

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας ΙΙ: Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Συστημάτων & Διεργασίων

Αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη υδατικών και ενεργειακών αναγκών

Εργασία υποβληθείσα για την απόκτηση διδακτορικού διπλώματος

Αβραάμ Καρταλίδης Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής ΕΜΠ Διονύσιος Ασημακόπουλος (Επιβλέπων Καθηγητής) Καθηγητής ΕΜΠ Ζαχαρίας Μαρούλης Αναπλ. Καθηγήτρια ΕΜΠ Μαγδαληνή Κροκίδα

> Αθήνα 2017

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Διονύση Ασημακόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον αντικείμενο της αφαλάτωσης και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και για την υλική και ηθική υποστήριξη όλα τα χρόνια που έχω την τιμή και την τύχη να ανήκω στην ερευνητική του ομάδα. Ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, την καθηγήτρια κ. Μάγδα Κροκίδα και τον καθηγητή κ. Ζαχαρία Μαρούλη για τις υποδείξεις τους.

Θέλω να ευχαριστήσω το Δρ. Γιώργο Αραμπατζή για την αμέριστη βοήθεια του στον προγραμματισμό και τη μοντελοποίηση αλλά και για τις διορθώσεις του στο τελικό κείμενο, ενώ τον ευχαριστώ για τον αναλυτικό τρόπο σκέψης που μου έχει περάσει κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το λέκτορα κ. Αθανάσιο Αγγελή-Δημάκη για τη βοήθεια του σε πολλά ζητήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της διατριβής και τον κ. Άγγελο Παναγιωτάκη για τη βοήθεια του στα θέματα του προγραμματισμού του υποστηρικτικού λογισμικού της διατριβής αλλά και για τα εισαγωγικά σεμινάρια της Visual Basic που μου παρέδωσε στο ξεκίνημά της. Ευχαριστώ από καρδιάς όλες και όλους όσοι έχουν περάσει από τη Μονάδα Ενεργειακών και Περιβαλλοντικών Συστημάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κατά την περίοδο εκπόνησης της διατριβής καθώς όχι μόνο ανέχτηκαν τις παραξενιές μου αλλά ο καθένας με τον τρόπο του με βοήθησε. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον παλιά ο καθηγητή Δρ. Νικόλαο Μπορμπιλά για τη συνολική του θετική επίδραση από τα μαθητικά μου χρόνια.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει και εξακολουθούν να μου προσφέρουν καθώς και την Μαριάνθη για την υπομονή της.

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής είναι ο σχεδιασμός αυτόνομων, υβριδικών συστημάτων παραγωγής ισχύος, για τη συνδυασμένη κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας και νερού με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές) και ενέργεια από συμβατικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος με καύσιμο πετρέλαιο. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος που ενσωματώνει δύο τεχνολογίες ΑΠΕ με ταυτόχρονη αποθήκευση, και ταυτόχρονα προσφέρει ενέργεια για την κάλυψη δύο διαφορετικών αναγκών, αποτελεί σχεδιαστική πρόκληση, η οποία, στα πλαίσια της διατριβής, αντιμετωπίζεται με τη χρήση κανόνων σχεδιασμού και προτεραιοτήτων κάλυψης των επιμέρους αναγκών.

Στόχος της διατριβής είναι η ανάπτυξη της κατάλληλης μεθοδολογίας που θα επιτρέπει τον καθορισμό των βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων των επιμέρους συστημάτων και της αξιολόγησής τους, με βάση τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Η μεθοδολογία υλοποιείται μέσω κατάλληλου λογισμικού υποστήριξης απόφασης (Decision Support System), το οποίο είναι εύχρηστο και λειτουργικό, και παρέχει γρήγορα αποτελέσματα.

Η μεθοδολογία επιλογής του κατάλληλου συστήματος αποτελείται από 7 βήματα:

Στο πρώτο βήμα πραγματοποιείται προκαταρκτικός σχεδιασμός, δηλαδή ο υπολογισμός των βασικών μεγεθών των ενεργειακών υποσυστημάτων χρησιμοποιώντας μέσες μηνιαίες τιμές για τα μετεωρολογικά δεδομένα και σταθερά φορτία ζήτησης νερού και ενέργειας. Υπολογίζονται η ισχύς των φωτοβολταϊκών και των αιολικών υποσυστημάτων, η χωρητικότητα του συσσωρευτή και η ισχύς του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Επειδή το ενεργειακό φορτίο σε ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να καλυφθεί με πολλούς δυνατούς συνδυασμούς της ισχύος των υποσυστημάτων, εισάγονται απαιτήσεις σχετικά με το ποσοστό κάλυψης των αναγκών από κάθε υποσύστημα. Η μεταβολή των απαιτήσεων οδηγεί σε διαφορετικές τιμές εγκατεστημένης ισχύος για κάθε ενεργειακό υποσύστημα.

οποία αξιολογούνται στα επόμενα βήματα.

- Στο δεύτερο βήμα πραγματοποιείται ανάλυση βιωσιμότητας των προτεινόμενων συστημάτων του πρώτου βήματος. Εκτιμώνται τα βασικά ενεργειακά μεγέθη σε ετήσια βάση, όπως η ενέργεια που αποδόθηκε από ΑΠΕ, η ποσότητα ενέργειας που θα πρέπει παραχθεί από τη βοηθητική συμβατική μονάδα κ.λπ.
- Στο τρίτο βήμα πραγματοποιείται εκτίμηση των επιδόσεων των συστημάτων που προέκυψαν στο πρώτο βήμα με ωριαία προσομοίωση, διάρκειας ενός έτους, αλλά λαμβάνονται υπόψη και κανόνες ενεργειακής διαχείρισης. Όμοια συστήματα αλλά με διαφορετικούς κανόνες ενεργειακής διαχείρισης έχουν άλλη συμπεριφορά και έτσι αντιμετωπίζονται ως διαφορετικές περιπτώσεις. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται λεπτομερή μοντέλα για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και το συσσωρευτή ενώ για την ανεμογεννήτρια και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές τους καμπύλες. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ, η κατανάλωση συμβατικού καυσίμου, το κόστος παραγωγής ενέργειας και νερού, οι ώρες λειτουργίας της συμβατικής μονάδας, η χρήση του συσσωρευτή, οι ισοδύναμες εκπομπές ρύπων και άλλα, συντίθενται για τον υπολογισμό 14 δεικτών αξιολόγησης.
- Στο τέταρτο βήμα πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για τα συστήματα που έχουν προκύψει από το πρώτο και το τρίτο βήμα. Εξετάζεται η επίδραση στους δείκτες αξιολόγησης: της μεταβολής του δυναμικού ΑΠΕ (ταχύτητα ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας), του φορτίου (ζήτηση νερού και ενέργειας), της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των ανεμογεννητριών, της τιμής του καυσίμου και του μεγέθους του συσσωρευτή. Ανάλογα με τα αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν και νέα, ελαφρώς διαφοροποιημένα προτεινόμενα συστήματα όπου η ανάλυση ευαισθησίας καταδεικνύει καλύτερες επιδόσεις ως προς κάποιους δείκτες αξιολόγησης, π.χ. χαμηλότερο κόστος νερού για σύστημα με συσσωρευτή μεγαλύτερης χωρητικότητας.
- Στο πέμπτο βήμα πραγματοποιείται ανάλυση επικινδυνότητας για τα προτεινόμενα συστήματα.
 Η ανάλυση επικινδυνότητας πραγματοποιείται με τη μέθοδο MONTE CARLO με παραμέτρους αβεβαιότητας την τιμή του καυσίμου, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την ταχύτητα του ανέμου, τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και τη ζήτηση νερού. Η επίδραση των αβέβαιων παραμέτρων φέτρων στους δείκτες αξιολόγησης παρουσιάζεται με τη χρήση διαγραμμάτων που δείχνουν την

κατανομή του κάθε δείκτη καθώς και τη μεταβλητότητα του.

- Στο έκτο βήμα πραγματοποιείται επισκόπηση των αποτελεσμάτων για την εύρεση των κυρίαρχων (dominant solutions) συστημάτων μεταξύ όλων των προτεινόμενων. Μπορεί να γίνει αποδοχή ή απόρριψη κάποιων εφ' όσον δεν πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια που θέτει ο σχεδιαστής, π.χ. κόστος εγκατάστασης ή κατανάλωση καυσίμου.
- Στο έβδομο βήμα γίνεται η τελική επιλογή του συστήματος, δηλαδή της εγκατεστημένης ισχύος κάθε υποσυστήματος παραγωγής ενέργειας, της χωρητικότητας του συσσωρευτή και της ενεργειακής διαχείρισης του συστήματος συνολικά. Η τελική επιλογή πραγματοποιείται με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης ως προς τους 14 δείκτες αξιολόγησης.

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση της διατριβής είναι σαφές πως δεν υπάρχει μια κοινά αποδεκτή μέθοδος σχεδιασμού και αξιολόγησης υβριδικών συστημάτων με ΑΠΕ για τη συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας και νερού, παρόλο που έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές πιλοτικές εφαρμογές. Οι διάφορες σχεδιαστικές προσεγγίσεις έχουν κυρίως ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους του νερού και χρησιμοποιούν μαθηματικό προγραμματισμό και άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη, πρωτότυπη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στη διατριβή, επιτρέπει την εξέταση πολλαπλών παραμέτρων και την αξιολόγηση της επίδρασης αυτών στους επιμέρους δείκτες. Ανάλογα με την περίπτωση, ο σχεδιαστής της μονάδας μπορεί να αξιολογήσει μεμονωμένα κάθε σύστημα (π.χ. ελαχιστοποίηση χρήσης συμβατικής μονάδας) ή συνολικά, με βάση τις προτεραιότητες που θέτει μέσα από τα βάρη της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Αναμφίβολα, το οικονομικό κριτήριο αποτελεί σημαντικό κριτήριο προς βελτιστοποίηση, αλλά χρειάζεται συνεκτίμηση και άλλων περιβαλλοντικών και τεχνικών δεικτών, οι οποίοι επιτυχώς ενσωματώνονται στην προσέγγιση της διατριβής. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε υπερέχει έναντι των άλλων καθώς: (α) μπορεί να δώσει σαφή αποτελέσματα από το πρώτο βήμα της διαστασιολόγησης, με σημαντική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας μόνο μηνιαία δεδομένα, (β) υπάρχει εποπτεία των αποτελεσμάτων σε κάθε βήμα, (γ) καθιστά δυνατή την εξέταση και αξιολόγηση της επίδρασης αβέβαιων μεταβλητών, (δ) υπολογίζει τόσο ενεργειακά μεγέθη όσο και λειτουργικά χαρακτηριστικά, (ε) μπορεί, μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας, να εξετάσει την επίδραση διάφορων κατασκευαστικών και μετεωρολογικών παραμέτρων, και (στ) μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης καθιστά δυνατή τη σύγκριση και αξιολόγηση ανόμοιων δεικτών που δεν μπορούν να αξιολογηθούν με οικονομικά και μόνο κριτήρια.

Η μεθοδολογία της διατριβής εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό συστήματος για την κάλυψη των αναγκών

νερού μιας απομονωμένης κοινότητας 60 ατόμων στην Τυνησία (μέση ημερήσια κατανάλωση νερού $24 \,\mathrm{m}^3$ και εξωτερική ισχύς $4 \,\mathrm{kW}$). Το νερό που αφαλατώνεται είναι υφάλμυρο και η ζήτηση καθαρού νερού και η ζήτηση ενέργειας θεωρήθηκαν σταθερές ως προς τον χρόνο. Θεωρήθηκε ότι το νερό που παράγεται χρησιμοποιείται όλο την επόμενη μέρα. Όλα τα συστήματα που επιλέχθηκαν είναι εμπορικά διαθέσιμα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση μπορούν να βρεθούν στα εμπορικά φυλλάδια τους. Η μονάδα αφαλάτωσης έχει επιλεχθεί να δουλεύει σε 24ώρη βάση, δηλαδή έχει τόση δυναμικότητα όση απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που επιλέχθηκε είναι μονοκρυσταλλικό, ισχύος $185 \,\mathrm{Wp}$ ενώ η ανεμογεννήτρια είναι οριζοντίου άξονα, ονομαστικής ισχύος $15 \,\mathrm{kW}$. Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος χρησιμοποιεί ως καύσιμο πετρέλαιο Diesel, έχει ισχύ $16.3 \,\mathrm{kWe}$ και οι συσσωρευτές είναι μολύβδου-οξέως. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμογής, εκτιμήθηκε ως καλύτερο ένα σύστημα το οποίο αποτελείται μια ανεμογεννήτρια τρια και $136 \,\mathrm{φωτοβολτα}$ ϊκά πλαίσια $25 \,\mathrm{kWp}$ ενώ η συστοιχία των συσσωρευτών πρέπει να έχει χωρητικότητα $181 \,\mathrm{kWh}$.

Abstract

The subject of this PhD thesis is the design of autonomous, hybrid systems that produce power for the simultaneous cover of electrical energy and water with the use of Renewable Energy Sources (RES) and desalination with Reverse Osmosis (RO). More specific, the renewable technologies of photovoltaics and wind turbines are used, with battery array as an energy storage and with conventional diesel genset as a backup/auxiliary system. The design of a system that combines two different RES technologies with storage and simultaneous cover two different needs, is a technical challenge in which, within this thesis, is overcome by the use of design rules and energy dispatch priorities.

Objective of this PhD thesis is the development of the appropriate methodology that will specify the basic design parameters of the various subsystems and it allow their evaluation. The methodology is applied with the use of a custom decision support software developed for the purposes of this thesis, in order to be easy to use and to export results with minimum effort and in short time. The methodology for the selection of the appropriate system is composed by 7 steps:

- In the *first step* the calculation of the basic parameters for the energy subsystem takes place with the use of mean monthly values for meteorological data and steady demand for water and energy loads. The installed power of the photovoltaics and of the wind turbines are calculated and the capacity of the battery and the power of the genset as well. Due to the fact that the load in a hybrid systems can be covered with many different combinations of the installed power for the energy subsystems, specific demands loads from each technology are required as a percentage and in this way the size of each component is calculated. The alternation of these requirements gives different installed power from each energy subsystem. In this step, 10 alternative systems are created and evaluated in the next steps.
- In the *second step* a preliminary viability analysis is calculated for the 10 alternative systems from the first step. The basic energy figures are estimated such as the energy delivered to the load

from RES, the energy production from the auxiliary unit etc.

- In the *third step* the systems are evaluate with the use of hourly simulation but taking into account different energy management rules. Identical systems but with different energy management rules have different behavior and thus, they treaded as different cases for evaluation. For the simulation, detailed models for the photovoltaics and battery behavior are used and characteristics curves for the wind turbine and diesel genset. Simulation results, such as the demand and consumption of RES energy, the fuel consumption and the duration of operation for genset, the cost of energy and water, the battery usage, the equivalent emissions and others, are synthesized in order to produce 14 indicators of evaluation.
- In the *fourth step* sensitivity analysis is carried out for the cases/systems created in the first and third step. By changing the values of the RES potential (wind speed and solar radiation), the load (water and energy demand), the installed power (wind turbine and photovoltaics), the fuel cost and the battery array size. According to the sensitivity results, the sizing values can be altered in order to achieve better performance in certain performance indicators (eg, lower water cost for system with larger capacity battery array).
- In the *fifth step* risk analysis is applied to the proposed cases. The risk analysis is carried out with the MONTE CARLO method, with uncertainty parameters the fuel price, the mean solar radiation, mean annual wind speed, water demand and energy demand. The influence of the parameters with uncertainty to the evaluation indicators are presented with the use of bar charts that they present their distribution and its variability.
- In the *sixth step* PARETO analysis is carried out for the identification if dominant solutions within the proposed cases. In this step, some cases can be accepted or rejected, according to their performance in specific evaluation indicators such as the installation cost or the fuel consumption.
- In the *seventh step* the final case selection is made. The installed power of each subsystem, the battery array size and the energy management system. The final choice is made with the help of Multi-Criteria Analysis (MCA) as to the 14 evaluation indicators.

From literature review, it was clear that there is no a common methodology in the design and evaluation of hybrid RES systems for covering water and energy sources, although many pilot plans have been installed. Various design methodologies are targeting to the minimization of water and energy cost and

they use mathematical programming or other optimization methods to achieve this. This, innovative methodology that was creating in this thesis, allows the examination of many design parameters and their effect to the evaluation indicators. According to each specific problem, the system designer can evaluate the systems by using one indicator (e.g. minimize the hours of operation of the backup unit) or for all the 14 indicators with the assignments of weights through the MCA method.

With no doubt, the economic indicators are most important indicator to optimize, but the designer need to take into account other indicators as well such as the environment and social indicators indicators. The methodology that was developed, transcendent the general optimization methods in the following: (a) it can give clear results even from the first step, with good accuracy, (b) there is supervision of the results in every step (c) it can evaluate the uncertainty parameters, (d) it can calculate energy and operational figures, (e) through the sensitivity analysis the influence of certain design and meteorological parameters can be examined, and (f) through the MCA analysis is feasible the comparison among dissimilar indicators that cannot be evaluate in economic terms.

The methodology was applied in the design of a system with water and energy needs for a small and isolate community of 60 inhabitants in Tunis (daily water consumption is 24 m^3 and external power needs 4 kW). The desalination feed water is brackish and both water and energy consumption were assumed steady over time. All subsystems that were chosen for this case study are commercially available and their specific characteristics can derive from their leaflets or manuals. Desalination unit has daily capacity $24 \text{ m}^3/\text{day}$ and thus is operate continuously in order to cover the demand. The photovoltaic module has power of 185 kWp and the wind turbine has nominal power of 15 kW. The genset use diesel as fuel and has nominal power of 16.3 kWe and the system use lead-acid battery. For the specific case study, the best system that was selected is composed from 136 photovoltaic modules (25 kWp), 1 wind turbine and the battery arrays has a total capacity of 181 kWh.

Περιεχόμενα

1	Εισα	φωγή		31
	1.1	Αντικε	ίμενο της διατριβής	31
	1.2	Το πρό	βλημα παροχής ενέργειας και νερού	34
		1.2.1	Υβριδικά ενεργειακά συστήματα	34
		1.2.2	Συστήματα αφαλάτωσης	36
		1.2.3	Υβριδικά συστήματα ΑΠΕ με αφαλάτωση	39
		1.2.4	Συμπαραγωγή ενέργειας και νερού	40
		1.2.5	Αλγόριθμοι και λογισμικά προσομοίωσης και σχεδιασμού	42
		1.2.6	Δείκτες ενεργειακών συστημάτων	43
	1.3	Εισαγυ	υγή στην αντίστροφη ώσμωση	44
	1.4	Η ελλη	νική εμπειρία της αφαλάτωσης	47
		1.4.1	Ιστορική αναδρομή	49
		1.4.2	Παρούσα κατάσταση	53
		1.4.3	Ενέργεια για νερό στην Ελλάδα	57
		1.4.4	Συμπεράσματα	59
2	Μον	τελοπο	ίηση συστρυάτων	63
-	2 1	Mours		63
	2.1	2 1 1		03
		2.1.1	Ανεμογεννητριες	00
		2.1.2	Φωτοβολταϊκά	68
		2.1.3	Ηλεκτρικοί συσσωρευτές	72
		2.1.4	Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος	81
		2.1.5	Μονάδες αφαλάτωσης	82
		2.1.6	Αντιστροφέας	86

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	2.2	Δυναμ	ικό πόρων	87
		2.2.1	Αιολικό δυναμικό	87
		2.2.2	Ηλιακό δυναμικό	89
3	Μεθ	οδολογ	ικό πλαίσιο	91
	3.1	Διαστα	ασιολόγηση	94
		3.1.1	Μεθοδολογία διαστασιολόγησης	97
		3.1.2	Αλγόριθμοι διαστασιολόγησης	101
	3.2	Προσο	μοίωση	107
		3.2.1	Προσομοίωση αυτόνομου συστήματος	107
		3.2.2	Κανόνες λειτουργίας	112
	3.3	Ανάλυ	ση ευαισθησίας	115
	3.4	Ανάλυ	ση επικινδυνότητας	116
	3.5	Επισκό	όπηση	118
		3.5.1	Ανάλυση Trade-off	118
		3.5.2	Ανάλυση διαδρομής	118
		3.5.3	Ισοβαρής κατάταξη	119
	3.6	Αξιολό	γηση εναλλακτικών προτάσεων	119
	3.7	Οικονο	ρμική ανάλυση	121
		3.7.1	Κόστος εγκατάστασης	121
		3.7.2	Κόστος λειτουργίας	122
		3.7.3	Κόστος συντήρησης	123
		3.7.4	Κόστος ενέργειας και νερού	124
	3.8	Υπολον	γισμός αερίων του θερμοκηπίου	125
4	Περι	ιγραφή	περίπτωσης εφαρμογής	127
	4.1	Περιοχ	(ή εγκατάστασης	127
	4.2	Ζήτησι	η ενέργειας και νερού	127
	4.3	Συστήι	ματα ισχύος	128
		4.3.1	Ανεμογεννήτρια	128
		4.3.2	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	129
		4.3.3	Ηλεκτρικός Συσσωρευτής	130

		4.3.4	Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος	132
	4.4	Μονάδ	δα αφαλάτωσης	133
	4.5	Άλλα κ	όστη και παραδοχές	133
	4.6	Δυναμ	ικό πόρων	134
		4.6.1	Αιολικό δυναμικό	134
		4.6.2	Ηλιακό δυναμικό	134
		4.6.3	Θερμοκρασία	134
5	Αποτ	τελέσμο	ιτα περίπτωσης εφαρμογής	137
	5.1	Βιωσιμ	ιότητα και προκαταρκτικός σχεδιασμός	137
	5.2	Επιδός	εις συστημάτων	138
		5.2.1	1° Σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (EnerSc1)	141
		5.2.2	2° Σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (EnerSc2)	142
		5.2.3	3° Σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (EnerSc3)	146
	5.3	Ανάλυ	ση ευαισθησίας σεναρίων	146
		5.3.1	Σενάριο μόνο με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (DGOnly)	146
		5.3.2	Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου EnerSc1 HiRes 75PV/25WEC	148
	5.4	Ανάλυ	ση επικινδυνότητας	151
	5.5	Επισκό	πηση	151
		5.5.1	Ανάλυση διαδρομής	151
		5.5.2	Ανάλυση Trade-off	152
		5.5.3	Ισοβαρής κατάταξη	156
	5.6	Πολυκ	οιτηριακή ανάλυση και επιλογή συστήματος	156
	5.7	Επίδρο	αση συμπαραγωγής ενέργειας και νερού	159
6	Συμπ	τεράσμα	ατα	161
По	ιράρτι	ημα Π.1	Υλοποίηση λογισμικού	165
	ПП.1	Κεντρι	κό περιβάλλον εργασίας	165
		ПП.1.1	Διαχειριστής σεναρίων	166
		ПП.1.2	Βάση δεδομένων	167
	ПП.2	Διαστο	ασιολόγηση	170
	ПП.3	Προσο	μοίωση	173

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΠΠ.4 Ανάλυση ευαισθησίας	174
	ΠΠ.5 Ανάλυση επικινδυνότητας	175
	ΠΠ.6 Επισκόπηση	175
	ΠΠ.7 Πολυκριτηριακή ανάλυση	179
Г	Ιαράρτημα Π.2 Υπολογισμοί ηλιακών δεδομένων	181
Г	Ιαράρτημα Π.2 Υπολογισμοί ηλιακών δεδομένων ΠΠ.8 Υπολογισμός ωρών ανατολής και δύσης Ηλίου	181 181
Г	Ιαράρτημα Π.2 Υπολογισμοί ηλιακών δεδομένων ΠΠ.8 Υπολογισμός ωρών ανατολής και δύσης Ηλίου	181 181 182
Г	Ιαράρτημα Π.2 Υπολογισμοί ηλιακών δεδομένων ΠΠ.8 Υπολογισμός ωρών ανατολής και δύσης Ηλίου	181 181 182 182

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Σχηματική παράσταση των δυνατών συνδυασμών αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πη-	
	γές ενέργειας	38
1.2	Σχηματική παράσταση ενός ηλεκτρικού υβριδικού συστήματος με αιολική ενέργεια,	
	φωτοβολταϊκά, συμβατικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος και αποθήκευση ενέργειας.	40
1.3	Σχηματική αναπαράσταση μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης	46
1.4	Η μονάδα ηλιακής απόσταξης της Σύμης [49]	48
1.5	Ο συμπιεστής της πρώτης αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης που εγκαταστάθηκε	
	στη Σύρο το 1987 [52]	49
1.6	Μέρος της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης που εγκαταστάθηκε στην Κίμωλο [29].	50
1.7	Η συστοιχία των συσσωρευτών στο αυτόνομο σύστημα της Θηρασιάς [55]	51
1.8	Η πλωτή μονάδα αφαλάτωσης στην Ηρακλειά	51
1.9	Η αυτόνομη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης με ΑΠΕ στη νήσο Στρογγύλη	52
1.10	Οι αφαλατώσεις για δημόσια ύδρευση στα ελληνικά νησιά μαζί με τις αντίστοιχες	
	δυναμικότητες σε κυβικά μέτρα ανά ημέρα.	53
1.11	Ο ρυθμός εγκαταστάσεων των αφαλατώσεων για δημόσια ύδρευση στα ελληνικά	
	νησιά	54
1.12	Η ειδική ενέργεια αφαλάτωσης σε 7 ελληνικές μονάδες	55
1.13	Η κατανομή των μονάδων αφαλάτωσης στη Σύρο	56
1.14	Η μέση μηνιαία διακύμανση της ζήτησης νερού και της ενεργειακής κατανάλωσης	
	στη Σύρο (2010-2013)	56
1.15	Η μέση μηνιαία διακύμανση της ειδικής ενέργειας αφαλάτωσης στην Ερμούπολη	
	για το σύνολο των μονάδων.	57

1.16	Βασικοί δείκτες ενεργειακής κατανάλωσης για παραγωγή, διανομή και επεξεργασία	
	νερού σε τρία τυπικά συστήματα	59
2.1	Σκαρίφημα του υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας και νερού που θα μο-	
	ντελοποιηθεί	64
2.2	Καμπύλες ισχύος ανεμογεννητριών με και χωρίς έλεγχο βήματος	67
2.3	Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού κελιού	69
2.4	Ποιοτική απεικόνιση των χαρακτηριστικών καμπυλών ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.	70
2.5	Ροή νερού διαμέσου μεμβράνης	82
2.6	Η ροή του νερού σε σχέση με την υδροστατική πίεση δια μέσου της μεμβράνης	83
2.7	Προσέγγιση ημερήσιας κατανομής ταχύτητας ανέμου κατά το στάδιο της διαστα-	
	σιολόγησης	88
2.8	Προσέγγιση ημερήσιας κατανομής ηλιακής ακτινοβολίας κατά στάδιο της διαστα-	
	σιολόγησης	89
3.1	Η σχέση των υπολογιστικών εργασιών και των βημάτων λήψης απόφασης	93
3.2	Η διαδικασία της διαστασιολόγησης σχηματικά	96
3.3	Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος	102
3.4	Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης του αιολικού συστήματος	102
3.5	Περιγραφική κατανομή της διαθέσιμης ανανεώσιμης ισχύος και η σχέση του με τη	
	ζήτηση	103
3.6	Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης της χωρητικότητας του συσσωρευτή για συγκεκρι-	
	μένο μήνα σχεδιασμού	105
3.7	Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ενέργειας από το βοηθητικό σύστημα για την τυπική	
	ημέρα κάθε μήνα (i)	106
3.8	Η διαδικασία της προσομοίωσης σχηματικά	108
3.9	Ροές ενέργειας από το σύστημα στο συσσωρευτή και από το συσσωρευτή στο σύ-	
	στημα	109
3.10	Κατανομές πυκνότητας πιθανότητας που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση επικιν-	
	δυνότητας	117
3.11	Μορφή αποτελεσμάτων ανάλυσης επικινδυνότητας, ανά δείκτη	117
3.12	Ανάλυση Trade-off	118

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

3.13	Ανάλυση διαδρομής.	119
3.14	Τελική κατάταξη συστημάτων.	121
4.1	Η χαρακτηριστική καμπύλη της Α/Γ Proven 15	129
4.2	Н А/Г Proven 15	130
4.3	Καμπύλες εκφόρτισης του συσσωρευτή που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.	132
4.4	Η ειδική κατανάλωση της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης σε σχέση με την αλατό-	
	τητα του νερού τροφοδοσίας	133
5.1	Παράσταση του τρόπου που προκύπτουν τα εναλλακτικά σενάρια κατά την διαστα-	
	σιολόγηση	138
5.2	Σύγκριση ενεργειακών δεικτών ανάμεσα στην εκτίμηση κατά την διαστασιολόγηση	
	και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης	141
5.3	Σύγκριση σεναρίων ενεργειακής διαχείρισης.	142
5.4	Σύγκριση σεναρίων ενεργειακής διαχείρισης.	148
5.5	Ανάλυση ευαισθησίας για την εύρεση της τιμής καυσίμου που κάνει ανταγωνιστική	
	τη χρήση ΑΠΕ	148
5.6	Ανάλυση ευαισθησίας των δεικτών του κόστους του νερού και της κατανάλωσης	
	συμβατικού καυσίμου ως προς τη μεταβολή της χωρητικότητας των συσσωρευτών.	149
5.7	Ανάλυση ευαισθησίας των δεικτών της κατανάλωσης συμβατικού καυσίμου και του	
	κόστους του νερού ως προς τη μεταβολή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου.	150
5.8	Ανάλυση ευαισθησίας των δεικτών του κόστους νερού και των εκπομπών αερίων	
	του θερμοκηπίου με τν μεταβολή του αριθμού των Φ/Β πλαισίων	150
5.9	Κατανομές μεγεθών κόστους που προέκυψαν μετά από ανάλυση επικινδυνότητας.	152
5.10	Ανάλυση διαδρομής εναλλακτικών σεναρίων.	152
5.11	Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στο χρόνο λειτουργίας και τους ημερήσιους κύκλους	
	του Η/Ζ	153
5.12	Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στους δείκτες του κόστους εγκατάστασης και του κό-	
	στους νερού	154
5.13	Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στο χρόνο λειτουργίας του Η/Ζ και στις ισοδύναμες	
	εκπομπές ρύπων	155

5.14	Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στο λόγο της ανανεώσιμης ενέργεια που αποδίδεται /	
	ενέργεια που ζητείται και την ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / ανανεώσιμη	
	ενέργεια που συλλέγεται	155
5.15	Η κατάταξη των εναλλακτικών συστημάτων που προέκυψε μετά την πολυκριτηριακή	
	ανάλυση σύμφωνα με το 8ο σενάριο αξιολόγησης	159
П.1.1	Το κεντρικό περιβάλλον εργασίας του λογισμικού	166
П.1.2	Διαχείριση των σεναρίων σχεδιασμού.	166
П.1.3	Η εισαγωγή των διάφορων περιοχών και των μέσων μηνιαίων τιμών τους	168
П.1.4	Η φόρμα εισαγωγής χρονοσειρών στη βάση	168
П.1.5	Οι διαθέσιμες επιλογές για εισαγωγή δεδομένων στη βάση	169
П.1.6	Εισαγωγή δεδομένων στη βάση με τις Α/Γ	169
П.1.7	Η κεντρική οθόνη του εργαλείου της διαστασιολόγησης	171
П.1.8	Φόρμα επιλογή των υποσυστημάτων.	171
П.1.9	Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης.	172
П.1.10	Η κεντρική εικόνα της προσομοίωσης, με τον καθορισμό των διαφόρων παραμέτρων	.174
П.1.11	Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.	175
П.1.12	Η ανάλυση ευαισθησίας.	176
П.1.13	Εισαγωγή των δεδομένων για την ανάλυση επικινδυνότητας	176
П.1.14	Αποτελέσματα ανάλυσης επικινδυνότητας	177
П.1.15	Συγκριτικός πίνακας δεικτών αξιολόγησης	178
П.1.16	Ανάλυση trade-off	178
П.1.17	Ανάλυση διαδρομής.	178
П.1.18	Το εργαλείο της ισοβαρούς κατάταξης.	179
П.1.19	Η οθόνη απόδοσης βαρών στου δείκτες αξιολόγησης	179
П.1.20	Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης.	180

Κατάλογος πινάκων

1.1	Τυπικές τιμές λόγου ισχύος-νερού συμπαραγωγής συμβατικών θερμικών συστημάτων	
	νερού και ενέργειας.	42
1.2	Κατηγοριοποίηση νερού με βάση τα συνολικά διαλυμένα στερεά	45
1.3	Τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις συστημάτων ύδρευσης για την Ελλάδα	58
3.1	Διαδικασία/Βήματα λήψης απόφασης για την επιλογή ενός υβριδικού συστήματος .	91
3.2	Σύνοψη σκοπού και αποτελεσμάτων των υπολογιστικών εργαλείων	95
3.3	Περιγραφή δεικτών αξιολόγησης.	113
3.4	Παράμετροι ευαισθησίας.	116
3.5	Συγκεντρωτικός πίνακας σχετικά με τα κόστη της εγκατάστασης των συστημάτων πα-	
	ραγωγής και την αποθήκευσης ενέργειας	122
4.1	Τα εμπορικά συστήματα που επιλέχθηκαν.	128
4.2	Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας.	131
4.3	Ανεμολογικά δεδομένα στην περιοχή εγκατάστασης	134
4.4	Μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης	135
4.5	Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή εγκατάστασης και για τη βέλτιστη κλίση και	
	μέση μηνιαία θερμοκρασία.	135
5.1	Τα αποτελέσματα σχεδιασμού για το μήνα με πλούσιο δυναμικό (HiRes)	139
5.2	Τα αποτέλεσματα σχεδιασμού για το μήνα με φτωχό δυναμικό (LowRes)	140
5.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc1-HiRes	143
5.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc1-LowRes	144
5.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc2 (Μόνο δείκτες)	145
5.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc3-HiRes	147

