aligned} \right] \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} + R_{BAT} + R_{CH} + R_{INV} \end{aligned} \quad (5.3)$$

όπου:

c_w (€) το κόστος σύνδεσης της παραγωγής νερού της εγκατάστασης αφαλάτωσης στο σύστημα ύδρευσης,

- c_e (€) το συνολικό κόστος σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο,
- c_T (€) το συνολικό κόστος των σωληνώσεων (παράλληλη λειτουργία) μεταφοράς θαλασσινού νερού στο σημείο εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης και απόρριψης απορριμμάτων αφαλάτωσης πίσω στη θάλασσα, αντίστοιχα,
- $N_{PV} = N_S \cdot N_P \cdot N_{PVA}$ ο συνολικός αριθμός Φ/Β μονάδων του συστήματος ΑΠΕ,
- C_{PV} , C_{BAT} , C_{CH} , C_{DU} , C_{INV} , και C_{WG} (€) τα κόστη αγοράς και εγκατάστασης κάθε μονάδας Φ/Β, μπαταρίας, Φ/Β φορτιστή μπαταριών, μονάδας αφαλάτωσης, αντιστροφέα, και Α/Γ αντίστοιχα,
- C_T (€/lt) το κόστος κατασκευής της δεξαμενής νερού ανά λίτρο όγκου,
- C_h (€/m) το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του πύργου Α/Γ ανά μέτρο ύψους,
- Y (έτη) η διάρκεια ζωής του συστήματος αφαλάτωσης,
- $E_p(j)$ (kWh) η συνολική ποσότητα ενέργειας που αγοράστηκε από το ηλεκτρικό δίκτυο κατά το έτος j , ($1 \leq j \leq Y$),
- c_p (€/kWh) η παρούσα αξία του κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο,
- M_{PV} , M_{BAT} , M_{CH} , M_{DU} , M_{INV} , M_{WG} (€) η παρούσα αξία του ετήσιου κόστους συντήρησης κάθε μονάδας Φ/Β, μπαταρίας, Φ/Β φορτιστή μπαταριών, μονάδας αφαλάτωσης, αντιστροφέα, και Α/Γ αντίστοιχα,
- M_T (€/lt) η παρούσα αξία του ετήσιου κόστους συντήρησης της δεξαμενής νερού ανά λίτρο χωρητικότητας,
- M_h (€/m) η παρούσα αξία του ετήσιου κόστους συντήρησης του πύργου της Α/Γ ανά μέτρο ύψους,
- R_{BAT} (€) η παρούσα αξία του συνολικού κόστους αντικατάστασης των μπαταριών,
- R_{CH} (€) η παρούσα αξία του συνολικού κόστους αντικατάστασης των Φ/Β φορτιστών μπαταριών,
- R_{INV} (€) η παρούσα αξία του συνολικού κόστους αντικατάστασης των αντιστροφέων,

g (%) το ετήσιο ποσοστό πληθωρισμού,

i (%) το επιτόκιο.

Η τιμή του c_w στη σχέση (5.3) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη τιμή της ωριαίας ζήτησης σε νερό από τον καταναλωτή κατά τη διάρκεια του έτους, ως ακολούθως:

$$c_w = c_{wnet} \cdot \max \left\{ W_D(t) \left| \begin{array}{l} t = 8760 \\ t = 1 \end{array} \right. \right\} \quad (5.4)$$

όπου c_{wnet} (€/lt) είναι το κόστος σύνδεσης της παραγωγής νερού της εγκατάστασης αφαλάτωσης στο δίκτυο ύδρευσης ανά μεταφερόμενο λίτρο την ώρα.

Η εγκατάσταση αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ σχεδιάζεται έτσι, ώστε να μπορεί να εγγεί το μέγιστη δυνατή ποσότητα ρεύματος στο ηλεκτρικό δίκτυο (εάν υπάρχει πλεόνασμα κατά τη λειτουργία του). Γι' αυτό το λόγο, η τιμή του c_e στη σχέση (5.3) υπολογίζεται με βάση τη συνολική ονομαστική ισχύ συνεχούς ρεύματος των αντιστροφών που περιλαμβάνονται στο σύστημα τροφοδοσίας με χρήση ΑΠΕ, ως εξής:

$$c_e = c_{enet} \cdot N_{INV} \cdot P_{INV} \quad (5.5)$$

όπου c_{enet} (€/W) είναι το κόστος ανά Watt της σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, συμπεριλαμβανομένου του κόστους οποιασδήποτε απαιτούμενης υποδομής, όπως οι γραμμές ρεύματος και οι υποσταθμοί.

Η τιμή του C_{DU} στη σχέση (5.3) επίσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Τα κόστη των εσωτερικών κατασκευών που σχετίζονται με τις μονάδες αφαλάτωσης, όπως τα φίλτρα θαλασσινού νερού, τις δεξαμενές αποθήκευσης του νερού πριν και μετά την επεξεργασία, και τον οργανοληπτικό εξοπλισμό.
- Το συνολικό κόστος των σωληνώσεων (παράλληλη λειτουργία) μεταφοράς θαλασσινού νερού προς το σημείο εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης και απόρριψης απορριμμάτων αφαλάτωσης πίσω στη θάλασσα, αντίστοιχα, όταν το σύστημα αφαλάτωσης είναι εγκατεστημένο δίπλα στη θάλασσα (δηλαδή στην ακτογραμμή).

Αν η εγκατάσταση αφαλάτωσης δεν είναι εγκατεστημένη δίπλα στη θάλασσα, τότε το συνολικό κόστος των επιπλέον σωληνώσεων μεταφοράς θαλασσινού νερού προς το σημείο εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης και μεταφοράς των απορριμμάτων αφαλάτωσης πίσω στη θάλασσα (αγωγός εκροής απορριμμάτων αφαλάτωσης), c_T (€), υπολογίζεται ως εξής:

$$c_T = H \cdot c_H \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} + E \cdot c_E \cdot W_{d,n} \cdot N_{DU} \quad (5.6)$$

όπου c_H και c_E [$\text{€}(\text{m} \cdot \text{lt})$] είναι τα κόστη εγκατάστασης του συστήματος μεταφοράς νερού ανά μέτρο οριζόντιας απόστασης και υψομέτρου, αντίστοιχα, και ανά λίτρο ημερήσιας ονομαστικής παραγωγής νερού των μονάδων αφαλάτωσης.

Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης, οι μπαταρίες θα πρέπει να αντικατασταθούν εξαιτίας της μικρής διάρκειάς τους λόγω γήρανσης, κάτι που επηρεάζει το κόστος του συνολικού συστήματος στις σχέσεις (5.1) και (5.3). Η διάρκεια ζωής μιας συστοιχίας μπαταριών εξαρτάται από το προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης της σε σχέση με το χρόνο. Για να υπολογιστεί το σχετικό κόστος [δηλαδή η παράμετρος R_{BAT} στη (5.3)], η συνολική ποσότητα αμπερωρίων που μπορεί να παρέχει η συστοιχία μπαταριών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της ($Q_{bat,total}$) υπολογίζεται αρχικά ως εξής:

$$Q_{bat,total} = DOD \cdot C_B \cdot N_{B,p} \cdot N_C \quad (5.7)$$

όπου N_C είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της με βάση το επιτρεπόμενο DOD του κατασκευαστή των μπαταριών. Η διακίνηση των αμπερωρίων της συστοιχίας μπαταριών κατά τη λειτουργία του συστήματος, $Q_{Ah,t}$ (Ah), υπολογίζεται κατά την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος ΑΠΕ που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.2. Αυτό γίνεται με τη χρήση των υπολογισμένων τιμών του ρεύματος εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών ως ακολούθως:

$$Q_{Ah,t} = \sum_{t=1}^{1 \leq t \leq 8760 \cdot Y} I_B(t) \cdot S(I_B(t)) \cdot 1h \quad (5.8)$$

όπου η συνάρτηση $S(x)$ ορίζεται ως εξής:

$$S(x) = 0 \text{ αν } x \geq 0, \text{ αλλιώς } S(x) = +1.$$

Οι μπαταρίες αντικαθίστανται την ώρα t ($1 \leq t \leq 8760 \cdot Y$), όπου η τιμή του $Q_{Ah,t}$ εκείνη την ώρα ισούται με $Q_{bat,total}$, που υπολογίστηκε με χρήση του τύπου (5.7). Η παρούσα αξία του κόστους αντικατάστασης των μπαταριών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης R_{BAT} (€), υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{BAT} = N_{BAT} \cdot C_{BAT} \cdot \left[\sum_{\forall j=Y_i^*} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \quad (5.9)$$

Η άθροιση στη σχέση (5.9) υπολογίζεται μόνο για τις συγκεκριμένες τιμές της μεταβλητής των ετών, Y_1^* , όπου απαιτείται η αντικατάσταση των μπαταριών [117]. Κατά την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ, μετά την αντικατάσταση των μπαταριών, η στάθμη φόρτισης θεωρείται ότι είναι ίση με την τιμή που είχε πριν την αντικατάσταση. Μέσω αυτής της διαδικασίας, αποφεύγεται η αλλοίωση των υπολογισμών της ροής της ενέργειας. Επομένως, η αντικατάσταση των μπαταριών επηρεάζει μόνο το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης [δηλαδή την τιμή της $C_{total}(X)$ στη σχέση (5.3)].