5.7	Ο πίνακας των μεταβλητών αβεβαιότητας με τις παραμέτρους τους	151
5.8	Ισοβαρής κατάταξη των τριών εναλλακτικών συστημάτων	156
5.9	Τα βάρη ανά δείκτη αξιολόγησης και ανά κατηγορία για το 8ο σενάριο αξιολόγησης.	158
5.10	Τα αποτελέσματα των 8 σεναρίων αξιολόγησης.	158
5.11	Αποτελέσματα σχεδιασμού των περιπτώσεων που το σύστημα παράγει μόνο νερό και	
	μόνο ενέργεια σε σύγκριση με το όμοιο σύστημα που παράγει και 2 αγαθά	160
5.12	Αποτελέσματα προσομοίωσης των περιπτώσεων που το σύστημα παράγει μόνο νερό	
	και μόνο ενέργεια σε σύγκριση με το όμοιο σύστημα που παράγει και 2 αγαθά	160
П 15	Τιμές του συντελεστή ανάκλασης για διάφορα είδη επιφάνειας	18/
11.13	They too ooverleading warmany fur oragona conference and a second conference of a second content of the second	104

Κατάλογος συμβόλων

Συντομογραφίες

BC	Κελί συσσωρευτή
BT	Ηλεκτρικός συσσωρευτής65
H/Z - DG	Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος64
MPPT	Ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος69
NOCT	Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/Β πλαισίου
STC	Πρότυπες συνθήκες δοκιμής Φ/Β πλαισίων70
A/Г- WEC	Ανεμογεννήτριες / Αιολικό υποσύστημα64
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας31
Ф/В - РV	Φωτοβολταϊκά / Φωτοβολταϊκό υποσύστημα64
Μεταβλητές	
α	Απορροφητικότητα φωτοβολταϊκού πλαισίου
α_{λ}	Συντελεστής απωλειών Φ/Β πλαισίου ηλιακού φάσματος
α_{BOS}	Ποσοστό κόστους κατασκευής ως προς το κόστος αγοράς του εξοπλισμού 122
α_{BT}	Ετήσιος ρυθμός αντικατάστασης συσσωρευτών
α_{dirt}	Συντελεστής απωλειών Φ/Β πλαισίου λόγω σκόνης
α_{em}	Μεταβλητή απόφασης για τη συμμετοχή της κάθε τεχνολογίας ΑΠΕ στο ενεργειακό
	μείγμα

α_{memb}	Ετήσιος ρυθμός αντικατάστασης μεμβρανών	124
α_z	Συντελεστής διάχυσης ανέμου	. 88
$\bar{\eta}_{PV_{sys}}$	Μέσος βαθμός απόδοσης Φ/Β συστήματος	. 72
Δt	Διάρκεια χρονικού βήματος της προσομοίωσης	. 65
δ	Ηλιακή απόκλιση	181
δ_V	Ημερήσιος συντελεστής διακύμανσης ανέμου	. 88
η_{ch}	Βαθμός απόδοσης φόρτισης συσσωρευτή	. 77
η_{dch}	Βαθμός απόδοσης εκφόρτισης συσσωρευτή	. 77
η_{el}	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης Α/Γ	. 66
$\eta_{inv_{PV}}$	Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα Φ/Β	. 72
$\eta_{inv_{WEC}}$	Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα Α/Γ	. 68
η_{mech}	Μηχανικός βαθμός απόδοσης Α/Γ	. 66
$\eta_{PV_{sys}}$	Στιγμιαίος βαθμός απόδοσης Φ/Β συστήματος	. 72
η_{PV}	Στιγμιαίος βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου	. 69
η_{STC}	Βαθμός απόδοσης Φ/Β σε πρότυπες συνθήκες STC	. 70
η_{wake}	Απώλειες ομόρου αιολικού πάρκου	. 68
λ	Μήκος κύματος ηλιακής ακτινοβολίας	. 69
λ_V	Λόγος γραμμικής ταχύτητας ακροπτερυγίου προς ταχύτητα ανέμου	. 66
μ_P	Θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος Φ/Β πλαισίου	. 70
μ_{VOC}	Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτοκύκλωσης Φ/Β πλαισίου	. 70
ω_s	Ωριαία γωνία	181
π	Ωσμωτική πίεση	. 82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$ ho_{air}$	Πυκνότητα αέρα	66
$ ho_{DSL}$	Πυκνότητα καυσίμου	122
τ	Διαπερατότητα καλύμματος Φ/Β πλαισίου	71
A_{PV}	Επιφάνεια Φ/Β πλαισίου	70
A_R	Επιφάνεια σάρωσης Α/Γ	66
A_{sys}	Συνολική επιφάνεια Φ/Β συστήματος	72
AHC	Χωρητικότητα συσσωρευτή σε αμπερώρια	75
AST	Φαινόμενος ηλιακός χρόνος	182
С	Λόγος διαθέσιμου φορτίου μοντέλου KiBaM	78
C_{∞}	Χωρητικότητα κελιού συσσωρευτή με πολύ μικρή ταχύτητα εκφόρτισης	75
c_p	Συντελεστής ισχύος Α/Γ	66
E_1	Διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια στο συσσωρευτή κάθε στιγμή	79
E_2	Δεσμευμένη ηλεκτρική ενέργεια στο συσσωρευτή κάθε στιγμή	79
E_{aux}	Ενέργεια που πρέπει να δοθεί από βοηθητική πηγή ενέργειας	111
E_{BTi}	Ενεργειακό περιεχόμενο συσσωρευτή	76
E_{BT}	Ενέργεια που αποδίδει ή προσλαμβάνει ο συσσωρευτής	65
E_{chloss}	Ενεργειακές απώλειες συσσωρευτών κατά τη φόρτιση	110
E_c	Σταθερές ηλεκτρικές ανάγκες μονάδας αφαλάτωσης	84
$E_{d_{an}}$	Ετήσια ενέργεια που ζητείται	111
$E_{dchloss}$	Ενεργειακές απώλειες συσσωρευτών κατά την εκφόρτιση	110
E_{delan}	Ετήσια ενέργεια που αποδίδεται στη ζήτηση	111
E_{DG}	Ενέργεια που αποδίδεται από ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος	65

E_{dlv}	Ενέργεια που αποδίδεται άμεσα στη ζήτηση σε κάθε βήμα της προσομοίωσης 108
E_{DUMP}	Ενέργεια που απορρίπτεται
E_d	Ζήτηση ενέργειας σε κάθε βήμα της προσομοίωσης
$E_{FBT_{an}}$	Ετήσια που αποδίδεται στη ζήτηση από τον συσσωρευτή
E_f	Ενέργεια ενέργεια που πρέπει να δοθεί από το συσσωρευτή ή από κάποια άλλη πηγή σε κάθε βήμα της προσομοίωσης
E_{HP}	Ενεργειακή κατανάλωση αντλίας υψηλής πίεσης
$E_{PV_{sys}}$	Ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β σύστημα72
E_{PV}	Ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά64
$E_{RESdel_{an}}$	Ετήσια ενέργεια από ΑΠΕ που αποδίδεται στη ζήτηση
$E_{RESdel_{an}}$	Ετήσια ενέργεια από ΑΠΕ που συλλέγεται111
E_{RES}	Ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ
E_v	Μεταβλητές ενεργειακές ανάγκες αφαλάτωσης84
E_{WEC}	Ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτριες
E_{xs}	Ενέργεια που δεν αποδίδεται άμεσα στη ζήτηση ή περισσεύει σε κάθε βήμα της προ- σομοίωσης
EC_{BS}	Ενεργειακή χωρητικότητα μιας σειράς συσσωρευτών
EC_{BT}	Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτή
EM_{GHG}	Αέριοι ρύποι από κάθε τεχνολογία
EnergyCost	Κόστος ενέργειας
ET	Εξίσωση χρόνου
$f_{\rm CO_2}$	Συντελεστής εκπομπής ισοδύναμου άνθρακα
$f_{DSL_{\rm CO_2}}$	Συντελεστής εκπομπής Η/Ζ

G_{NOCT}	Ηλιακή ακτινοβολία συνθηκών NOCT	71
G_T	Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία	68
H_d	Διάχυτη ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία	183
i	Επιτόκιο αναγωγής	124
I_{mp}	Ένταση στη μέγιστη ισχύ Φ/Β πλαισίου	69
I_T	Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια	72
IC	Κόστος εγκατάστασης	121
IC_{EEQ}	Κόστος εγκατάστασης ενεργειακών υποσυστημάτων	121
IC_{RO}	Κόστος εγκατάστασης αφαλάτωσης	122
k	Σταθερά χρόνου μοντέλου KiBaM	
K_T	Μέσος συντελεστής αιθριότητας	183
$m_{fuel_{an}}$	Ετήσια κατανάλωση καυσίμου	112
MC	Κόστος συντήρησης	121
MC_E	Κόστος συντήρησης ενεργειακού συστήματος	123
n	Διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη	124
N_{BC}	Αριθμός κελιών συσσωρευτών σε σειρά	76
N_{BS}	Αριθμός παράλληλων σειρών συσσωρευτών	
N_{PV}	Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	
N_{tur}	Αριθμός ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου	68
OC	Κόστος λειτουργίας	121
OC_{CH}	Ετήσιο κόστος χημικών	123
OC_{DSL}	Ετήσιο κόστος καυσίμου	122

OC_E	Κόστος λειτουργίας ενεργειακού συστήματος	122
OC_{ROEN}	Κόστος παραγωγής ενέργειας	123
OC_{RO}	Κόστος λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης	122
OP_{DG}	Ώρες λειτουργίας Η/Ζ	124
P_{BS}	Ισχύς που αποδίδεται από / αποδίδει το υποσύστημα του συσσωρευτή	72
$P_{c,max}$	Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς φόρτισης συσσωρευτή	80
$P_{d,max}$	Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς εκφόρτισης συσσωρευτή	79
P_{DG}	Ισχύς που αποδίδεται στο σύστημα από το Η/Ζ	81
P_{mp}	Μέγιστη ισχύς Φ/Β πλαισίου	69
$P_{PV_{sys}}$	Ισχύς Φ/Β συστήματος	72
P_{PV_u}	Ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο	68
$P_{WEC_{sys}}$	Ισχύς αιολικού συστήματος	68
P_{WEC_u}	Ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια	66
PR	Λόγος απόδοσης μονάδας αφαλάτωσης	41
PWR	Λόγος ισχύος-νερού	41
Q	Διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο συσσωρευτή	73
q_0	Συνολικό ηλεκτρικό φορτίο συσσωρευτή στην αρχή του χρονικού βήματος	79
$q_{1,0}$	Διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο συσσωρευτή στην αρχή του χρονικού βήματος	79
q_1	Διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο κάθε στιγμή	78
$q_{2,0}$	Δεσμευμένο ηλεκτρικό φορτίο συσσωρευτή στην αρχή του χρονικού βήματος	79
q_2	Δεσμευμένο ηλεκτρικό φορτίο κάθε στιγμή	79
$q_{ m max}$	Μέγιστη χωρητικότητα συσσωρευτή κατά KiBaM	78

$q_{\max}(I)$	Μέγιστη χωρητικότητα συσσωρευτή για ένταση ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης		
	κατά KiBaM	78	
Q_{cap}	Ημερήσια δυναμικότητα μονάδας αφαλάτωσης	85	
$Q_{p_{an}}$	Ετήσιο παραγόμενο νερό		
R	Ετήσια πρόσοδος	124	
r	Συντελεστής ανάκλασης		
SEC	Ειδική κατανάλωση ενέργειας αφαλάτωσης		
SEC_{HP}	Ειδική ενεργειακή κατανάλωση αντλίας υψηλής πίεσης	84	
SOC	Κατάσταση φόρτισης συσσωρευτή	73	
$T_{\alpha NOCT}$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος συνθηκών NOCT $20{}^{\circ}\mathrm{C}\ldots\ldots\ldots$	71	
T_c	Θερμοκρασία επιφάνειας Φ/Β πλαισίου	69	
T_{NOCT}	Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας Φ/Β πλαισίου	71	
t_s	Χρόνος δύσης του ήλιου	182	
TDS	Αλατότητα νερού	127	
U_{BC}	Τάση λειτουργίας κελιού συσσωρευτή	75	
U_{BS}	Τάση λειτουργίας υποσυστήματος συσσωρευτών	76	
U_L	Συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών	71	
U_{mp}	Τάση στη μέγιστη ισχύ Φ/Β πλαισίου	69	
UC	Κόστος εγκατάστασης μιας στοιχειώδους ενεργειακής μονάδας	121	
UC_{CH}	Κόστος χημικών για το σύνολο της διεργασίας αφαλάτωσης ανά μονάδα νερού	παραγόμενου	
UC_{MEMB}	Κόστος αγοράς μεμβρανών		
$V_{cut_{in}}$	Ταχύτητα ανέμου έναρξης λειτουργίας Α/Γ	66	

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$V_{cut_{out}}$	Ταχύτητα ανέμου αποκοπής Α/Γ	66
V_{ref}	Ταχύτητα αναφοράς ανέμου	88
V_R	Ταχύτητα ανέμου ονομαστικής ισχύος Α/Γ	66
V_z	Ταχύτητα ανέμου στο ύψος κεφαλής της Α/Γ	66
WaterCost	Κόστος νερού	124
z	Ύψος ανεμογεννήτριας	88
z_{ref}	Ύψος αναφοράς ταχύτητας ανέμου	88

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας που επιτρέπει το σχεδιασμό συστημάτων που καλύπτουν ταυτόχρονα ενεργειακές και υδατικές ανάγκες με τη χρήση υβριδικών συστημάτων *ανανεώσιμων πηγών ενέργειας* (ΑΠΕ) με βιώσιμο τρόμο. Οι ενεργειακές ανάγκες αφορούν την κάλυψη αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας ενώ οι υδατικές την κάλυψη πόσιμου νερού με τη χρήση αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Ο σχεδιασμός των συστημάτων πραγματοποιείται σε διακριτές φάσεις με κύριες (α) τη διαστασιολόγηση, (β) την προσομοίωση και (γ) την αξιολόγηση. Σε κάθε φάση λαμβάνονται υπόψη κανόνες που αφορούν την κάλυψη των αναγκών και την ενεργειακή διαχείριση. Καθώς αυτοί οι κανόνες μεταβάλλονται, δημιουργούν εναλλακτικά σενάρια σχεδιασμού τα οποία και αξιολογούνται κατά την τελική φάση στη βάση δεικτών.

Το νερό και η ενέργεια αποτελούν τους βασικούς πόρους διατήρησης της ζωής ενώ η αφθονία τους είναι σημάδι οικονομικής ανάπτυξης και ευημερίας, όμως δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Συνδέονται στενά, με πολύπλοκο τρόπο και πολλές φορές η σχέση τους αναφέρεται και ως *δεσμός* ενέργειας και νερού. Η παραγωγή νερού απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας (διύλιση, άντληση, αφαλάτωση κτλ) ενώ από την άλλη πλευρά η παραγωγή ενέργειας απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού (ψύξη θερμοηλεκτρικών σταθμών, διυλιστήρια, υδροηλεκτρικά εργοστάσια, κτλ). Η ανάλυση του δεσμού ενέργειας και νερού απαιτεί γνώση για την ανάλυση όλων των σταδίων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας και νερού, του τρόπου που συνδέονται μεταξύ τους και του τρόπου λειτουργίας της κάθε συσκευής που συμμετέχει στις διεργασίες αυτές [1, 2]. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να έχουν ένα σημαντικό ρόλο στο δεσμό ενέργειας-νερού, αφού με σωστό σχεδιασμό και κατάλληλες μεθόδους λειτουργίας μπορούν να καλύψουν μεγάλο ποσοστό και των δύο αναγκών οι οποίες, πολλές φορές, είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους. Σε ένα αυτόνομο και απομονωμένο σύστημα η σχέση ενέργειας-νερού γίνεται ακόμα πιο έντονη καθώς η έλλειψη ενός από τους δύο πόρους, επηρεάζει σημαντικά και τον άλλο.

Σε κάθε στάδιο στην αλυσίδα τροφοδοσίας του νερού είναι σημαντικό να γίνεται καταγραφή των διάφορων ενεργειακών αναγκών καθώς και του τρόπου που μεταβάλλονται μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα οι καταναλώσεις, αφού ο δεσμός είναι δυναμικός και όχι στατικός. Παρόλα αυτά υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης με τη χρήση συμβατικών τεχνολογιών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και με τη χρήση ΑΠΕ [3].

Η ενεργειακή ένταση της αλυσίδας τροφοδοσίας του νερού, παρουσιάζει και σημαντική περιοδική διακύμανση και από την πλευρά της διαθεσιμότητας, αλλά και από την πλευρά του καταναλωτή αφού με τις ανάγκες και τη συμπεριφορά του καθορίζει την ενεργειακή ζήτηση. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή ασκεί πιέσεις στη διαθεσιμότητα του νερού με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση για την κάλυψη των ίδιων αναγκών. Σύμφωνα με διάφορες μελέτες ως το 2035 αναμένεται αύξηση 35% στην ενεργειακή κατανάλωση που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση 85% στην κατανάλωση του νερού [4].

Σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους, η κάλυψη των αναγκών πραγματοποιείται με τρεις βασικούς τρόπους: 1) με τη μεταφορά νερού από περιοχές με πλούσια υδατικά αποθέματα, 2) με την εντατική χρήση των υπαρχόντων πόρων (π.χ. γεώτρηση σε μεγαλύτερο βάθος) και 3) με εναλλακτικές μεθόδους όπως η αφαλάτωση και η επαναχρησιμοποίηση. Και οι τρεις μέθοδοι έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης για την παραγωγή νερού, οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερο κόστος, είτε για τους καταναλωτές είτε για τις κυβερνήσεις που επιδοτούν την προμήθεια του νερού στα πλαίσια κοινωνικών πολιτικών. Έτσι, οποιαδήποτε βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων επεξεργασίας νερού μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον αλλά και για τους καταναλωτές ή τις κυβερνήσεις.

Όλες οι μέθοδοι σχεδιασμού υβριδικών συστημάτων βασίζονται σε διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης (π.χ. γραμμικός προγραμματισμός) με καθαρά οικονομικά κριτήρια και σπανιότερα ενεργειακά κριτήρια. Η μεθοδολογία σχεδιασμού που προτείνεται στην παρούσα διατριβή ξεκινάει από μια απλή μέθοδο διαστασιολόγησης με λίγα δεδομένα και αφού έχουν δημιουργηθεί ικανές λύσεις με βάση λογικούς κανόνες περνάει στην λεπτομερή προσομοίωση του ενεργειακού συστήματος. Ο σχεδιαστής μπορεί να θέσει δικούς του κανόνες ενεργειακής διαχείρισης και να δει τις επιπτώσεις που θα έχουν

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

στα ενεργειακά μεγέθη. Ακόμα, μπορεί εξετάσει τις επιπτώσεις που θα έχουν σημαντικοί ενεργειακοί, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί δείκτες (Δείκτες απόδοσης) μεταβάλλοντας ορισμένες από τις σχεδιαστικές παραμέτρους. Σε δεύτερη φάση μπορεί να εξετάσει με τη χρήση ανάλυσης επικινδυνότητας την κατανομή των δεικτών απόδοσης και έτσι να απορρίψει, να δεχτεί ή να μεταβάλλει κάποια συστήματα (σχεδιασμός και κανόνες ενεργειακής διαχείρισης). Τέλος, με τη βοήθεια πολυκριτηριακής ανάλυσης ο σχεδιαστής ενός υβριδικού συστήματος για κάλυψη αναγκών ενέργειας και νερού μπορεί να δηλώσει τις προτιμήσεις του στους διάφορους δείκτες με τη χρήση κατάλληλων βαρών και έτσι να επιλεχθεί η καλύτερη λύση.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου η βέλτιστη οικονομικά λύση δεν είναι η επιθυμητή. Ένα σύστημα που καλύπτει ανάγκες ενέργειας και νερού σε μια αυτόνομη οικία πρέπει να είναι αθόρυβο και άρα θα πρέπει να μη λειτουργούν πολλές ώρες οι μηχανές συμβατικής ενέργειας. Άρα ένα σενάριο ενεργειακής διαχείρισής όπου οι μηχανές φορτίζουν τους συσσωρευτές, είναι αρκετά επιθυμητό. Μια απομονωμένη οικία ή ένα νησί δεν έχει δυνατότητα συχνής τροφοδοσίας συμβατικού καυσίμου. Άρα θα πρέπει η εκμετάλλευση των ΑΠΕ να μεγιστοποιείται ή να αποθηκεύεται νερό υπεριαδιαστασιολογόντας τις υπομονάδες του συστήματος.

Στην εισαγωγή της διατριβής γίνεται περιγραφή του προβλήματος παροχής ενέργειας και νερού, περιγράφεται συνοπτικά η τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης ενώ τέλος περιγράφεται η εμπειρία στις άνυδρες περιοχές της Ελλάδας και συγκεκριμένα στα άνυδρα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτά τα νησιά, η αφαλάτωση προσφέρει την καλύτερη εναλλακτική για την κάλυψη των αναγκών για δημόσια ύδρευση, αν και αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες λύσεις. Το νησί της Σύρου, βρίσκεται στο κέντρο των Κυκλάδων και θα αποτελέσει μια μικρή μελέτη περίπτωσης για να φανεί ο δεσμός ανάμεσα στην παραγωγή νερού από αφαλάτωση και στην ενεργειακή κατανάλωση και έτσι να γίνει κατανοητή η ανάγκη για μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και η αύξηση της απόδοσης. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των υποσυστημάτων νερού και ενέργειας καθώς και του δυναμικού των πόρων που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε για το σχεδιασμό, την προσομοίωση και την αξιολόγηση των συστημάτων. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα δεδομένα μιας περίπτωση εφαρμογής για ένα πραγματικό σύστημα που εγκαταστάθηκε κοντά στην Τύνιδα της Τυνησίας ενώ στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

1.2 Το πρόβλημα παροχής ενέργειας και νερού

Πολλές φορές, η εγκατάσταση ή η επέκταση δικτύων που παρέχουν ενέργεια (π.χ. ηλεκτρική) καθώς και δικτύων νερού δεν είναι οικονομικά βιώσιμη ή τεχνολογικά εφικτή οπότε θα πρέπει να γίνει παραγωγή αυτών των αγαθών σε *τοπικό επίπεδο*. Με τον όρο *τοπικό επίπεδο* μπορεί να γίνεται αναφορά σε μια απομονωμένη κατοικία, μια απομονωμένη κοινότητα ή ένα νησί.

Η απομακρυσμένη παραγωγή ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικά συστήματα (ορυκτού καυσίμου), ΑΠΕ ή συνδυασμού των δύο (*Υβριδικά συστήματα*). Το ορυκτό καύσιμο δεν θα μπορούσε να παραχθεί τοπικά στην περίπτωση ενός μικρού απομονωμένου συστήματος, όμως μπορεί να γίνει μεταφορά του όπως συμβαίνει στα νησιά και τις οικίες.

Η ζήτηση νερού μπορεί να καλυφθεί από μονάδες αφαλάτωσης, υπόγεια αποθέματα (γεωτρήσεις, πηγές) και επιφανειακά αποθέματα (λίμνες, φράγματα ή μέσω συλλογής βρόχινου νερού). Η λύση της αφαλάτωσης αποτελεί την ασφαλέστερη επιλογή όταν οι άλλες πηγές δεν επαρκούν ή δεν παρέχουν καλής ποιότητας νερό.

Στη συνέχεια, θα γίνει περιγραφή των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων, των συστημάτων αφαλάτωσης και τέλος της συμπαραγωγής ενέργειας και νερού.

1.2.1 Υβριδικά ενεργειακά συστήματα

Ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα παράγει ενέργεια από περισσότερες από μια πηγές χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες ενώ η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές μορφές. Ως πηγές θεωρούνται ο άνεμος, ο ήλιος, η γεωθερμία, τα ορυκτά καύσιμα κτλ, ενώ ως τεχνολογίες συμπεριλαμβάνονται οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα ηλιακά θερμικά συστήματα, οι αντλίες θερμότητας, οι μηχανές εσωτερικής καύσης κτλ. Οι τεχνολογίες αυτές σε ένα υβριδικό σύστημα αποτελούν τα *ενεργειακά υποσυστήματα*.

Οι πολλές δυνατές κατασκευαστικές επιλογές καθιστούν τα υβριδικά συστήματα στην πράξη, σύνθετες δομές διαφορετικών ενεργειακών υποσυστημάτων όπου το καθένα έχει διαφορετική πηγή ενέργειας, προσφέροντας ασφάλεια από διακυμάνσεις διαθεσιμότητας του πόρου αλλά και του κόστους. Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνουν πολλά υποσυστήματα αποτελούν την ασφαλέστερη επιλογή για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών [5]. Ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα μπορεί να περιέχει τα παρακάτω υποσυστήματα:

• Φωτοβολταϊκά

1.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ

- Αιολικά
- Καυστήρες βιομάζας
- Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας
- Θερμικά ηλιακά (Ηλιακοί συλλέκτες και συγκεντρωτικά συστήματα)
- Παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης με φυσικό αέριο ή πετρέλαιο
- Αεροστρόβιλοι με φυσικό αέριο ή πετρέλαιο

Η παραγωγή ενέργειας (προς χρήση) από ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα ή ακόμα και υδρογόνο επιτρέποντας στο σχεδιαστή αλλά και το λειτουργό του συστήματος πολλές επιλογές. Στη βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί πολλές μορφές υβριδικών συστημάτων όπως [6]:

- Φωτοβολταϊκά, αιολικά και παραγωγή βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρισμού και υδρογόνου [7]
- Πετρέλαιο και αιολικά για παραγωγή ηλεκτρισμού και υδρογόνου [8]
- Σύστημα παραγωγής βιοαερίου και αιολικά για παραγωγή ηλεκτρισμού και υδρογόνου [9, 10]
- Αεριοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου για παραγωγή ηλεκτρισμού και υδρογόνου [11]
- Συμπαραγωγή νερού και ηλεκτρισμού από υβριδικό σύστημα

Τα συστήματα όπου η κύρια παραγόμενη μορφή ενέργειας είναι ο ηλεκτρισμός, ονομάζονται *ηλεκτρικά υβριδικά συστήματα* και συνήθως περιλαμβάνουν μια συμβατική και τουλάχιστον μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (π.χ. μια μηχανή εσωτερική καύσης και μια ανεμογεννήτρια) ενώ μπορεί να περιλαμβάνεται και αποθήκευση ενέργειας με ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες) [12] ή να γίνεται αποθήκευση νερού σε μεγάλο ύψος και να χρησιμοποιείται, στη συνέχεια, με στρόβιλο κατά την υδατόπτωση (αντλησιοταμίευση). Το σύστημα αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας και την αποδίδει όταν υπάρχει έλλειμμα. Αντί για συσσωρευτές (ή και συμπληρωματικά) μπορεί, να υπάρχει κάποιο εξωτερικό δίκτυο (σε σχέση πάντα με το σύστημα αναφοράς) όπου ενέργεια πωλείται, αγοράζεται ή συμψηφίζεται. Τα ηλεκτρικά υβριδικά συστήματα πρέπει να έχουν προσεγμένη διαστασιολόγηση, δηλαδή να έχουν ικανή συμμετοχή ισχύος/ενέργειας της κάθε τεχνολογίας, έτσι ώστε να παρέχουν επαρκώς ισχύ στη ζήτηση, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια του κάθε πόρου που είναι διαθέσιμος στη κάθε περιοχή εγκατάστασης. Το βασικό πλεονέκτημα ενός ηλεκτρικού υβριδικού συστήματος με πολλές ανανεώσιμες πηγές είναι η απεξάρτηση από συγκεκριμένους πόρους, εξασφαλίζοντας έτσι αυτονομία και οικονομία καυσίμου.

1.2.2 Συστήματα αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση είναι μια διεργασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση άλατος από ένα υγρό. Όταν το υγρό είναι νερό, τότε η διαδικασία αυτή ονομάζεται αφαλάτωση νερού. Η αφαλάτωση διακρίνεται σε φυσική και τεχνητή. Η φυσική αφαλάτωση είναι μια συνεχής διεργασία και αποτελεί μέρος του κύκλου του νερού και πραγματοποιείται με την εξάτμιση του νερού λόγω της θερμότητας και της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και με τη διαδικασία της παγοποίησης στους πόλους της γης (π.χ. δημιουργία παγόβουνων). Η τεχνητή αφαλάτωση αποτελεί την προσπάθεια του ανθρώπου να αφαιρέσει τα άλατα από το νερό με τη βοήθεια ειδικών συσκευών, παρέχοντας ενέργεια για τη λειτουργία τους. Για να ληφθεί καθαρό νερό από το αλμυρό πρέπει να εφαρμοσθεί κάποια μέθοδος διαχωρισμού. Ιστορικά, οι πρώτες μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή φρέσκου νερού βασίστηκαν στη μέθοδο της εξάτμισης με την παροχή θερμότητας. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται ακόμα στις θερμικές μεθόδους. Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των σύγχρονων πολυμερών υλικών έχει οδηγήσει στην κατασκευή μεμβρανών που επιτρέπουν την επιλεκτική διέλευση νερού (ημιπερατές μεμβράνες) ή ιόντων (ιοντικές μεμβράνες) διαμέσου της επιφάνειάς τους, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αφαλάτωσης [13]. Οι θερμικές μέθοδοι και οι μέθοδοι με μεμβράνες είναι οι δύο μεγάλες κατηγορίες των μεθόδων αφαλάτωσης [14]. Οι βασικές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση είναι:

- Ηλεκτρική
- Θερμική
- Μηχανική (Πίεση)

Η κάθε μορφή ενέργειας χρησιμοποιείται με μια ή και περισσότερες τεχνολογίες αφαλάτωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που είναι εφαρμόσιμες για κάθε μορφή ενέργειας.
1.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ



όπου:

- RO Αντίστροφή ώσμωση (Reverse Osmosis)
- MVC Μηχανική συμπίεση ατμών (Mechanical Vapor Compression)
- MED Εξάτμιση με πολλαπλές βαθμίδες (Multiple Effect Distillation)
- ΤVC Θερμική συμπίεση ατμών (Thermal Vapor Compression)
- MSF Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση (Multi Stage Flash)
- ED Ηλεκτροδιάλυση (ElectroDialysis)

Σε αντίστοιχους πίνακες κατάταξης των μονάδων αφαλάτωσης με βάση τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια, η αντίστροφή ώσμωση ανήκει στις μονάδες που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια, πράγμα που είναι αληθές, αφού οι αντλίες χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό ρεύμα, όμως, η τελική ενέργεια για την πραγματοποίηση της αφαλάτωσης είναι η μηχανική.

Συνδυάζοντας τις μορφές ενέργειας με τις πηγές ενέργειας από ΑΠΕ μπορεί να δημιουργηθεί ένα δένδρο με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς (Εικόνα 1.1) [15]. Στη βιβλιογραφία έχουν μελετηθεί εκτενώς οι περισσότεροι συνδυασμοί, ενώ πολλές λύσεις έχουν εφαρμοστεί σε πιλοτικά αλλά και εμπορικά συστήματα [16, 17]. Επιγραμματικά αναφέρονται:

- Αντίστροφη ώσμωση με φωτοβολταϊκά [18–26]
- Αντίστροφη ώσμωση με κάτοπτρο STIRLING [21, 26]
- Αντίστροφη ώσμωση με θερμική ενέργεια από ηλιακά κάτοπτρα [21, 26, 27]
- Αντίστροφη ώσμωση με ανεμογεννήτρια [14]
- Μηχανική συμπίεση ατμών με ανεμογεννήτρια [14]



Εικόνα 1.1: Σχηματική παράσταση των δυνατών συνδυασμών αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

- Ηλεκτροδιάλυση με ανεμογεννήτρια [14]
- Πολυβάθμια εκρηκτική εξάτμιση με γεωθερμία [28, 29]
- Εξάτμιση πολλαπλών βαθμίδων (χαμηλής θερμοκρασίας) με συγκεντρωτικά κάτοπτρα [30]
- Αντίστροφη ώσμωση με συγκεντρωτικά κάτοπτρα (κύκλο rankine) μέσω ηλεκτρισμού [30] ή στον άξονα [31]
- Αφαλάτωση μεμβρανών με ηλιοθερμικούς συλλέκτες [32]
- Ηλιακή απόσταξη με ηλιακή καμινάδα [33]

Όταν εξετάζονται πολλές διαφορετικές λύσεις αφαλάτωσης με ΑΠΕ για μια συγκεκριμένη περίπτωση θα πρέπει η τελική απόφαση να λαμβάνεται με βάση την τεχνολογική ωριμότητα των τεχνολογιών, το τελικό κόστος νερού, τη διαθεσιμότητα στην τεχνική υποστήριξη καθώς και την απλότητα της λειτουργίας και της συντήρησης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της περιοχής (όπως ποιότητα νερού και δυναμικό ανανεώσιμου πόρου) [16].

Ο Kalogirou [17] κάνει μια εκτενή αναφορά σε μεγάλο αριθμό πιλοτικών συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ με βάση την πρωταρχική ενεργειακή πηγή, δηλαδή ηλιακά θερμικά, ηλιακά φωτοβολταϊκά, αιολικά, υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών με αιολικά και τέλος σε γεωθερμικά συστήματα. Αναφέρεται στο σημαντικό πλεονέκτημα που έχουν τα υβριδικά συστήματα (φωτοβολταϊκά και αιολικά) να αλληλοκαλύπτονται στην παραγωγή ενέργειας και νερού, καθώς όταν δεν έχει ήλιο η ένταση του

1.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ

ανέμου είναι ισχυρότερη και το αντίστροφο. Οι Mathioulakis et al. [28] αναφέρουν πως θα πρέπει να γίνεται προσομοίωση με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα για την παραγωγή νερού και ενέργειας για να αξιολογηθεί η επίπτωση της χρονικής διαφοράς στην ένταση των πόρων και κατά πόσο ένα υβριδικό αιολικό-φωτοβολταϊκό σύστημα είναι βιώσιμο. Οι Karagiannis & Soldatos [34] αναφέρουν γενικά πως τα υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης αυξάνουν την παραγωγικότητα και μειώνουν το κόστος νερού ενώ επισημαίνουν πως εκτός από δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας, η απαιτούμενη ποσότητα νερού από αφαλάτωση μπορεί να παράγεται με δύο μεθόδους (π.χ. MSF & RO).