Η παρούσα αξία του κόστους αντικατάστασης των Φ/Β φορτιστών μπαταρίας και των αντιστροφών, R_{CH} και R_{INV} (€) αντίστοιχα, στον τύπο (5.3), υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$R_{CH} = N_{CH} \cdot C_{CH} \cdot \left[\sum_{\forall j=Y_2^*} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \quad (5.10)$$

$$R_{INV} = N_{INV} \cdot C_{INV} \cdot \left[\sum_{\forall j=Y_3^*} \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \right] \quad (5.11)$$

Οι τιμές των Y_2^* και Y_3^* εξαρτώνται από το συνολικό χρόνο λειτουργίας των Φ/Β φορτιστών μπαταριών και των αντιστροφών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης και τον μέσο χρόνο μεταξύ των βλαβών, $MTBF_{CH}$ και $MTBF_{INV}$ σε ώρες, που ορίζεται από τους κατασκευαστές αυτών:

$$Y_2^* = Y \cdot 365 \cdot 24 / MTBF_{CH} \quad (5.12)$$

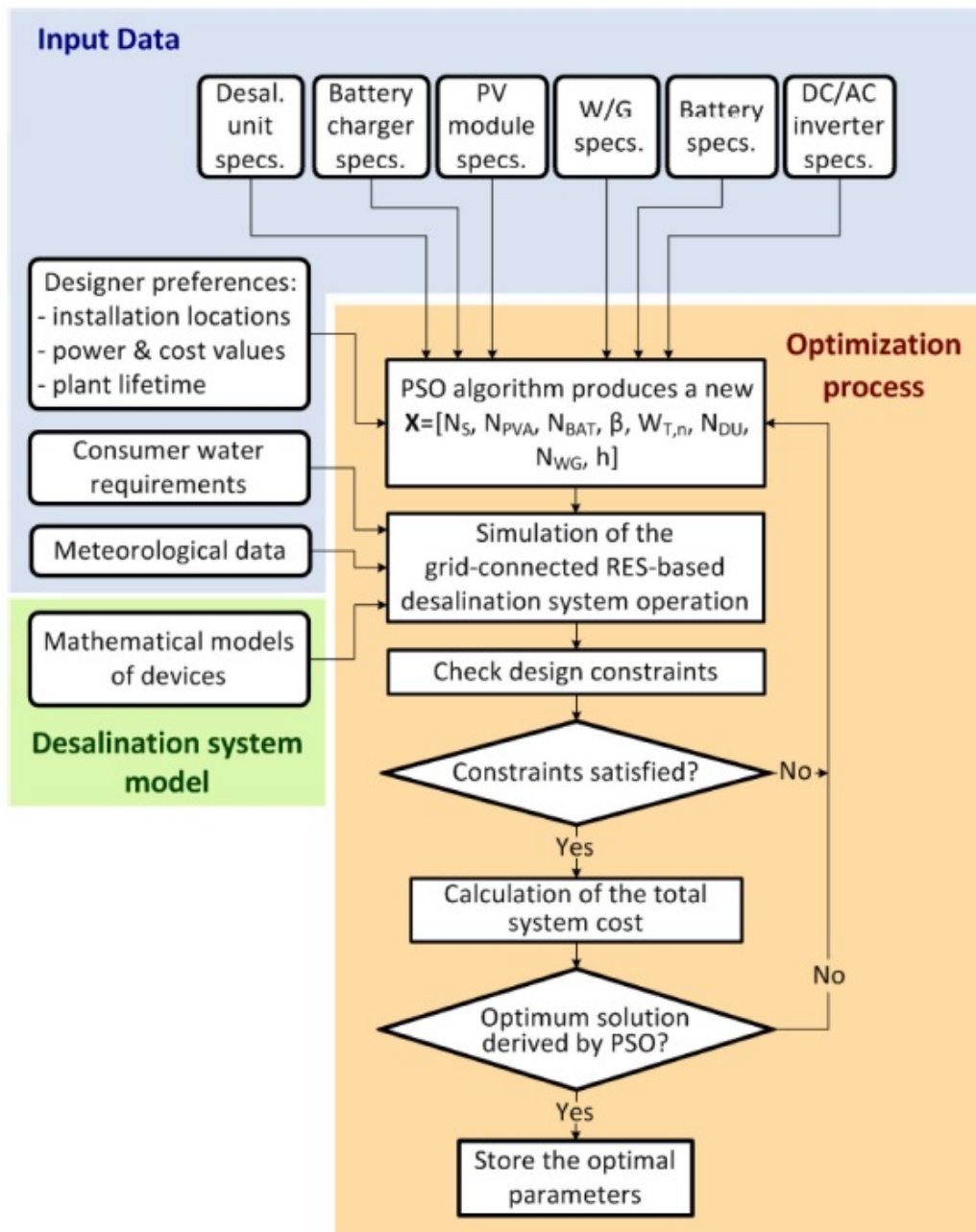
$$Y_3^* = Y \cdot 365 \cdot 24 / MTBF_{INV} \quad (5.13)$$

5.2 Διαδικασία βελτιστοποίησης

Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό της βέλτιστης διαμόρφωσης του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ ο οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο. Αρχικά, ο σχεδιαστής παρέχει τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για την εκτέλεση της διαδικασίας βέλτιστης σχεδίασης ως ακολούθως:

- τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσκευών που σχετίζονται με την ενέργεια και το νερό, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για να συνθέσουν το υπό μελέτη σύστημα αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ,
- την τοποθεσία εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης,
- τις τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με την ενέργεια και το κόστος και που απαιτούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας της εγκατάστασης αφαλάτωσης (όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.2) και τον υπολογισμό του συνολικού κόστους του συστήματος,
- τα επιθυμητά λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης αφαλάτωσης, δηλαδή τη διάρκεια του κύκλου ζωής και την ωριαία ζήτηση σε νερό από τον καταναλωτή κατά τη διάρκεια του έτους,
- τις ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, και την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος αναφοράς (I_{ref} σε μέτρα), τα οποία επικρατούν στην επιθυμητή τοποθεσία εγκατάστασης κατά τη διάρκεια του έτους.

Η βέλτιστη τιμή της $C_{total}(X)$ στην (5.1) εξάγεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης PSO. Σε σχέση με άλλες εξελικτικές τεχνικές βελτιστοποίησης (π.χ. γενετικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμος πυγολαμπίδας, κλπ) ο αλγόριθμος PSO παρουσιάζει σχετική απλότητα στην εκτέλεση και είναι αποτελεσματικός στην επίλυση πολύπλοκων μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης [118]. Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης (βλ. Σχ. 2), ο αλγόριθμος PSO παράγει πολλαπλές εναλλακτικές τιμές του \mathbf{X} . Για κάθε μία από αυτές, η λειτουργία της εγκατάστασης αφαλάτωσης προσομοιώνεται για κάθε ώρα του κύκλου ζωής του, όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.2. Επιπλέον, υπολογίζεται το αντίστοιχο κόστος κύκλου ζωής, $C_{total}(X)$, με βάση την (5.3). Μεταξύ των εναλλακτικών τιμών του \mathbf{X} μέσω αυτής της διαδικασίας, το διάνυσμα \mathbf{X} το οποίο 1) δεν οδηγεί σε ανεπιτυχείς λειτουργίες για καμία ώρα λειτουργίας του κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης σύμφωνα με την παράγραφο 4.2 και 2) έχει ως αποτέλεσμα την ελάχιστη τιμή της $C_{total}(X)$, θεωρείται ως η βέλτιστη σχεδιαστική λύση.



Σχήμα 5-1. Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου σχεδιασμού βελτιστοποίησης.

5.3 Σχεδίαση εναλλακτικών συναρτήσεων βελτιστοποίησης

Για να διερευνηθεί η επίδραση του διαφορετικού είδους αντικειμενικής συνάρτησης στα αποτελέσματα βελτιστοποίησης σχεδίασης, έχουν εναλλακτικά χρησιμοποιηθεί τροποποιήσεις της σχέσης (5.3), οι οποίες εκφράζουν διαφορετικούς στόχους βελτιστοποίησης, με σκοπό τη σύγκριση.

- Η ελαχιστοποίηση του καθαρού κόστους κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ και σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, $C_{net}(X)$ (€). Η τιμή του $C_{net}(X)$ υπολογίζεται αφαιρώντας από την $C_{total}(X)$ τα έσοδα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής που προέρχονται από την πώληση ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο και μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$C_{net}(X) = C_{total}(X) - \sum_{j=1}^Y E_s(j) \cdot c_s \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (5.14)$$

όπου:

$E_s(j)$ (kWh) η συνολική ενέργεια που έχει πωληθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά το έτος j ($1 \leq j \leq Y$) και

c_s (€/kWh) η παρούσα αξία της τιμής πώλησης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, η οποία προσδιορίζεται από το σχεδιαστή.

- Η μεγιστοποίηση των συνολικών εσόδων που προέρχονται από την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης, $C_{rev}(X)$ (€), που υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{rev}(X) = \sum_{j=1}^Y E_s(j) \cdot c_s \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (5.15)$$

Σε αυτή την περίπτωση, η συνολική ονομαστική ισχύς των μονάδων ΑΠΕ έχει περιοριστεί να είναι μικρότερη από το ένα τρίτο της αντίστοιχης τιμής της βελτιστοποιημένης διαμόρφωσης που προκύπτει από την εφαρμογή των σχέσεων (5.1) και (5.3).

- Η ελαχιστοποίηση του κόστους του κύκλου ζωής μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης η οποία δε χρησιμοποιεί ΑΠΕ και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, αλλά λειτουργεί αγοράζοντας ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση, το διάνυσμα των σχεδιαστικών μεταβλητών είναι $X_1 = [W_{T,n} | N_{DU}]$. Επίσης, η διαδικασία βελτιστοποίησης εκτελείται ελαχιστοποιώντας την αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση κόστους κύκλου ζωής $C_{eg}(X_1)$ (€), η οποία είναι:

$$C_{eg}(X) = c_w + c_e + c_T + W_{T,n} \cdot C_T + N_{DU} \cdot C_{DU} + \sum_{j=1}^Y [E_p(j) \cdot c_p + W_{T,n} \cdot M_T + N_{DU} \cdot M_{DU}] \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+i)^j} \quad (5.16)$$

Θέτοντας τις τιμές των c_p και/ή c_s ίσες με μηδέν, δίνεται η δυνατότητα να ερευνηθούν διαμορφώσεις του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ, όπου ενέργεια μπορεί μόνο να πωληθεί ή να αγοραστεί από το ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, παρατηρείται ότι οι αντικειμενικές συναρτήσεις που δίνονται από τις (5.3), (5.15) και (5.16) είναι μέρη της αντικειμενικής συνάρτησης (5.14).

Για να δηλωθεί η εγκατάσταση των μονάδων αφαλάτωσης δίπλα στη θάλασσα, ο σχεδιαστής θα πρέπει να εισάγει τις τιμές $c_H = c_E = P_E = P_H = 0$ στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτό επηρεάζει τις τιμές που υπολογίζονται στις συναρτήσεις (4.5) και (5.6), (5.14), ή (5.16). Αν οι συσκευές ΑΠΕ εγκατασταθούν σε διαφορετική τοποθεσία από τις μονάδες αφαλάτωσης (π.χ. σε σημείο που παρουσιάζει σημαντικό δυναμικό ΑΠΕ), τότε το σημείο εγκατάστασης που προσδιορίζεται αρχικά από το σχεδιαστή αφορά την τοποθεσία των συσκευών ΑΠΕ. Σε αυτή την περίπτωση, η έξοδος εναλλασσόμενου ρεύματος των αντιστροφών μπορεί να μεταφερθεί στις μονάδες αφαλάτωσης μέσω του ηλεκτρικού δικτύου (για παράδειγμα, εφαρμόζοντας ένα σχήμα net-metering). Θέτοντας κατάλληλα τις τιμές των c_p και/ή c_s στην προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης εξυπηρετείται η έρευνα αντίστοιχων διαμορφώσεων.

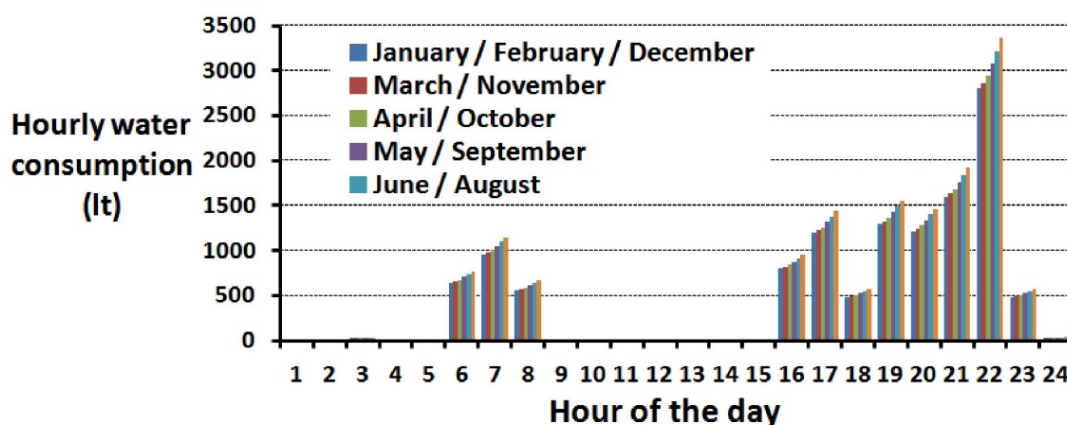
Οι τιμές των c_{wnet} και c_{enet} στις συναρτήσεις (5.4) και (5.5) προσδιορίζονται από το σχεδιαστή λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις της εγκατάστασης αφαλάτωσης από το δίκτυο ύδρευσης και το ηλεκτρικό δίκτυο, αντίστοιχα. Επομένως, η τιμή της c_w στην (5.4) εξαρτάται από τη ζήτηση νερού και την τοποθεσία των μονάδων αφαλάτωσης σε σχέση με το δίκτυο παροχής νερού. Επίσης, οι τιμές των c_e και c_T στις συναρτήσεις (5.5) και (5.6), αντίστοιχα, καθορίζονται από την τοποθεσία του συστήματος αφαλάτωσης και της διαμόρφωσής του. Το τελευταίο ενσωματώνεται στις (5.5) και (5.6) μέσω των τιμών των μεταβλητών απόφασης N_{INV} και N_{DU} , που απορρέουν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Τέλος, η τιμή του P_T στην (4.5), η οποία επίσης καθορίζεται από την τοποθεσία της εγκατάστασης αφαλάτωσης, επηρεάζει τη ροή ενέργειας κατά τη λειτουργία του συστήματος αφαλάτωσης. Με τη σειρά του, αυτό επηρεάζει τα σχεδιαστικά αποτελέσματα για τη βελτιστοποίηση της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης που δίνεται από τις σχέσεις (5.3), (5.14), (5.15), ή (5.16), αντίστοιχα. Μέσω της προαναφερόμενης προσέγγισης επιλογής των τιμών των σχεδιαστικών μεταβλητών, εξετάζεται η επίδραση των εναλλακτικών τοποθεσιών εγκατάστασης στη δομή και το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής της υπό σχεδίαση εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ.

Σε περίπτωση που οι εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις (5.14)-(5.16) χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδίασης, οι λειτουργικοί περιορισμοί της εγκατάστασης αφαλάτωσης παραμένουν ίδιοι με αυτούς που έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4 και στην παράγραφο 5.1. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης σχεδίασης για εναλλακτικά κριτήρια βελτιστοποίησης της συνολικής εγκατάστασης αφαλάτωσης.

6. Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα λογισμικού στην πλατφόρμα MATLAB με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Εξαιτίας της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος PSO ορίστηκε να λειτουργεί με μέγεθος σμήνους 500 σωματιδίων, και εκτελείται το μέγιστο για 600 γενιές. Εντούτοις, η διαδικασία βελτιστοποίησης τερματίζει όταν η σχετική μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι λιγότερο από 10^{-6} για 40 γενιές.

Με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδοσή της, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τη βέλτιστη σχεδίαση ενός υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ, το οποίο ήταν συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο και εγκατεστημένο σε μια τοποθεσία της Κρήτης με γεωγραφικό πλάτος $35,517^\circ$ και μήκος $23,856^\circ$. Το εργοστάσιο αφαλάτωσης σχεδιάστηκε για να καλύψει τη ζήτηση σε νερό μιας μικρής κοινότητας για διάρκεια $Y=20$ έτη. Η αντίστοιχη ζήτηση σε νερό κατά τη διάρκεια του έτους παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-1.



Σχήμα 6-1. Ωριαία διαφοροποίηση της κατανάλωσης νερού καθ' όλη την διάρκεια του έτους.

Το υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας με χρήση ΑΠΕ της εγκατάστασης αφαλάτωσης αποτελείται από συσκευές διαθέσιμες εμπορικά, οι οποίες διαθέτουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και τα κόστη που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε λαμβάνοντας υπόψη τρεις εναλλακτικούς τύπους εμπορικά διαθέσιμων μπαταριών μολύβδου-οξέως, με διαφορετικές τιμές C_{BAT} , N_C , και C_B (βλ. Πίνακα 6-1), όπως αναλύεται στη συνέχεια. Τα ετήσια κόστη συντήρησης των αντιστροφών συνεχούς/εναλλασσόμενου ρεύματος και των μονάδων αφαλάτωσης ορίστηκαν ίσα με το 10% του αντίστοιχου κόστους αγοράς και εγκατάστασης. Για τις υπόλοιπες συσκευές, τα αντίστοιχα ποσοστά ορίστηκαν ίσα με 1%. Οι τιμές των παραμέτρων διαμόρφωσης της εγκατάστασης αφαλάτωσης, που χρησιμοποιούνται για τη ροή ενέργειας και νερού και των μοντέλων υπολογισμού του κόστους διάρκειας ζωής που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-2.

Πίνακας 6-1. Λειτουργικά χαρακτηριστικά και κόστη συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση της εγκατάστασης αφαλάτωσης υπό σχεδίαση.

Device type	Parameter	Value
PV modules	C_{PV}	67 €
	V_{\max}	21.6 V
	I_{\max}	3.24 A
PV battery chargers	C_{CH}	308.9 €
	V_{BUS}	24 V
	P_{CH}	1440 W
W/Gs	C_{WG}	3460 €
	C_h	70 €
	l_{ref}	10 m
Batteries	C_{BAT}	Type 1: 794.00 €
		Type 2: 712.48 €
		Type 3: 942.97 €
	N_C	Type 1: 1400 for 80 % DOD
		Type 2: 1200 for 60 % DOD
		Type 3: 2400 for 70 % DOD
	C_B	Type 1: 185 Ah
		Type 2: 185 Ah
		Type 3: 610 Ah
	V_B	12 V
DC/AC inverters	C_{INV}	1478 €
	P_{INV}	1200 W
Desalination units	C_{DU}	51608 €
	$W_{d,n}$	18925 lt/day

Πίνακας 6-2. Ρυθμίσεις παραμέτρων λειτουργίας και εγκατάστασης του συστήματος αφαλάτωσης υπό σχεδίαση.