1.2.3 Υβριδικά συστήματα ΑΠΕ με αφαλάτωση

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ΑΠΕ έχουν απασχολήσει ερευνητικά την επιστημονική κοινότητα σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο αρκετά χρόνια με μια πληθώρα συνδυασμών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, αποθήκευσης ενέργειας αλλά και τελικής χρήσης ενώ έχουν δοκιμαστεί και σε συστήματα αφαλάτωσης. Οι αναφορές στη βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- Εξέταση της οικονομικής βιωσιμότητας των υβριδικών συστημάτων αφαλάτωσης
- Εξέταση τεχνικών παραμέτρων όπως είναι η δυναμική συμπεριφορά και ο έλεγχος των συστημάτων
- Συμπεράσματα από πιλοτικά και υπάρχοντα συστήματα

Οι Kershman et al. [35, 36] εξετάζουν, για την περίπτωση της Λιβύης, πολλούς δυνατούς συνδυασμούς υβριδικών συστημάτων με αφαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης και εξετάζουν την οικονομική βιωσιμότητα σε σχέση με την περίπτωση κάλυψης των αναγκών από το δίκτυο αλλά και με μια συμβατική ηλεκτρογεννήτρια. Οι Kim et al. [37] μοντελοποιούν και ελέγχουν τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με υβριδικό σύστημα ΑΠΕ λαμβάνοντας υπόψη και θερμικό σταθμό. Ο Scrivani [38] εξετάζει τη λύση του υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών με ηλεκτρογεννήτρια και συσσωρευτές με ένα έξυπνο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου. Τέλος, οι Spyrou & Anagnostopoulos [39] εξετάζουν ένα σύστημα αφαλάτωσης με ΑΠΕ με χρήση αιολικών και φωτοβολταϊκών, αλλά ως αποθήκευση ενέργειας επιλέγουν την αντλησιοταμίευση.

Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται σχηματικά ένα ηλεκτρικό υβριδικό σύστημα όπου η παραγωγή ενέργειας πραγματοποιείται από αιολικά, φωτοβολταϊκά και μια συμβατική πηγή (ηλεκτροπαραγωγό ζεύ-



Εικόνα 1.2: Σχηματική παράσταση ενός ηλεκτρικού υβριδικού συστήματος με αιολική ενέργεια, φωτοβολταϊκά, συμβατικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος και αποθήκευση ενέργειας.

γος), η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει χωριστεί σε 2 επιμέρους ανάγκες (αφαλάτωση και κάλυψη αναγκών κατοικιών) και υπάρχει και συσσωρευτής για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2.4 Συμπαραγωγή ενέργειας και νερού

Η συμπαραγωγή ενέργειας και νερού από αφαλάτωση μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές κατηγορίες: Σε αυτές που χρησιμοποιούν ΑΠΕ ως κύρια πηγή ενέργειας και σε αυτές που χρησιμοποιούν μόνο συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Υπάρχουν πολλές δοκιμασμένες λύσεις συμβατικών συστημάτων που παρέχουν νερό από αφαλάτωση και ενέργεια (ηλεκτρική αλλά και θερμική) όπως [11]:

- Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης με αφαλάτωση MSF
- Ατμοστρόβιλος απομάστευσης με αφαλάτωση MSF
- Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας και ατμοποίηση με αφαλάτωση MSF
- Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας και συμπληρωματική καύση με αφαλάτωση MSF
- Συνδυασμένος κύκλος, ατμοστρόβιλου αντίθλιψης με αφαλάτωση MSF
- Συνδυασμένος κύκλος, ατμοστρόβιλου απομάστευσης με αφαλάτωση MSF

1.2. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΡΟΥ

Τα συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας και νερού με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε αυτόνομα συστήματα. Τα ηλεκτρικά υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης μπορούν να καλύψουν και τις 2 ανάγκες. Από όλες τις τεχνολογίες αφαλάτωσης που έχουν φτάσει σε επίπεδα τεχνολογικής ωριμότητας, η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση αποτελεί την πρώτη επιλογή σε όλες τις περιοχές εκτός από τις χώρες του Περσικού Κόλπου, οπού το κόστος του πετρελαίου είναι χαμηλό [40] και κάνει τις θερμικές μεθόδους συμφέρουσες. Το 62% των συστημάτων αφαλάτωση σης με ΑΠΕ, χρησιμοποιεί την αντίστροφη ώσμωση ως τεχνολογία αφαλάτωσης [28]. Η αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση εκτός ότι αποτελεί τη λύση με τη χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας για παραγωγή νερού, εξυπηρετεί καλύτερα τους σκοπούς ύδρευσης όταν:

- Υπάρχει διαθέσιμο αλμυρό ή υφάλμυρο νερό. Ειδικά στην περίπτωση του υφάλμυρου η κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά μικρή, ενώ με τις μεθόδους της απόσταξης η κατανάλωση ενέργειας είναι ανεξάρτητη της αλατότητας.
- Υπάρχει διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια ή μπορεί να παραχθεί. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να καλύψει και τις ενεργειακές ανάγκες των κατοίκων.
- Η κάλυψη αναγκών ύδρευσης είναι σε επίπεδο οικίας ή κοινότητας. Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης είναι μικρού μεγέθους, εγκαθιστώνται εύκολα και μπορούν να λειτουργήσουν αυτόματα σε μεγάλο ποσοστό.

Έτσι, η χρήση αντίστροφης ώσμωσης για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης, μεταφράζεται σε επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια, όμως μπορεί να μπει προτεραιότητα στην παραγωγή του ενός έναντι του άλλου αγαθού χωρίς να υπάρχει έλλειψη στη ζήτηση αφού, για παράδειγμα, μπορεί να γίνει σχετικά μακρόχρονη αποθήκευση νερού.

Δείκτης ισχύος - νερού

Ο δείκτης (ή λόγος) ισχύος-νερού (PWR) είναι μια σημαντική παράμετρος που χαρακτηρίζει τα θερμικά συστήματα συμπαραγωγής νερού και ενέργειας. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας (σε MW) προς την ποσότητα νερού που παράγεται την ημέρα (σε εκατομμύρια γαλόνια - MGD). Ανάλογα με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται αυτός ο λόγος διαφέρει σημαντικά. Τυπικά όρια για διάφορες τεχνολογίες παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1. Ο δείκτης PWR δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνολογία παραγωγής ισχύος αλλά και από το λόγο απόδοσης της μονάδας αφαλάτωσης (PR),

Τεχνολογία	Λόγος ισχύος - νερού
Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης και αφαλάτωση MSF	4-7
Ατμοστρόβιλος απομάστευσης/συμπύκνωσης	
και αφαλάτωση MSF	4-19
Συνδυασμένος κύκλος και αφαλάτωση MSF	
(Αεριοστρόβιλος και ατμοστρόβιλος unfired)	6-13
Συνδυασμένος κύκλος και αφαλάτωση MSF	
(Αεριοστρόβιλος και ατμοστρόβιλος αντίθλιψης)	9-18

Πίνακας 1.1: Τυπικές τιμές λόγου ισχύος-νερού συμπαραγωγής συμβατικών θερμικών συστημάτων νερού και ενέργειας.

δηλαδή του ποσοστού της μάζας του παραγόμενου νερού προς την μάζα του ατμού που δόθηκε. Όσο μικραίνει ο λόγος απόδοσης PR της μονάδας αφαλάτωσης, ο δείκτης PWR μεγαλώνει.

1.2.5 Αλγόριθμοι και λογισμικά προσομοίωσης και σχεδιασμού

Για το σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων με ΑΠΕ για κάλυψη αναγκών αφαλάτωσης έχουν εξεταστεί και προταθεί διάφορες μεθοδολογίες. Οι Mohamed και Papadakis [41] προτείνουν μια μηνιαία μέθοδο διαστασιολόγησης ενός υβριδικού με φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και συσσωρευτές. Αρχικά υπολογίζουν την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών βασιζόμενοι στην κάλυψη της μέγιστης ζήτησης ενέργειας της αφαλάτωσης υποθέτοντας συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας την ημέρα. Στη συνέχεια υποθέτουν μια μείωση στην εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών που καλύπτει τις ανάγκες 60 κατοίκων σε μια περιοχή στα Χανιά της Κρήτης.

Οι Manolakos et al. [42] ακολουθούν μια μέθοδο προσομοίωσης για ένα παρόμοιο σύστημα μόνο που αυτό έχει επιπλέον αποθήκευση ενέργειας και υδροδυναμική ενέργεια νερού ενώ καλύπτει και ανάγκες για ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και λαμβάνουν υπόψη πολλές τεχνικές λεπτομέρειες κατά την προσομοίωση, δεν προκύπτει κάποια μέθοδος διαστασιολόγησης. Η μέθοδος εφαρμόζεται για το χωριό της Μερσίνης στη Δονούσα όπου κατοικούν 7 οικογένειες τον χειμώνα, και 13 το καλοκαίρι. Οι Bourouni et al. [43] εφαρμόζουν μια μέθοδο σχεδιασμού μέσω προσομοίωσης που καταλήγει σε βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγορίθμους εξετάζοντας πέντε περιπτώσεις αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση: αιολικό με φωτοβολταϊκό και συσσωρευτή, αιολικό με και χωρίς συσσωρευτή και τέλος, φωτοβολταϊκό με και χωρίς συσσωρευτή. Στόχος του γενετικού αλγορίθμου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους στη διάρκεια ζωής του έργου. Η εφαρμογή πραγματοποιείται για το χωρίο Khar Ghilene στο νότο της Τυνησίας. Μια παρόμοια μέθοδο βελτιστοποίησης με γενετικούς αλγορίθμους ακολουθούν οι Koutroulis & Kolokotsa [44].

Εμπορικά ή επιστημονικά, διαθέσιμα εργαλεία για το σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ που να καλύπτουν ταυτόχρονα τις ανάγκες νερού και ενέργειας δεν υπάρχουν, όπως επισημαίνουν οι Bourouni et Al [43]. Γενικά, υπάρχουν λογισμικά που είτε σχεδιάζουν μονάδες αφαλάτωσης όπως το ROSA της DOW και το IMSDesign της Hydranautics και λογισμικά όπου προσομοιώνουν υβριδικά συστήματα, όπως το HOMER και παλαιότερα το Hybrid2. Οι Voivontas et al. [45] ανέπτυξαν ένα λογισμικό που σχεδιάζει μονάδες αφαλάτωσης με ΑΠΕ. Ο σχεδιαστής, επιλέγει μια από τις διαθέσιμες μεθόδους (αντίστροφη ώσμωση, συμπίεση ατμών ή ηλεκτροδιάλυση) και μια από τις διαθέσιμες τεχνολογίες ΑΠΕ (δηλαδή αιολικά ή φωτοβολταϊκά). Τελικά, ο χρήστης συγκρίνει τα διαφορετικά συστήματα που δημιούργησε στη βάση οικονομικών δεικτών όπως ο δείκτης αποδοτικότητας (Profitability Index).

Η βιβλιογραφική επισκόπησή έδειξε το μεγάλο ενδιαφέρον που υπάρχει στα υβριδικά συστήματα αφαλάτωσης για την κάλυψη νερού και ενέργειας αλλά από την άλλη δεν υπάρχει μια κοινά αποδεκτή μεθοδολογία σχεδιασμού και αξιολόγησης αυτών των συστημάτων καθώς και το αντίστοιχο υπολογιστικό εργαλείο.

1.2.6 Δείκτες ενεργειακών συστημάτων

Η μέτρηση της αειφορίας ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος αποτελεί το κριτήριο για την επιλογή και την υλοποίηση του. Η δημιουργία δεικτών που μετράνε την αειφορία είναι προαπαιτούμενο για την κατανόηση των διάφορων δράσεων, ενώ η ενημέρωση των φορέων που λαμβάνουν αποφάσεις (decision makers) για την ποιότητα των δράσεων καθώς και η διαρκής μέτρηση των επιπτώσεων στην κοινωνία και το περιβάλλον διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων. Η ανάπτυξη πολλών δεικτών και μετρητικών εργαλείων σε αυτό το αναπτυσσόμενο ερευνητικό πεδίο, δείχνει και τη σημασία που έχει η μεθοδολογία σχεδιασμού. Έτσι, για την αξιολόγηση της αειφορίας των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων, οι Afgan και Carvaho προτείνουν τη χρήση των παρακάτω δεικτών [6].

- 1. Οικονομικοί δείκτες
 - 1.1. Δείκτης απόδοσης
 - 1.2. Δείκτης ηλεκτρισμού

- 1.3. Δείκτης κόστους επένδυσης
- 2. Περιβαλλοντικοί δείκτες
 - 2.1. Δείκτης εκπομπής CO2
- 3. Κοινωνικοί δείκτες
 - 3.1. Δείκτης εκπομπής NO_x

Οικονομικοί δείκτες

Οι οικονομικοί δείκτες περιλαμβάνουν, το δείκτη απόδοσης, δηλαδή τη θερμοδυναμική απόδοση του συστήματος και όλους εκείνους τους δείκτες απόδοσης της μετατροπής ενέργειας από τον πόρο στην τελική ενέργεια χρήσης. Ο δείκτης ηλεκτρικής ενέργειας δίνει το κόστος ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ο δείκτης κόστους επένδυσης δείχνει την αξιοποίηση της επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος.

Περιβαλλοντικοί δείκτες

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες περιλαμβάνουν το δείκτη εκπομπής CO₂ και μετράται σε ποσότητα CO₂ που απελευθερώνονται στο περιβάλλον ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας. Με παρόμοιο τρόπο μπορούν να οριστούν και άλλοι περιβαλλοντικοί δείκτες.

Κοινωνικοί δείκτες

Οι κοινωνικοί δείκτες περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις που έχει η λειτουργία των υβριδικών συστημάτων στην κοινωνία και κυρίως στην υγεία. Έτσι ο βασικός κοινωνικός δείκτης είναι η ποσότητα των εκπομπών NO_x ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας. Στα συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας και νερού προτείνονται δείκτες αξιολόγησής που αφορούν την κάλυψη των αναγκών ενέργειας και νερού.

1.3 Εισαγωγή στην αντίστροφη ώσμωση

Η τεχνολογία αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση διαλυμένων στερεών και μεγάλων μορίων από το νερό. Οι τυπικές εφαρμογές της τεχνολογίας της αντίστροφης ώσμωσης περιλαμβάνουν: την παραγωγή πόσιμου νερού, την παραγωγή νερού για χρήση σε λέβητες, την παραγωγή

Κατηγορία	TDS ${ m mg/L}$
Πόσιμο νερό	<500
Φρέσκο νερό	<1500
Υφάλμυρο νερό	1500-5000
Αλμυρό νερό	>5000

Πίνακας 1.2: Κατηγοριοποίηση νερού με βάση τα συνολικά διαλυμένα στερεά

καθαρού νερού για τη βιομηχανία μικροηλεκτρονικής, την παραγωγή νερού για εργαστηριακές εφαρμογές και εφαρμογές βιοτεχνολογίας. Το μεγάλο εύρος των εφαρμογών, οδηγεί και σε μεγάλο εύρος δυναμικότητας με συστήματα διαθέσιμα στην αγορά από $0.1 \, \mathrm{m}^3/\mathrm{hr}$ έως πάνω από $2000 \, \mathrm{m}^3/\mathrm{hr}$. Για την περιγραφή συστημάτων αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται οι παρακάτω ορισμοί:

- Νερό τροφοδοσίας Το νερό το οποίο οδηγείται στη μονάδα αφαλάτωσης. Μπορεί να είναι αλμυρό ή υφάλμυρο. Η διάκριση της ποιότητας νερού πραγματοποιείται με βάση τη μάζα των διαλυμένων στερεών (Πίνακας 1.2).
- Καθαρό νερό Το νερό το οποίο έχει παραχθεί από τη μονάδα αφαλάτωσης και είναι καθαρό από αλάτι και άλλες ουσίες που υπήρχαν.
- Συμπύκνωμα Το νερό το οποίο έχει απορριφθεί από τη μονάδα αφαλάτωσης και περιέχει άλατα και όλες τις άλλες ουσίες.
- Συντελεστής ανάκτησης Ο λόγος του καθαρού νερού προς το νερό τροφοδοσίας.

Τα μέρη που απαρτίζουν ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης είναι (Εικόνα 1.3):

- Φίλτρα προεπεξεργασίας Χρησιμοποιούνται μετά την πρόσληψη του νερού τροφοδοσίας και πριν το νερό εισέλθει στη μονάδα αφαλάτωσης. Χρησιμοποιούνται πολλά φίλτρα με το καθένα να έχει διαφορετικό σκοπό. Τα συνηθέστερα είναι τα φίλτρα που συγκρατούν άμμο, λάσπη και άλλες ακαθαρσίες και τα φίλτρα άνθρακα που απομακρύνουν χλώριο και διάφορες οργανικές ουσίες.
- Στοιχεία μεμβρανών Οι μεμβράνες είναι η καρδιά του συστήματος αντίστροφης ώσμωσης. Εδώ γίνεται η απομάκρυνση των αλάτων και παράγεται το καθαρό νερό.
- Δοχεία πίεσης Το δοχείο πίεσης είναι ένα στεγανό κοίλο δοχείο εντός του οποίου τοποθετούνται τα στοιχεία των μεμβρανών. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται πρώτα στο δοχείο πίεσης και εν



Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση μιας μονάδας αντίστροφης ώσμωσης.

συνεχεία στη μεμβράνη. Η πίεση εντός είναι μεγάλη έτσι ώστε να μπορέσει να νικηθεί η ωσμωτική πίεση του νερού και να διέλθει διαμέσου της μεμβράνης.

- Αντλία υψηλής πίεσης Η αντλία απαιτείται ώστε να αυξήσει την πίεση εντός του δοχείου, να υπερνικηθεί η ωσμωτική πίεση, και να περάσει το νερό διαμέσου της μεμβράνης. Η συσκευή με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης είναι η αντλία υψηλής πίεσης. Υπάρχουν και άλλες αντλίες που οδηγούν το νερό στις δεξαμενές καθώς και δοσομετρικές αντλίες στα φίλτρα.
- Βάνες και βαλβίδες Οι βάνες απαιτούνται έτσι ώστε να ρυθμίζεται η ροή και η πίεση σε ένα σύστημα αντίστροφης ώσμωσης και να εξασφαλίζεται η σωστή και βέλτιστη λειτουργία του.
- Δεξαμενή αποθήκευσης Στη δεξαμενή αποθήκευσης αποθηκεύεται προσωρινά το καθαρό νερό προτού οδηγηθεί στη δεξαμενή διανομής του δικτύου ή μέχρι να οδηγηθεί προς χρήση εάν πρόκειται για μικρά συστήματα.
- Αποχέτευση Στην αποχέτευση (ή εξαγωγή) οδηγείται η άλμη μετά από επεξεργασία για την εξαγωγή των χημικών.

Μερικοί παράγοντες βελτιστοποίησης σε μια διεργασία αντίστροφης ώσμωσης είναι:

 Η προεπεξεργασία του νερού τροφοδοσίας Τα διαλυμένα και αιωρούμενα στερεά μπορούν να φιλτραριστούν κατά την πρόσληψη του νερού έτσι ώστε η μεμβράνη να λειτουργήσει πιο αποδοτικά και έτσι να ενισχυθεί όλη η διεργασία.

1.4. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

- Νέες τεχνολογίες μεμβρανών Οι νέες εμπορικές μεμβράνες αυξάνουν την ενεργό επιφάνεια και την περατότητα με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας και την αύξηση της απόδοσης του συστήματος.
- Ροϊκή συμπεριφορά Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης σχεδιάζονται έτσι ώστε να ανακυκλοφορούν μια ποσότητα νερού και να αυξάνεται ο συντελεστής ανάκτησης.

Γενικά, υπάρχουν αρκετές ευκαιρίες εξοικονόμησης, οι οποίες πραγματοποιούνται με την εφαρμογή των κανόνων βελτιστοποίησης μειώνοντας την ειδική ενέργεια, αυξάνοντας το συντελεστή ανάκτησης και ελαχιστοποιώντας τη συντήρηση των μεμβρανών και το κόστος αντικατάστασής τους. Τέλος, μειώνεται το κόστος επεξεργασίας του νερού που απορρίπτεται αφού μειώνεται η ποσότητά του.

Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης είναι συστήματα μεγάλης ενεργειακής έντασης, αλλά με τη βελτιστοποίηση των συστημάτων μπορεί να επιτευχθεί μικρότερη πίεση λειτουργίας με αποτέλεσμα την ελάττωση της ζητούμενης ενέργειας.

Η βελτιστοποίηση της προεπεξεργασίας βοηθάει στη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της μεμβράνης αλλά και της απόδοσής της και έτσι ελαττώνεται η συχνότητα καθαρισμού της [46].

1.4 Η ελληνική εμπειρία της αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση νερού αποτελεί διαδεδομένη πρακτική για την κάλυψη αναγκών νερού στα άνυδρα ελληνικά νησιά και σε παραλιακά μέρη. Η εφαρμογή της αφαλάτωσης, για δημόσια ύδρευση, ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και συνεχίστηκε με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς έως και τις αρχές του 2000 όπου οι τεχνολογικές εξελίξεις στις μονάδες αντίστροφης ώσμωσης κατέστησαν την αφαλάτωση βιώσιμη με οικονομικούς όρους.

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, που χρησιμοποιούνται σήμερα, αποτελεί βασικό παράγοντα στο κόστος του παραγόμενου νερού. Επιπλέον, η χρήση των μονάδων αφαλάτωσης πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο σε νησιά με αυτόνομο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής, όπου χρησιμοποιείται ως καύσιμο το πετρέλαιο με αποτέλεσμα το κόστος της ενέργειας να είναι αρκετά υψηλότερο από άλλες περιοχές με διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο [47, 48]. Η μεγάλη τουριστική κίνηση στα συγκεκριμένα νησιά δημιουργεί εκτεταμένες ανάγκες ενέργειας και νερού ενώ τελικά και η ζήτηση νερού μετατρέπεται σε ζήτηση ενέργειας είτε πρόκειται για ιδιωτικά έργα είτε για έργα δημόσιας χρήσης. Η εγκατάσταση μεγάλων μονάδων για την κάλυψη των αναγκών αιχμής του καλοκαιριού αυξάνουν το κόστος του νερού αφού ο συντελεστής χρήσης των μο-



Εικόνα 1.4: Η μονάδα ηλιακής απόσταξης της Σύμης [49].

νάδων, σε ετήσια βάση, είναι μικρός. Τα πλεονεκτήματα της κάλυψης των αναγκών νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ελληνικά νησιά, είχαν γίνει αντιληπτά από τη δεκαετία του 1960 με τις πρώτες μονάδες αφαλάτωσης ηλιακής απόσταξης μεγάλης συλλεκτικής επιφάνειας να εγκαθίστανται στα νησιά όπου υπάρχει σημαντικό πρό β λημα υδατικών πόρων όπως Σύμη ($2600 \, {
m m}^2$ επιφάνειας συλλέκτη, Εικόνα 1.4), Καστελόριζο ($2500 \, {
m m}^2$ επιφάνειας συλλέκτη), Κίμωλος ($2008 \, {
m m}^2$ επιφάνειας συλλέκτη), Αίγινα ($2600 \,\mathrm{m}^2$ επιφάνειας συλλέκτη) και Πάτμος ($7200 \,\mathrm{m}^2$ επιφάνειας συλλέκτη). Οι μονάδες αυτές εγκαταστάθηκαν από το 1964 έως το 1973 και είχαν ειδική παραγωγή νερού περίπου $3 \, \mathrm{L}$ ανά m^2 συλλέκτη και ημέρα. Αυτές οι πρώιμες μονάδες δυστυχώς είχαν αρκετά προβλήματα, λειτουργικά αλλά κυρίως συντήρησης, με αποτέλεσμα να εγκαταλειφθούν [50, 51] ενώ προκάλεσαν και αρκετά προβλήματα στο κατεστημένο των μεταφορέων νερού αφού οι αφαλατώσεις μείωναν σημαντικά τις απαιτούμενες ποσότητες μεταφοράς και άρα τα κέρδη των μεταφορέων. Από τότε, έγιναν πολλά βήματα σε τεχνολογικό, εμπορικό και κοινωνικό επίπεδο που οδήγησαν στην εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης με χρήση συμβατικής ενέργειας αλλά και μονάδων που χρησιμοποιούν ΑΠΕ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ελληνική εμπειρία από την εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης στα άνυδρα νησιά για δημοτική ύδρευση, περιγράφεται η παρούσα κατάσταση ενώ γίνεται και ανάλυση της περίπτωσης της νήσου Σύρου.



Εικόνα 1.5: Ο συμπιεστής της πρώτης αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης που εγκαταστάθηκε στη Σύρο το 1987 [52].

1.4.1 Ιστορική αναδρομή

Μονάδες αφαλάτωσης με συμβατική ενέργεια

To 1969-70 εγκαταστάθηκε στη Σύρο θερμική μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού τεχνολογίας πολυβάθμιας εκτόνωσης (MSF), δυναμικότητας $1200 \,\mathrm{m^3}$ η οποία λειτούργησε έως το 1984 παρόλα τα τεχνικά προβλήματα και το υψηλό κόστος του πετρελαίου [52]. Το 1978 εγκαταστάθηκε στην Κέρκυρα μονάδα ηλεκτροδιάλυσης υφάλμυρου νερού (EDR), έως $2000 \,\mathrm{ppm}$, δυναμικότητας $15,000 \,\mathrm{m^3}$ η οποία λειτούργησε για λίγα χρόνια [53] ενώ η ειδική κατανάλωσή της ήταν $1.7 \,\mathrm{kWh/m^3}$ [54]. Το 1981 ξεκίνησαν να εγκαθίστανται οι πρώτες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης (RO) στην Ελλάδα, πρώτα στην Ιθάκη και στη Μύκονο (με ειδική ενέργεια παραγόμενου νερού περίπου $15 \,\mathrm{kWh/m^3}$) ενώ την περίοδο 1987-1989 εγκαταστάθηκαν οι πρώτες μονάδες αντίστροφης ώσμωσης με συσκευές ανάκτησης ενέργειας στη Σύρο (Εικόνα 1.5) και στη Μύκονο με αποτέλεσμα μεγάλη μείωση στην ειδική ενεργειακή κατανάλωση η οποία και έδωσε ώθηση για την εγκατάσταση περισσότερων μονάδων.

Η εμπειρία από τις μονάδες που τροφοδοτούνται με συμβατική ενέργεια προώθησε την προσπάθεια να εισαχθούν οι ΑΠΕ στην παραγωγή νερού ειδικά αφού το αιολικό, το ηλιακό αλλά και το γεωθερμικό δυναμικό, σε αρκετές νησιωτικές περιοχές, είναι σε υψηλά επίπεδα. Για το σκοπό αυτό (εκτός από την ηλιακή απόσταξη) δοκιμάστηκαν αρκετές λύσεις σε πιλοτική αλλά και εμπορική κλίμακα.



Εικόνα 1.6: Μέρος της γεωθερμικής μονάδας αφαλάτωσης που εγκαταστάθηκε στην Κίμωλο [29].

Πιλοτικές μονάδες αφαλάτωσης με ΑΠΕ

Γεωθερμική ΜΕΟ στην Κίμωλο Την περίοδο 1997-98 εγκαταστάθηκε στην Κίμωλο γεωθερμική μονάδα αφαλάτωσης πολυβάθμιας εξάτμισης (MED) δυναμικότητας 80 m^3 με χρήση γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασία περίπου $61 \,^{\circ}$ C. Η μέθοδος της αφαλάτωσης ήταν η απόσταξη σε κενό (δηλαδή σε χαμηλή πίεση). Η παραγωγή του πόσιμου νερού ήταν $3.24 \, \text{m}^3/\text{h}$ ενώ η χρήση του γεωθερμικού ρευστού έφτανε τα $50 \, \text{m}^3/\text{h}$. Σημαντικό χαρακτηριστικό της μονάδας ήταν πως εκτός από θαλασσινό νερό, η μονάδα μπορούσε να αφαλατώσει και το ίδιο το γεωθερμικό ρευστό, εάν είχε τα κατάλληλα χαρακτηριστικά. Ενώ λειτούργησε χωρίς προβλήματα, μετά το τέλος του ερευνητικού έργου, στα πλαίσια του οποίου δημιουργήθηκε, εγκαταλείφθηκε (Εικόνα 1.6) [29].

Αυτόνομη αντίστροφη ώσμωση με ανεμογεννήτρια στη Θηρασιά Το 1997 στη Θηρασιά εγκαταστάθηκε μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης ημερήσιας δυναμικότητας 4.8 m^3 με χρήση μιας ανεμογεννήτριας 15 kW και παρέμεινε σε χρήση πολλά χρόνια. Στο σύστημα υπήρχε και εγκατεστημένη συστοιχία συσσωρευτών (Εικόνα 1.7) κυρίως για την εξομάλυνση του φορτίου. Η ειδική κατανάλωση της μονάδας ήταν περίπου 16 kWh/m^3 [55].

Αιολική RO στη Σύρο Το 1998 εγκαταστάθηκε στο νησί της Σύρου μια ανεμογεννήτρια $500 \,\mathrm{kW}$ με σκοπό την ενεργειακή τροφοδοσία αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης ημερήσιας δυναμικότητας $900 \,\mathrm{m^3}$ αλλά δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ η σύνδεση τους.

1.4. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ



Εικόνα 1.7: Η συστοιχία των συσσωρευτών στο αυτόνομο σύστημα της Θηρασιάς [55].



Εικόνα 1.8: Η πλωτή μονάδα αφαλάτωσης στην Ηρακλειά.

Πλωτή RO με Αιολικά Το 2007 μεταφέρθηκε στην Ηρακλειά μια πρωτοποριακή πλωτή μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης με τη χρήση αιολικής ενέργειας δυναμικότητας 80 m^3 την ημέρα (Εικόνα 1.8) με σκοπό την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης του νησιού αλλά, πρακτικά, δε λειτούργησε όπως θα έπρεπε λόγω τεχνικών προβλημάτων και αδιαφορίας της δημοτικής αρχής [56].

Εμπορικές μονάδες αφαλάτωσης με ΑΠΕ

Μονάδα αντίστροφης ώσμωσης με αιολική ενέργεια στη Μήλο Η περίπτωση της Μήλου αποτελεί ένα επιτυχημένο παράδειγμα μεγάλης μονάδας (για τα ελληνικά δεδομένα) αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης δυναμικότητας $3360 \,\mathrm{m}^3$ με διασυνδεδεμένη στο δίκτυο του νησιού ανεμογεννήτρια $850 \,\mathrm{kW}$ που καλύπτει πρώτα τις ενεργειακές ανάγκες της αφαλάτωσης ενώ διοχετεύει την περίσσεια



Εικόνα 1.9: Η αυτόνομη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης με ΑΠΕ στη νήσο Στρογγύλη.

της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο του νησιού. Το σύστημα αφαλάτωσης-ανεμογεννήτριας χρησιμοποιεί ένα σύστημα ελέγχου που λαμβάνει υπόψη του την πρόβλεψη της ζήτησης νερού, την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου καθώς και την πληρότητα των δεξαμενών ύδρευσης του νησιού. Η εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας αυτής (περίπου $3.5 \,\mathrm{kWh/m^3}$) αποτέλεσε βασικό παράγοντα για την επιτυχία του έργου. Η μονάδα αφαλάτωσης δεν ανήκει στη δημοτική επιχείρηση ύδρευσης αλλά σε ιδιώτη ο οποίος πουλάει το νερό στο δήμο (ΣΔΙΤ¹).

Αυτόνομη μονάδα συμπίεσης ατμών MVC με αιολική ενέργεια στη Σύμη Το 2009 εγκαταστάθηκε στο νησί της Σύμης αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης συμπίεσης ατμών (MVC) ειδικής κατανάλωσης ενέργειας $14.5 \,\mathrm{kWh/m^3}$ [57] με τη χρήση ανεμογεννήτριας ισχύος $330 \,\mathrm{kW}$. Η παραγωγή νερού δεν ήταν η αναμενόμενη και τελικά το 2011 καταστράφηκε από πυρκαγιά και δεν επισκευάστηκε.

Αυτόνομη αφαλάτωση αντίστροφης ώσμωσης στην Στρογγύλη Το 2013 εγκαταστάθηκε στη νήσο Στρογγύλη, για τις ανάγκες του στρατού, αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, ημερήσιας δυναμικότητας 8 m^3 . Η μονάδα χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά εγκατεστημένης ισχύος 20 kW (Εικόνα 1.9).

¹Σύμπραξη Δημόσιου-Ιδιωτικού Τομέα



Εικόνα 1.10: Οι αφαλατώσεις για δημόσια ύδρευση στα ελληνικά νησιά μαζί με τις αντίστοιχες δυναμικότητες σε κυβικά μέτρα ανά ημέρα.