Parameter	Value
P_H	0.0075 W / (m·m ³)
P_E	0.15 W / (m·m ³)
c_H	3.04 x 10 ⁻⁶ €/ (m·m ³)
c_E	2.567 x 10 ⁻³ €/ (m·m ³)
$C_{w/l}$	8.5 x 10 ⁻⁴ €/ (W·m)
C_T	0.35 €/ lt
g	1.2 %
i	3.0 %

Αρχικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε με χρήση της μπαταρίας τύπου 1 (βλ. Πίνακα 6-1), όπως επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι (5.3) και (5.15)-(5.17), αντίστοιχα, ως εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι προκύπτουσες βελτιστοποιημένες διαμορφώσεις τόσο των υποσυστημάτων που σχετίζονται με το νερό όσο και με την ενέργεια (παραγωγή και αποθήκευση) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-3. Σε αυτές τις διαμορφώσεις, τα κόστη σύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο και στο δίκτυο ύδρευσης ορίστηκαν ίσα με $c_w = 1,2835 \text{ €/m}^3$ και $c_e = 425 \text{ €/kW}$. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε απόσταση 500 m μεταξύ των δικτύων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και νερού από την εγκατάσταση αφαλάτωσης.

Πίνακας 6-3. Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

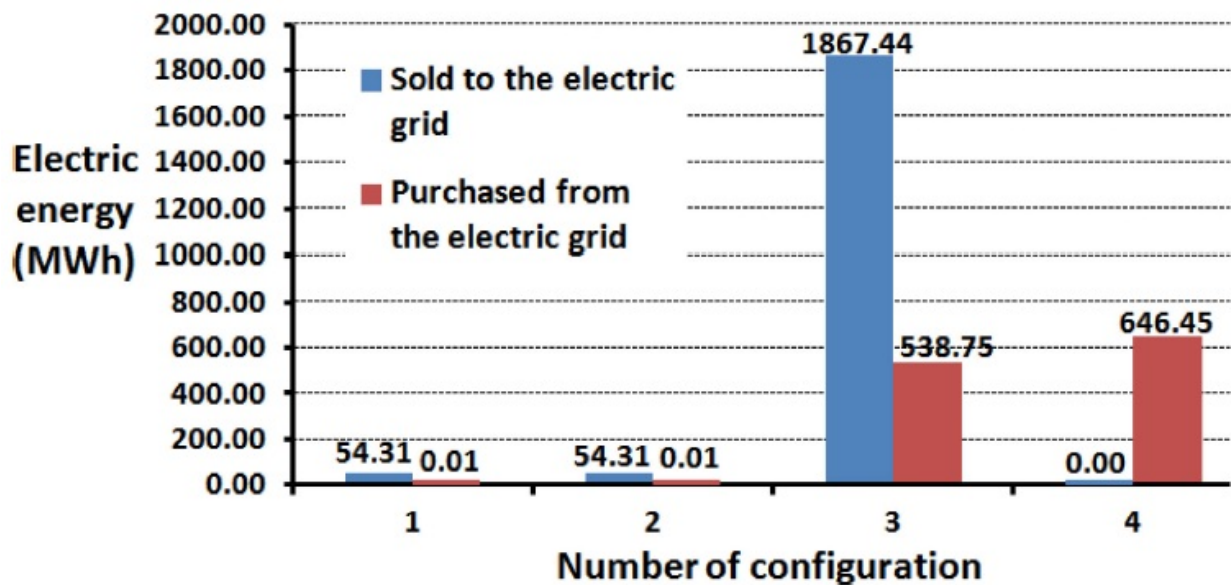
Configuration	Optimization objective	Configuration number	Optimal design parameters								
			N_S	N_P	N_{PVA}	N_{BAT}	β (°)	$W_{T,n}$ (lt)	N_{DU}	N_{WG}	$L_{W/G}$
Grid-connected desalination plant with RES	Minimum $C_{total}(X)$	1	4	7	9	10	31	98975	1	9	14
	Minimum $C_{net}(X)$	2	4	7	9	10	31	98975	1	9	14
	Maximum $C_{rev}(X)$	3	0	0	0	102	-	85864	49	69	14
Grid-connected desalination plant without RES	Minimum $C_{eg}(X_1)$	4	-	-	-	-	-	2084	5	-	-

βελτιστοποιημένη διαμόρφωση #1-4 που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-3, εμφανίζεται στον Πίνακα 6-4. Οι προκύπτουσες βέλτιστες χωρητικότητες των συσκευών ΑΠΕ, συστοιχίας μπαταριών, και μονάδων αφαλάτωσης για τις διαμορφώσεις #1-4 επίσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-4. Οι βέλτιστες τιμές του X για τις διαμορφώσεις #1 και #2, όπως επίσης και οι αντίστοιχες τιμές των C_{total} , C_{net} , και C_{rev} είναι ίσες. Αυτό συμβαίνει επειδή η διαδικασία διαχείρισης ενέργειας της εγκατάστασης αφαλάτωσης (βλ. παράγραφο 4.2) κατευθύνει την ενέργεια που παράχθηκε από ΑΠΕ πρωτίστως για την κάλυψη των λειτουργικών απαιτήσεων και μόνο η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ως εκ τούτου, τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο (δηλαδή C_{rev}) είναι μόνο το 1,61% του C_{total} για τις διαμορφώσεις #1 και #2 στον Πίνακα 6-4. Επομένως, η ενσωμάτωση του C_{rev} στην αντικειμενική συνάρτηση (5.15) δεν επηρεάζει τα βέλτιστα σχεδιαστικά αποτελέσματα σε σχέση με την (19). Επίσης, στον Πίνακα 6-4 παρατηρείται ότι η εγκατάσταση αφαλάτωσης που έχει βελτιστοποιηθεί με γνώμονα τη μεγιστοποίηση των εσόδων από πώληση ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο (διαμόρφωση #3), αποτελείται μόνο από Α/Γ. Η τιμή του C_{rev} για τη διαμόρφωση #3 είναι περίπου 34 φορές μεγαλύτερη από τις διαμορφώσεις #1 και #2. Παρόλα αυτά, το αντίστοιχο κόστος κύκλου ζωής αυτής της εγκατάστασης αφαλάτωσης [δηλαδή το C_{total} στη (5.3)] είναι δυσανάλογα υψηλότερο κατά περίπου 30 φορές, καθώς ο στόχος βελτιστοποίησης που περιγράφεται στην (5.16) δεν λαμβάνει υπόψη το κόστος του προκύπτοντος συστήματος. Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την εξαγωγή της βέλτιστης διαμόρφωσης #1 και #2 οδήγησε στη μείωση του κόστους κύκλου ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης κατά 60,04% σε σχέση με αυτό μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης η οποία λειτουργεί μόνο με χρήση ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς τη χρήση μονάδων ΑΠΕ (δηλαδή διαμόρφωση #4 στους Πίνακες 6-3 και 6-4). Αυτό οφείλεται στην ικανότητα της προτεινόμενης τεχνικής να διερευνήσει το βέλτιστο ισοζύγιο ανάμεσα στους τύπους και ονομαστικές τιμές ισχύος των ΑΠΕ και των ποσοτήτων της χωρητικότητας μπαταρίας, χωρητικότητας δεξαμενής νερού, και ανταλλαγής ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο, αντίστοιχα.

Πίνακας 6-4. Βέλτιστες τιμές πλήθους συσκευών για κάθε σενάριο βελτιστοποίησης.

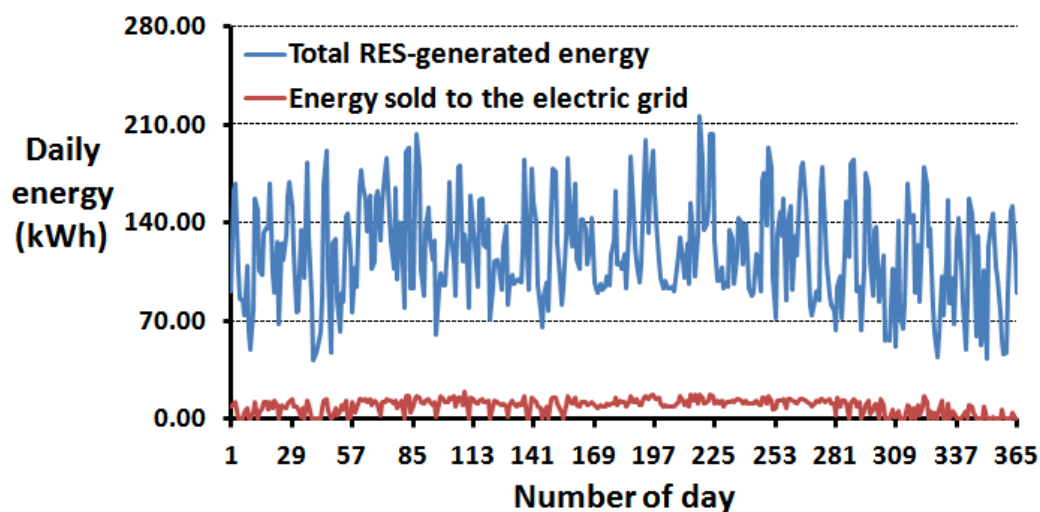
Configuration No.		1	2	3	4
Optimal capacities	Total PV power (kW)	12.6	12.6	-	-
	Total W/G power (kW)	5.85	5.85	44.85	-
	Nominal battery capacity (Ah)	925	925	9435	-
	Nominal water production of the desalination units (lt/h)	788.54	788.54	38638.54	3942.71
Performance index	C_{total} (k€)	286.82	286.82	8689.07	-
	C_{net} (k€)	282.21	282.21	8533.12	-
	C_{rev} (k€)	4.61	4.61	155.95	-
	C_{eg} (k€)	-	-	-	717.72

Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που αγοράστηκε από το ηλεκτρικό δίκτυο και που πωλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο, αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια ζωής των βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων #1-#4 που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-3, εμφανίζεται στο Σχήμα 6-2. Στις διαμορφώσεις #1 και #2, η ποσότητα ενέργειας που αγοράστηκε από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι το 0,017% της αντίστοιχης ενέργειας που πωλήθηκε σε αυτό. Αυτό το ποσοστό αυξάνεται στο 28,85% στη διαμόρφωση #3, μιας και το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε από το δίκτυο για να καλύψει τις λειτουργικές απαιτήσεις των μονάδων αφαλάτωσης δε λαμβάνεται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση που δίνεται από την (5.16). Η ενέργεια που αγοράστηκε από το ηλεκτρικό δίκτυο στις διαμορφώσεις #1 και #2 ισούται με το $1,42 \cdot 10^{-3}$ % της αντίστοιχης ποσότητας στη διαμόρφωση #4. Επομένως, η χρήση των ΑΠΕ για την τροφοδοσία του συστήματος αφαλάτωσης στις διαμορφώσεις #1 και #2 είχε σκοπό τη μείωση της ενέργειας που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Όμως, οι προκύπτουσες διαμορφώσεις #1 και #2 δεν είναι πλήρως αυτόνομες. Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης είχε ως αποτέλεσμα να εξαχθούν οι βέλτιστες χωρητικότητες των υποσυστημάτων που σχετίζονται με την ενέργεια και το νερό, έτσι ώστε μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας (8,4% της ενέργειας που αγοράστηκε από το δίκτυο στη διαμόρφωση #4) να πωληθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι, η οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης αφαλάτωσης βελτιώνεται και, ταυτόχρονα, υποστηρίζεται και η λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου.

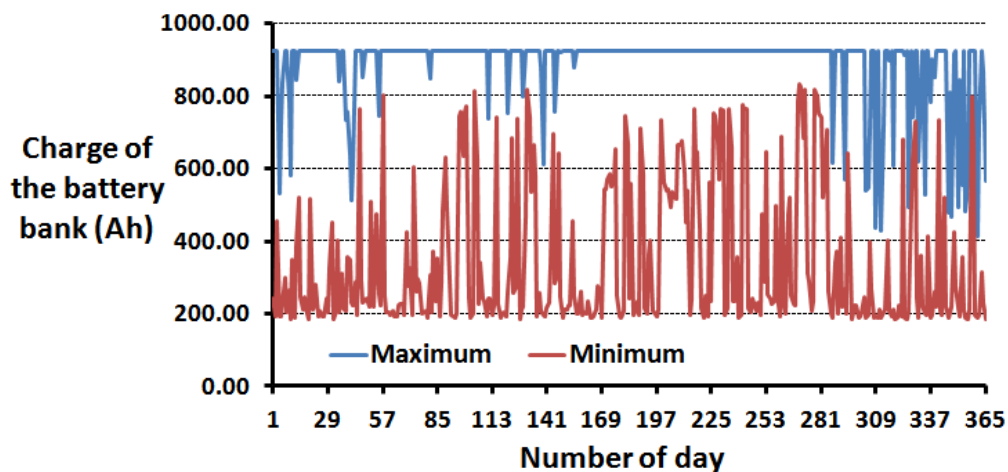


Σχήμα 6-2. Σύνολο ενέργειας που ανταλλάσσεται με το ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος, για κάθε μία από τις βελτιστοποιημένες διατάξεις #1-#4.

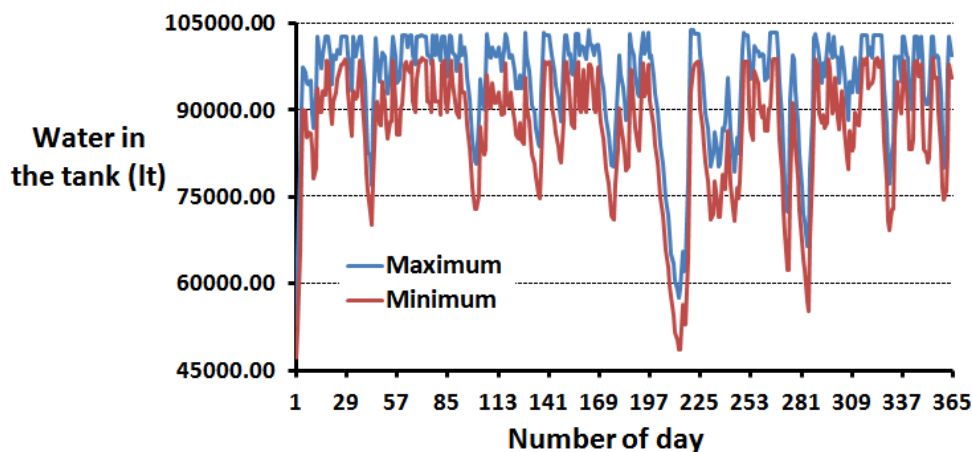
Για παράδειγμα, η επίδοση των συσκευών ΑΠΕ, της συστοιχίας μπαταριών, και της δεξαμενής νερού κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας στη διαμόρφωση #1 στους Πίνακες 6-3 και 6-4 παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-3. Παρατηρείται ότι η ενέργεια που πωλείται ημερησίως στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι λιγότερη από το 18,29% της αντίστοιχης παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ. Ταυτόχρονα, η στάθμη φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών και η ποσότητα νερού στη δεξαμενή ποικίλλουν σε μεγάλο εύρος. Αυτά τα χαρακτηριστικά επέτρεψαν τη βέλτιστη εκμετάλλευση της παραγόμενης από ΑΠΕ ενέργειας για την κάλυψη της ζήτησης σε νερό από τους καταναλωτές με την ελάχιστη δυνατή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης C_{total} .



(α)



(β)

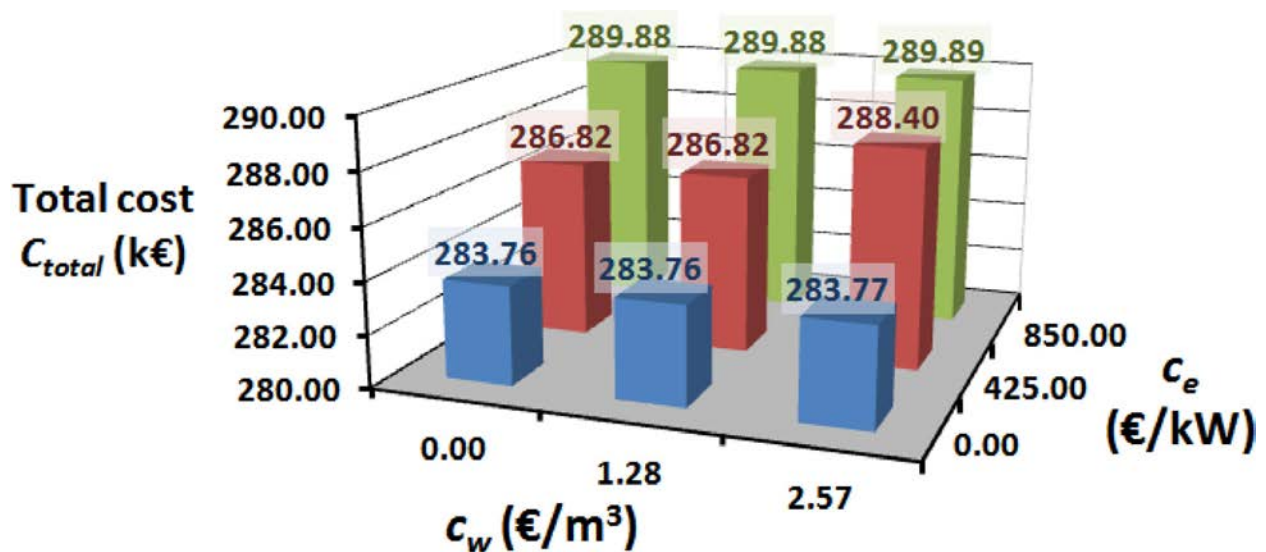


(γ)

Σχήμα 6-3. Η λειτουργία των ΑΠΕ, μπαταριών και δεξαμενής νερού στο χρονικό διάστημα του πρώτου χρόνου λειτουργίας του συστήματος στο σενάριο 1 των Πινάκων 6-3 και 6-4.