1.4.2 Παρούσα κατάσταση

Στα χρόνια μετά το 1989 εγκαταστάθηκαν πολλές μονάδες αντίστροφης ώσμωσης για δημόσια ύδρευση με αποτέλεσμα σήμερα να υπάρχουν 30 νησιά που καλύπτουν εξ ολοκλήρου ή εν μέρει τις ανάγκες τους σε νερό για ύδρευση από αφαλάτωση με συνολική ημερήσια δυναμικότητα $52,000 \, {
m m}^3$ εκ των οποίων τα $9000 \, {
m m}^3$ χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό (Εικόνα 1.11). Από τα 30 νησιά, τα 22 βρίσκονται σε αυτόνομα δίκτυα ενώ τα 8 είναι διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό δίκτυο της χώρας (Εικόνα 1.10). Τα επόμενα χρόνια προβλέπεται να εγκατασταθούν ακόμα $11,000 \, {
m m}^3$ μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο την εξάρτηση από τη μη βιώσιμη και ακριβή λύση της μεταφοράς νερού με πλοία υδροφόρες [40, 52, 58–65]. Η ενεργειακή κατανάλωση των μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης είναι σχετικά μεγάλη και πραγματοποιείται σε τρεις αντλίες, στην αντλία που αντλεί νερό από τη θάλασσα προς τη μονάδα αφαλάτωσης, στην αντλία υψηλής πίεσης για την καθαυτή διεργασία της αφαλάτωσης, δηλαδή για τη διέλευση του νερού διαμέσου των μεμβρανών και τέλος στην αντλία για τη μεταφορά του νερού προς τη δεξαμενή διανομής (εάν υπάρχει ανάκτηση ενέργειας συνήθως υπάρχει και μια επιπλέον αντλία). Με την πάροδο των ετών και την εξέλιξη της τεχνολογίας η κατανάλωση των μονάδων αφαλάτωσης μεμβρανών και με τη χρήση



Εικόνα 1.11: Ο ρυθμός εγκαταστάσεων των αφαλατώσεων για δημόσια ύδρευση στα ελληνικά νησιά.

μονάδων ανάκτησης ενέργειας (στρόβιλοι ΡΕΙΤΟΝ και εναλλάκτες πίεσης). Σήμερα, όλες οι μονάδες αφαλάτωσης, ακόμα και οι μικρότερες, χρησιμοποιούν αυτές τις συσκευές. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας για αφαλάτωση θαλασσινού νερού σε 7 νησιωτικές περιοχές παρουσιάζεται στην εικόνα 1.12. Οι αντλίες που συμπεριλαμβάνονται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η αντλία θαλασσινού νερού, η αντλία αφαλάτωσης (υψηλής πίεσης) και η αντλία που συνοδεύει το σύστημα ανάκτησης ενέργειας όπου υπάρχει. Η αφαλάτωση στη Χίο, Χάλκη και Κουφονήσι έχει ειδική κατανάλωση $5 \,\mathrm{kWh/m^3}$ στη Θηρασιά και το Αγαθονήσι περίπου $7 \,\mathrm{kWh/m^3}$ ενώ στη Ερμούπολη της Σύρου περίπου $9 \,\mathrm{kWh/m^3}$. Η αφαλάτωση στη Σύρο παρουσιάζει μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας καθώς η πλειοψηφία των μονάδων είναι εγκατεστημένες πριν το 2002 όταν η τεχνολογία του εναλλάκτη πίεσης ήταν ακριβή και τεχνολογικά ανώριμη.

Η περίπτωση της Σύρου

Η περίπτωση της Σύρου αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση εντελώς αυτόνομου νησιού το οποίο καλύπτει τις ανάγκες ύδρευσής του σχεδόν αποκλειστικά από 13 μονάδες αφαλάτωσης συνολικής ημερήσιας δυναμικότητας 8340 m^3 . Οι μονάδες έχουν δυναμικότητα από $250 \text{ έως } 2000 \text{ m}^3$ και είναι κατανεμημένες σε 5 διαφορετικές περιοχές στο νησί (Εικόνα 1.13). Για το 2011 η ηλεκτρική ενεργειακή κατανάλωση των μονάδων αφαλάτωσης ήταν το 11.2% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής του νησιού καθιστώντας την εταιρία ύδρευσης (ΔΕΥΑ Σύρου) από τους μεγαλύτερους καταναλωτές του νη-



Εικόνα 1.12: Η ειδική ενέργεια αφαλάτωσης σε 7 ελληνικές μονάδες.

σιού [52, 66, 67]. Χαρακτηριστικό της μεγάλης κατανάλωσης αποτελεί η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων αφαλάτωσης (2.08 MW) που σε πλήρη ισχύ καταναλώνουν το 5.2% της συμβατικής εγκατεστημένης ισχύος στο νησί. Το κόστος της ενέργειας αποτελεί τη βασική συνιστώσα του λειτουργικού κόστους (περίπου 45%) καθώς το κόστος λειτουργίας υπολογίζεται σε 1.2 με 1.6 €/m³ και σε αυτό το κόστος η ενέργεια συμμετέχει περίπου με 0.7 €/m³ έως 1€/m³. Το μέσο κόστος της ενέργειας ήταν για το 2012 0.086 €/kWh. Επειδή τα αυτόνομα νησιά για την ηλεκτροδότηση τους καταναλώνουν πετρέλαιο Diesel, το πραγματικό κόστος της ενέργειας είναι πολύ παραπάνω από αυτό που χρεώνει ο ηλεκτρικός πάροχος για λόγους κοινωνικής πολιτικής. Το πραγματικό κόστος της ενέργειας για την παραγωγή του νερού μπορεί να φτάσει έως και 1.7 €/m³, τιμή έως και 240% σε σχέση με την τιμή που χρεώνεται.

Μηναία διακύμανση Η ζήτηση νερού στο νησί της Σύρου αυξάνεται σημαντικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω του τουρισμού, αν και αυτή η αύξηση είναι μικρότερη από ότι στα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων, παραμένει σημαντικά μεγάλη. Για παράδειγμα, η παραγωγή πόσιμου νερού τον Αύγουστο είναι 85% μεγαλύτερη από τη ζήτηση του Φεβρουάριο (Εικόνα 1.14). Όμοια συμπεριφορά εμφανίζει και η ζήτηση ενέργειας για την παραγωγή νερού, όπου τον Φεβρουάριο η ζήτηση ήταν 560 MWh ενώ τον Αύγουστο ήταν 910 MWh παρουσιάζοντας αύξηση 62.5%. Συγκρίνοντας τα ποσοστά της αύξησης ανάμεσα στην παραγωγή νερού και την καταναλισκόμενη ενέργεια διαπιστώνεται πως η *ειδική ενεργειακή κατανάλωση* για παραγωγή νερού μειώνεται σημαντικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.



Εικόνα 1.13: Η κατανομή των μονάδων αφαλάτωσης στη Σύρο



Εικόνα 1.14: Η μέση μηνιαία διακύμανση της ζήτησης νερού και της ενεργειακής κατανάλωσης στη Σύρο (2010-2013)



Εικόνα 1.15: Η μέση μηνιαία διακύμανση της ειδικής ενέργειας αφαλάτωσης στην Ερμούπολη για το σύνολο των μονάδων.

Συγκεκριμένα, η ειδική ενέργεια για την αφαλάτωση της Ερμούπολης είναι περίπου $8.1 \,\mathrm{kWh/m^3}$ για τον Αύγουστο ενώ για τον Φεβρουάριο η ίδια τιμή είναι $9.7 \,\mathrm{kWh/m^3}$, δηλαδή παρουσιάζεται μείωση σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες της τάξης του 16.5% (Εικόνα 1.15). Η μείωση οφείλεται κυρίως σε τρεις παράγοντες:

- Οι μονάδες αφαλάτωσης δουλεύουν συνεχώς κατά την καλοκαιρινή περίοδο, ελαχιστοποιώντας
 έτσι τους κύκλους έναρξης-τερματισμού και του ενεργοβόρου καθαρισμού των μεμβρανών.
- Η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού είναι υψηλότερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες με αποτέλεσμα την αλλαγή ορισμένων ιδιοτήτων του νερού (όπως το ιξώδες) με αποτέλεσμα την πτώση της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης της αφαλάτωσης [68].
- Στην Ερμούπολη υπάρχουν εγκατεστημένες πολλές μονάδες αφαλάτωσης, διαφορετικής δυναμικότητας και ειδικής κατανάλωσης ενέργειας, με αποτέλεσμα η εκτεταμένη χρήση των μονάδων με χαμηλότερη ειδική κατανάλωση το καλοκαίρι να μειώνει τη συνολική ενέργεια για το σύνολο.

1.4.3 Ενέργεια για νερό στην Ελλάδα

Η ενέργεια που απαιτείται για την πρόσληψη, την επεξεργασία και τη διανομή του πόσιμου νερού διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή. Για το σκοπό αυτό θα πραγματοποιηθεί σύγκριση ανάμεσα σε τρεις περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά:

- Ερμούπολη Σύρου, όπου χρησιμοποιείται αφαλάτωση για την ύδρευση των κατοίκων
- Αθήνα (ΕΥΔΑΠ), όπου χρησιμοποιείται κυρίως επιφανειακό νερό
- Θεσσαλονίκη (ΔΕΥΘ), όπου χρησιμοποιείται επιφανειακό αλλά και υπόγειο νερό

Τα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής/οργανισμού ύδρευσης, παρουσιάζονται στον πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις συστημάτων ύδρευσης για την Ελλάδα.

		Ερμούπολη ΔΕΥΑ Σύρου	Αθήνα ΕΥΔΑΠ	Θεσσαλονίκη ΕΥΑΘ
Πληθυσμός αναφοράς		13,400	4,500,000	1,000,000
Νερό που παράγεται	hm^3	1.05	385.5	89.7
Νερό που τιμολογείται	hm^3	0.89	337	66.3
Ετήσια κατανάλωση νερού ανά άτομο	m^3/yr	66.6	74.9	66.3
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας	GWh	10	251	119
Περίοδος αναφοράς		2010–13	2009	2008
Κόστος ενέργειας	€/kWh	0.086	0.089	Χωρίς δεδομένα (Όπως της Αθήνας)
Αναφορές		[67]	[69, 70]	[70, 71]

Γενικά, η ενέργεια που απαιτείται για νερό μπορεί να περιγραφεί με τρεις δείκτες:

- Κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα νερού που πωλείται
- Κόστος ενέργειας ανά μονάδα νερού που πωλείται
- Κατανάλωση ενέργειας για νερό ανά άτομο

Στην εικόνα 1.16i παρουσιάζεται η (ειδική) ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για επεξεργασία, διανομή και μεταφορά για κάθε κυβικό μέτρο νερού που πωλείται. Στην Αθήνα, η ειδική ενεργειακή κατανάλωση είναι $0.75 \,\mathrm{kWh/m^3}$, στη Θεσσαλονίκη είναι παραπάνω από διπλάσια ενώ στην Ερμούπολη η ειδική ενεργειακή κατανάλωση είναι 15 φορές μεγαλύτερη από την Αθήνα φθάνοντας τα $11.2 \,\mathrm{kWh/m^3}$. Στην εικόνα 1.16ii παρουσιάζεται το ειδικό κόστος της ενέργειας για κάθε κυβικό νερό που πωλείται. Το ειδικό κόστος της ενέργειας ακολουθεί παρόμοια μορφή (Εικόνα 1.16ii) με το κόστος της ενέργειας για την Αθήνα να είναι 0.066 €/m³, για την Θεσσαλονίκη 0.16 €/m³, και για την Σύρο 0.97 €/m³. Η κατανάλωση ενέργειας για νερό ανά άτομο το έτος είναι 55.8 kWh για την Αθήνα, πάνω τη διπλάσια για την Θεσσαλονίκη ενώ για την Σύρο αυτή η τιμή φτάνει τα 747 kWh, δηλαδή

58



(i) Κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα (ii) Κόστος ενέργειας ανά μονάδα νερού (iii) Κατανάλωση ενέργειας για νερό ανά νερού που πωλείται άτομο

Εικόνα 1.16: Βασικοί δείκτες ενεργειακής κατανάλωσης για παραγωγή, διανομή και επεξεργασία νερού σε τρία τυπικά συστήματα.

14 φορές πάνω από την Αθήνα. Οι τρεις αυτοί δείκτες δείχνουν τη μεγάλη διαφορά στην ενεργειακή κατανάλωση ανάμεσα στο σύστημα που χρησιμοποιεί αφαλάτωση και στα υπόλοιπα συμβατικά συστήματα.

1.4.4 Συμπεράσματα

Η κάλυψη των αναγκών νερού από αφαλάτωση αποτελεί μια διαδεδομένη πρακτική στα ελληνικά άνυδρα νησιά παρόλο που είναι μια ενεργοβόρος διεργασία. Οι αρχικές προσπάθειες αφαλάτωσης με ηλιακή απόσταξη ήταν ανεπιτυχείς κυρίως λόγω της περιορισμένης τεχνικής υποστήριξης και του μεγάλου λειτουργικού κόστους. Η πρόοδος στις τεχνολογίες της αφαλάτωσης και κυρίως στην αντίστροφη ώσμωση, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη για την κάλυψη της ζήτησης στις αναπτυσσόμενες τουριστικές περιοχές (όπως τα άνυδρα νησιά που αποτελούν σημαντικό τουριστικό προορισμό) αύξησαν τη συμμετοχή της αφαλάτωσης ως συμπληρωματική ή ακόμα και κύρια πηγή πόσιμου νερού. Σε πιλοτικό, αλλά και εμπορικό επίπεδο, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και προσπάθειες για την ενεργειακή τους τροφοδοσία από ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές αλλά τεχνικοί και οικονομικοί λόγοι δεν έχουν καταστήσει αυτές τις προσπάθειες πάντα επιτυχημένες.

Η κύρια τεχνική πρόκληση είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των μονάδων αφαλάτωσης. Καθώς η ενέργεια είναι ένας σημαντικός παράγοντας κόστους για την αφαλάτωση, μέθοδοι για την ελάττωση της κατανάλωσης θα οδηγούσαν σε σημαντική μείωση του κόστους. Μια άλλη εναλλακτική θα ήταν η χρήση φθηνότερης ενέργειας όπως της ηλιακής και της αιολικής που λόγω της μεγάλης έντασης των ανανεώσιμων πόρων στα νησιά αυτά, το κόστος τους είναι ανταγωνιστικό. Επιπλέον, η χρήση των ΑΠΕ μπορεί να μειώσει σημαντικά τη ζήτηση ενέργειας σε αυτά τα απομονωμένα συστήματα με αποτέλεσμα η κατασκευή αφαλατώσεων με ΑΠΕ να έχει υπάρξει προτεραιότητα για την κεντρική κυβέρνηση και τις κατά τόπους υπηρεσίες ύδρευσης με τη χρήση επιδοτήσεων και κινήτρων. Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας για τα μεγάλα συστήματα δεν αποτελεί βιώσιμη λύση καθώς οι συσσωρευτές είναι ακριβοί και έχουν σχετικά μικρή διάρκεια ζωής, ενώ ταμιευτήρες νερού δεν μπορούν να κατασκευαστούν στα άνυδρα νησιά.

Τα υβριδικά συστήματα σε συνδυασμό με συστήματα βελτιστοποίησης και ενεργειακής διαχείρισης μπορούν να δώσουν λύση στο πρόβλημα της κάλυψης της ενεργειακής ανάγκης για ύδρευση αλλά και να συνεισφέρουν στο ενεργειακό μείγμα του νησιού-δικτύου. Όμως, τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα ειδικά στα τουριστικά νησιά συναντούν την αντίδραση των κατοίκων αφού θεωρούν πως υποβαθμίζουν το τοπίο και δεν είναι συμβατά με τις χρήσεις γης.

Οι μελέτες και τα πιλοτικά συστήματα έχουν δείξει πως τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα με τον κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να καλύψουν με βιώσιμο τρόπο τις ανάγκες των συστημάτων αφαλάτωσης. Τα δεδομένα της κατανάλωσης νερού (προφίλ) καθώς και της κατανομής των ενεργειακών πόρων μπορούν να οδηγήσουν στην καλύτερη εκμετάλλευση των ΑΠΕ για παραγωγή νερού.

Η έλλειψη νερού σε πολλά άνυδρα ή μερικώς άνυδρα νησιά αντιμετωπίζεται με μεταφορές νερού με έξοδα της κεντρικής κυβέρνησης, ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των μονάδων αφαλάτωσης, όπου υπάρχουν, επιδοτείται καθώς το πραγματικό κόστος του νερού δεν μπορεί να μεταφερθεί στους καταναλωτές για κοινωνικούς λόγους. Είναι σαφές πως η λύση της διαρκούς επιδότησης δεν αποτελεί βιώσιμη λύση και πρέπει να εφαρμοστούν άλλες λύσεις. Η λύση των ΑΠΕ με τη μορφή σύμπραξης (δημόσιου και ιδιωτικού τομέα) αν και δεν είναι πάντα κοινωνικά αποδεκτή μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση. Επιπλέον, καθώς οι συμβατικές πηγές νερού δέχονται σημαντικές πιέσεις και το κόστος της ενέργειας αυξάνεται, θα πρέπει να γίνει αξιολόγηση των νέων εναλλακτικών μορφών κάλυψης των αναγκών ενέργειας και νερού με διατομεακό σχεδιασμό και κοινή διαχείριση των πόρων και των συστημάτων.

Όπως παρουσιάστηκε στη συγκριτική ανάλυση, η ειδική ενέργεια για παραγωγή νερού από αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση παραμένει υψηλή και με μεγάλο λειτουργικό κόστος όμως είναι αξιόπιστη τεχνολογία και προσφέρει νερό σε επαρκή ποσότητα και ποιότητα. Έτσι θα πρέπει όλες οι προκλήσεις που εμφανίζονται σε τεχνικό αλλά και σε επίπεδο διαχείρισης να αντιμετωπίζονται για να βελτιώνεται η σχέση της ενέργειας για νερό ως κομμάτι της ολοκληρωμένης διαχείρισης νερού των ελληνικών νησιών. Συνολικά, η ύδρευση στα νησιά αποτελεί ένα ευαίσθητο θέμα. Ως αποτέλεσμα

1.4. Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΤΗΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

της ελλιπούς πληροφόρησης των κατοίκων σε θέματα σχετικά με τη χρήση του νερού και επειδή τα πρώτα συστήματα αφαλάτωσης είχαν εμφανίσει προβλήματα (ως νέα τεχνολογία), είχε διαμορφωθεί αρνητικό κλίμα ως προς τη χρήση τους. Η πολιτεία πρέπει να ενημερώσει και να επιμορφώσει τους κατοίκους των νησιών σχετικά με τα μακροπρόθεσμα οφέλη που έχει η αφαλάτωση νερού (σε σχέση με τη μεταφορά και την άντληση), ενώ παράλληλα οι διαχειριστές και οι ιδιοκτήτες της κάθε μονάδας να τη συντηρούν σύμφωνα με τους κανόνες που εξασφαλίζουν την αποδοτική λειτουργία της, την υψηλή ποιότητα και την προστασία του περιβάλλοντος. Εάν επιτευχθεί μεγάλη κοινωνική αποδοχή, ειδικά στα τουριστικά ελληνικά νησιά, όπου η αισθητική αξία του τοπίου είναι μεγάλη, τότε μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ενεργειακή αυτονομία για την παραγωγή νερού.

Μια σημαντική παράμετρος στην οποία η τοπική κοινωνία πρέπει να δώσει σημαντικό βάρος είναι τα δίκτυα διανομής του πόσιμου νερού. Τα δίκτυα στα περισσότερα νησιά είναι σε κακή κατάσταση, κατασκευασμένα πριν πολλά χρόνια, με ακατάλληλα υλικά και πολλές διαρροές, ενώ η έκταση τους δεν καλύπτει το σύνολο των κατοίκων με αποτέλεσμα τα δίκτυα νερού να αποτελούν εμπόδιο στη γενικευμένη χρήση των αφαλατώσεων. Μια λύση για τη σωστή λειτουργία των δικτύων ύδρευσης και των αφαλατώσεων θα ήταν η δημιουργία ενός ανεξάρτητου φορέα που θα ελέγχει όλες τις δημόσιες μονάδες αφαλάτωσης για ύδρευση έτσι ώστε να παρακολουθεί την ποιότητα του νερού καθώς και την εφαρμογή καλών πρακτικών κατά την λειτουργία τους ενώ θα δίνει κίνητρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.

Γενικά, η εξασφάλιση της παροχής νερού και ενέργειας θα αποτελέσει προτεραιότητα τις επόμενες δεκαετίες στην Ελλάδα. Λεπτομερείς υπολογισμοί του δεσμού νερού και ενέργειας θα δείξουν τις διαφορές ανάμεσα στους τρόπους ύδρευσης στα νησιά και θα αναδείξουν τις καλύτερες στρατηγικές διαχείρισης και λειτουργίας των συστημάτων αυτών ενώ η υιοθέτηση τεχνολογικών καινοτομιών μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Σε κάθε περίπτωση, είτε πρόκειται για μείωση της απαιτούμενης ενέργειας με τη χρήση νέων τεχνολογιών (τεχνολογίες ανάκτησης πίεσης, μεμβράνες κτλ) είτε του κόστους της με χρήση εναλλακτικών καυσίμων ή ΑΠΕ, υπάρχει οικονομικό όφελος. Στα ελληνικά νησιά έχουν εφαρμοστεί πολλές τεχνολογίες και στις περισσότερες περιπτώσεις η θέληση των δημοτικών αρχών για επίλυση με βιώσιμο τρόπο του προβλήματος της ύδρευσης είναι εξίσου σημαντική με την τεχνολογική πρόοδο των μονάδων αφαλάτωσης και των συστημάτων ΑΠΕ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κεφάλαιο 2

Μοντελοποίηση συστημάτων

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, τα δύο πρώτα στάδια του σχεδιασμού ενός συστήματος κάλυψης των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας και νερού είναι η διαστασιολόγηση και η προσομοίωση. Για τα δύο αυτά στάδια απαιτείται μοντελοποίηση των διάφορων υποσυστημάτων. Η διαστασιολόγηση θα πραγματοποιηθεί με μέσες μηνιαίες τιμές ενώ για την προσομοίωση θα χρησιμοποιηθούν λογιστικά μοντέλα και αναλυτικές χρονοσειρές. Στα λογιστικά μοντέλα δεν λαμβάνονται υπόψη δυναμικά φαινόμενα ενώ οι μεταβατικές καταστάσεις γίνονται βηματικά και διαρκούν μέχρι την επόμενη κατάσταση. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσομοιώσεις με χρονικό βήμα από δέκα λεπτά έως μια ώρα, δίνοντας αποτελέσματα με σχετικά μεγάλη ακρίβεια για ετήσιες προβλέψεις. Εφαρμόζονται στο σχεδιασμό και την ανάλυση των ενεργειακών συστημάτων στη βιομηχανία, στην εκπαίδευση και στην έρευνα ενώ υπάρχουν και εμπορικά λογισμικά (π.χ. Homer, Hybrid2) που χρησιμοποιούν παρόμοια μοντέλα. Ειδικά στον τομέα των ΑΠΕ, έχουν βρει εφαρμογή σε αιολικά, φωτοβολταϊκά αλλά και υβριδικά συστήματα ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί και στην αφαλάτωση με ΑΠΕ [72–76]. Τα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι πως απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ καθώς και αναλυτικές χρονοσειρές [77]. Η συνδεσμολογία του συστήματος που θα μοντελοποιηθεί παρουσιάζεται σε μονογραμμικό σκαρίφημα στην εικόνα 2.1. Η συνδεσμολογία αυτή είναι παρόμοια με του συστήματος στην εικόνα 1.2.

2.1 Μοντελοποίηση ενεργειακών υποσυστημάτων

Με τον όρο ενεργειακά υποσυστήματα αναφέρονται τα σύνολα των μονάδων που παράγουν, καταναλώνουν ή αποθηκεύουν ενέργεια. Πολλές όμοιες ενεργειακές μονάδες αποτελούν ένα υποσύστημα



Εικόνα 2.1: Σκαρίφημα του υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας και νερού που θα μοντελοποιηθεί.

(π.χ. ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελεί μια μονάδα ενώ μια συστοιχία αποτελεί ένα φωτοβολταϊκό υποσύστημα). Οι μονάδες συμβολίζονται με το δείκτη (_u) ενώ τα αντίστοιχα υποσυστήματα με το δείκτη (_{sys}). Όταν δεν υπάρχει δείκτης γίνεται γενική αναφορά στην τεχνολογία. Η ενέργεια μεταφέρεται ανάμεσα στα ενεργειακά υποσυστήματα με τη μορφή *ηλεκτρικής* ενέργειας. Στην παρούσα εργασία δεν έχει νόημα η χρησιμοποίηση των βασικών εξισώσεων στο επίπεδο της *τάσης* και της *έντασης* του ηλεκτρικού ρεύματος αφού δεν προσφέρουν επιπλέον πληροφορίες στην ανάλυση που πραγματοποιείται. Όμως, επειδή η παραγωγή ισχύος εξαρτάται από το γινόμενο αυτών των δυο ηλεκτρικών μεγεθών θα γίνεται αναφορά όπου χρειάζεται στα πλαίσια της μοντελοποίησης ενώ θα ληφθούν υπόψη και τεχνικοί περιορισμοί.

Τα ενεργειακά υποσυστήματα προσφέρουν ή απαιτούν μια ποσότητα ενέργειας σε κάθε βήμα της προσομοίωσης. Τα υποσυστήματα που *παράγουν* ενέργεια είναι:

- Φωτοβολταϊκά (Φ/Β PV)
- Ανεμογεννήτριες (Α/Γ WEC)
- Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H/Z DG)

Η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά (E_{PV}) και ανεμογεννήτριες (E_{WEC}), δηλαδή από τις μονάδες ΑΠΕ, εξαρτάται από το περιβάλλον, δηλαδή από την ένταση του φυσικού πόρου (source) και τον περίγυρο (surround), και από την ίδια τη μονάδα, δηλαδή από την εγκατεστη-

2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

μένη ισχύ (size) και τα τεχνικά χαρακτηριστικά (specs) της. Η γενική σχέση που δίνει την ενέργεια που παράγεται σε ένα χρονικό βήμα, είναι το γινόμενο της ισχύος με τη διάρκεια του χρονικού βήματος Δt . Για την ένταση των φυσικών πόρων και για την επίδραση του περίγυρου χρησιμοποιούνται μέσες τιμές για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Η γενική σχέση που δίνει την παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ (δηλαδή από φωτοβολταϊκά και αιολικά) σε κάθε βήμα Δt είναι:

$$E_{RES} = P(source, size, surround, specs) \cdot \Delta t$$
(2.1)

Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος δίνει την ενέργεια (E_{DG}) που απαιτείται με βάση την ζητούμενη ενέργεια/μέση ισχύ για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα και με βάση την απόδοση του, υπολογίζεται η κατανάλωση συμβατικού καυσίμου.

Οι μονάδες που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια είναι:

- Φορτίο Αφαλάτωσης (DES)
- Εξωτερικό φορτίο (LOAD)
- Διαχύτης ενέργειας (DUMP)

Η κατανάλωση ενέργειας και η ζήτηση ισχύος των μονάδων καθορίζεται με βάση τη ζήτηση των αγαθών όπως είναι η ηλεκτρική ενέργεια και το νερό. Στην περίπτωση της αφαλάτωσης η ζήτηση για νερό μεταφράζεται και αυτή σε ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος. Το εξωτερικό φορτίο αφορά στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών σε ένα αυτόνομο σύστημα. Τέλος, υπάρχει και ο διαχύτης ενέργειας ο οποίος μπορεί να δεχτεί και να απορρίψει στο περιβάλλον την περίσσεια ενέργειας εάν δεν μπορεί να απορροφηθεί από κάποια άλλη κατανάλωση (E_{DUMP}) ή από τη μονάδα αποθήκευσης.

Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας είναι ο ηλεκτρικός συσσωρευτής δηλαδή η μπαταρία (BT) και αποδίδει ή προσλαμβάνει ενέργεια από το σύστημα (E_{BT}).

Στην πλειοψηφία παρόμοιων έργων οι ανεμογεννήτριες είναι οριζοντίου άξονα, μεταβλητού ή σταθερού βήματος, τα φωτοβολταϊκά είναι πολυκρυσταλλικά ή μονοκρυσταλλικά ενώ οι συσσωρευτές είναι μολύβδου-οξέως, οπότε και η μοντελοποίηση θα γίνει για μονάδες αυτών των τύπων [78]. Είναι δυνατό σε ένα σύστημα να υπάρχουν παραπάνω από ένα υποσυστήματα ίδιας κατηγορίας ή παραπάνω από μια μονάδες αφαλάτωσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά ενώ μπορούν να αντιμετωπίζονται και διαφορετικά από το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι εκφράσεις της σχέσης 2.1 για τις μονάδες ΑΠΕ αλλά και οι αντίστοιχες σχέσεις για τις υπόλοιπες ενεργειακές μονάδες.

2.1.1 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες (αιολικές μηχανές) μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια (P_{WEC_u}) δίνεται συνήθως από τον κατασκευαστή της σε μορφή καμπύλης σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου (V_z) στο ύψος της κεφαλής της ανεμογεννήτριας. Επίσης, ορισμένες φορές είναι δυνατόν να δίνεται ο συντελεστής ισχύος (c_p) σε συνάρτηση του λόγου της γραμμικής ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου (λ_V) στο ύψος κεφαλής της ανεμογεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση, η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τη παρακάτω σχέση [79–81]:

$$P_{WEC_u} = \eta_{mech} \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot A_R \cdot V_z^3$$
(2.2)

όπου:

- A_R επιφάνεια σάρωσης της ανεμογεννήτριας
- ρ πυκνότητα του αέρα
- η_{mech} μηχανικός βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας
- η_{el} ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης απόδοσης ανεμογεννήτριας

Σε παρόμοια προβλήματα οι ανεμογεννήτριες μοντελοποιούνται είτε με την πινακοποίηση των καμπυλών (είτε τα $c_p - \lambda_V$ είτε τα $P_{WEC_u} - V$) και τη χρήση της μεθόδου των πινάκων αναζήτησης (Lookup Tables) είτε με τη χρήση παλινδρόμησης. Στην περίπτωση που γίνεται παλινδρόμηση των καμπυλών ισχύος-ταχύτητας χρησιμοποιούνται πολυώνυμα ν-βαθμού (συνήθως άνω του δεύτερου βαθμού) [81]. Σε κάποιες περιπτώσεις γίνεται παλινδρόμηση σε περισσότερες από μια συναρτήσεις για καλύτερη προσαρμογή [72]. Σημαντικό ρόλο για την τελική επιλογή της εξίσωσης παλινδρόμησης έχει ο τύπος της ανεμογεννήτριας, δηλαδή εάν είναι ελεγχόμενου (Pitch Controlled) ή σταθερού βήματος (Stall Controlled). Ο τύπος της ανεμογεννήτριας καθορίζει και τη μορφή της καμπύλης (Εικόνα 2.2). Σε ορισμένες περιπτώσεις η καμπύλη ισχύος-ταχύτητας μπορεί να θεωρηθεί πως αυξάνεται γραμμικά από μηδέν έως τη μέγιστη ισχύ¹ (P_R) για ταχύτητα ίση με V_R και μετά παραμένει σταθερή έως την ταχύτητα αποκοπής $V_{cut_{out}}$ [82]. Για την παλινδρόμηση του συντελεστή ισχύος χρησιμοποιούνται πιο πολύπλοκες εκφράσεις [83, 84].

¹Η μέγιστη ισχύς δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ονομαστική.



Εικόνα 2.2: Καμπύλες ισχύος ανεμογεννητριών με και χωρίς έλεγχο βήματος.

Στη συγκεκριμένη εργασία για τη μοντελοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια θα χρησιμοποιηθεί πολυώνυμο σε συνάρτηση με κλάδους εξαρτώμενους από την ταχύτητα στο ύψος κεφαλής δηλαδή:

$$P_{WEC_u} = \begin{cases} 0 & V_z \leq V_{cut_{in}} \\ P_R \cdot (\alpha_{WEC1} \cdot (V_z - V_{cut_{in}}) + \alpha_{WEC2} \cdot (V_z - V_{cut_{in}})^2 + \dots) & V_{cut_{in}} < V_z < V_{cut_{out}} \\ 0 & V_z > V_{cut_{out}} \end{cases}$$

$$(2.3)$$

Εάν η ανεμογεννήτρια έχει έλεγχο βήματος τότε η σχέση 2.3 γίνεται για καλύτερη προσέγγιση:

$$P_{WEC_{u}} = \begin{cases} 0 & V_{z} \leq V_{cut_{in}} \\ P_{R} \cdot (\alpha_{WEC1} \cdot (V_{z} - V_{cut_{in}}) + \alpha_{WEC2} \cdot (V_{z} - V_{cut_{in}})^{2} + \ldots) & V_{cut_{in}} < V_{z} < V_{R} \\ P_{R} & V_{R} \leq V_{z} \leq V_{cut_{out}} \\ 0 & V_{z} > V_{cut_{out}} \end{cases}$$

$$(2.4)$$

Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μια ανεμογεννήτριες τότε η συνολική ισχύς που παράγεται από το αιολικό υποσύστημα είναι το άθροισμα της ισχύος από όλες τις μονάδες επί το βαθμό απόδοσης του αντιστροφέα της κάθε Α/Γ ($\eta_{inv_{WEC}}$) εάν η Α/Γ δίνει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή:

$$P_{WEC_{sys}} = \sum P_{WEC_u} \cdot \eta_{inv_{WEC}} \tag{2.5}$$

Στην περίπτωση που εκτελείται μια προσομοίωσην με παραπάνω από δύο ανεμογεννήτριες είναι πιθανόν να επηρεάζει η μια την απόδοση της άλλης με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγόμενης ισχύος. Αυτές ονομάζονται απώλειες ομόρου και υπολογίζονται από αναλυτικά μοντέλα ανάλογα με την τοποθέτηση τους στο χώρο, την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου. Αρχική εκτίμηση των απωλειών μπορεί να γίνει με εμπειρικούς κανόνες που βασίζονται μόνο στην απόσταση των ανεμογεννητριών. Για λόγους απλότητας, οι εμπειρικοί κανόνες δεν υπολογίζουν νέες ταχύτητες ανέμου αλλά μια συνολική μείωση της ισχύος στο σύνολο του πάρκου (η_{wake}) σε σχέση με την ισχύ εάν δεν υπήρχαν αυτές οι απώλειες. Έτσι για N_{tur} όμοιες ανεμογεννήτριες η σχέση 2.5 γίνεται:

$$P_{WEC_{sys}} = (1 - \eta_{wake}) \cdot \eta_{inv_{WEC}} \cdot N_{tur} \cdot P_{WEC_u}$$
(2.6)

Γενικά, η χρήση ανεμογεννητριών μεγάλης ονομαστικής ισχύος είναι πάντα οικονομικότερη από μικρότερες ίδιας αθροιστικά ονομαστικής ισχύος κυρίως λόγω της οικονομίας κλίμακας κατά την εγκατάσταση και τη συντήρηση, τις μειωμένες απώλειες ομόρου και το γεγονός πως οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερο ύψος κεφαλής με αποτέλεσμα καλύτερες ταχύτητες ανέμου. Όμως, προβλήματα χωροθέτησης μπορούν να μην επιτρέπουν την εγκατάσταση μεγάλης ανεμογεννήτριας, ενώ η πιθανότητα βλάβης και η συντήρηση βγάζουν εκτός λειτουργίας μια μεγάλη ποσότητα ισχύος. Τέλος, οι περισσότερες μικρότερες ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν με μεγάλη διασπορά και να παρέχουν καλύτερη ηλεκτρική ευστάθεια στο δίκτυο.