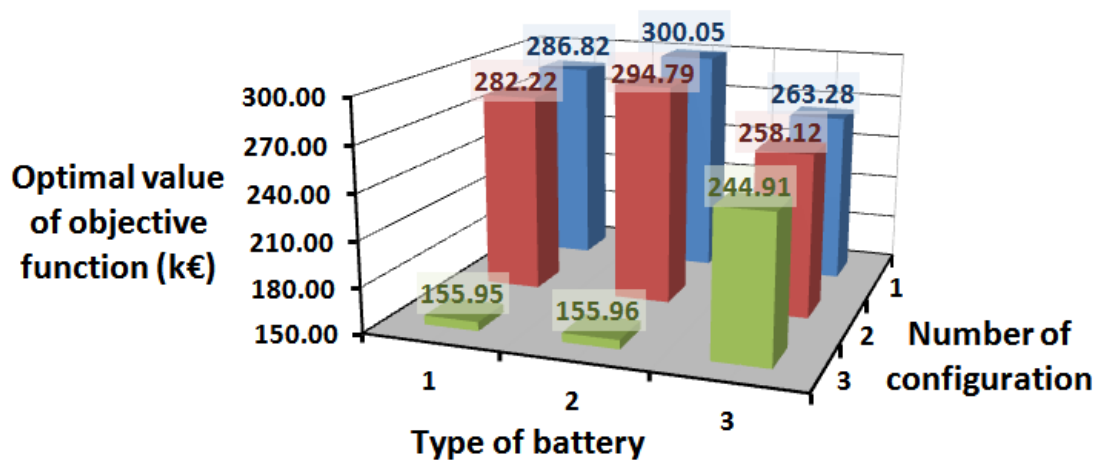
Η προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης σχεδίασης για την ελαχιστοποίηση της $C_{total}(X)$ στη (5.3) εφαρμόστηκε επίσης για πολλαπλές εναλλακτικές τιμές των c_w και c_e στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται μπαταρίες τύπου 1 (βλ. Πίνακα 6-1). Οι προκύπτουσες παραλλαγές των βέλτιστων τιμών του C_{total} για διαφορετικές τιμές των c_w και c_e (που αντιστοιχούν σε αποστάσεις 0-1000 m από τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και νερού) όταν $c_p = 0,1 \text{ €/kWh}$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-4. Για κάθε τιμή του c_w , το βελτιστοποιημένο κόστος κύκλου ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης αυξάνεται με το c_e κατά 1,08-2,16% σε σχέση με τις αντίστοιχες βέλτιστες τιμές του C_{total} όταν $c_e = 0 \text{ €/kW}$. Επίσης, για κάθε τιμή του c_e , η τιμή του C_{total} αυξάνεται με το c_w κατά $1,49 \cdot 10^{-3} - 0,55 \%$ σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση όπου $c_w = 0 \text{ €/m}^3$. Επομένως, το βελτιστοποιημένο κόστος κύκλου

ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ επηρεάζεται από τις αποστάσεις μεταξύ αυτού και του ηλεκτρικού δικτύου και δικτύου ύδρευσης, αντίστοιχα.

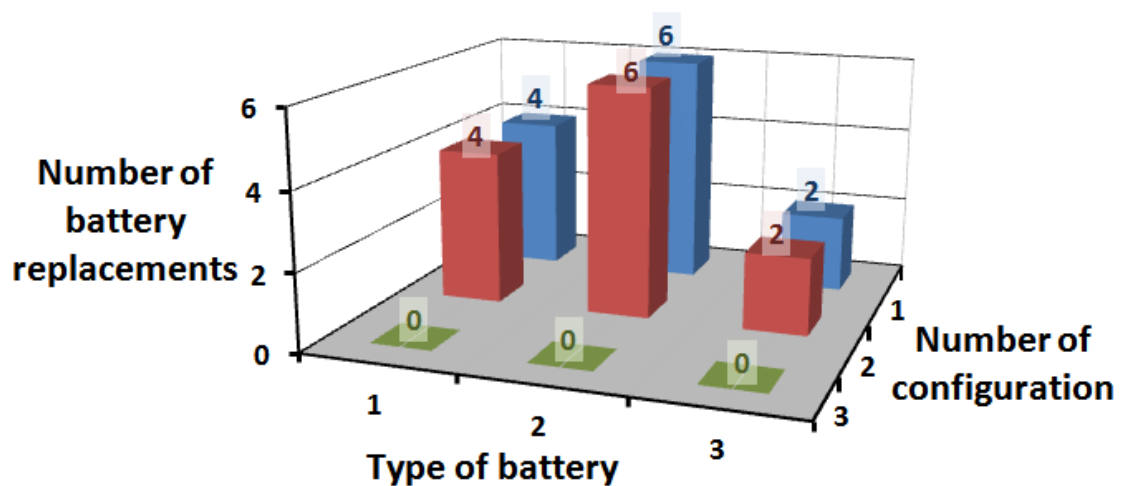


Σχήμα 6-4. Αναπαράσταση του συνολικού κόστους C_{total} όταν αλλάζουν τα c_w και c_e .

Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μπαταριών, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τρεις εναλλακτικούς τύπους μπαταριών που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6-1. Οι προκύπτουσες βέλτιστες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων (5.3), (5.15), και (5.16) αντίστοιχα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-5(α). Οι αντίστοιχοι αριθμοί αντικατάστασης μπαταριών κατά την εικοσαετή λειτουργία του συστήματος αφαλάτωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-5(β). Για όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, η χρήση μπαταρίας τύπου 2 οδηγεί στις υψηλότερες τιμές των C_{total} και C_{net} (δηλαδή διαμορφώσεις #1 και #2 στο Σχήμα 6-5) και του αριθμού αντικαταστάσεων, εξαιτίας της χαμηλής τιμής του $Q_{bat,total}$ στην (5.7) που διαθέτει. Η χρήση μπαταρίας τύπου 3 οδηγεί σε μηδενικές αντικαταστάσεις λόγω της υψηλής τιμής του N_c που τις χαρακτηρίζει (βλ. Πίνακα 6-1). Επίσης, η μπαταρία τύπου 3 παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή του λόγου $C_{BAT} / Q_{bat,total}$ που οδηγεί στη μείωση των τιμών των C_{total} και C_{net} κατά 8,21-12,44 %. Ακόμη, στην περίπτωση της διαμόρφωσης #3, η τιμή του C_{rev} αυξάνεται κατά 57,04% όταν χρησιμοποιείται αυτού του είδους μπαταρία. Επομένως, μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας τη λειτουργική διάρκεια ζωής των μπαταριών, βελτιώνεται η οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ και διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.



(α)



(β)

Σχήμα 6-5. α) Η μεταβολή του συνολικού κόστους C_{total} ως συνάρτηση του σεναρίου βελτιστοποίησης και του τύπου των μπαταριών, β) Η μεταβολή του πλήθους των αντικαταστάσεων των μπαταριών ως συνάρτηση του σεναρίου βελτιστοποίησης και του τύπου των μπαταριών.

7. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκε μια νέα μεθοδολογία σχεδίασης, η οποία λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ τριών εναλλακτικών βαθμών ελευθερίας στη λειτουργία του συνόλου της εγκατάστασης αφαλάτωσης, δηλαδή την αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες, την αποθήκευση νερού, και την ανταλλαγή ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης σχεδίασης έδειξαν ότι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας επιτρέπει τη μείωση του κόστους κύκλου ζωής της εγκατάστασης αφαλάτωσης κατά 60% σε σύγκριση με μια εγκατάσταση αφαλάτωσης η οποία λειτουργεί μόνο με ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς τη χρήση μονάδων ΑΠΕ. Επίσης, αποδείχθηκε ότι μέσω: 1) εφαρμογής του συνολικού κόστους κύκλου ζωής του συστήματος αφαλάτωσης με χρήση ΑΠΕ συνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο ως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης σχεδίασης και 2) μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής των μπαταριών, βελτιώνεται η οικονομική βιωσιμότητα των προκυπτουσών διαμορφώσεων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εστίασε σε Φ/Β και Α/Γ εξαιτίας του αυξημένου επιπέδου βιομηχανικής ωριμότητάς τους.

Η μελλοντική εργασία περιλαμβάνει την εφαρμογή εναλλακτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης με σκοπό τη διερεύνηση της επίδοσης τους στο συγκεκριμένο πρόβλημα που εξετάζεται. Επίσης, η προτεινόμενη τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση χρήσης κυματικών μετατροπών με σκοπό την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης σε σχέση με τη χρήση Φ/Β και Α/Γ. Τέλος, θα μπορούσε να ενσωματωθεί η μοντελοποίηση της μεταβολής της τάσης των μπαταριών με τον ρυθμό φόρτισης και της κατάστασης φόρτισης τους, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας των υπολογισμών ροής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι εκτελούνται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Βιβλιογραφία

- [1] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UNWater, The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. Paris, France: UNESCO, 2018.
- [2] W. N. Lubega and A. M. Farid, “A reference system architecture for the energy–water nexus”, *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 106–116, Mar. 2016.
- [3] M. Faezipour and S. Ferreira, “A system dynamics approach for sustainable water management in hospitals”, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1278–1285, Jun. 2018.
- [4] S. Imen, N.-B. Chang, Y. J. Yang, and A. Golchubian, “Developing a model-based drinking water decision support system featuring remote sensing and fast learning techniques”, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1358–1368, Jun. 2018.
- [5] S. Bhojwani, K. Topolski, R. Mukherjee, D. Sengupta, and M. M. El-Halwagi, “Technology review and data analysis for cost assessment of water treatment systems”, *Science of The Total Environment*, vol. 651, no. 2, pp. 2749–2761, 2019.
- [6] J. Leijon and C. Boström, “Freshwater production from the motion of ocean waves—A review”, *Desalination*, vol. 435, pp. 161–171, 2018.
- [7] Z. Li, A. Siddiqi, L. D. Anadon, and V. Narayanamurti, “Towards sustainability in water-energy nexus: Ocean energy for seawater desalination”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. 3, pp. 3833–3847, 2018.
- [8] Z. M. Amin, A. I. Maswood, M. N. A. Hawlader, E. A. Al-Ammar, J. Orfi, and H. A. Al-Ansary, “Desalination with a solar-assisted heat pump: An economic optimization”, *IEEE Systems Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 732–741, Dec. 2013.

- [9] E. L. Mooney, Y. Almogathawi, and K. Barker, “Facility location for recovering systems of interdependent networks”, *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 489–499, Mar. 2019.
- [10] I. B. Ali, M. Turki, J. Belhadj, and X. Roboam, “Optimized fuzzy rulebased energy management for a battery-less PV/wind-BWRO desalination system”, *Energy*, vol. 159, pp. 216–228, 2018.
- [11] G. Zhang, B. Wu, A. Maleki, and W. Zhang, “Simulated annealing-chaotic search algorithm based optimization of reverse osmosis hybrid desalination system driven by wind and solar energies”, *Solar Energy*, vol. 173, pp. 964–975, 2018.
- [12] C.-S. Karavas, K. G. Arvanitis, G. Kyriakarakos, D. D. Piromalis, and G. Papadakis, “A novel autonomous PV powered desalination system based on a DC microgrid concept incorporating short-term energy storage”, *Solar Energy*, vol. 159, pp. 947–961, 2018.
- [13] W. Peng, A. Maleki, M. A. Rosen, and P. Azarikhah, “Optimization of a hybrid system for solar-wind-based water desalination by reverse osmosis: Comparison of approaches”, *Desalination*, vol. 442, pp. 16–31, 2018.
- [14] B. Wu, A. Maleki, F. Pourfayaz, and M. A. Rosen, “Optimal design of stand-alone reverse osmosis desalination driven by a photovoltaic and diesel generator hybrid system”, *Solar Energy*, vol. 163, pp. 91–103, 2018.
- [15] S. Bahrami and M. H. Amini, “A decentralized trading algorithm for an electricity market with generation uncertainty”, *Applied Energy*, vol. 218, pp. 520–532, 2018.
- [16] K. G. Boroojeni, M. H. Amini, A. Nejadpak, S. S. Iyengar, B. Hoseinzadeh, and C. L. Bak, “A theoretical bilevel control scheme for power networks with large-scale penetration of distributed renewable resources”, *2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology*, Grand Forks, ND, USA, 2016, pp. 510–515.
- [17] N. Saxena and B. J. Choi, “Integrated distributed authentication protocol for smart grid communications”, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2545–2556, Sep. 2018.
- [18] P. Kou, D. Liang, and L. Gao, “Stochastic energy scheduling in microgrids considering the uncertainties in both supply and demand”, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2589–2600, Sep. 2018.

- [19] M. Diekerhof, S. Schwarz, F. Martin, and A. Monti, “Distributed optimization for scheduling electrical demand in complex city districts”, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3226–3237, Dec. 2018.
- [20] F. Ahmad, M. S. Alam, and M. Shahidehpour, “Profit maximization of microgrid aggregator under power market environment”, *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 3388–3399, Sep. 2019.
- [21] F. M. Gatta *et al.*, “Replacing diesel generators with hybrid renewable power plants: Giglio Smart Island project”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 2, pp. 1083–1092, Mar./Apr. 2019.
- [22] W. Hickman, A. Muzhikyan, and A. M. Farid, “The synergistic role of renewable energy integration into the unit commitment of the energy water nexus”, *Renewable Energy*, vol. 108, pp. 220–229, 2017.
- [23] N. Vakilifard, P.A. Bahri, M. Anda, and G. Ho, “A two-level decision making approach for optimal integrated urban water and energy management”, *Energy*, vol. 155, pp. 408–425, 2018.
- [24] A. M. Abdelshafy, H. Hassan, and J. Jurasz, “Optimal design of a gridconnected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach”, *Energy Conversion and Management*, vol. 173, pp. 331–347, 2018.
- [25] R. Fornarelli, F. Shahnian, M. Anda, P. A. Bahri, and G. Ho, “Selecting an economically suitable and sustainable solution for a renewable energy-powered water desalination system: A rural Australian case study”, *Desalination*, vol. 435, pp. 128–139, 2018.
- [26] L. Perković *et al.*, “Modeling of optimal energy flows for systems with close integration of sea water desalination and renewable energy sources: case study for Jordan”, *Energy Conversion and Management*, vol. 110, pp. 249–259, 2016.
- [27] S. Aminfard, F. T. Davidson, and M. E. Webber, “Multilayered spatial methodology for assessing the technical and economic viability of using renewable energy to power brackish groundwater desalination”, *Desalination*, vol. 450, pp. 12–20, 2019.
- [28] T. Ishimatsu, A. Doufene, A. Alawad, and O. de Weck, “Desalination network model driven decision support system: A case study of Saudi Arabia”, *Desalination*, vol. 423, pp. 65–78, 2017.

- [29] Α. Μαλισόβας, «Ανάλυση και Σχεδίαση Ηλεκτρολογικού Συστήματος ενός Ηλεκτροηλεκτρικού Οχήματος», Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.
- [30] M. Malinowski, J. I. Leon, H. Abu-Rub, “Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2132–2146, 2017.
- [31] K. Ranabhat, L. Patrikeev, A. A. Revina, K. Andrianov, V. Lapshinsky, E. Sofronova, “An introduction to solar cell technology”, *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 14, no. 4, pp. 481-491, 2016.
- [32] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, «Οδηγός φωτοβολταϊκών», διαθέσιμο στη σελίδα https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf, όπως ανακτήθηκε το Νοέμβριο του 2020.
- [33] Φ. Στεργιόπουλος, «Φωτοβολταϊκή Ενέργεια», στο Μ. Δαμιανίδης, Γ. Κατσαρός, Μ. Τόλης, Φ. Στεργιόπουλος, «Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, 2011.
- [34] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, “Photovoltaics Report”, διαθέσιμο στη διεύθυνση www.ise.fraunhofer.de, όπως ανακτήθηκε το Νοέμβριο του 2020.
- [35] M. Gul, Y. Kotak, T. Muneer, “Review on recent trend of solar photovoltaic technology”, *Energy Exploration & Exploitation*, vol. 34, no. 4, pp. 485-526, 2016
- [36] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP
- [37] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, «Στατιστικά Ελληνικής Αγοράς», 2020, διαθέσιμο στη σελίδα https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf, όπως ανακτήθηκε το Νοέμβριο του 2020.
- [38] Κ. Χατζηκωστής, «Τεχνολογία Ανεμογεννητριών», Πτυχιακή εργασία, Σχολή Μηχανικών, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, 2012
- [39] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill.htm, όπως ανακτήθηκε τον Οκτώβριο 2020.

- [40] Z. Changshui, H. Guangdong, W. Jun, “A fast algorithm based on the submodular property for optimization of wind turbine positioning”, *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 2951-2958, 2011.
- [41] S. Chowdhury, J. Zhang, A. Messac, L. Castillo, “Optimizing the arrangement and the selection of turbines for wind farms subject to varying wind conditions”, *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 273-282, 2013.
- [42] M. Wagner, J. Day, F. Neumann, “A fast and effective local search algorithm for optimizing the placement of wind turbines”, *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 67-70, 2013.
- [43] S. A. Grady, M. Y. Hussaini, M. M. Abdullah, “Placement of wind turbines using genetic algorithms”, *Renewable Energy*, vol. 30, no. 2, pp. 259-270, 2005.
- [44] B. Czech, P. Bauer, “Wave Energy Converter Concepts: Design Challenges and Classification”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 4-16, 2012.
- [45] M. D. Esteban, J. S. Lopez-Gutierrez, V. Negro, “Classification of Wave Energy Converters”, *Recent Advances in Petrochemical Science*, vol. 2, no. 4, pp. 63-66, 2017.
- [46] B. Drew, A. R. Plummer, M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887-902, 2009.
- [47] D. Dunnett, J. S. Wallace, “Electricity generation from wave power in Canada”, *Renewable Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 179-195, 2009.
- [48] Y. Li, Y. H. Yu, “A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no.6, pp. 4352-4564, 2012.
- [49] Ν. Χέλμης, «Επισκόπηση και αξιολόγηση των κυριότερων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ενέργεια των κυμάτων και εκτίμηση της σκοπιμότητας εισαγωγής των τεχνολογιών αυτών και στην Ελλάδα», Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Κρήτης.
- [50] K. Guibertau, J. Lee, Y. Liu, Y. Dou, “Wave energy Converters and Design Considerations for Gulf of Mexico”, *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, vol. 30, no. 4, pp. 55-76, 2015.

- [51] Γ. Ντάβαλης, «Κυματική ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2016.
- [52] <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- [53] Θ. Αγόρης, «Τεχνολογίες αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
- [54] A. Jossen, J. Garche, D. U. Sauer, “Operation Conditions of batteries in PV applications”, *Solar Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 759-769, 2004.
- [55] N. Achaibou, M. Haddadi, A. Malek, “Modeling of lead-acid batteries in PV systems”, *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 538-544, 2012.
- [56] Z. M. Salameh, M. A. Casacca, W. A. Lynch, “A Mathematical Model for Lead – Acid Batteries”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no.1, pp. 93-98, 1992.
- [57] J. B. Copetti, E. Lorenzo, F. Chenlo, “A general battery model for PV system simulation”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 1, no. 4, pp. 283 – 292, 1993.
- [58] T. U. Daim, X. Li, J. Kim, S. Simms, “Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity: Quantifying expert opinions”, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 3, pp. 29-49, 2012.
- [59] H. L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, J. P. Lopez, “Characterization of electrical energy storage technologies”, *Energy*, vol. 53, pp. 288-298, 2013.
- [60] K. El Kamouny, H. Mahmoudi, B. Lakssir, “Smart solar battery charger for PV-application”, *10TH International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, pp. 1-6, 2017.
- [61] A. Jossen, J. Garche, D. U. Sauer, “Operation Conditions of batteries in PV applications”, *Solar Energy*, vol. 76, no. 6, pp. 759-769, 2004.
- [62] G. Lorenzi, C. A. S. Silva, “Comparing demand response and battery storage to optimize self – consumption in PV systems”, *Applied Energy*, vol. 180, pp. 524-535, 2016.
- [63] S. Anuphaphpharadorn, S. Sukchai, C. Sirisamphanwong, N. Ketjoy, “Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion battery and lead-acid in PV stand-alone applications”, *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 352-358, 2014.