2.1.2 Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ένα φωτοβολταϊκό (P_{PVu}) δίνεται από αναλυτικά μοντέλα ή από διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπυλών του κατασκευαστή. Τα αναλυτικά μοντέλα βασίζονται στην ηλεκτρική ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος της διόδου του φωτοβολταϊκού κελιού (Εικόνα 2.3) και σχετίζουν την ηλεκτρική τάση (U) με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (I) [85]. Η σχέση της τάσης με το ηλεκτρικό ρεύμα εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T), από



Εικόνα 2.3: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού κελιού.

το μήκος κύματος (λ) και από τη θερμοκρασία επιφανείας του πλαισίου (T_c) [72]. Είναι αρκετά δύσκολο να εξαχθεί μια αναλυτική σχέση που να καλύπτει ικανοποιητικά την επίδραση όλων των παραμέτρων. Η σχέση ηλεκτρικής τάσης και ηλεκτρικού ρεύματος, η εξάρτηση από τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία καθώς και η αποδιδόμενη ισχύ σε σχέση με την ακτινοβολία παρουσιάζονται ποιοτικά στην εικόνα 2.4 ενώ δίνονται συγκεκριμένες καμπύλες από τον κατασκευαστή του κάθε πλαισίου. Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι σε μορφή συνεχούς ρεύματος και για τη μετατροπή της σε εναλλασσόμενο χρησιμοποιούνται αντιστροφείς (inverter). Γενικά η ισχύς που δίνει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι:

$$P_{PV_u} = I_{PV} \cdot U_{PV} \tag{2.7}$$

Για να μεγιστοποιείται η ισχύς που αποδίδει το πλαίσιο πρέπει το σημείο λειτουργίας του να είναι στο γόνατο της καμπύλης (Εικόνα 2.4i). Για το λόγο αυτό, στον αντιστροφέα είναι ενσωματωμένος και ο ανιχνευτής του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker - MPPT) που φροντίζει με ηλεκτρονικές διατάξεις η ισχύς που αποδίδεται να είναι πάντα η μέγιστη, δηλαδή να έχει τάση και ένταση ηλεκτρικού ρεύματος αυτές που αντιστοιχούν στη μέγιστη ισχύ (U_{mp} και I_{mp}). Άρα η μέγιστη ισχύς (P_{mp}) είναι:

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot U_{mp} \tag{2.8}$$

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η μέγιστη παραγόμενη ισχύς έχουν γραμμική εξάρτηση με συντελεστή αναλογίας το στιγμιαίο βαθμό απόδοσης (η_{PV}) του φωτοβολταϊκού. Άρα, κάθε στιγμή η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς για ένα σύστημα που δουλεύει στο σημείο μέγιστης ισχύος θα είναι:

$$P_{PV_u} = \eta_{PV} \cdot G_T \cdot A_{PV} \tag{2.9}$$



Εικόνα 2.4: Ποιοτική απεικόνιση των χαρακτηριστικών καμπυλών ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

όπου A_{PV} η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Για την κατάταξη και την αξιολόγηση των πλαισίων έχουν θεσπιστεί πρότυπες συνθήκες μέτρησης οι οποίες ονομάζονται κανονικές συνθήκες δοκιμής (Standard Test Conditions - STC). Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης σε αυτές τις πρότυπες συνθήκες ονομάζεται βαθμός απόδοσης STC² (η_{STC}).

Η διαφοροποίηση του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης από το βαθμό απόδοσης των πρότυπων συνθηκών μπορεί να ποσοτικοποιηθεί για την επίδραση της θερμοκρασίας του πλαισίου, ενώ αν και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση του ηλιακού φάσματος δεν μπορεί να έχει πρακτική εφαρμογή κατά τη διάρκεια της ωριαίας προσομοίωσης. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν επηρεάζει άμεσα τον βαθμό απόδοσης αλλά έμμεσα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας επιφανείας του κελιού (T_c). Αναλυτικά ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης ενός πλαισίου γίνεται:

$$\eta_{PV} = \eta_{STC} \cdot (1 + \mu_P \cdot (T_c - T_{STC})) \cdot (1 - \alpha_\lambda) \cdot (1 - \alpha_{dirt})$$
(2.10)

όπου:

- α_{λ} μέσος συντελεστής απωλειών ηλιακού φάσματος
- α_{dirt} συντελεστής απωλειών λόγω σκόνης
- μ_P θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος δίνεται από τον κατασκευαστή του πλαισίου άμεσα ή έμμεσα. Συνήθως, οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν το θερμοκρασιακό συντελεστή για τη μεταβολή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης με τη θερμοκρασία (μ_{VOC}) και έτσι ο θερμοκρασιακός συντελεστής απωλειών

²Οι συνθήκες αυτές αφορούν ένταση ακτινοβολίας $G_{STC} = 1000 \frac{W}{m^2}$, θερμοκρασία κελιού $T_{STC} = 298 K$ και φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε 1.5 Air Mass

2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

του πλαισίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_P = \eta_{STC} \cdot \frac{\mu_{VOC}}{U_{mp}} \tag{2.11}$$

Η θερμοκρασία της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να υπολογιστεί από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η σχέση που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι:

$$T_c = T_\alpha + G_T \cdot \frac{\tau \alpha}{U_L} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{PV}}{\tau \alpha}\right)$$
(2.12)

όπου U_L είναι ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών του πλαισίου προς το περιβάλλον με συναγωγή και ακτινοβολία από όλες τις επιφάνειες, τ είναι η διαπερατότητα του καλύμματος και α η απορροφητικότητα. Το γινόμενο $\tau \alpha$ είναι συνήθως σταθερό και ίσο με 0.9. Ο λόγος $\frac{\tau \alpha}{U_L}$ μπορεί να βρεθεί εάν εφαρμοστεί η σχέση 2.12 για την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας T_{NOCT} του φωτοβολταϊκού πλαισίου (Nominal Operating Cell Temperature - NOCT) την οποία παρέχει ο κατασκευαστής του πλαισίου. Η θερμοκρασία T_{NOCT} υπολογίζεται για την επιφάνεια του πλαισίου όταν το πλαίσιο δέχεται ακτινοβολία $G_{NOCT} = 800 \frac{W}{m^2}$, το περιβάλλον έχει θερμοκρασία $T_{\alpha NOCT} = 20$ °C και ο αέρας έχει ταχύτητα $1\frac{m}{s}$ χωρίς το πλαίσιο να είναι συνδεδεμένο στο σύστημα για να αποδίδει ισχύ. Άρα η ποσότητα $\frac{\tau \alpha}{U_L}$ είναι ίση με:

$$\frac{\tau\alpha}{U_L} = \frac{T_{NOCT} - T_{\alpha NOCT}}{G_{NOCT}}$$
(2.13)

Εάν αντικατασταθεί η σχέση 2.10 στη σχέση 2.12 και επιλυθεί ως προς T_c προκύπτει η σχέση που δίνει τη θερμοκρασία επιφανείας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$T_c = \frac{T_a \cdot U_L + G_T \cdot (\eta_{STC} \cdot (T_{STC} \cdot \mu_P - 1) \cdot (\alpha_{rad} - 1) \cdot (\alpha_{dirt} - 1) + \tau \alpha)}{G_T \cdot \mu_P \cdot \eta_{STC} \cdot (\alpha_{rad} - 1) \cdot (\alpha_{dirt} - 1) + U_L}$$
(2.14)

Με αντικατάσταση της σχέσης 2.14 στη σχέση 2.10 προκύπτει ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του πλαισίου.

Τα παραπάνω, τα οποία αφορούν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μπορούν να γενικευτούν με όμοιο τρόπο και για μια συστοιχία. Μια συστοιχία αποτελείται από πολλά όμοια φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα κατάλληλα μεταξύ τους τα οποία καταλήγουν στον αντιστροφέα. Στην παρούσα εργασία δεν θα απασχολήσει η μεταξύ τους ηλεκτρική σύνδεση αλλά μόνο ο αριθμός τους (N_{PV}) ο οποίος καθορίζει την τελική επιφάνεια A_{sys} του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού συστήματος θα είναι:

$$A_{sus} = N_{PV} \cdot A_{PV} \tag{2.15}$$

και μπορεί να γραφτεί ξανά η σχέση 2.9 για την ισχύ που αποδίδει το φωτοβολταϊκό σύστημα στο δίκτυο (*P*_{PV_{sys}) ως [78]:}

$$P_{PV_{sys}} = \eta_{PV_{sys}} \cdot G_T \cdot A_{sys} \tag{2.16}$$

οπού $\eta_{PV_{sys}}$ είναι ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης της συστοιχίας και μπορεί να αναλυθεί ως:

$$\eta_{PV_{sys}} = \eta_{PV} \cdot \eta_{inv_{PV}} \tag{2.17}$$

όπου $\eta_{inv_{PV}}$ ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.

Η ολοκλήρωση της σχέσης 2.16 για $\Delta t = 1$ hr (ή διαφορετικά για μια χρονική περίοδο ίση με το βήμα προσομοίωσης) δίνει τη σχέση για την ενέργεια που παράγεται:

$$E_{PV_{sys}} = \bar{\eta}_{PV_{sys}} \cdot I_T \cdot A_{sys} \tag{2.18}$$

όπου I_T η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και $\bar{\eta}_{PV_{sys}}$ ο μέσος βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο μέσος βαθμός απόδοσης αλλάζει σε κάθε βήμα της προσομοίωσης αφού αλλάζουν οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης και οι συντελεστές απωλειών, ενώ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 2.17 θεωρώντας τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και επιφανείας κελιού, καθώς και ένα μέσο βαθμό απόδοσης αντιστροφέα.

2.1.3 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι τα στοιχεία που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια κυρίως³ από ανανεώσιμες πηγές σε αυτόνομα συστήματα και την αποδίδουν όταν αυτό απαιτείται. Η αποθήκευση πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων δηλαδή χημικών αντιδράσεων που όταν πραγματοποιούνται από τη μια κατεύθυνση παράγουν ηλεκτρικό φορτίο (εκφόρτιση) ενώ όταν δεχτούν ηλεκτρικό φορτίο, πραγματοποιούνται αντίστροφα (φόρτιση). Η ισχύς (*P*_{BS}) που αποδίδει ή απο-

 $^{^{3}}$ Δεν είναι σπάνιο να φορτίζονται και από συμβατικές μονάδες, ανάλογα με την ενεργειακή διαχείριση.
δίδεται στο συσσωρευτή προκύπτει από τα ισοζύγια των υπολοίπων ενεργειακών υποσυστημάτων σύμφωνα με το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και την κατάσταση φόρτισης του (SOC - Stage of Charge). Γενικά, η κατάσταση φόρτισης δείχνει το ποσοστό του διαθέσιμου ηλεκτρικού φορτίου (Q) του συσσωρευτή προς τη χωρητικότητά του (C).

$$SOC = \frac{Q}{C}$$
(2.19)

Η κατάσταση φόρτισης αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό κατάστασης ενός συσσωρευτή αλλά παρουσιάζει πολλές δυσκολίες στον υπολογισμό του (και στα πλαίσια της προσομοίωσης αλλά και στις πραγματικές εφαρμογές).

Ο συσσωρευτής απέχει πολύ από το να θεωρηθεί απλά μια "δεξαμενή" ηλεκτρικού φορτίου με συγκεκριμένη χωρητικότητα και άπειρη διαθέσιμη ισχύ καθώς εμφανίζει σύνθετη, μη γραμμική και χρονοεξαρτώμενη συμπεριφορά. Παρότι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές, η μοντελοποίηση τους βασίζεται σε ημιεμπειρικές εξισώσεις ανάλογα με τον τύπο τους αν και έχει αναθερμανθεί το ερευνητικό ενδιαφέρον στο συγκεκριμένο τομέα ειδικά από τις αυτοκινητοβιομηχανίες λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρικών - υβριδικών αυτοκίνητων.

Τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες [86, 87]:

- Ηλεκτροχημικά μοντέλα
- Ηλεκτρικά μοντέλα
- Μαθηματικά μοντέλα

Τα ηλεκτροχημικά μοντέλα βασίζονται στις θεμελιώδεις χημικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσα σε ένα κελί/στοιχείο συσσωρευτή κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Τα συγκεκριμένα μοντέλα αναπτύσσονται για τη μελέτη της συμπεριφοράς των στοιχείων στο επίπεδο των αντιδράσεων (και όχι σε επίπεδο σχεδιασμού ενός μεγάλου συστήματος) ενώ δεν χρησιμοποιούνται για τη μελέτη ενεργειακών ροών καθώς είναι πολύπλοκα και απαιτούν πολλές παραμέτρους που είναι δύσκολο να γνωρίζει ο τελικός χρήστης ενός συγκεκριμένου συσσωρευτή.

Τα ηλεκτρικά μοντέλα προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των συσσωρευτών με τη χρήση ηλεκτρικών ισοδύναμων χρησιμοποιώντας ιδανικές πηγές τάσης, αντιστάσεις, πυκνωτές αλλά και ηλεκτρονικά στοιχεία όπως διόδους. Χρησιμοποιούνται κυρίως για προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς και για ηλεκτρικό σχεδιασμό. Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν ημι-εμπειρικές εξισώσεις για να περιγράψουν τη συμπεριφορά των συσσωρευτών στο επίπεδο του τελικού χρήστη αν και απαιτούν ένα σχετικά μεγάλο αριθμό συντελεστών που όμως μπορούν να προκύψουν από παλινδρόμηση πειραματικών δεδομένων. Επειδή το υποσύστημα του συσσωρευτή αποτελεί την καρδιά των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων θα πρέπει το μοντέλο να περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια, για δεδομένο βήμα προσομοίωσης, τη συμπεριφορά του και τις ενεργειακές ροές από και προς το υποσύστημα αυτό [88]. Συνοπτικά η συμπεριφορά των συσσωρευτών έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η χωρητικότητα τους εξαρτάται από το ρυθμό εκφόρτισης
- Εκφορτίζονται ακόμα και εάν δεν χρησιμοποιούνται
- Η θερμοκρασία επηρεάζει όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους
- Ο υπολογισμός της κατάστασης φόρτισης είναι περίπλοκη διαδικασία
- Η τάση στα άκρα τους μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης
- Ο βαθμός απόδοσης τους δεν είναι σταθερός και αλλάζει με βάση την κατάσταση φόρτισης και την ένταση του ρεύματος
- Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται στη διάρκεια ζωής τους

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για μελέτες δυναμικής συμπεριφοράς, ανάλυσης και σχεδιασμού συστημάτων είναι παραλλαγές του μοντέλου του Copetti [89] το οποίο βασίζεται στο μοντέλο του Shepherd [90]. Από αυτά, ξεχωρίζει το μοντέλο των Guasch και Silvestre [91] για προσομοίωση φωτο-βολταϊκών συστημάτων ενώ παρόμοια είναι η εργασία των Zhou, Yang και Fang [92] για υβριδικά συστήματα. Σκοπός των μοντέλων αυτών είναι να δώσουν αναλυτικές σχέσεις για την τάση στους ακροδέκτες των συσσωρευτών συναρτήσει της έντασης του ρεύματος, της κατάστασης φόρτισης και της θερμοκρασίας ($U_{BS} = f(I, SOC, T)$) ενώ, το μοντέλο του Ross [88] επεκτείνει στην αποφόρτιση, στην παραγωγή αερίου και θερμότητας.

Στόχος της μοντελοποίησης στην παρούσα εργασία είναι να ποσοτικοποιηθούν τα παραπάνω δυναμικά φαινόμενα της συμπεριφοράς των συσσωρευτών στη μη δυναμική ανάλυση που ακολουθείται στην προσομοίωση. Πριν γίνει η περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί θα γίνει μια αναφορά στα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών και θα διατυπωθούν οι σχέσεις των ενεργειακών ροών.

2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός κελιού συσσωρευτή (BC) είναι η τάση λειτουργίας του (U_{BC}) και η χωρητικότητα του (C). Η τάση λειτουργίας δεν είναι σταθερή και αλλάζει ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης, εάν φορτίζει ή εκφορτίζει κτλ. Η χωρητικότητα του κελιού είναι η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να προσφέρει κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί δώσει ένα πλήρως φορτισμένο κελί για πολύ μικρή ταχύτητα εκφόρτισης είναι C_{∞} . Η χωρητικότητα του ίδιου κελιού πλήρως φορτισμένου που αποδίδει όλο το ηλεκτρικό φορτίο σε X ώρες συμβολίζεται ως C_X ενώ ισχύει πως $C_{\infty} > C_X$. Η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης θα είναι:

$$I_X = \frac{C_X}{X} \tag{2.20}$$

Η χωρητικότητα ενός κελιού συσσωρευτή σε σχέση με την *σταθερή* ένταση εκφόρτισης δίνεται από τους κατασκευαστές για κάποιες συγκεκριμένες τιμές της έντασης εκφόρτισης. Η χωρητικότητα για διαφορετική *σταθερή* ένταση εκφόρτισης μπορεί να βρεθεί από το νόμο του PEUKERT:

$$C_p = I_X^{k_p} \cdot X \tag{2.21}$$

όπου C_p μια σταθερή ποσότητα (και εξ ορισμού ίση με τη χωρητικότητα του κελιού για ένταση εκφόρτισης 1 Α) και k_p η σταθερά του νόμου του ΡΕυΚΕRT.

Στις εφαρμογές χρήσης συσσωρευτών με ΑΠΕ, η ένταση του ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης μεταβάλλεται συνεχώς αφού μεταβάλλεται ο φυσικός πόρος αλλά και το ηλεκτρικό φορτίο, στη γενική περίπτωση. Ένα κελί μπορεί να αποδώσει μια ποσότητα ηλεκτρικού φορτιού για ένα συγκεκριμένο χρόνο, υπό μια συγκεκριμένη τάση. Το γινόμενο της έντασης ρεύματος με το χρόνο είναι η χωρητικότητα του συσσωρευτή (C_{BC} ή AHC) σε αμπερώρια (Ah). Το γινόμενο της χωρητικότητας σε αμπερώρια με την τάση λειτουργίας δίνει τη χωρητικότητα σε μονάδες ενέργειας. Έτσι για ένα κελί συσσωρευτή:

$$EC_{BC} = AHC \cdot U_{BC} \tag{2.22}$$

Η μοντελοποίηση του συσσωρευτή πραγματοποιείται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος υπολογίζονται οι ενεργειακές ροές ανάμεσα στο ηλεκτρικό σύστημα και το συσσωρευτή ενώ στο δεύτερο μέρος υπολογίζονται οι παράμετροι απόδοσης ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Το κελί συσσωρευτή αποτελεί βασικό δομικό συστατικό κάθε υποσυστήματος συσσωρευτών ενώ τα

κελιά κατάλληλα συνδεδεμένα σχηματίζουν συστοιχίες σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του σχεδιασμού. Η ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας προκύπτει από τον αριθμό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κελιών που την απαρτίζουν.

Ενεργειακές ροές

Η μοντελοποίηση του συσσωρευτή πρέπει να επιτρέπει τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισής του στο τέλος του βήματος προσομοίωσης το οποίο ταυτίζεται με την αρχή τού επόμενου βήματος. Η κατάσταση φόρτισης είναι ο λόγος της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο συσσωρευτή (E_{BTi}) προς την ονομαστική *ενεργειακή χωρητικότητά* του (EC_{BT}), δηλαδή:

$$SOC = \frac{E_{BTi}}{EC_{BT}}$$
(2.23)

Η εξίσωση 2.23 είναι ισοδύναμη της εξίσωσης 2.19. Η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή, προκύπτει από τον αριθμό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κελιών που απαρτίζουν τη συστοιχία. Για λόγους μείωσης των ωμικών απωλειών, η τάση λειτουργίας του πρέπει να είναι μεγάλη και για το λόγο αυτό πρέπει να συνδεθεί συγκεκριμένος αριθμός κελιών σε σειρά (N_{BC}) έτσι ώστε να σχηματιστεί η επιθυμητή τάση λειτουργίας (U_{BS}), δηλαδή:

$$U_{BS} = N_{BC} \cdot U_{BC} \tag{2.24}$$

Η ενεργειακή χωρητικότητα EC_{BS} μιας σειράς συσσωρευτών είναι:

$$EC_{BS} = AHC \cdot U_{BS} = N_{BC} \cdot EC_{BC} \tag{2.25}$$

Εάν πρέπει να αυξηθεί η ενεργειακή χωρητικότητα, τότε χρησιμοποιούνται πολλές όμοιες σειρές κελιών (N_{BS}) συνδεδεμένες παράλληλα. Η συνολική ενεργειακή χωρητικότητα είναι:

$$EC_{BT} = N_{BS} \cdot EC_{BS} = N_{BS} \cdot N_{BC} \cdot EC_{BC}$$
(2.26)

Από τη συνολική χωρητικότητα του συσσωρευτή, επιλέγεται ένα ποσοστό κάτω από το οποίο δεν επιτρέπεται να κατέβει η κατάσταση φόρτισης για λόγους μεγιστοποίησης της διάρκειας ζωής του. Η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης ονομάζεται βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge - DoD).

Ο συσσωρευτής μπορεί να έχει 3 διακριτές καταστάσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας ενός υβριδικού

2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

συστήματος:

- Φόρτιση
- Εκφόρτιση
- Σε εφεδρεία

Κατά την κατάσταση φόρτισης, ενέργεια διοχετεύεται στο συσσωρευτή από το σύστημα (E_{TBT}) αλλά ένα ποσοστό από αυτή τελικά θα αποθηκευτεί ($E_{BT_{in}}$) αφού υπάρχουν απώλειες. Έτσι,

$$E_{BT_{in}} = \eta_{ch} \cdot E_{TBT} \tag{2.27}$$

όπου η_{ch} είναι ο βαθμός απόδοσης φόρτισης του υποσυστήματος των συσσωρευτών.

Αντίστοιχα, κατά την κατάσταση εκφόρτισης, ενέργεια από το συσσωρευτή ($E_{BT_{out}}$) διοχετεύεται στο σύστημα αλλά και πάλι ένα ποσοστό από αυτήν την ενέργεια θα διοχετευτεί στο δίκτυο (E_{FBT}) αφού και σε αυτή τη μετατροπή υπάρχουν μικρές απώλειες. Άρα η ενέργεια που διοχετεύεται στο σύστημα θα είναι:

$$E_{FBT} = \eta_{dch} \cdot E_{BT_{out}} \tag{2.28}$$

όπου η_{dch} ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης. Για λόγους προστασίας των συσσωρευτών, ο ρυθμός φόρτισης (CR) και εκφόρτισης (DCR) περιορίζεται με αποτέλεσμα ο συσσωρευτής να μην μπορεί να δώσει ή να λάβει όση ενέργεια ζητείται ή περισσεύει κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος.

Οι βαθμοί απόδοσης φόρτισης και εκφόρτισης γενικά εξαρτώνται από την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή και δίνονται από τον κατασκευαστή του ανάλογα με τον τύπο ενώ στη συγκεκριμένη εργασία θεωρούνται σταθεροί. Αυτο-αποφόρτιση δεν θα ληφθεί υπόψη.

Η διαθέσιμη ενέργεια ενός συσσωρευτή στην αρχή του χρονικού βήματος t + 1 είναι η διαθέσιμη ενέργεια που είχε στην αρχή του προηγούμενου βήματος t προσθέτοντας αλγεβρικά τις ποσότητες που εισέρχονται ή εξέρχονται στο βήμα t, δηλαδή:

$$E_{BT_{av}}(t+1) = E_{BT_{av}}(t) + E_{BT_{in}}(t) - E_{BT_{out}}(t)$$
(2.29)

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των ροών ενέργειας από και προς το συσσωρευτή σε σχέση με το σύστημα παραγωγής ενέργειας.

Μοντέλο συσσωρευτή KiBaM

Το κινητικό μοντέλο συσσωρευτή (Kinetic Battery Model - KiBaM) το οποίο αναπτύχθηκε από τους Manwell και McGowan [93, 94] αποτελεί την καλύτερη επιλογή για τους σκοπούς της εργασίας. Επιπλέον έχει χρησιμοποιηθεί σε παρόμοια προγράμματα ανάλυσης και σχεδιασμού συστημάτων ΑΠΕ (Hybrid2, HOMER κτλ).

Το συγκεκριμένο μοντέλο υποθέτει πως το φορτίο του συσσωρευτή κατανέμεται ανάμεσα σε δύο "δεξαμενές", μια δεξαμενή του διαθέσιμου φορτίου και μια δεξαμενή του δεσμευμένου φορτίου. Η δεξαμενή του διαθέσιμου φορτίου μπορεί να δώσει ηλεκτρικό φορτίο απευθείας στη ζήτηση ενώ η δεσμευμένη δεξαμενή μπορεί να δώσει φορτίο μόνο στην άλλη δεξαμενή. Κάθε στιγμή, το ηλεκτρικό φορτίο *q* ένος συσσωρευτή είναι το άθροισμα των δύο δεξαμενών, δηλαδή:

$$q = q_1 + q_2$$
 (2.30)

Η χωρητικότητα μπορεί να συνδεθεί κάθε στιγμή με ένα σταθερό ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης από την ακόλουθη εξίσωση:

$$q_{\max}(I) = \frac{q_{\max} \cdot k \cdot c \cdot \delta t}{1 - e^{-k \cdot \delta t} + c \cdot (k \cdot \delta t - 1 + e^{-k \cdot \delta t})}$$
(2.31)

όπου:

- $q_{\max}(I)$ η μέγιστη χωρητικότητα (Ah) σε ένταση ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης I
- $q_{\rm max}$ η μέγιστη χωρητικότητα σε απειροστής έντασης ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης
- δt ο χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης ίσος με $\delta t = \frac{q_{\max}(I)}{I}$
- η k σταθερά χρόνου (rate constant)
- η *c* παράμετρος που σχετίζεται με το λόγο του διαθέσιμου φορτίου προς τη συνολική χωρητικότητα (ratio constant).

Εάν υποτεθεί πως σε κάθε χρονικό βήμα, ο συσσωρευτής διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής έντασης (φόρτισης ή εκφόρτισης) τότε τα διαθέσιμα φορτία q_1 και q_2 δίνονται από τις σχέσεις:

$$q_1 = q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - I) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} - \frac{I \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}$$
(2.32)

$$q_2 = q_{2,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot (1-c) \cdot (1-e^{-k \cdot \Delta t}) - \frac{I \cdot (1-c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}$$
(2.33)

όπου:

- $q_{1,0}$ το διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο στην αρχή του χρονικού βήματος
- $q_{2,0}$ το δεσμευμένο ηλεκτρικό φορτίο στη αρχή του χρονικού βήματος
- q_0 το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο στην αρχή του χρονικού βήματος ($q_0 = q_{1,0} + q_{2,0}$)
- Δt η διάρκεια του χρονικού βήματος

Επειδή στην προσομοίωση που θα ακολουθήσει ενδιαφέρει η ενεργειακή χωρητικότητα των συσσωρευτών και όχι η χωρητικότητα του ηλεκτρικού φορτίου, εάν πολλαπλασιαστούν οι εξισώσεις 2.32 και 2.33 με την τάση ανοιχτού κυκλώματος για πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή, τότε προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$E_1 = E_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(E_0 \cdot k \cdot c - P) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} - \frac{P \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}$$
(2.34)

$$E_2 = E_{2,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + E_0 \cdot (1-c) \cdot (1-e^{-k \cdot \Delta t}) - \frac{P \cdot (1-c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}$$
(2.35)

Με αυτή τη μετατροπή μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο KiBaM σε μια προσομοίωση με ποσά ενέργειας που ανταλλάσσονται ανάμεσα στο σύστημα και το συσσωρευτή. Για την εφαρμογή του μοντέλου αρκεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων c, k και q_{max} , όπου P η ισχύς που αποδίδεται ή πρέπει να αποδώσουν οι συσσωρευτές. Συγκεκριμένα, εάν έχει ζητηθεί μια μέση ισχύς (P_{need}) ή εάν προσφέρεται από το σύστημα στο συσσωρευτή κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος θα πρέπει να βρεθεί ποια είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσουν ή να λάβουν οι συσσωρευτές (για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα). Έτσι, εάν στην εξίσωση 2.34 τεθεί το $E_1 = 0$ και λυθεί ως προς την ισχύ λαμβάνεται:

$$P_{d,max} = \frac{k \cdot E_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + E_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}$$
(2.36)

Κατά την φόρτιση, η μέγιστη ισχύς που μπορούν να δεχτούν οι συσσωρευτές, για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα, θα βρεθεί εάν στη σχέση 2.34 τεθεί $E_1 = c \cdot E_{max}$. Έτσι προκύπτει:

$$P_{c,max} = \frac{-k \cdot c \cdot E_{max} + k \cdot E_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + E_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}$$
(2.37)

Το μοντέλο υποθέτει πως η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή είναι συνάρτηση των κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης. Ένας κύκλος ορίζεται σαν την διεργασία που ξεκινά από ένα συγκεκριμένο σημείο της κατάστασης φόρτισης (*SOC*), ξεφορτίζεται έως ένα χαμηλότερο σημείο κατάστασης φόρτισης και μετά φορτίζεται ως το αρχικό σημείο κατάστασης φόρτισης. Σύμφωνα με το μοντέλο, το εύρος του κύκλου παίζει σημαντικότερο ρόλο από τη μέση κατάσταση φόρτισης κατά τη διάρκεια του κύκλου. Αυτό θα πει πως μια αποφόρτιση από το 90% στο 70% και πάλι στο 90% έχει την ίδια επίδραση με μια αποφόρτιση από το 50% στο 30% και πάλι στο 50%. Η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή σε όρους αριθμού κύκλων φόρτισης προβλέπεται ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης με τη μέτρηση του κλασματικού βάθους εκφόρτισης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια εξίσωση με δύο εκθετικούς όρους, οι συντελεστές της οποίας προκύπτουν από παλινδρόμηση.

$$C_f = C_1 + C_2 \cdot e^{C_3 \cdot R} + C_4 \cdot e^{C_5 \cdot R}$$
(2.38)

όπου:

- C_f αριθμός κύκλων έως ότου ο συσσωρευτής χαλάσει
- $C_1 C_5$ συντελεστές παλινδρόμησης
- R εύρος κύκλου εκφρασμένος σε όρους κλασματικής κατάστασης φόρτισης

Στο λογισμικό Hybrid2, χρησιμοποιείται η μέθοδος "rainflow" για τη μέτρηση των κύκλων φόρτισης μέσα σε μια χρονοσειρά που δίνει την κατάσταση φόρτισης ανά χρονικό βήμα. Βασισμένη στον αριθμό των κύκλων για κάθε κλασματικό εύρος κατάστασης φόρτισης, η "ζημία" στο συσσωρευτή υπολογίζεται ως:

$$D = \sum_{i=1}^{N_i} \left(N_i \cdot \frac{1}{C_{F,i}} \right)$$
(2.39)

όπου:

• D η κλασματική "ζημία" στο συσσωρευτή

2.1. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

- $C_{F,i}$ ο αριθμός των κύκλων για την αστοχία στο i-οστό εύρος κύκλου
- N_i ο συνολικός αριθμός κύκλων που προκύπτει από την προσομοίωση στο i-οστό εύρος κύκλου.

Πρέπει να σημειωθεί πως στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν υποστηρίζονται οι επιδράσεις του συσσωρευτή με τη θερμοκρασία καθώς και η αυτό-αποφόρτιση.

2.1.4 Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Η ενέργεια από συμβατικό καύσιμο παρέχεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, δηλαδή ενός βενζινοκινητήρα ή πετρελαιοκινητήρα και μιας γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος. Γενικά οι πετρελαιοκινητήρες Diesel έχουν μεγάλο μερίδιο στην αγορά των αυτόνομων συστημάτων ενώ καθώς έχουν μικρό κόστος αγοράς (αλλά μεγάλο κόστος λειτουργίας) χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος λειτουργίας, εκτός από το υψηλό κόστος του καυσίμου τους (το οποίο πρέπει να μεταφερθεί στην απομονωμένη περιοχή) επιβαρύνεται από τη συντήρηση (π.χ. λίπανση) μετά από συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας ενώ η σχετικά περιορισμένη τους χρήση και σε χαμηλό φορτίο προκαλεί θέματα αξιοπιστίας.

Γενικά, οι πετρελαιοκινητήρες έχουν ένα τεχνικό ελάχιστο λειτουργίας το οποίο διαφέρει ανάλογα τον κατασκευαστή και το μοντέλο ενώ η κατανάλωση καυσίμου σε μερικό φορτίο έχει μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση απ' ότι στο βέλτιστο/ονομαστικό φορτίο. Οι μηχανές που καλύπτουν τη βοηθητική ενέργεια πρέπει να είναι σε θέση να καλύψουν την απαιτούμενη ζήτηση συνολικά ενώ ανάλογα το σχεδιασμό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η φόρτιση του συσσωρευτή.

Για τη μοντελοποίηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, στην περίπτωση που εξετάζεται, αρκεί η καμπύλη ισχύος που δίνει την κατανάλωση καυσίμου (σε μονάδες μάζας ή όγκου) σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδεται στο σύστημα από τη μηχανή (P_{DG}), καθώς και οι περιορισμοί λειτουργίας σε σχέση με τα τεχνικά ελάχιστα και το διαθέσιμο καύσιμο. Γενικά η καμπύλη ισχύος μπορεί να αποδοθεί από μια πολυωνυμική εξίσωση δηλαδή:

$$\dot{m}_{fuel} = a_0 + a_1 \cdot P_{DG} + a_2 \cdot P_{DG}^2 + \dots$$
(2.40)

όπου ο συντελεστής a_0 δίνει την κατανάλωση καυσίμου για μηδενική ισχύ. Σε πολλές περιπτώσεις αρκούν οι δύο πρώτοι όροι (a_0 και a_1) για να περιγράψουν την κατανάλωση καυσίμου από μια μηχανή



Εικόνα 2.5: Ροή νερού διαμέσου μεμβράνης.

[78, 95], δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας ως προς την ισχύ είναι της μορφής:

$$\dot{m}_{fuel} = a_0 + a_1 \cdot P_{DG} \tag{2.41}$$

Εάν θεωρηθεί η κατανάλωση και η λειτουργία της μηχανής σταθερή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος τότε η κατανάλωση καυσίμου θα είναι:

$$m_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \cdot \Delta t = a_0 \cdot \Delta t + a_1 \cdot P_{DG} \cdot \Delta t \to m_{fuel} = a_0 \cdot \Delta t + a_1 \cdot E_{DG}$$
(2.42)

2.1.5 Μονάδες αφαλάτωσης

Αρχή λειτουργίας αντίστροφης ώσμωσης

Η αντίστροφή ώσμωση δεν είναι τίποτα άλλο από αντιστροφή της διαδικασίας του φυσικού φαινομένου της ώσμωσης. Σε δύο υγρά διαφορετικής συγκέντρωσης που χωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη, ασκείται εξωτερική πίεση στην πλευρά που υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση άλατος (Εικόνα 2.5) οδηγώντας έτσι το διαλύτη (καθαρό νερό) προς την αντίθετη κατεύθυνση της ώσμωσης, δηλαδή προς την πλευρά στην οποία υπάρχει το καθαρό νερό (στην πράξη χαμηλή συγκέντρωση άλατος). Η πίεση που πρέπει να ασκηθεί πρέπει να είναι παραπάνω από την ωσμωτική πίεση.

Η ωσμωτική πίεση εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ιόντων C_N στο διάλυμα και δίνεται από την εξίσωση του MORSE:

$$\pi = R \cdot T \sum_{N} i_N \cdot C_N \tag{2.43}$$



Εικόνα 2.6: Η ροή του νερού σε σχέση με την υδροστατική πίεση δια μέσου της μεμβράνης.

όπου i είναι ο συντελεστής VAN'T HOFF για το N ιόν, R η σταθερά των τελειών αερίων και T η θερμοκρασία του νερού. Σε ιδανικά διαλύματα, ο συντελεστής VAN'T HOFF είναι ο συνολικός αριθμός των ιόντων στα οποία ηλεκτρολύεται το άλας, πρακτικά όμως ακόμα και στους ισχυρούς ηλεκτρολύτες είναι λίγο λιγότερο λόγω της εμφάνισης ζευγών ιόντων. Η ωσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού είναι περίπου 2.5MPa. Η σχέση 2.43 για δεδομένο άλας και θερμοκρασία μπορεί να απλοποιηθεί:

$$\pi = \omega \cdot C \tag{2.44}$$

όπου ω ο συντελεστής ωσμωτικής πίεσης και Cη συγκέντρωση του άλατος.

Όσο η εφαρμοζόμενη υδροστατική πίεση ΔP είναι μεγαλύτερη από την διαφορά ωσμωτικής πίεσης $\Delta \pi$ ανάμεσα στο νερό τροφοδοσίας και το καθαρό νερό, τότε νερό θα ρέει από το νερό με άλας στο καθαρό νερό όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6.

Παραγωγή νερού με αντίστροφη ώσμωση

Η παραγωγή νερού με αντίστροφη ώσμωση είναι μια συνεχής διεργασία. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται με υψηλή πίεση σε κυλινδρικά δοχεία κατά μήκος του κύριου άξονά τους. Εντός του δοχείου πίεσης είναι τοποθετημένη η μεμβράνη και ένα μέρος του νερού διέρχεται διαμέσου της και πηγαίνει στο ρεύμα του καθαρού νερού ενώ το υπόλοιπο νερό συνεχίζει και τελικά εξέρχεται. Στο ρεύμα του νερού τροφοδοσίας και κατά μήκος της μεμβράνης, η συγκέντρωση του άλατος αυξάνεται καθώς η ποσότητα του νερού μειώνεται, άρα η ωσμωτική πίεση του νερού αυξάνεται και επομένως η πίεση που πρέπει να ασκεί η αντλία θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπάρχει ροή νερού διαμέσου της μεμβράνης σε όλο το μήκος της.

Ενεργειακή κατανάλωση

Για την προσέγγιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας αρχικά θα θεωρηθεί η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης χωρίς τη χρήση μονάδας ανάκτησης ενέργειας [96]. Το ενεργειακό κόστος συνδέεται με την ειδική κατανάλωση ενέργειας (*SEC*-kWh/m³) η οποία ορίζεται ως η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για να παραχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού, δηλαδή:

$$SEC = \frac{E_p}{Q_p} \tag{2.45}$$

όπου Q_p η παραγόμενη ποσότητα νερού. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται (E_p) μπορεί να θεωρηθεί πως αποτελείται από δύο συνιστώσες, από ένα σταθερό μέρος (E_c) το όποιο έχει να κάνει με τις σταθερές ηλεκτρικές ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης και από ένα μεταβλητό (E_v) το οποίο σχετίζεται με την ποσότητα του νερού που παράγεται, έτσι:

$$E_p = E_c + E_v \tag{2.46}$$

Η ενέργεια E_v σχετίζεται άμεσα με τη διεργασία της αφαλάτωσης και περιλαμβάνει όλες εκείνες τις συσκευές που καταναλώνουν ενέργεια εξαρτημένη με την ποσότητα νερού που παράγεται. Η κατανά-λωση αυτή προέρχεται από τις αντλίες και κυρίως από την αντλία υψηλής πίεσης (E_{HP}). Όμοια μπορεί να οριστεί και η ειδική ενεργειακή κατανάλωση της αντλίας υψηλής πίεσης (SEC_{HP}):

$$SEC_{HP} = \frac{E_{HP}}{Q_p} \tag{2.47}$$

Για μια στιγμιαία τιμή μπορεί να οριστεί ως:

$$SEC_{HP,i} = \frac{P_{HP}}{\dot{Q}_p} \tag{2.48}$$

$$P_{HP} = \Delta P \cdot \dot{Q}_f \tag{2.49}$$

όπου \dot{Q}_f ο ρυθμός τροφοδοσίας του νερού και ΔP η διαφορά πίεσης που αποδίδεται από την αντλία στο νερό τροφοδοσίας, δηλαδή:

$$\Delta P = P_f - P_o \tag{2.50}$$

όπου P_f η τελική πίεση του νερού τροφοδοσίας και P_o η αρχική πίεση του νερού. Συντελεστής ανάκτησης ονομάζεται ο λόγος του παραγόμενου νερού προς το νερό τροφοδοσίας (Εξί-

σωση 2.51) και αποτελεί σημαντική παράμετρο που δείχνει την απόδοση της διεργασίας.

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} \tag{2.51}$$

ή στιγμιαία:

$$Y_i = \frac{Q_p}{\dot{Q}_f} \tag{2.52}$$

Έτσι από τις εξισώσεις 2.52, 2.49 και 2.48 προκύπτει η ειδική κατανάλωση σε σχέση με το συντελεστή ανάκτησης:

$$SEC_i = \frac{\Delta P}{Y_i} \tag{2.53}$$

Στη συγκεκριμένη εργασία, η ειδική ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης θα δίνεται από πίνακα ως προς τη συγκέντρωση άλατος. Στην απλούστερη περίπτωση μοντελοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως βασική παράμετρος σχεδιασμού η ημερήσια δυναμικότητα ($Q_{cap} - m^3$). Έτσι, η ισχύς που απαιτεί μια μονάδα αφαλάτωσης κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι [97]:

$$P_{DES} = SEC_i \cdot \frac{Q_{cap}}{24 \,\mathrm{hr}} \tag{2.54}$$

Οι ώρες λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης κάθε ημέρας καθορίζονται από την ημερήσια ζήτηση νερού. Έτσι εάν η ημερήσια ζήτηση είναι Q_{daily} τότε οι ώρες λειτουργίας είναι:

$$T_{op} = \min\left(\frac{Q_{daily}}{Q_{cap}/24\,\mathrm{hr}}, 24\,\mathrm{hr}\right) \tag{2.55}$$

Η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να αδυνατεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες νερού. Οι ώρες λειτουργίας της μονάδας μέσα στην ημέρα αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την εκμετάλλευση της ανανεώσιμης ενέργειας. Εάν η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας προέρχεται κυρίως από φωτοβολταϊκά, τότε η βέλτιστη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης είναι γύρω από τις μεσημεριανές ώρες που η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται.

Εάν η ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή ενέργειας είναι κυρίως η αιολική ενέργεια τότε οι ώρες λειτουργίας της μονάδας εξαρτώνται από τη μικροκλίμακα της περιοχής εγκατάστασης. Στις περισσότερες περιοχές, το απόγευμα επικρατούν μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Η κατανομή της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης δίνεται από τη μεταβλητή OP(t) και δίνει το ποσοστό λειτουργίας της μονάδας στο χρονικό διάστημα του βήματος t. Η μεταβλητή OP(t) έχει τιμή 100% όταν η μονάδα αφαλάτωσης δουλεύει για μια ώρα χωρίς άνοιγμα ή κλείσιμο και 0% εάν η μονάδα δεν δουλεύει καθόλου και από 0% έως 100% εάν η μονάδα αφαλάτωσης ανοίγει ή κλείνει μέσα στην ώρα αυτή. Η μονάδα

Η ενέργεια που απαιτεί η αφαλάτωση σε κάθε βήμα της προσομοίωσής λειτουργίας (t) είναι:

$$E_{DES}(t) = OP(t) \cdot P_{DES}(t) \cdot \Delta t \tag{2.56}$$

2.1.6 Αντιστροφέας

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι η συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο με τη βοήθεια συγκεκριμένων ηλεκτρονικών διατάξεων. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση απαιτούνται ειδικοί αντιστροφείς κατάλληλοι για αυτόνομα συστήματα. Η διαφορά με τους κοινούς αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται στα διασυνδεδεμένα συστήματα είναι πως ο αυτόνομος αντιστροφέας πρέπει να δημιουργήσει το εναλλασσόμενο δίκτυο δηλαδή την κυματομορφή συγκεκριμένης συχνότητας και τάσης. Όταν υπάρχει ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος σε λειτουργία, τότε η συχνότητα δημιουργείται από το Η/Ζ αφού παράγει καλύτερης ποιότητας κυματομορφή. Οι αυτόνομοι αντιστροφείς έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν με τους συσσωρευτές του συστήματος και να λειτουργήσουν έτσι ως ρυθμιστές φόρτισης.

2.2. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΟΡΩΝ

Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας/αποθήκευσης που απαιτούν αντιστροφέα είναι τα φωτοβολταϊκά και οι συσσωρευτές ενώ ανάλογα τον τύπο της Α/Γ (δηλαδή εάν δίνει συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα) ενδέχεται να χρειάζεται και αυτή.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν εξετάζεται ο τρόπος διασύνδεσης των ενεργειακών υποσυστημάτων επάνω στον αντιστροφέα, για παράδειγμα πως τα Φ/Β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν στον κάθε αντιστροφέα (σειρά και παράλληλα) αλλά ενδιαφέρει μόνο η εγκατεστημένη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης τους. Εν γένει, ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα η_{inv} εξαρτάται από την ισχύ που διαχειρίζεται κάθε φόρα αλλά γενικά δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα και μπορεί να θεωρηθεί σταθερός για το στάδιο της διαστασιολόγησης αλλά και της προσομοίωσης.

Στην εικόνα 2.1 εμφανίζονται τρεις τύποι αντιστροφέων. Ο ειδικός αντιστροφέας για αυτόνομα συστήματα είναι ο INV_{autonom} ενώ οι υπόλοιποι, δηλαδή των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών είναι κοινοί. Ο αριθμός των αντιστροφέων κάθε τύπου εξαρτάται από την εγκατεστημένη ισχύ των συνδεδεμένων συστημάτων, παραγωγής ενέργειας ή αποθήκευσης.

2.2 Δυναμικό πόρων

Η μοντελοποίηση του δυναμικού των ανανεώσιμων πόρων (*source*) αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διαστασιολόγηση. Τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά υποσυστήματα χρησιμοποιούν τον άνεμο και την ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα, και έτσι αυτοί είναι οι εκφραστές του δυναμικού προς μοντελοποίηση. Για το στάδιο του σχεδιασμού ενδιαφέρει η κατανομή των πόρων μέσα στην ημέρα, ενώ για το στάδιο της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται απλές χρονοσειρές του διαθέσιμου πόρου. Η μοντελοποίηση σε ημερήσιο επίπεδο έστω και με απλό τρόπο, χωρίς πολλά δεδομένα, μπορεί να επιτρέψει το σχεδιασμό με ακρίβεια ενός υβριδικού συστήματος καθώς η αλληλεπίδραση τους παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό με τρόπο όπου οι μέθοδοι που λαμβάνουν μέσες τιμές δεν μπορούν εκτιμήσουν.

2.2.1 Αιολικό δυναμικό

Μοντελοποίηση ταχύτητας ανέμου για το στάδιο της διαστασιολόγησης

Γενικά, το αιολικό δυναμικό παντού στη βιβλιογραφία μοντελοποιείται σε ετήσια βάση με την διπαραμετρική κατανομή Weibull. Στην περίπτωση του σχεδιασμού, μας ενδιαφέρει η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μέσα σε μια ημέρα. Η διακύμανση του ανέμου είναι γενικά ένα στοχαστικό φαινόμενο



Εικόνα 2.7: Προσέγγιση ημερήσιας κατανομής ταχύτητας ανέμου κατά το στάδιο της διαστασιολόγησης.

και δεν ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη μορφή. Η καθημερινή διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου σε μια περιοχή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως η μορφολογία του εδάφους, το υψόμετρο καθώς και άλλα στοχαστικά φαινόμενα. Μετά από αναλύσεις σε χρονοσειρές η κατανομή μπορεί να προσεγγιστεί σε αρκετές περιπτώσεις από μια ημιτονοειδή καμπύλη της μορφής [98]:

$$V_z = V_{mean} \left(1 + \delta_V \cdot \sin \frac{2\pi}{24 \text{hr}} (t - t_{Vmax}) \right)$$
(2.57)

όπου t_{Vmax} η ώρα της ημέρας όπου παρατηρείται η μέγιστη ταχύτητα και δ_V ο συντελεστής διακύμανσης που σχετίζεται με το πλάτος της καμπύλης (Εικόνα 2.7). Οι δύο αυτοί συντελεστές προκύπτουν μετά από ανάλυση μετρήσεων για την κάθε περιοχή. Για την αναγωγή στο ύψος της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος:

$$V_z = V_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha_z}$$
(2.58)

όπου V_{ref} η ταχύτητα αναφοράς, z το ύψος της ανεμογεννήτριας, z_{ref} το ύψος αναφοράς των μετρήσεων/τιμών της ταχύτητας ανέμου και α_z ο συντελεστής διάχυσης του ανέμου wind shear coefficient) που αφορά στην κάθε περιοχή.



Εικόνα 2.8: Προσέγγιση ημερήσιας κατανομής ηλιακής ακτινοβολίας κατά στάδιο της διαστασιολόγησης.

2.2.2 Ηλιακό δυναμικό

Μοντελοποίηση ηλιακής ακτινοβολίας για το στάδιο της διαστασιολόγησης

Ο ήλιος ακολουθεί καθημερινά μια συγκεκριμένη πορεία στον ουράνιο θόλο και η ένταση της ακτινοβολίας, αν και εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια. Για το σκοπό αυτό στη βιβλιογραφία απαντώνται αρκετά μοντέλα με συνηθέστερα το μοντέλο αίθριας ημέρας (Hottel) που δίνει τη στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία για μια συγκεκριμένη περιοχή, μια συγκεκριμένη στιγμή, με δεδομένο τις αίθριες καιρικές συνθήκες και το μοντέλο της μέσης ημέρας (Lui-Jordan) που δίνει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια τη μέση ημέρα ενός μήνα [99]. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία σχεδιασμού έχει γίνει η υπόθεση πως η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι τριγωνική, με βάση τριγώνου τις ώρες ανατολής και δύσης και εμβαδόν όσο η ημερήσια ακτινοβολία επιπέδου για τη συγκεκριμένη μέρα και τη συγκεκριμένη περιοχή (Εικόνα 2.8). Οι ώρες ανατολής t_{sr} και δύσης t_{ss} για την κάθε περιοχή μπορούν να βρεθούν από θεωρητικές σχέσεις που περιγράφονται αναλυτικά στο παράρτημα (ΠΠ.8 και ΠΠ.9). Η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από πίνακες (ή εναλλακτικά ο δείκτης αιθριότητας) και μετασχηματίζεται για την κλίση του επιπέδου που μας ενδιαφέρει σύμφωνα με το μοντέλο της μέσης ημέρας των Lui-Jordan το οποίο περιγράφεται και αυτό στο παράρτημα (ΠΠ.10). Έτσι, από τη στιγμή που υπάρχουν τα δεδομένα αυτά, η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$G = \begin{cases} 0 & t_{sr} > t > 0 \\ (t - t_{sr}) \cdot \frac{G_{max}}{2 \cdot t_m} & t_{sr} + t_m > t > t_{sr} \\ G_{max} - (t - t_{sr}) \cdot \frac{G_{max}}{2 \cdot t_m} & t_{ss} > t > t_{sr} + t_m \\ 0 & 24 > t > t_{ss} \end{cases}$$
(2.59)

Όπου t_m το μέσον της χρονικής απόστασης ανατολής και δύσης του ήλιου, δηλαδή:

$$t_m = \frac{t_{ss} - t_{sr}}{2} \tag{2.60}$$

και G_{max} η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή:

$$G_{max} = \frac{2 \cdot H_T}{t_{sr} - t_{ss}} \tag{2.61}$$

όπου H_T η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογικό πλαίσιο

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα αφορά στη διαδικασία που ακολουθείται για την εύρεση του καλύτερου εναλλακτικού σεναρίου εγκατάστασης ενός υβριδικού συστήματος κάλυψης αναγκών ενέργειας και νερού στη βάση πολλαπλών κριτηρίων αξιολόγησης. Η αξιοπιστία της απόφασης εξαρτάται από τον αριθμό των εναλλακτικών σεναρίων και από το εύρος των λύσεων. Κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εξάλειψη όλων των αβεβαιοτήτων έτσι ώστε η τελική απόφαση να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο τεκμηριωμένη . Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τα στάδια της διαδικασίας λήψης απόφασης για την επιλογή ενός υβριδικού συστήματος για τη συνδυασμένη κάλυψη αναγκών ενέργειας και νερού. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι ερωτήσεις στις οποίες πρέπει να απαντά ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων.

Στάδιο	Ερωτήσεις	
Ανάλυση Βιωσιμότητας	 Είναι δυνατό να καλυφθούν οι ανάγκες νερού και ενέρ- γειας σε μια περιοχή από ΑΠΕ και μονάδα αφαλάτωσης; 	
Προκαταρκτικός Σχεδιασμός	 Ποιες είναι οι εναλλακτικές διαμορφώσεις του συστι ματος; 	
	• Πόση είναι η ισχύς κάθε ενεργειακού υποσυστήματος;	
Επιδόσεις Συστημάτων	 Πώς ανταποκρίνεται το κάθε εναλλακτικό σύστημα σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας; 	

Πίνακας 3.1: Διαδικασία/Βήματα λήψης απόφασης για την επιλογή ενός υβριδικού συστήματος

	 Ποιο είναι το κόστος επένδυσης και το κόστος λειτουρ-
	γίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου;
	 Ποια είναι τα περιβαλλοντικά κόστη και οφέλη;
Ανάλυση Ευαισθησίας	 Πόσο ευαίσθητες είναι οι επιδόσεις του συστήματος
	στις μεταβολές της ισχύος των συστημάτων, των άλλων
	σχεδιαστικών παραμέτρων καθώς και των πόρων;
Ανάλυση Επικινδυνότητας	 Ποιοι είναι οι παράγοντες αβεβαιότητας και πως επηρε-
	άζουν την απόδοση του συστήματος;
	 Ποια είναι τα ακραία σενάρια και οι επιπτώσεις τους:
	 Ποιοι είναι οι κίνδυνοι αστοχίας του συστήματος;
Επισκόπηση Εναλλακτικών	 Τα συστήματα καλύπτουν τις απαιτούμενες ανάγκες
	ενέργειας και νερού;
	 Τα συστήματα εκμεταλλεύονται επαρκώς το δυναμικό
	ΑΠΕ της περιοχής;
	 Υπάρχουν επικρατούσες εναλλακτικές;
Αξιολόγηση και Επιλογή	 Ποιες είναι οι προτιμήσεις αυτών που λαμβάνουν τις
	αποφάσεις;
	 Ποια χαρακτηριστικά και ποιοι δείκτες επιδόσεων είναι
	οι σημαντικότεροι:

Υποστηρικτικά εργαλεία λήψης απόφασης

Για την υποστήριξη των σταδίων λήψης απόφασης, έχουν υλοποιηθεί έξι υπολογιστικά εργαλεία. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των σταδίων με τα εργαλεία ενώ στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται επιγραμματικά οι σκοποί και τα αποτελέσματα του κάθε υπολογιστικού εργαλείου.

 Διαστασιολόγηση Συστήματος Σκοπός του σχεδιαστή είναι ο καθορισμός του συνόλου των εναλλακτικών συστημάτων που ικανοποιούν τις ανάγκες σε ενέργεια και νερό στην περιοχή όπου προτείνεται να εγκατασταθεί το υβριδικό σύστημα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτή τη



Εικόνα 3.1: Η σχέση των υπολογιστικών εργασιών και των βημάτων λήψης απόφασης.

διαδικασία είναι ένα σύνολο εναλλακτικών συστημάτων. Τα συστήματα αυτά διαφοροποιούνται από το μέγεθος/εγκατεστημένη ισχύ των ενεργειακών υποσυστημάτων καθώς και από τους κανόνες ενεργειακής διαχείρισης. Το κάθε σύστημα προκύπτει μέσα από μια διαδικασία σχεδιασμού βασισμένη σε στόχους που πρέπει να ικανοποιούνται. Η διαδικασία της διαστασιολόγησης παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 3.1.

- 2. Προσομοίωση Συστήματος Σκοπός της προσομοίωσης είναι η εκτίμηση της απόδοσης του κάθε εναλλακτικού συστήματος. Ο υπολογισμός της απόδοσης βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα διαθεσιμότητας πόρων (χρονοσειρές ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας) αλλά και ζήτησης. Από την προσομοίωση παράγονται λεπτομερή αποτελέσματα, όπως οι ενεργειακές ροές ανάμεσα στα υποσυστήματα, η κατάσταση των συστημάτων σε κάθε χρονική στιγμή ενώ υπολογίζονται και δείκτες απόδοσης που αποτελούν το σημαντικότερο αποτέλεσμα του συγκεκριμένου εργαλείου. Η διαδικασία της προσομοίωσης παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 3.2.
- 3. Ανάλυση Ευαισθησίας Η ανάλυση ευαισθησίας έχει σκοπό την εξέταση της σημαντικότητας της κάθε παραμέτρου στις επιδόσεις του συστήματος. Τα αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν σε μικρές ή μεγάλες αλλαγές στη διαστασιολόγηση του συστήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζεται στην ενότητα 3.3
- 4. Ανάλυση Επικινδυνότητας Η ανάλυση επικινδυνότητας αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση των κινδύνων που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος από τις διάφορες αβεβαιότητες στις παραμέτρους σχεδιασμού. Η ανάλυση επικινδυνότητας πραγματοποιείται με προσομοίωση MONTE CARLO όπου κύριο παραγόμενο αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο δεικτών κινδύνου.

Οι δείκτες αυτοί μπορούν να αξιολογηθούν μαζί με τους άλλους δείκτες κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης. Η ανάλυση επικινδυνότητας παρουσιάζεται στην ενότητα 3.4.

- 5. Επισκόπηση Η επισκόπηση κάθε μιας από τις εναλλακτικές περιπτώσεις σχεδιασμού μπορεί να εντοπίσει τους συμβιβασμούς (trade-offs) ανάμεσα στους διαφορετικούς στόχους ενώ μπορεί να εντοπίσει τις εναλλακτικές που δεν αποτελούν καλές επιλογές. Επιπλέον, με την επισκόπηση μπορούν να βρεθούν οι κυρίαρχες εναλλακτικές λύσεις. Η επισκόπηση παρουσιάζεται στην ενότητα 3.5.
- 6. Αξιολόγηση Η αξιολόγηση χρησιμοποιείται για την εύρεση του καλύτερου συστήματος και πραγματοποιείται στη βάση πολλαπλών κριτηρίων για τους δείκτες που παράγονται κατά την προσομοίωση. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση είναι αυτή της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Χρησιμοποιούνται βάρη για τη σημαντικότητα του κάθε δείκτη. Το αποτέλεσμα αυτού του εργαλείου είναι η τελική κατάταξη των εναλλακτικών σχεδιαστικών προτάσεων. Αναλυτικά, η μεθοδολογία της αξιολόγησης παρουσιάζεται στην ενότητα 3.6.

3.1 Διαστασιολόγηση

Για το σωστό σχεδιασμό της μονάδας παραγωγής ενέργειας με ΑΠΕ που θα καλύπτει ανάγκες νερού μέσω αφαλάτωσης και ανάγκες ηλεκτρικού ρεύματος μιας κοινότητας είναι σημαντική η εκτίμηση μιας σειράς παραμέτρων που αφορούν α) το μέγεθος των αναγκών σε νερό και ηλεκτρική ενέργεια β) τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής καθώς και γ) τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν. Βασικό στοιχείο του σχεδιασμού είναι οι κανόνες-στόχοι που αφορούν στη λειτουργία της μονάδας αλλά και στην εκμετάλλευση των ενεργειακών πηγών.

Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκαν οι ακόλουθοι στόχοι:

- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να χρησιμοποιούνται στο μέγιστο δυνατό βαθμό (στόχος MAX-RES).
- Η περίσσεια ενέργειας να είναι όσο το δυνατό λιγότερη (στόχος MIN-UNDELIVER).
- Το κόστος της εγκατάστασης να είναι το ελάχιστο δυνατό (στόχος MIN-CAP).
- Το κόστος λειτουργίας να είναι το ελάχιστο δυνατό (στόχος MIN-OP).
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις να είναι ελάχιστες (στόχος MIN-ENV)

3.1. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

Εργασία	Σκοπός	Αποτέλεσμα Λίστα εναλλακτικών <u>Εναλ.</u> Ισχύς ΡV Ισχύς WEC Χωρ. DES Χωρ. BAT <u>C1</u> <u>C2</u> <u>C3</u> <u>C4</u>		
1. Διαστασιολόγηση	Να δημιουργηθεί ικανός αριθμός εναλλακτικών σχεδιασμών			
2. Προσομοίωση	Να υπολογιστούν οι επιδόσεις της κάθε εναλλακτικής βασισμένη σε πραγματικά δεδομένα	Δείκτες επιδόσεων Εναλ. Δεικτης1 Δεικτης2 Δεικτης Δεικτης C1 C2 C3 C4		
3. Ανάλυση ευαισθησίας	Εξετάζεται η επιρροή της κάθε σχεδιαστικής παραμέτρου, στους δείκτες επιδόσεων	Γραφήματα ευαισθησίας		
4. Επισκόπηση	Να εντοπιστούν trade-offs και επικρατούσες λύσεις από τη λίστα των εναλλακτικών	Συγκεντρωτική επισκόπηση Εναλ. Επικ1 Επικ2 Επικ Επικ_n C1 C2 C4		
5. Ανάλυση επικινδυνότητας	Να ποσοτικοποιηθεί η επικινδυνότητα που έχουν οι μεταβλητές με αβεβαιότητα	Δείκτες επικινδυνότητας Εναλ. Δεικτης1 Δεικτης2 Δεικτης Δεικτης_n C1 C2 C3 C4		
6. Αξιολόγηση	Αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων στη βάση των δεικτών	Κατάταξη Εναλ. Κατάταξη Βαθμολογία C2 1 C1 2 C4 3		

	,	`	· · ·	h 1
Πνακας 3 2. Συνοιμη	ακοποιι και α	ποτελεσιιατών τω	ν μπολονιστικώ	V EUVUYEIUV
πνακάς 3.2. 20νοφη		ποτεπεσματών τω		v cpyu/iciwv.



Εικόνα 3.2: Η διαδικασία της διαστασιολόγησης σχηματικά.

Για λόγους που αφορούν τη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης υπάρχουν δύο ακόμα λειτουργικοί περιορισμοί που θα ληφθούν υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού:

- Να υπάρχει πάντα διαθέσιμη ενέργεια για την παραγωγή νερού (Περιορισμός συνεχούς λειτουργίας).
- Η ισχύς που δίνεται στη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης να είναι σταθερή (Περιορισμός σταθερής λειτουργίας).

Οι στόχοι του σχεδιασμού, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς οδηγούν στη δημιουργία ενός συνόλου κανόνων σχεδιασμού που πρέπει να ικανοποιούνται σε μεγάλο ή μικρό βαθμό, αφού πολλοί από τους στόχους έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Έτσι, οι παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν αυτούς τους κανόνες, τελικά αποτελούν μεταβλητές απόφασης και γι' αυτό το λόγο εξετάζονται σενάρια. Με αυτή την προσέγγιση, μπορούν να βρεθούν μέγιστα, ελάχιστα αλλά και ενδιάμεσα μεγέθη και χωρητικότητες για τις ενεργειακές μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Όλα τα μεγέθη που προκύπτουν από τα σενάρια σχεδιασμού αποτελούν τις βασικές εναλλακτικές περιπτώσεις που θα πρέπει να διερευνηθούν στη συνέχεια

3.1. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

3.1.1 Μεθοδολογία διαστασιολόγησης

Στη γενικότερη περίπτωση, οι ενεργειακές ανάγκες της μονάδας καλύπτονται από φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεμογεννήτριες, μηχανές εσωτερικής καύσης και συσσωρευτές που λειτουργούν παράλληλα. Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε τεχνολογίας στο συνολικό φορτίο αποτελεί μια σημαντική σχεδιαστική παράμετρο με επιπτώσεις στο κόστος, στην ευστάθεια και γενικά στη λειτουργία της μονάδας.

Η διακύμανση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές λόγω αυξομείωσης των συνθηκών (π.χ. ήλιος και άνεμος), γενικά δεν συμπίπτει με τη διακύμανση της ζήτησης. Όμως σε ένα αυτόνομο σύστημα πρέπει να διατηρείται η παροχή ενέργειας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψη κατά το σχεδιασμό. Η ενέργεια που απορροφάται από το σύστημα κατά τις περιόδους που δεν υπάρχει σχετική ταύτιση ζήτησης και παραγωγής θα πρέπει να έχει παραχθεί και να έχει αποθηκευθεί κατά τις περιόδους που υπάρχει πλεόνασμα.

Κατά το σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αναλυτικά δεδομένα σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής εγκατάστασης έτσι ώστε μέσα από τη διαδικασία της προσομοίωσης για πολλά διαφορετικά συστήματα να προκύψει αυτό που ικανοποιεί καλύτερα τους στόχους και τους περιορισμούς του σχεδιασμού.

Ο σκοπός της διαστασιολόγησης, ως μέρος της λήψης απόφασης/σχεδιασμού, έχει ως σκοπό να δώσει αρχικές ενδείξεις για τα μεγέθη των μονάδων που θα εγκατασταθούν. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μέσες μηνιαίες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του ανέμου και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς και μέσες τιμές για την κατανάλωση ενέργειας και νερού, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα μεγέθη των μονάδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, οι συσσωρευτές και το βοηθητικό σύστημα.

Η διαστασιολόγηση πραγματοποιείται σε τρία διακριτά βήματα:

- Βήμα 1: Υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης και του εξωτερικού φορτίου για την περίοδο σχεδιασμού καθώς και η διαθέσιμη ισχύς.
- Βήμα 2: Υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη των υποσυστημάτων παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες).
- Βήμα 3: Υπολογίζονται τα μεγέθη των υπόλοιπων υποσυστημάτων (συσσωρευτές και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος).

Δεδομένα που απαιτούνται

Η μέθοδος σχεδιασμού που περιγράφεται, βασίζεται στη χρήση ενός ελάχιστου συνόλου μετεωρολογικών δεδομένων για την υποψήφια προς εγκατάσταση περιοχή ενώ γίνεται χρήση λίγων τεχνικών χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων που απαρτίζουν την εγκατάσταση. Συγκεκριμένα για το σχεδιασμό απαιτούνται:

- Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία. Οι τιμές μετασχηματίζονται με βάση την κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η οποία επιλέγεται έτσι ώστε το πλαίσιο να αποδίδει τη μέγιστη ενέργεια σε ετήσια βάση. Δίνεται σε kWh/m².
- Κατανομή ταχύτητας ανέμου. Συγκεκριμένα:
 - Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου και παράμετρος k της κατανομής Weibull που δίνει τη συνάρτηση κατανομής πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου.
 - Το ύψος αναφοράς της ταχύτητας ανέμου.
 - Ο συντελεστής α_z της εκθετικής μεταβολής για τη μετατροπή των ταχυτήτων από το ύψος
 αναφοράς στο ύψος της ανεμογεννήτριας.
 - Μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου. Δίνεται σε $\mathrm{m/s.}$

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων που απαρτίζουν το σύστημα παραγωγής ενέργειας και νερού και απαιτούνται για τους υπολογισμούς έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 2.