- [64] J. Leadbetter, L. G. Swan, “Selection of battery technology to support grid-integrated renewable electricity”, *Journal of Power Sources*, vol. 216, pp. 376-386, 2012.
- [65] M. Dakkak, A. Hasan, “A charge controller based on microcontroller in stand-alone Photovoltaic Systems”, *Energy Procedia*, vol. 19, pp. 87-90, 2012.
- [66] N. Khera, N. Rana, Narendiran S, S. K. Sahoo, Balamurugan M, S. P. Karthikeyan, I. J. Raglend, “Design of Charge Controller for Solar PV Systems”, *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies*, pp. 149-153, 2015.
- [67] Π. Συντάκη, S. Y. Khozamy, «Μελέτη και σχεδιασμός εγκατάστασης αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος σε μόνιμη κατοικία», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013.
- [68] Ε. Κοκκίνη, «Υβριδική λειτουργία συστήματος άντλησης νερού σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- [69] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, J. C. Hernández, G. M. Tina, «Monitoring PWM Signals in Stand-Alone Photovoltaic Systems», *Measurement*, vol. 134, pp. 412425, 2018.
- [70] Y. E. Abu Eldahab, N. H. Saad, A. Zerky, “Enhancing the design of battery controllers for photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 646-665, 2016.
- [71] V. Salas, E. Olias, A. Barrado. A. Lazaro, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555-1578, 2006.
- [72] A. S. Hiwale, M. V. Patil, H. Vinchurkar, “An efficient MPPT Solar Charge Controller”, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 3, no. 7, pp. 10505-10511, 2014.
- [73] B. Bendib, H. Belmili, F. Krim, “A survey of the most used MTTP methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637-348, 2015.

- [74] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, “Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications”, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 151, no. 2, pp. 191-197, 2004.
- [75] Ε. Τσιουμπρή, «Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Αντιμετώπιση των συνηθισμένων προβλημάτων των συσσωρευτών μολύβδου οξέος στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [76] W. Ali, H. Farooq, A. U. Rehman, Q. Awais, M. Jamil, A. Noman, “Design Considerations of Stand-Alone Solar Photovoltaic Systems”, *2018 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering*, pp. 1-6, 2018.
- [77] www.deh.gr, «II. Σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων με το δίκτυο της ΔΕΗ Α.Ε. – Τεχνικές διευκρινίσεις».
- [78] K. Zeb, W. Uddin, M. A. Khan, Z. Ali, M. U. Ali, N. Christoforides, H. J. Kim, “A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1120-1141, 2018.
- [79] T. Zhao, V. Bhavaraju, P. Nirantare, J. Xu, “Evaluation of commercial scale transformerless solar inverter technology”, *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 5342-5348, 2015.
- [80] J. Väisänen, A. Kosonen, J. Ahola, T. Sallinen, T. Hannula, “Optimal sizing ration of a solar PV inverter for minimizing the levelized cost of electricity in Finnish irradiation conditions”, *Solar Energy*, vol. 185, pp. 350-362, 2019.
- [81] M. A. M. Khan, S. Rehman, F. A. Al-Sulaiman, “A hybrid renewable energy system as a potential energy source for water desalination using reverse osmosis: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 456-477, 2018.
- [82] M. A. Darwish, H. K. Abdulrahim, “Feed water arrangements in a multi-effect desalting system”, *Desalination*, vol. 228, no. 1-3, pp. 30-54, 2008.
- [83] M. A. Sharaf, A. S. Nafey, L. G. Rodriguez, “Exergy and thermo-economic analyses of a combined solar organic cycle with multi effect distillation (MED) desalination process”, *Desalination*, vol. 272, no. 1-3, pp.135-147, 2011.

- [84] M. Al-Shammiri, M. Safar, “Multi-effect distillation plants: state of the art”, *Desalination*, vol. 126, no. 1-3, pp. 45-59, 1999.
- [85] H. Sharon, K. S. Reddy, “A review of solar energy driven desalination technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1080-1180, 2015.
- [86] A. Alkaisi, R. Mossad, A. Sharifian-Barforoush, “A review of the water desalination systems integrated with renewable energy”, *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 268-274, 2017.
- [87] D. Zhao, J. Xue, S. Li, H. Sun, Q. Zhang, “Theoretical Analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity wastewater”, *Desalination*, vol. 273, no.2-3, pp. 292-298, 2011.
- [88] H. Manchanda, M. Kumar, “Study of water desalination techniques and a review on active solar distillation methods”, *Environmental progress & sustainable energy*, vol.37, no. 1, pp. 444-464, 2018.
- [89] A. H. Saadat, M. S. Islam, F. Parvin, A. Sultana, “Desalination Technologies for Developing Countries: A Review”, *Journal of Scientific Research*, vol. 10, no. 1, pp. 77-97, 2018
- [90] Κ. Συσκάκη, «Τεχνολογίες αφαλάτωσης νερού. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία μονάδων με αντίστροφη ώσμωση», Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας. ΤΕΙ Κρήτης, 2013.
- [91] R. Dev, G. Tiwari, “Solar Distillation”, In: Ray C., Jain R. (eds) “Drinking Water Treatment. Strategies for Sustainability”, Springer, Dordrecht, pp. 159-209, 2011.
- [92] M. W. Shahzad, K. C. Ng, K. Thu, B. B. Saha, “Multi effect desalination and adsorption desalination (MEDAD): A hybrid desalination method”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 72, no. 2, pp. 289-297, 2014.
- [93] M. Qasim, M. Badrelzaman, N. N. Darwish, N. A. Darwish, “Reverse Osmosis desalination: A state-of-the-art review”, *Desalination*, vol. 459, pp. 59-104, 2019.
- [94] <http://www.worldofchemicals.com/610/chemistry-articles/reverse-osmosis-water-treatment-process.html>

- [95] S. Burn, M. Hoang, D. Zarzo, F. Olewniak, E. Campos, B. Bolto, O. Barron, “Desalination techniques – A review of the opportunities for desalination in agriculture”, *Desalination*, vol. 364, pp. 2-16, 2015.
- [96] Y. Zhang, M. Sivakumar, S. Yang, K. Enever, M. Ramezaniapour, “Application of solar energy in water treatment processes: A review”, *Desalination*, vol. 428, pp. 116-145, 2018.
- [97] B. Van de Bruggen, “6 – Advances in electrodialysis for water treatment”, in “Advances in Membrane Technologies for Water Treatment - Materials, Processes and Applications”, Woodhead Publishing Series in Energy, pp 185-203, 2015.
- [98] A. Engelbrecht, “Computational Intelligence: An Introduction”, Wiley New York, 2007.
- [99] I. A. Korejo, “Adaptive Mutation Operators for Evolutionary Algorithms”, Doctoral Thesis, Department of Computer Science, University of Leicester, 2011.
- [100] B. S. S. S. Sathya, “A survey of bio inspired optimization algorithms”, *International journal of soft computing and engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 137-151, 2012.
- [101] E. Elbeltagi, T. Hegazy, D. Grierson, “Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 19, no. 1, pp. 43-53, 2005.
- [102] Π. Σ. Α. Γεωργιάκης, «Εφαρμογή Γενετικών Αλγορίθμων στην Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας», *Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ*, vol, 111, no. 1-2, pp. 41-50, 2004.
- [103] H. Yang, D. Kong, Z. Yang, Y. Yang, D. Dong, L. Zhang, "An improved particle swarm optimization algorithm" *Applied Mathematics and Computation*, vol. 193, no. 1, pp. 231-239, 2007.
- [104] X. S. Yang, “Optimization and Metaheuristic Algorithms in Engineering”, *Metaheuristic in Water, Geotechnical and Transport Engineering*, pp. 1-23, 2013.
- [105] A. Engelbrecht, “Computational Intelligence: An Introduction”, Wiley New York, 2007.
- [106] F. Zhou, Z. Liao, “A particle swarm optimization algorithm”, *Applied mechanics and materials*, vols. 303-306, pp. 1369-1372, 2013.
- [107] R. C. Eberhart, Y. Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 81-86, 2001.

- [108] <http://www.swarmintelligence.org/tutorials.php>
- [109] Y. Zhang, S. Wang, G. Ji, “A comprehensive survey on particle swarm optimization algorithm and its applications”, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, pp. 1-38, 2015.
- [110] W. Zhang, D. Ma, J. Wei, H. Liang, “A parameter selection strategy for particle swarm optimization based on particle positions”, *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 7, pp. 3576-3584, 2014.
- [111] Q. Bai, “Analysis of Particle Swarm Optimization Algorithm”, *Computer and Information Science*, Vol 3, No 1, pp. 180-184, 2010.
- [112] N. Priyadarshi, S. Padmanaban, P. K. Maroti, and A. Sharma, “An extensive practical investigation of FPSO-based MPPT for grid integrated PV system under variable operating conditions with anti-islanding protection,” *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1861–1871, Jun. 2019.
- [113] Y. Zhou and R. S. J. Tol, “Evaluating the costs of desalination and water transport”, *Water Resources Research*, vol. 41, no. 3, pp. 1–10, Mar. 2005.
- [114] E. Lorenzo, “Solar Electricity—Engineering of Photovoltaic Systems”, 1st ed. Sevilla, Spain, Progensa, 1994.
- [115] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis, and K. Kalaitzakis, “Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 9, pp. 1072–1088, 2006.
- [116] F. Blaabjerg and D. M. Ionel, “Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB and ANSYS”, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [117] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, and G. Stavrakakis, “Optimal design and economic evaluation of a battery energy storage system for the maximization of the energy generated by wind farms in isolated electric grids”, *Wind Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 55–81, 2009.
- [118] S. R. Ghatak, S. Sannigrahi, and P. Acharjee, “Comparative performance analysis of DG and DSTATCOM using improved PSO based on success rate for deregulated environment”, *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2791–2802, Sep. 2018.