1ο Βήμα διαστασιολόγησης - Υπολογισμός αναγκών ενέργειας και ισχύος

Σε αυτό το βήμα υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες του συστήματος. Οι ενεργειακές απαιτήσεις εξαρτώνται από τη δυναμικότητα της μονάδας και από την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας. Η απαιτούμενη ισχύς της μονάδας αφαλάτωσης θεωρείται πως παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια λειτουργίας της.

Η ισχύς που χρειάζεται να δίνει κάθε στιγμή το σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι το άθροισμα της ζήτησης της αντίστροφης ώσμωσης με την εξωτερική ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος.

$$P_d = P_{DES} + P_{LOAD} \tag{3.1}$$

όπου P_{DES} είναι η ισχύς που απαιτεί η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και P_{LOAD} η εξωτερική ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος.

20 Βήμα διαστασιολόγησης - Διαστασιολόγηση ανανεώσιμων μονάδων παραγωγής ενέργειας

Σε αυτό το βήμα γίνεται υπολογισμός της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των ανανεώσιμων υποσυστημάτων παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες). Ο υπολογισμός θα γίνει με γνώμονα την ικανοποίηση όσο το δυνατό περισσότερων περιορισμών καθώς και των σχεδιαστικών στόχων που αναλύθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.

Πρακτικά, η μεταβλητή σχεδιασμού για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών είναι ισοδύναμη με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ καθώς και ισοδύναμη με τη συνολική επιφάνεια πλαισίων (για δεδομένο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου). Η μεταβλητή σχεδιασμού για την περίπτωση των ανεμογεννητριών είναι ισοδύναμη με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των ανεμογεννητριών. Οι παραπάνω μεταβλητές σχεδιασμού επηρεάζουν σημαντικά και το συνολικό κόστος της επένδυσης.

Ο *κανόνας σχεδιασμού* ο οποίος θα επιτρέψει τον προσδιορισμό της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ συνοψίζεται ως εξής:

Η συνολική ποσότητα της ανανεώσιμης ενέργειας που παράγεται σε μια συγκεκριμένη περίοδο σχεδιασμού ισούται με την ενέργεια που απαιτείται από τη μονάδα αφαλάτωσης και τη ζήτηση του δικτύου για την ίδια περίοδο.

Ο κανόνας σχεδιασμού είναι σε συμφωνία με τους στόχους σχεδιασμού "MAX-RES" and "MIN-UNDELIVER" καθώς και με τον περιορισμό της συνεχούς λειτουργίας. Πρέπει εδώ να ειπωθεί πως ο περιορισμός της σταθερής λειτουργίας δεν διασφαλίζεται σε αυτό το σημείο αλλά στο 3ο βήμα. Οι αναλυτικοί αλγόριθμοι δίνονται συνολικά σε επόμενη ενότητα.

Ο παραπάνω κανόνας μπορεί να οδηγήσει σε διάφορες πιθανές εγκαταστάσεις ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας αφού η ίδια ποσότητα ενέργειας μπορεί να παραχθεί από διαφορετικούς συνδυασμούς ΑΠΕ. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί οδηγούν σε διαφορετικά επίπεδα ικανοποίησης των στόχων σχεδιασμού "MIN-CAP" και "MIN-OP" καθώς έχουν και διαφορετική συνεισφορά στον περιορισμό της σταθερής λειτουργίας.

Για να εξεταστούν οι πιθανοί συνδυασμοί καθώς και οι επιδράσεις τους στους δείκτες θα χρησιμοποιηθεί μια μεταβλητή απόφασης. Αυτή η μεταβλητή απαιτείται για να υπολογιστεί η ενέργεια που παράχθηκε από κάθε ανανεώσιμη πηγή στο υβριδικό σύστημα σε σχέση με τη συνολική ενέργεια που παράγουν οι ΑΠΕ. Έτσι ορίζεται ως α_{em} το ποσοστό της ανανεώσιμης ενέργειας που παράχθηκε από τις ανεμογεννήτριες, δηλαδή από το αιολικό υποσύστημα: Ενώ η ενέργεια που παράχθηκε από ανεμογεννήτριες είναι:

$$E_{PV} = (1 - \alpha_{em}) \cdot E_{RES} \tag{3.3}$$

όπου E_{RES} είναι η συνολική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Σύμφωνα με τον κανόνα σχεδιασμού αυτή η ενέργεια πρέπει να είναι:

$$E_{RES} = \int_0^T P_d dt \tag{3.4}$$

όπου Tείναι η χρονική περίοδος του σχεδιασμού.

Έτσι μπορεί να εξεταστούν περιπτώσεις σχεδιασμού για συγκεκριμένες τιμές του α_{em} (ανάμεσα στο 0 και το 100%) καθώς και για τις περιπτώσεις μόνο φωτοβολταϊκών (δηλαδή $\alpha_{em} = 0\%$) και μόνο ανεμογεννητριών ($\alpha_{em} = 100\%$). Οι διαφορετικές τιμές του α_{em} δημιουργούν εναλλακτικά σενάρια σχεδιασμού ως προς τη συμμετοχή της κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό μείγμα του υβριδικού συστήματος. Για τη μελέτη περίπτωσης έχουν ληφθεί 5 τιμές του α_{em} , δηλαδή 0, 25, 50, 75 και 100%.

3ο Βήμα διαστασιολόγησης - Διαστασιολόγηση βοηθητικών συστημάτων

Οι παράμετροι σχεδιασμού για τα βοηθητικά συστήματα είναι ο αριθμός των συστοιχιών των συσσωρευτών και ο αριθμός των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Οι κανόνες σχεδιασμού που θα επιτρέψουν τον προσδιορισμό των βοηθητικών συσκευών συνοψίζονται ως εξής:

- Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών πρέπει να είναι ίση με τη συνολική ισχύ που χρειάζεται η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης μαζί με την μεγαλύτερη προβλεπόμενη εξωτερική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται άμεσα από ΑΠΕ, καλύπτεται πρώτα από την περίσσεια ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στους συσσωρευτές και έπειτα από ενέργεια που παρέχεται από το υποσύστημα συμβατικού καυσίμου.

Και οι δύο κανόνες βασίζονται στον περιορισμό σταθερής λειτουργίας. Ο πρώτος κανόνας διασφαλίζει τη σταθερή λειτουργία κατά τις χρονικές εκείνες περιόδους όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι ικανές να παρέχουν την απαραίτητη ισχύ. Ο δεύτερος κανόνας είναι σε συμφωνία με το στόχο σχεδιασμού "MIN-UNDELIVER".

Οι παραπάνω κανόνες οδηγούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς επειδή η ζήτηση ενέργειας που δεν

3.1. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

καλύπτεται από ΑΠΕ μπορεί να καλυφθεί από συστήματα με διαφορετικές βοηθητικές μονάδες. Έτσι μια νέα μεταβλητή απόφασης χρειάζεται για να ορίσει το σύστημα ως προς τη χρησιμοποίηση των συμβατικών συστημάτων. Αυτή η μεταβλητή απόφασης επηρεάζει τους στόχους σχεδιασμού "MIN-CAP", "MIN-OP" και "MIN-ENV" με τρόπο έτσι ώστε οι στόχοι να έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Γι' αυτό το σκοπό ορίζονται δύο ακραίες περιπτώσεις όπως φαίνεται παρακάτω:

- Η περίπτωση "LowRes" εκφράζει την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας της μονάδας παραγωγής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ελαχιστοποιώντας τη χρήση συμβατικών συστημάτων.
- Η περίπτωση "HiRes" εκφράζει την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης της μονάδας παραγωγής ενέργειας ελαχιστοποιώντας το μέγεθος του απαιτούμενου συσσωρευτή και την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων ΑΠΕ μεγιστοποιώντας τη χρήση συμβατικών συστημάτων.

Όπως θα γίνει σαφές παρακάτω, η μεταβλητή απόφασης εισάγεται στο μοντέλο επιλέγοντας μήνα σχεδιασμού και κατ' επέκταση τις τιμές για τους διαθέσιμους ανανεώσιμους πόρους (ταχύτητα ανέμου και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας).

3.1.2 Αλγόριθμοι διαστασιολόγησης

Φωτοβολταϊκό υποσύστημα

Η διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού υποσυστήματος βασίζεται στον κανόνα που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.1.1 ενώ ο αλγόριθμος σχεδιασμού περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 3.3.

Αιολικό υποσύστημα

Ο σχεδιασμός του αιολικού υποσυστήματος βασίζεται στον κανόνα σχεδιασμού που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.1.1 ενώ ο αλγόριθμος σχεδιασμού περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 3.4.

Σχεδιασμός βοηθητικών συστημάτων

Ο υπολογισμός της χωρητικότητας του συσσωρευτή και της χρήσης των συμβατικών συστημάτων παpoυσιάστηκε στην παράγραφο 3.1.1. Όμως, η απευθείας εφαρμογή αυτού του κανόνα είναι δυνατή εάν είναι γνωστή η λεπτομερής κατανομή της ανανεώσιμης πηγής για τη συγκεκριμένη περίοδο σχεδιασμού (π.χ. ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα για τον άνεμο). Όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή δεδομένα υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν. Η πρώτη βασίζεται σε



Εικόνα 3.3: Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

εμπειρικούς και πρακτικούς σχεδιαστικούς κανόνες ενώ η δεύτερη βασίζεται σε μοντελοποίηση των ανανεώσιμων πόρων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η περίπτωση της μοντελοποίησης των ανανεώσιμων πόρων.

Διαστασιολόγηση με μοντελοποίηση

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό της επίδρασης που έχουν οι μεταβολές των ανανεώσιμων πόρων εντός μιας μικρής χρονικής περιόδου (συνήθως μια ημέρα) στην απόδοση του συστήματος για όλη την περίοδο σχεδιασμού. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στα βήματα που περιγράφονται πα-



Εικόνα 3.4: Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης του αιολικού συστήματος.





- 1. Εκτιμάται η μορφή της κατανομής του ανανεώσιμου πόρου (Ενότητα 2.2).
- 2. Η κατανομή του ανανεώσιμου πόρου μετασχηματίζεται σε κατανομή ισχύος με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε η ενέργεια που παράγεται για την περίοδο σχεδιασμού να είναι ίση με την ανανεώσιμη ενέργεια που υπολογίστηκε στο 1ο βήμα του σχεδιασμού.
- 3. Η μοντελοποίηση της κατανομής του ανανεώσιμου πόρου, επιτρέπει τον υπολογισμό της ζήτησης της ενέργειας που δεν καλύπτεται από τις ανανεώσιμες πηγές καθώς και τον υπολογισμό της ανανεώσιμης ενέργειας που δεν απορροφά το σύστημα και απορρίπτεται (περίσσεια).
- 4. Τα παραπάνω ενεργειακά μεγέθη μαζί με την εφαρμογή του κανόνα σχεδιασμού 2 της ενότητας 3.1.1 χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση του συσσωρευτή και του υπολογισμού της ενέργειας που χρειάζεται να δοθεί από το συμβατικό σύστημα.

Ένα απλό, περιγραφικό μοντέλο για την κατανομή της ισχύος των ανανεώσιμων πόρων P_{RES} μέσα σε χρονική περίοδο T και η σχέση του με τη ζήτηση ισχύος P_d παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5 έτσι ώστε να περιγράψει τα βήματα 3 και 4 που αναφέρονται παραπάνω. Η ακριβής μορφή της κατανομής των ανανεώσιμων πόρων εξαρτάται από το είδος της ανανεώσιμης πηγής που χρησιμοποιείται (φωτοβολταϊκά, αιολικά ή και τα δύο), από το μέγεθος των συστημάτων και από την εκτιμώμενη κατανομή του ανανεώσιμου πόρου για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο.

Στο γράφημα της εικόνας 3.5 διακρίνονται τρεις περιοχές οι οποίες αναπαριστούν διαφορετικές ενεργειακές ποσότητες. Αυτές είναι:

- $E_{RES,d}$: Είναι η ανανεώσιμη ενέργεια η οποία παράγεται και κατευθείαν δίνεται στη ζήτηση.
- *E_{RES,x}*: Είναι η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας. Μέρος ή το σύνολο αυτής της ενέργειας
 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φορτιστεί ο συσσωρευτής (ανάλογα με το μέγεθος και την
 κατάσταση φόρτισής του).
- $E_{d,u}$: Είναι η ποσότητα της ενέργειας η οποία δεν καλύπτεται άμεσα από τις ανανεώσιμες πηγές. Μέρος ή το σύνολο αυτής της ενέργειας μπορεί να καλυφθεί από το συσσωρευτή. Εάν ο συσσωρευτής δεν έχει αρκετή ενέργεια για να καλυφθεί η ζήτηση, τότε θα χρησιμοποιηθεί ενέργεια από συμβατικό σύστημα.

Η διαστασιολόγηση του συσσωρευτή και ο υπολογισμός της ενέργειας που προσφέρει το συμβατικό σύστημα εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στην ποσότητα της ενέργειας που δεν καλύπτεται άμεσα και στην περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό γίνεται διάκριση σε τρεις περιπτώσεις:

- E_{RES,x} = E_{d,u} Η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας ισούται με την ενέργεια που δεν καλύπτεται άμεσα. Όλη η περίσσεια ενέργειας θα αποθηκευτεί στο συσσωρευτή και θα αποδοθεί όλη στην ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα. Έτσι, η χωρητικότητα του συσσωρευτή ισούται με την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας και δεν χρειάζεται η χρήση συμβατικού συστήματος.
- E_{RES,x} > E_{d,u} Η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα. Μέρος της περίσσειας ανανεώσιμης ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στο συσσωρευτή ικανοποιεί όλη τη ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα. Έτσι, η χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι ίση με την ενέργεια που δεν καλύπτεται άμεσα και δεν απαιτείται η χρήση συμβατικού συστήματος, ενώ υπάρχει και απόρριψη της ενεργειακής περίσσειας.
- 3. $E_{RES,x} < E_{d,u}$ Η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας είναι μικρότερη από την ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα. Όλη η περίσσεια ενέργειας θα δοθεί στο συσσωρευτή και θα καλύψει ένα μέρος της ζήτησης που δεν καλύπτεται άμεσα. Το υπόλοιπο θα καλυφθεί από το συμβατικό σύστημα. Η χωρητικότητα του συσσωρευτή ισούται με την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας και η ενέργεια που αποδίδεται από το συμβατικό σύστημα ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται άμεσα μείον την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας ($E_{d,u} - E_{RES,x}$).

Ο αλγόριθμος για τη διαστασιολόγηση του συσσωρευτή παρουσιάζεται για ένα μήνα σχεδιασμού στην εικόνα 3.6. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας από το βοηθητικό σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.7 για κάθε μήνα (*i*) λειτουργίας της εγκατάστασης [100]. Αυτή η μοντελοποίηση

3.1. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ



Εικόνα 3.6: Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης της χωρητικότητας του συσσωρευτή για συγκεκριμένο μήνα σχεδιασμού.

εφαρμόζεται σε όλα τα διαφορετικά συστήματα που παράγονται για τις διάφορες τιμές του α_{em} . Για να ορισθούν δύο διαφορετικές περιπτώσεις για τη κατανάλωση ενέργειας του συμβατικού συστήματος, ο σχεδιασμός επαναλαμβάνεται για δύο μήνες:

- 1. Για το μήνα όπου η ανανεώσιμη πηγή (ηλιακή ακτινοβολία ή ταχύτητα ανέμου) είναι ελάχιστη (Σχεδιασμός - LowRes). Αυτή η περίπτωση οδηγεί στον υπολογισμό της μονάδας παραγωγής ενέργειας με τρόπο έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το μέγεθος των εγκατεστημένων συστημάτων και να γίνεται μεγάλη χρήση των ανανεώσιμων πηγών. Έτσι, ελαχιστοποιείται η χρήση των συμβατικών συστημάτων. Αυτό είναι το σενάριο κατανάλωσης ελάχιστου καυσίμου. Σε αυτή την περίπτωση, συσσωρευτής χρησιμοποιείται πλήρως αφού κατά τη διάρκεια του έτους αναλαμβάνει την κάλυψη του φορτίου. Κατά τους περισσότερους μήνες, η ενέργεια που δεν καλύπτεται θα είναι μικρή λόγω της μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ.
- 2. Για το μήνα όπου η ανανεώσιμη πηγή είναι μέγιστη (Σχεδιασμός HiRes). Αυτή η περίπτωση οδηγεί στον υπολογισμό της μονάδας παραγωγής ενέργειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το μέγεθος των εγκατεστημένων συστημάτων ΑΠΕ αλλά έτσι γίνεται μέγιστη η χρήση των συμβατικών συστημάτων. Ο υπολογιζόμενος συσσωρευτής θα είναι σχετικά μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για το σύνολο των μηνών αφού δεν πρόκειται ποτέ να είναι φορτισμένος πλήρως κατά τη διάρκεια του έτους (εκτός από το μήνα σχεδιασμού).

Ο υπολογισμός της ενέργειας από συστήματα συμβατικού καυσίμου δίνεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο υπολογισμού (Εικόνα 3.7) για την τυπική μέρα του μήνα *i* από την εξίσωση:

$$E_{conv,i} = E_{RES,d,day,i} - E_{BAT,i}$$
(3.5)





ενώ για όλο το έτος η ενέργεια είναι:

$$ConvEnergy = \sum_{i=1}^{12} E_{conv,i} \times MonthDays_i$$
(3.6)

όπου $MonthDays_i$ οι μέρες του μήνα i (π.χ. $MonthDays_1 = 31$ κτλ).

Η ανανεώσιμη ενέργεια η οποία τελικά δεν αποδίδεται ούτε στη ζήτηση αλλά ούτε και στο συσσωρευτή, για την τυπική ημέρα του μήνα *i* σύμφωνα με τον αλγόριθμο υπολογισμού είναι:

$$E_{LOST,i} = \begin{cases} E_{RES,day,x,i} - E_{d,day,u,i} & E_{d,day,u,i} \le E_{BAT,i} \\ max(E_{RES,day,x,i} - E_{BAT,max}, 0) & E_{d,day,u,i} > E_{BAT,i} \end{cases}$$
(3.7)

Η μη αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια, για το σύνολο του έτους είναι:

$$RE_{undelivered} = \sum_{i=1}^{12} E_{LOST,i} \times MonthDays_i$$
(3.8)

3.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

3.2 Προσομοίωση

Η προσομοίωση αποτελεί την καρδιά της μεθοδολογίας καθώς χρησιμοποιείται στη συνέχεια από την ανάλυση ευαισθησίας και από την ανάλυση επικινδυνότητας. Δίνει την δυνατότητα να εξεταστούν διάφορες στρατηγικές ενεργειακής διαχείρισης με τη χρήση κανόνων για τα συστήματα που προέκυψαν κατά τη διαστασιολόγηση ενώ μπορούν να εξεταστούν και διαφοροποιημένες περιπτώσεις ως προς τη δυναμικότητα των συστημάτων. Η προσομοίωση συνήθως πραγματοποιείται με ωριαίο βήμα και χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα αντίστοιχου βήματος, ενώ πραγματοποιείται για δεδομένη χρονική περίοδο (π.χ. έτος).

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης θα πρέπει να έχουν καθοριστεί πλήρως:

- Όλα τα υποσυστήματα που απαρτίζουν το σύστημα και θα πρέπει να έχουν δοθεί πλήρως τα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος διασύνδεσης τους.
- Οι χρονοσειρές ζήτησης νερού και ενέργειας. Εάν δεν υπάρχουν θα πρέπει να δημιουργηθούν.
- Οι κανόνες ενεργειακής διαχείρισης.
- Οι χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων, δηλαδή ταχύτητα ανέμου, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η διαδικασία της προσομοίωσης παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 3.8. Από την προσομοίωση λαμβάνονται σημαντικά ενεργειακά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των μονάδων όπως η ενεργειακή παραγωγή, η παραγωγή νερού, η κατανάλωση καυσίμου, οι ώρες λειτουργίας του Η/Ζ, οι ισοδύναμες εκπομπές αερίων ρύπων, η ενέργεια που παρέχεται διαμέσου του συσσωρευτή κ.α. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα υπολογιστούν 14 δείκτες επιδόσεων/απόδοσης των συστημάτων που θα επιτρέψουν την αξιολόγηση τους. Οι δείκτες παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.3.

3.2.1 Προσομοίωση αυτόνομου συστήματος

Η ζήτηση ενέργειας είναι κάθε στιγμή:

$$E_d(t) = E_{DES}(t) + E_{EL}(t)$$
(3.9)

Η παραγωγή ενέργειας από τις μονάδες ΑΠΕ είναι:

$$E_{RES}(t) = E_{WEC}(t) + E_{PV}(t) \tag{3.10}$$



Εικόνα 3.8: Η διαδικασία της προσομοίωσης σχηματικά.

Η ενέργεια που αποδίδεται άμεσα στη ζήτηση είναι:

$$E_{dlv}(t) = \min(E_d(t), E_{RES_{av}}(t))$$
(3.11)

Η ενέργεια που δεν αποδίδεται άμεσα ή περισσεύει είναι:

$$E_{xs}(t) = E_{RES}(t) - E_{dlv}(t)$$
(3.12)

Η ενέργεια που πρέπει να δοθεί από το συσσωρευτή ή από κάποια άλλη πηγή είναι:

$$E_f(t) = E_d(t) - E_{dlv}(t)$$
(3.13)

Οι παραπάνω σχέσεις είναι γενικές και εφαρμόζονται ανεξάρτητα από την κατάσταση του συσσωρευτή. Το βασικό πρόβλημα είναι ο υπολογισμός των ροών ενέργειας από και προς το συσσωρευτή, αφού οι ροές εξαρτώνται από την κατάσταση φόρτισής του. Έτσι, ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

• SOC κατάσταση φόρτισης
3.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

 $E_{TBT} \xrightarrow{E_{chloss}} E_{BTin} \xrightarrow{E_{BTout}} E_{dchloss} \xrightarrow{E_{FBT}}$

Εικόνα 3.9: Ροές ενέργειας από το σύστημα στο συσσωρευτή και από το συσσωρευτή στο σύστημα.

• $E_{BT_{av}}$ διαθέσιμη ενέργεια συσσωρευτή

Η σχέση που δίνει την αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή σε σχέση με την κατάσταση φόρτισης είναι:

$$E_{BT_{av}}(t) = (SOC(t) - DoD) \cdot E_{BT_{inst}}$$
(3.14)

όπου $E_{BT_{inst}}$ η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή και DoD το καθορισμένο βάθος εκφόρτισης. Η μέγιστη διαθέσιμη ενεργειακή χωρητικότητα είναι:

$$E_{BT_{\max}} = (100\% - DoD) \cdot E_{BT_{inst}}$$
(3.15)

Οι ροές από και προς το συσσωρευτή αναπαρίστανται σχηματικά στην εικόνα 3.9 και είναι:

- Ε_{TBT} Ενέργεια που δίνει το σύστημα στο συσσωρευτή
- $E_{BT_{in}}$ Ενέργεια που δέχεται ο συσσωρευτής από το σύστημα
- *E*_{chloss} Απώλειες φόρτισης
- $E_{BT_{out}}$ Ενέργεια που προσφέρει ο συσσωρευτής στο σύστημα
- E_{FBT} Ενέργεια που δέχεται το σύστημα από το συσσωρευτή
- $E_{dch_{loss}}$ Απώλειες εκφόρτισης.

Όπου η σχέση ανάμεσα στις ροές καθορίζεται από τους βαθμούς απόδοσης όπως έχουν δοθεί στις Εξισώσεις 2.27 και 2.28. Τέλος, ορίζονται τα ενεργειακά μεγέθη:

E_{und} Ενέργεια που δεν μπορεί να αποθηκευτεί και απορρίπτεται. Είναι το ίδιο μέγεθος με το
 E_{LOST} της διαστασιολόγησης, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορά την ωραία προσομοί ωση και όχι εκτίμηση με μηνιαίες τιμές.

*E*_{aux} Ενέργεια από τη βοηθητική συμβατική πηγή ενέργειας (π.χ. ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος
 Diesel). Είναι το ίδιο μέγεθος με το _{conv} της διαστασιολόγησης, αλλά στη συγκεκριμένη περί πτωση αφορά την ωραία προσομοίωση και όχι εκτίμηση με μηνιαίες τιμές.

Ενέργεια προς το συσσωρευτή ρέει όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας ($E_{xs}(t) > 0$) και μπορεί να τη δεχτεί όλη ή μερικώς. Για να τη δεχτεί όλη, το περιθώριο φόρτισης πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την περίσσεια ενώ για να τη δεχτεί εν μέρει, η περίσσεια είναι μεγαλύτερη από το περιθώριο φόρτισης και η ποσότητα που θα μεταφερθεί θα είναι ίση με το περιθώριο φόρτισης. Αυτό διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$E_{BT_{in}}(t) = \min\left(E_{xs}(t) \cdot \eta_{ch}, E_{BT_{max}} - E_{BT_{av}}(t)\right)$$
(3.16)

Οι απώλειες φόρτισης είναι:

$$E_{chloss} = E_{TBT} - E_{BT_{in}} = \frac{E_{BT_{in}}}{\eta_{ch}} - E_{BT_{in}}$$
 (3.17)

Ενέργεια από το συσσωρευτή ρέει όταν η ενέργεια από ΑΠΕ δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Ο συσσωρευτής θα καλύψει τη ζήτηση (όλη ή μερικώς) ανάλογα με τη διαθέσιμη ενέργειά του. Για να καλυφθεί όλη η υπόλοιπη ζήτηση από το συσσωρευτή θα πρέπει η φόρτισή του να επιτρέπει τη ροή όλης της απαιτούμενης ενέργειας, διαφορετικά θα αποδοθεί όλη στο φορτίο και ο συσσωρευτής δεν θα έχει διαθέσιμη ενέργεια. Η παραπάνω λογική διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$E_{BT_{out}}(t) = \min\left(\frac{E_f(t)}{\eta_{dch}}, E_{BT_{av}}(t)\right)$$
(3.18)

Οι απώλειες εκφόρτισης είναι:

$$E_{dchloss} = E_{BT_{out}} - E_{FBT} = E_{BT_{out}} \cdot (1 - \eta_{dch})$$
(3.19)

Για να βρεθεί η διαθέσιμη ενέργεια του συσσωρευτή στην αρχή της επόμενης κάθε περιόδου (που είναι ίση με τη διαθέσιμη ενέργεια στο τέλος της περιόδου), αρκεί να γίνει ισοζύγιο ενέργειας. Έτσι, η συνολική ποσότητα ενέργειας στο συσσωρευτή είναι η ενέργεια που είχε στην αρχή της περασμένης περιόδου προσθέτοντας ή αφαιρώντας τις ροές ενέργειας.

$$E_{BT_{av}}(t+1) = E_{BT_{av}}(t) + E_{BT_{in}}(t) - E_{BT_{out}}(t)$$
(3.20)

3.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Δεν γίνεται στην ίδια χρονική στιγμή ενέργεια να ρέει από και προς το συσσωρευτή άρα, όταν η μια ροή είναι θετική, η άλλη είναι μηδενική. Για τον υπολογισμό των ροών ενέργειας αρκεί να δοθεί η αρχική κατάσταση του συσσωρευτή, δηλαδή το $SOC(0) = SOC_{init}$ ή ισοδύναμα, η αρχική διαθέσιμη ενέργεια $E_{BT_{av}}(0)$.

Έτσι, με διαδοχική εφαρμογή των εξισώσεων, 3.14, 3.16, 3.18 και 3.20 προκύπτει η διαθέσιμη ενέργεια τη χρονική στιγμή t = 1.

Αφού έχουν υπολογιστεί οι ροές ενέργειας, από και προς το συσσωρευτή για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια που δεν αποδόθηκε ούτε στη ζήτηση ούτε και στο συσσωρευτή καθώς και η ενέργεια που πρέπει να καλυφθεί από κάποια άλλη βοηθητική πηγή ενέργειας.

Η ενέργεια που περίσσεψε και απορρίφθηκε είναι στη γενική περίπτωση:

$$E_{DUMP} = E_{und}(t) = E_{xs}(t) - E_{TBT}(t)$$
 (3.21)

Η ενέργεια που πρέπει να δοθεί από βοηθητική πηγή είναι στη γενική περίπτωση:

$$E_{aux}(t) = E_f(t) - E_{FBT}(t)$$
(3.22)

Η ετήσια ενέργεια που ζητείται είναι:

$$E_{d_{an}} = \sum_{t=1}^{8760} E_d(t) \tag{3.23}$$

Η *ετήσια ενέργεια που αποδίδεται στη ζήτηση* είναι η ετήσια ζήτηση μείον τα ετήσια ποσά ενέργειας που δεν αποδόθηκαν. Ποσά ενέργειας δεν αποδίδονται όταν ούτε η βοηθητική ενέργεια δεν επαρκεί για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες (π.χ. Η/Ζ χαμηλής ισχύος).

$$E_{del_{an}} = E_{d_{an}} - \sum_{t=1}^{8760} E_{unmet}(t)$$
(3.24)

Η ετήσια ενέργεια από ΑΠΕ που συλλέγεται είναι:

$$E_{RES_{an}} = \sum_{t=1}^{8760} E_{RES}(t)$$
(3.25)

Η *ετήσια ενέργεια από ΑΠΕ που αποδίδεται στη ζήτηση* είναι η ετήσια ενέργεια από ΑΠΕ που συλλέγεται μείον την ετήσια ενέργεια που δεν μπορεί να αποθηκευτεί και απορρίπτεται:

$$E_{RESdel_{an}} = E_{RESav_{an}} - \sum_{t=1}^{8760} E_{und}(t)$$
(3.26)

Η ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή είναι:

$$E_{FBT_{an}} = \sum_{t=1}^{8760} E_{FBT}(t)$$
(3.27)

Το πλήθος των βημάτων οπού $E_{aux}(t) > 0$ δίνουν το συνολικό χρόνο (T_{aux}) όπου χρησιμοποιείται βοηθητική ενέργεια. Εάν η βοηθητική ενέργεια παρέχεται εξ ολοκλήρου από μηχανή εσωτερικής καύσης Diesel ($E_{DG} = E_{aux}$) τότε η κατανάλωση καυσίμου σε κάθε βήμα είναι (Εξίσωση 2.42).

$$m_{fuel}(t) = a_{DG0} \cdot \Delta t + a_{DG0} \cdot E_{DG}(t) \tag{3.28}$$

Έτσι, η ετήσια κατανάλωση καυσίμου είναι:

$$m_{fuel_{an}} = \sum_{t=1}^{8760} m_{fuel}(t)$$
(3.29)

3.2.2 Κανόνες λειτουργίας

Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης μπορούν να εισαχθούν κανόνες ενεργειακής διαχείρισης της λειτουργίας του συστήματος που διαφοροποιούν τις επιδόσεις και κατ' επέκταση τα οικονομικά μεγέθη και τους ενεργειακούς δείκτες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται 3 κανόνες που μπορούν να δημιουργήσουν διαφορετικά σενάρια διαχείρισης (η εφαρμογή του κάθε κανόνα ξεχωριστά είναι ένα διαφορετικό σενάριο, αλλά και η εφαρμογή 2 κανόνων ταυτόχρονα είναι και αυτό ένα διαφορετικό σενάριο ενεργειακής διαχείρισης).

 Φόρτιση συσσωρευτή με συμβατική ενέργεια Όταν η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή είναι κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης (π.χ. 50%) και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος είναι σε λειτουργία τότε το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος θα μπορούσε να φορτίζει το συσσωρευτή. Αυτή η πρακτική μειώνει τη χρήση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, αυξάνει το βαθμό απόδοσης, ενώ αυξάνει και τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Από την άλλη, υπάρχουν οι απώλειες φόρτισης και εκφόρτισης.

- Κάλυψη ενεργειακών αναγκών εξωτερικής ζήτησης από συσσωρευτή Το νερό αποτελεί σημαντικότερο πόρο από την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών μιας κοινότητας. Έτσι, η ενέργεια που έχει ο συσσωρευτής μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο για την κάλυψη αναγκών νερού. Ο συγκεκριμένος κανόνας μπαίνει για την αξιολόγηση των συστημάτων που έχουν ανταγωνιστικές χρήσεις.
- Βαθιά εκφόρτιση του συσσωρευτή Η επιλογή της πλήρους εκφόρτισης (δηλαδή DoD = 100%) του συσσωρευτή μπορεί να έχει ενεργειακό όφελος αλλά μειώνει τη διάρκεια ζωής του.

A/A	Δείκτης	Περιγραφή
1	Ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται	Ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται στη ζήτηση προς την ενέργεια που ζητείται κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Ο δείκτης περιγράφει το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος. Για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, ο λόγος αυτός θα πρέπει να είναι ίσος με "1".
2	Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται	Ο λόγος της ανανεώσιμης ενέργειας που αποδίδεται στη ζήτηση προς την ενέργεια που ζητείται κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Ο δείκτης περιγράφει τη συνεισφορά της ανανεώσιμης ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο. Μεγάλες τιμές του δείκτη προτιμώνται καθώς δείχνουν μεγάλη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα.
3	Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται	Ο λόγος της ανανεώσιμης ενέργειας που αποδίδεται στη ζήτηση προς την ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Μεγάλες τιμές του δείκτη προτιμώνται καθώς δείχνουν την καλύτερη αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων.

Πίνακας 3.3: Περιγραφή δεικτών αξιολόγησης.

4	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας Η/Ζ (%)	Το ποσοστό χρόνου λειτουργίας του βοηθητικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Χαμηλές τιμές προτιμώνται καθώς δείχνουν περιορισμένη χρήση των βοηθητικών συστημάτων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.
5	Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ	Ο λόγος των συνολικών κύκλων λειτουργίας (ON-OFF) προς τον αριθμό των ημερών της προσομοίωσης. Ο δείκτης περιγράφει τη συχνότητα χρήσης του βοηθητικού συστήματος. Χαμηλές τιμές προτιμώνται.
6	Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται	Ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται από το συσσωρευτή προς την ενέργεια που ζητείται κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Ο δείκτης περιγράφει τη χρήση του συσσωρευτή.
7	Ποσοστό χρόνου όπου ο συσσωρευτής βρίσκεται κάτω από το κρίσιμο βάθος εκφόρτισης (%).	Ο λόγος του συνολικού χρόνου όπου το επίπεδο φόρτισης του συσσωρευτή είναι χαμηλότερο από το επιθυμητό βάθος εκφόρτισης ως προς την περίοδο της προσομοίωσης. Χαμηλές τιμές προτιμώνται.
8	Κεφαλαιακό κόστος (€)	Το συνολικό κόστος αγοράς του συστήματος, υπολογισμένο από όλα τα μέρη που το απαρτίζουν.
9	Κόστος καυσίμου (€/έτος)	Το ετήσιο κόστος καυσίμου υπολογισμένο στη βάση της περιόδου προσομοίωσης. Χαμηλές τιμές προτιμώνται.
10	Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου (kg _{CO2} /έτος)	Η ετήσια ποσότητα ισοδύναμου CO ₂ που εκλύεται από τη χρήση του συστήματος με όρους κύκλου ζωής στη βάση της περιόδου προσομοίωσης. Χαμηλές τιμές προτιμώνται αφού δείχνουν μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

		Το ποσοστό του χρόνου όπου η ενεργειακή παραγωγή				
		δεν επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών				
	Σταθερή λειτουργία μονάδας	αναγκών της αφαλάτωσης προς την περίοδο της προσομοίωσης. Δείκτης χαμηλότερος από "100%" θα πει πως το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει επαρκώς				
11						
		και κατ' επέκταση τις ανάγκες του νερού. Επειδή η				
		μονάδα αφαλάτωσης έχει προτεραιότητα έναντι των				
		εξωτερικών φορτίων κατ' επέκταση ούτε αυτά				
		καλύπτονται.				
		Το σταθμισμένο κόστος της ενέργειας σχετικό με τη				
12	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Wh) βιωσιμότητα της επένδυσης. Το κόστος της ενέργειας				
		δίνεται από τη σχέση 3.44.				
		Το σταθμισμένο κόστος του νερού είναι σχετικό με τη				
13	Κόστος νερού (€/ ${ m m}^3$)	βιωσιμότητα της επένδυσης. Υπολογίζεται από τη				
		σχέση 3.46				
		Αν και το σύστημα σχεδιάζεται για να καλύψει το				
1.4	Νερό που αποδίδεται / Νερό	100% των αναγκών νερού, ενδέχεται κατά την				
14	που ζητείται	περίοδο της προσομοίωσης να ζητηθεί παραπάνω και				
		για το λόγο αυτό πρέπει να αξιολογηθεί.				

3.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Κατά την ανάλυση ευαισθησίας, ο σχεδιαστής μπορεί να εξετάσει την επιρροή που έχει η μεταβολή διάφορων παραμέτρων (σχεδιασμού, μετεωρολογικών, οικονομικών, ζήτησης κτλ) στους δείκτες αξιολόγησης. Στην πραγματικότητα, επαναλαμβάνεται η προσομοίωση όσες φορές χρειαστεί σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου της ανάλυσης. Η μεταβολή περιγράφεται με ένα εύρος καθώς και ένα βήμα για την κάθε παράμετρο ευαισθησίας. Μέσω της ανάλυσης αυτής μπορούν να εντοπιστούν οι κρίσιμοι παράμετροι σχεδιασμού. Οι παράμετροι ευαισθησίας που έχουν συμπεριληφθεί παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε μορφή γραφήματος ή σε μορφή πίνακα. Με βάση τα

A/A	Παράμετρος ευαισθησίας	Τυπικές μονάδες
1	Τιμή πετρελαίου	€/kg
2	Μέση ταχύτητα ανέμου	m/s
3	Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία	$\rm kWh/day$
4	Μέση ζήτηση ημερήσια ζήτηση νερού	$\mathrm{m}^{3}/\mathrm{day}$
5	Μέση ζήτηση ισχύος	$\rm kW$
6	Αριθμός Φ/Β πλαισίων	-
7	Αριθμός Α/Γ	-
8	Μέγεθος συσσωρευτών	kWh

Πίνακας 3.4: Παράμετροι ευαισθησίας.

αποτελέσματα, μπορεί να υπάρξει διαφοροποίηση στα μεγέθη της διαστασιολόγησης.

3.4 Ανάλυση επικινδυνότητας

Το εργαλείο της ανάλυσης επικινδυνότητας στοχεύει στην ποσοτικοποίηση του κινδύνου για κάθε ένα από τα εναλλακτικά συστήματα. Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη μέθοδο Monte Carlo. Οι παράμετροι που εμπεριέχουν κίνδυνο είναι:

- Τιμή πετρελαίου
- Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου
- Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία
- Μέση ημερήσια ζήτηση νερού
- Μέση ζήτηση ισχύος

Για κάθε παράμετρο, καθορίζονται από ιστορικά στοιχεία με βάση την περιοχή μελέτης, η κατανομή και τα χαρακτηριστικά της. Οι κατανομές που έχουν υλοποιηθεί είναι η κανονική και η τριγωνική κατανομή. Τα χαρακτηριστικά της κάθε κατανομής είναι [101]:

- Κανονική κατανομή Μέση τιμή και τυπική απόκλιση (Εικόνα 3.10i)
- Τριγωνική κατανομή Μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή (Εικόνα 3.10ii)



Εικόνα 3.10: Κατανομές πυκνότητας πιθανότητας που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση επικινδυνότητας.



Εικόνα 3.11: Μορφή αποτελεσμάτων ανάλυσης επικινδυνότητας, ανά δείκτη.

Η ανάλυση επικινδυνότητας απαιτεί ένα σημαντικό αριθμό επαναλήψεων. Σε κάθε επανάληψη επιλέγονται τυχαία, με βάση τις κατανομές πιθανότητας, τιμές για τις παραμέτρους κινδύνου. Για αυτές τις τιμές και για τις προκαθορισμένες (από το σχεδιασμό και την προσομοίωση), ξαναγίνεται προσομοίωση τόσες φορές όσες και ο αριθμός των επαναλήψεων. Έτσι, οι δείκτες αξιολόγησης του Πίνακα 3.3 δεν έχουν μια τιμή αλλά τόσες τιμές όσες και οι επαναλήψεις, και μπορούν να αναπαρασταθούν από ιστογράμματα (Εικόνα 3.11). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης επικινδυνότητας εκτός από τα ιστογράμματα είναι η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή καθώς και η τυπική απόκλιση κάθε δείκτη.



Εικόνα 3.12: Ανάλυση Trade-off.

3.5 Επισκόπηση

Με το εργαλείο της επισκόπησης μπορούν να εντοπιστούν και να συγκριθούν τα αποτελέσματα από εναλλακτικές σχεδιαστικές προτάσεις. Η διαδικασία της επισκόπησης περιλαμβάνει την αναζήτηση επικρατουσών λύσεων καθώς και στην εύρεση "Trade-offs" ανάμεσα στους δείκτες αξιολόγησης των διαφόρων εναλλακτικών. Έτσι, στην επισκόπηση περιλαμβάνονται:

- Ανάλυση Trade-off
- Ανάλυση διαδρομής
- Ισοβαρής κατάταξη

3.5.1 Ανάλυση Trade-off

Στην ανάλυση Trade-off, αρχικά επιλέγονται 2 δείκτες αξιολόγησης για να συγκριθούν μεταξύ τους, έστω οι δείκτες A και B. Για κάθε εναλλακτικό σχεδιασμό ο δείκτης αξιολόγησης A τοποθετείται στον άξονα X σε δισδιάστατο καρτεσιανό γράφημα ενώ ο δείκτης αξιολόγησης B τοποθετείται στον άξονα Y. Ο κάθε εναλλακτικός σχεδιασμός τοποθετείται στο καρτεσιανό γράφημα σύμφωνα με τις επιδόσεις του στους δύο δείκτες που έχουν επιλεχθεί (Εικόνα 3.12).

3.5.2 Ανάλυση διαδρομής

Στην ανάλυση διαδρομής κάθε εναλλακτικός σχεδιασμός αναπαριστάται από μια γραμμή σε ένα γράφημα. Στον άξονα X τοποθετούνται οι 14 δείκτες αξιολόγησης ενώ στον άξονα των Y οι τιμές των δεικτών. Οι τιμές που τοποθετούνται στον άξονα Y είναι κανονικοποιημένες και με εύρος [0...1], όπου



Εικόνα 3.13: Ανάλυση διαδρομής.

η τιμές κοντά στο 1 αντιστοιχούν σε ευνοϊκές επιδόσεις ενώ τιμές κοντά στο 0 αντιστοιχούν σε δυσμενείς.

Με την ένωση των σημείων για κάθε εναλλακτική, σχηματίζονται οι γραμμές της ανάλυσης (Εικόνα 3.13). Εάν μια γραμμή βρίσκεται υψηλότερα απ΄όλες τις άλλες χωρίς να διασταυρώνεται με κάποια άλλη τότε, αυτός είναι ο σχεδιασμός που επικρατεί. Από το παρόν γράφημα μπορούν να βρεθεί γραφικά το μέτωπο PARETO.

3.5.3 Ισοβαρής κατάταξη

Η ισοβαρής κατάταξη είναι μια προκαταρκτική κατάταξη των διάφορων εναλλακτικών περιπτώσεων. Οι κανονικοποιημένες τιμές των επιδόσεων των εναλλακτικών σχεδιασμών που πραγματοποιήθηκε στην ανάλυση διαδρομής, αθροίζονται και πραγματοποιείται μια προκαταρκτική κατάταξη.

3.6 Αξιολόγηση εναλλακτικών προτάσεων

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών προτάσεων πραγματοποιείται για την τελική κατάταξη και επιλογή. Η εργασία αυτή κατατάσσει τις εναλλακτικές προτάσεις με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης. Οι δείκτες επιδόσεων του Πίνακα 3.3 μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες.

- Οικονομικοί Δείκτες (3-9, 12, 13)
- Περιβαλλοντικοί Δείκτες (2, 10)
- Κοινωνικοί Δείκτες (1, 11, 14)

Στους δείκτες αυτούς αποδίδονται βάρη αλλά αποδίδονται βάρη και στις κατηγορίες των δεικτών. Τα βάρη αποδίδονται με βάση τις προτεραιότητες που πρέπει να έχει το σύστημα του σχεδιασμού. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που λειτουργεί σε ένα τουριστικό νησί θα πρέπει να έχει μεγαλύτερο βάρος στους περιβαλλοντικούς δείκτες ενώ σε μια βιομηχανική μονάδα οι οικονομικοί δείκτες έχουν μεγαλύτερο βάρος. Αντίστοιχα, σε μια οικία οι ώρες λειτουργίας μιας συμβατικής μονάδας που παρέχει τη βοηθητική ενέργεια θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται για να μην επιβαρύνουν με θόρυβο τους κατοίκους. Τα τελικά αποτελέσματα δίδονται σε μορφή πινάκων ή σε μορφή διαγράμματος με μπάρες (Εικόνα 3.14).

Η διαδικασία της πολυκριτηριακής ανάλυσης περιλαμβάνει διάφορα βήματα έτσι ώστε να να γίνει η αξιολόγηση των διάφορων σεναρίων. Το πρώτο βήμα αφορά στην προετοιμασία των δεδομένων και κυρίως στη μετατροπή τους σε ποσοτικά δεδομένα. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει το σχηματισμό συναρτήσεων συμμετοχής (Membership Functions) $q_1(x_1), \ldots, q_m(x_m)$. Για κάθε δείκτη x_i πρέπει να καθοριστούν:

- οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές Min(i) και Max(i)
- εάν η συνάρτηση $q(x_i)$ είναι αύξουσα ή φθίνουσα
- η τιμή του εκθέτη λ στη σχέση

$$q_i(x_i) = \begin{cases} 0\\ \left(\frac{x_i - Min(i)}{Max(i) - Min(i)}\right)^{\lambda}\\ 1 \end{cases}$$
(3.30)

για την αύξουσα συνάρτηση $q_i(x_i)$.

Η μορφοποίηση των συναρτήσεων $q_1(x_1), \ldots, q_m(x_m)$ μπορεί να τελειώνει με έναν πίνακα $(q_i^{(j)})$, $i = 1, \ldots, m, j = 1, \ldots, k$ όπου το στοιχείο $q_i^{(j)}$ είναι η τιμή του *i*-οστού κριτηρίου για τη *j*-οστή εναλλακτική. Σε αυτή την ανάλυση θεωρείται πως οι γραμμικές συναρτήσεις $q_1(x_1), \ldots, q_m(x_m)$ χρησιμοποιούνται ως συναρτήσεις συμμετοχής με μειούμενη συνάρτηση.

Η μέθοδος των γενικών δεικτών περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας συνολικής συνάρτησης με το σταθμισμένο αριθμητικό μέσο των δεικτών. Η σύνθετη συνάρτηση ορίζεται ως:

$$Q(q;w) = \sum_{i=1}^{m} w_i q_i$$
(3.31)



Εικόνα 3.14: Τελική κατάταξη συστημάτων.

όπου w_i τα βάρη (δηλαδή οι τιμές από το διάνυσμα των βαρών w) και q_i τα οι δείκτες για τα συγκεκριμένα κριτήρια. Στη συνέχεια για κάθε γκρουπ κριτηρίων, εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία μόνο που τα κριτήρια αξιολόγησης είναι η κάθε κατηγορία.

3.7 Οικονομική ανάλυση

Σκοπός της παραγράφου είναι η παράθεση των εξισώσεων και της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των οικονομικών μεγεθών καθώς και του κόστους ενέργειας και νερού. Για τις ενεργειακές μονάδες αλλά και για τη μονάδα αφαλάτωσης θα υπολογιστούν τα κόστη εγκατάστασης (IC) το κόστος λειτουργίας (OC) και το κόστος αναλωσίμων και ανταλλακτικών και γενικά συντήρησης (MC). Για λόγους υπολογισμού του κόστους ενέργειας και νερού, θα υπολογιστούν ξεχωριστά τα δύο υποσυστήματα.

3.7.1 Κόστος εγκατάστασης

Το κόστος εγκατάστασης των ενεργειακών υποσυστημάτων (IC_{EEQ}) απαρτίζεται από το κόστος αγοράς του εξοπλισμού, το κόστος της κατασκευής και το κόστος μεταφοράς στην περιοχή εγκατάστασης στη γενική περίπτωση που δεν περιλαμβάνεται στο κόστος αγοράς (Ex Works). Το κόστος εγκατάστασης του εξοπλισμού είναι το άθροισμα του κόστους εγκατάστασης των επιμέρους συστημάτων:

$$IC_{EEQ} = IC_{WEC} + IC_{PV} + IC_{DG} + IC_{BT} + IC_{INV}$$
(3.32)

όπου το κόστος της κάθε ενεργειακής μονάδας είναι το γινόμενο των εγκατεστημένων μονάδων (N) επί το κόστος της μονάδας (UC) εκτός από το κόστος του αντιστροφέα που λαμβάνεται ως ένα κόστος

Κόστος	Εξίσωση υπολογισμού
IC_{WEC}	$N_{tur} \cdot UC_{WEC}$
IC_{PV}	$N_{mod} \cdot UC_{PV}$
IC_{DG}	$N_{DG} \cdot UC_{DG}$
IC_{BT}	$N_{BT} \cdot UC_{BT}$
IC_{INV}	$(P_{WEC} + P_{PV}) \cdot SC_{INV}$

Πίνακας 3.5: Συγκεντρωτικός πίνακας σχετικά με τα κόστη της εγκατάστασης των συστημάτων παραγωγής και την αποθήκευσης ενέργειας.

σε σχέση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των υποσυστημάτων παραγωγής συνεχούς ρεύματος. (Πίνακας 3.5).

Το κόστος κατασκευής λαμβάνεται σαν ένα ποσοστό του κόστους αγοράς του εξοπλισμού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (α_{BOS}) και εδώ συμπεριλαμβάνονται και όλα τα μικρά κόστη αγοράς όπως καλώδια, βάσεις φωτοβολταϊκών κτλ.

$$IC_{BOS} = \alpha_{BOS} \cdot IC_{EEQ} \tag{3.33}$$

Το κόστος εγκατάστασης της αφαλάτωσης είναι IC_{RO} και δίνεται από τον κατασκευαστή.

3.7.2 Κόστος λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας για το ενεργειακό σύστημα (OC_E) δίνεται σε ετήσια βάση και είναι το κόστος του καυσίμου (OC_{DSL}) (Εργατικό κόστος δεν θα ληφθεί υπόψη). Το ετήσιο κόστος καυσίμου δίνεται από τη σχέση:

$$OC_E = OC_{DSL} = UC_{DSL} \cdot \frac{m_{fuel_{an}}}{\rho_{DSL}}$$
(3.34)

όπου $m_{fuel_{an}}$ η ετήσια μάζα του καυσίμου που υπολογίστηκε κατά την προσομοίωση, ρ_{DSL} η πυκνότητα του καυσίμου και UC_{DSL} το μέσο ετήσιο κόστος καύσιμου ανά μονάδα όγκου.

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (OC_{RO}) είναι το κόστος των χημικών και το κόστος της ενέργειας.

$$OC_{RO} = OC_{CH} + OC_{ROEN} \tag{3.35}$$

Το ετήσιο κόστος χημικών (OC_{CH}) προ επεξεργασίας και μετ' επεξεργασίας νερού για τη λειτουργία της αφαλάτωσης δίνεται στη βιβλιογραφία ως το γινόμενο του ετήσιου παραγόμενου νερού (Q_{pan}) επί το μοναδιαίο κόστος για το σύνολο των χημικών (UC_{CH}).

$$OC_{CH} = UC_{CH} \cdot Q_{p_{an}} \tag{3.36}$$

Επειδή το σύστημα ενέργειας και το σύστημα νερού υπολογίζονται ξεχωριστά, θα θεωρηθεί ως κόστος ενέργειας για το νερό (OC_{ROEN}) το κόστος της παραγωγής ενέργειας του ενεργειακού συστήματος που θα υπολογιστεί. Έτσι:

$$OC_{ROEN} = EnergyCost \cdot E_{dlvRO_{an}}$$
(3.37)

όπου $E_{dlvRO_{an}}$ η ετήσια ενέργεια που αποδόθηκε στην αφαλάτωση.

3.7.3 Κόστος συντήρησης

Η συντήρηση του εξοπλισμού πραγματοποιείται έτσι ώστε ο εξοπλισμός να δουλεύει χωρίς σφάλματα. Η συντήρηση μπορεί να πραγματοποιείται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μετά από συγκεκριμένες ώρες λειτουργίας ή μετά από συγκεκριμένη ποσότητα προϊόντος (π.χ. νερό ή ενέργεια). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το κόστος της συντήρησης είναι ανηγμένο ανά έτος. Έτσι για τις ενεργειακές μονάδες το ετήσιο κόστος συντήρησης είναι:

$$MC_E = MC_{PV} + MC_{WEC} + MC_{BT} + MC_{DG}$$
(3.38)

Για τα φωτοβολταϊκά υπολογίζεται ένα κόστος καθαρισμού (α_{PV}) το οποίο σχετίζεται με το εμβαδόν της επιφανείας τους:

$$MC_{PV} = \alpha_{PV} \cdot A_{sys} \tag{3.39}$$

Το κόστος συντήρησης του αιολικού συστήματος είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης για συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια (α_{WEC}) επί τον αριθμό των ανεμογεννητριών, δηλαδή:

$$MC_{WEC} = \alpha_{WEC} \cdot N_{tur} \tag{3.40}$$

Για τους συσσωρευτές υπολογίζεται ένα ποσοστό του κόστους κτήσης τους για τη μελλοντική τους αντικατάσταση. Το ποσοστό (α_{BT}) σχετίζεται με τη συχνότητα αντικατάστασης η οποία με τη σειρά της σχετίζεται με τον αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

$$MC_{BT} = \alpha_{BT} \cdot IC_{BT} \tag{3.41}$$

Για το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος το κόστος συντήρησης είναι το κόστος της αλλαγής λιπαντικών (UC_{lbr}) μετά από συγκεκριμένο αριθμό ωρών λειτουργίας (OP_{DG}) ο οποίος προκύπτει από τη διαδικασία της προσομοίωσης:

$$MC_{DG} = OP_{DG} \cdot UC_{lbr} \tag{3.42}$$

Ως κόστος συντήρησης της μονάδας αφαλάτωσης θεωρείται το κόστος της αλλαγής μεμβρανών και λαμβάνεται βιβλιογραφικά ως ετήσιο ποσοστό (α_{memb}) σε σχέση με το κόστος αγοράς τους (UC_{MEMB}).

$$MC_{RO} = \alpha_{memb} \cdot UC_{MEMB} \tag{3.43}$$

3.7.4 Κόστος ενέργειας και νερού

Το κόστος της ενέργειας που παράγει το ενεργειακό υποσύστημα θα εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$EnergyCost = \frac{(IC_{EEQ} + IC_{BOS}) \cdot R + OC_E + MC_E}{E_{del_{an}}}$$
(3.44)

όπου E_{dlvan} είναι η ετήσια ενέργεια που αποδίδεται στη ζήτηση και R είναι η ετήσια πρόσοδος η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \tag{3.45}$$

όπου iτο επιτόκιο αναγωγής και nη διάρκεια της επένδυσης σε έτη.

Όμοια, το *κόστος νερού* θα είναι:

$$WaterCost = \frac{IC_{RO} \cdot R + OC_{RO} + MC_{RO}}{Q_{p_{an}}}$$
(3.46)

3.8 Υπολογισμός αερίων του θερμοκηπίου

Ο δέκατος δείκτης αξιολόγησης αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτός ο σύνθετος δείκτης περιλαμβάνει τις ετήσιες εκπομπές από τη χρήση της συμβατικής μονάδας, δηλαδή κυρίως την έκλυση CO₂ από την καύση του καυσίμου και την εκπομπή ισοδύναμου CO₂ με όρους ανάλυσης κύκλου ζωής από τις μονάδες ΑΠΕ. Επειδή στη συγκεκριμένη εργασία η ενέργεια που παράγεται υπολογίζεται κάθε φορά, θα αναζητηθούν οι τιμές εκπομπής αερίων ρύπων σε σχέση με τη δυναμικότητα του κάθε συστήματος. Οι ισοδύναμες εκπομπές από την κατασκευή και λειτουργία της μονάδας αντιστροφής ώσμωσης δεν θα συμπεριληφθούν.

Υπολογισμός αερίων ρύπων από καύση στο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Η ετήσια εκπομπή CO₂ δίνεται από:

$$EM_{GHG_{DSL}} = m_{fuel_{an}} \cdot f_{DSL_{CO_2}} \tag{3.47}$$

όπου $f_{DSL_{CO_2}}$ ο συντελεστής εκπομπής (σε kg CO₂ ανά kg) για το συγκεκριμένο καύσιμο. Η ποσότητα $m_{fuel_{an}}$ δίνεται από τη σχέση 3.29.

Υπολογισμός αερίων ρύπων από το φωτοβολταϊκό υποσύστημα

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πάρα πολλές αναφορές σχετικά με τον υπολογισμό των εκπομπών των αερίων ρύπων από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι εκπομπές αυτές δίνονται συνήθως ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας έτσι ώστε να γίνεται απευθείας σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες. Στη συγκεκριμένη εργασία, η παραγόμενη ενέργεια υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση, έτσι αρκεί να δοθούν οι συνολικές εκπομπές στη διάρκεια ζωής του συστήματος, δηλαδή οι εκπομπές κατά τη διάρκεια της κατασκευής των πλαισίων και του υπόλοιπου συστήματος. Οι εκπομπές κατά τη διάρκεια κατασκευής των Φ/Β πλαισίων, αντιστροφέων, βάσεων στήριξης, καλωδίων κτλ σχετίζονται κυρίως με την ενέργεια που δαπανήθηκε στη χώρα κατασκευής τους και το ενεργειακό της μείγμα καθώς και με τη μεταφορά από τη χώρα κατασκευής των πλαισίων, στη χώρα εγκατάστασης τους [102]. Η σημαντική αύξηση της παραγωγής Φ/Β πλαισίων έχει βελτιώσει τις μεθόδους κατασκευής με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των ισοδύναμων εκπομπών.

Για την ανάλυση θα θεωρηθεί η τιμή εκπομπής ($f_{PV_{CO_2}}$) για όλο τον κύκλο ζωής που θα σχετίζεται με την εγκαταστημένη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συμπεριλαμβανομένου και των βοηθητικών συ-

στημάτων (αντιστροφέας, βάσεις κτλ.) [103, 104]. Δηλαδή:

$$EM_{GHG_{PV}} = \frac{A_{sys} \cdot f_{PV_{CO_2}}}{n}$$
(3.48)

όπου nη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Υπολογισμός αερίων ρύπων από το αιολικό σύστημα

Ο υπολογισμός των αερίων ρύπων ενός αιολικού συστήματος με όρους ανάλυσης κύκλου ζωής είναι μια σύνθετη διαδικασία αλλά με πλούσια βιβλιογραφία. Στα αιολικά συστήματα, το μέγεθος της ανεμογεννήτριας είναι το σημαντικότερο μέγεθος για τις ισοδύναμες εκπομπές. Και εδώ στις περισσότερες περιπτώσεις δίνονται οι εκπομπές ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας αλλά για τις ανάγκες της εργασίας θα πρέπει να μετασχηματιστούν σε ετήσιες εκπομπές ανά εγκατεστημένη ισχύ ($f_{WEC_{CO_2}}$). Έτσι, η ετήσια ισοδύναμη εκπομπή για τους αέριους ρύπους θα είναι [105, 106]:

$$EM_{GHG_{WEC}} = N_{tur} \cdot P_R \cdot f_{WEC_{CO_2}} \tag{3.49}$$

Όπου N_{tur} ο αριθμός των Α/Γ και P_R η μέγιστη ισχύς τους.

Υπολογισμός αερίων ρύπων από τους συσσωρευτές

Ο υπολογισμός των αερίων ρύπων από τους συσσωρευτές παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον λόγω της εκτεταμένης τους χρήσης στα υβριδικά οχήματα. Οι συντελεστές εκπομπής δίνονται στη βιβλιογραφία για συγκεκριμένο τύπο ανά μονάδα βάρους συσσωρευτή ή ανά μονάδα ονομαστικής ενεργειακής χωρητικότητας. Οι εκπομπές επηρεάζονται αρκετά από τη χρήση ή όχι ανακυκλωμένων υλικών κατά την κατασκευή του συσσωρευτή. Στη συγκεκριμένη μελέτη, θα χρησιμοποιηθεί ο ειδικός συντελεστής εκπομπής $f_{BT_{CO_2}}$ ο οποίος δίνει τις εκπομπές ανά μονάδα ενεργειακής χωρητικότητας και συμπεριλαμβάνει τις ισοδύναμες εκπομπές των υλικών, της κατασκευής και της μεταφοράς [107]. Έτσι οι ετήσιες εκπομπές θα είναι:

$$EM_{GHG_{BT}} = E_{BT_{inst}} \cdot \alpha_{BT} \cdot f_{BT_{CO_2}} \tag{3.50}$$

Όπου α_{BT} είναι ο συντελεστής αντικατάστασης των συσσωρευτών και $E_{BT_{inst}}$ η ονομαστική χωρητικότητά τους σε ενέργεια.

Κεφάλαιο 4

Περιγραφή περίπτωσης εφαρμογής

4.1 Περιοχή εγκατάστασης

Η περίπτωση εφαρμογής της αυτόνομης μονάδας πραγματοποιείται για ένα σύστημα κάλυψης αναγκών νερού και ενέργειας στην περιοχή Borj-Cedria, $25 \,\mathrm{km}$ από την Τύνιδα της Τυνησίας (Γεωγραφικό μήκος 35° 24' 37N και Γεωγραφικό πλάτος 10° 25' 34E). Το διαθέσιμο νερό είναι υφάλμυρο με αλατότητα $TDS = 16,000 \,\mathrm{mg/L}$. Για τη συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν ωριαίες χρονοσειρές για την ταχύτητα ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και έτσι μπορεί να οριστεί πλήρως το ανανεώσιμο δυναμικό. Η βοηθητική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μηχανή εσωτερικής καύσης με καύσιμο πετρέλαιο Diesel. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα που απαιτούνται για τα στάδια της διαστασιολόγησης και της προσομοίωσης, δηλαδή η ζήτηση ενέργειας και νερού, το δυναμικό των πόρων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων.

4.2 Ζήτηση ενέργειας και νερού

Προδιαγράφεται η κάλυψη των αναγκών πόσιμου νερού και ηλεκτρικής ενέργειας για μια μικρή κοινότητα περίπου 200 ατόμων. Για την κάλυψη των αναγκών νερού θα χρησιμοποιηθεί μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Άρα εάν γίνει η υπόθεση πως το κάθε άτομο απαιτεί $120 \,\mathrm{L}$ νερού ημερησίως, τότε η ελάχιστη δυναμικότητα της μονάδας αφαλάτωσης πρέπει να είναι $24 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{day}$ (για συνεχή λειτουργία). Η εξωτερική ζητούμενη ισχύς θεωρείται πως είναι σταθερή και ίση με $4 \,\mathrm{kW}$.

Σύστημα	Μοντέλο
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	Wuxi Guofei Green Solar 185
Ανεμογεννήτρια	Proven $15\mathrm{kW}$
Συσσωρευτής	Sun Extender Concorde
Μηχανή εσωτερικής καύσης	Perkins 404C 22-G

Πίνακας 4.1: Τα εμπορικά συστήματα που επιλέχθηκαν.

4.3 Συστήματα ισχύος

Τα συστήματα ισχύος είναι τα συστήματα που παράγουν ή αποθηκεύουν ενέργεια. Επιλέχθηκαν εμπορικά συστήματα (με βάση τη διαθεσιμότητα τους κατά την περίοδο της μελέτης στη συγκεκριμένη περιοχή) και παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 4.1. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ενεργειακών υποσυστημάτων.

4.3.1 Ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια Proven 15 kW είναι μια τυπική ανεμογεννήτρια που προορίζεται για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε μικρά αυτόνομα συστήματα (Εικόνα 4.2). Αν και ο κινητήρας της είναι εναλλασσόμενος και τριφασικός, η κάθε φάση στη συνέχεια μετατρέπεται μέσω ανορθωτή σε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Στη συνέχεια το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα οδηγείται εκτός ανεμογεννήτριας σε αντιστροφέα έτσι ώστε να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά του εναλλασσόμενου δικτύου (δηλαδή σταθερή συχνότητα και τάση) και να διοχετευθεί σε αυτό [108]. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της Α/Γ ενώ στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος. Από την καμπύλη ισχύος μπορούν να εξαχθούν οι συντελεστές α_{WEC1} , α_{WEC2} , ..., α_{WECn} που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση της Α/Γ (Εξίσωση 2.3). Οι συντελεστές, μετά από προσαρμογή σε καμπύλη 4ου βαθμού είναι:

$$\alpha_{WEC1} = 699.22 \quad \alpha_{WEC2} = 70.1576 \quad \alpha_{WEC3} = 3.567 \quad \alpha_{WEC4} = 2.6501 \quad \alpha_{WEC5} = -0.2777$$

Η μέγιστη ισχύς P_R είναι 16,020 W, δηλαδή παραπάνω από την ονομαστική. Το κόστος λαμβάνεται μετά από έρευνα αγοράς στα $UC_{WEC} = 55,000 \in$. Το κόστος συντήρησης είναι $\alpha_{WEC} = 550 \in$ ανά έτος και ανεμογεννήτρια.

Για τις ισοδύναμες εκπομπές αερίων, η βιβλιογραφία δεν έχει πολλές αναφορές για μικρές Α/Γ. Βρέ-



Εικόνα 4.1: Η χαρακτηριστική καμπύλη της Α/Γ Proven 15.

θηκαν δύο τιμές για τις ετήσιες εκπομπές, μια για Α/Γ 10 kW και για Α/Γ 30 kW με αντίστοιχους συντελεστές $195.7 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kW}$ και $70.1 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kW}$. Στην ανάλυση επιλέχθηκε μια σταθμισμένη μέση τιμή $f_{WEC_{\text{CO}_2}} = 150 \text{ kg}_{\text{CO}_2}/\text{kW}$ [106].

4.3.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

To φωτοβολταϊκό πλαίσιο Wuxi Guofei Green Solar 185 είναι ένα τυπικό μονοκρυσταλλικό πλαίσιο 185 W και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρά αλλά και σε μεγάλα συστήματα αν και θεωρείται μικρό για τις σημερινές εφαρμογές. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επιπλέον, για τις ανάγκες της προσομοίωσης λήφθηκε τιμή θερμοκρασίας NOCT, $T_{NOCT} = 48$ °C και έτσι σύμφωνα με τη σχέση 2.13 η τιμή $\frac{\tau \alpha}{U_L}$ είναι $0.035 \text{ m}^2/\text{W}$. Τέλος, το γινόμενο $\tau \alpha$ λήφθηκε ίσο με 0.9. Το κόστος του πλαισίου υπολογίστηκε με βάση μια μέση τιμή 1.2 €/W_p δίνοντας έτσι κόστος $UC_{PV} = 220$ €.

Γενικά, η αύξηση του μεγέθους της εγκατεστημένης ισχύος μειώνει σημαντικά το μοναδιαίο κόστος όμως στα πλαίσια της περίπτωσης εφαρμογής, το εύρος των δυνατών εγκαταστάσεων δεν επηρεάζει σημαντικά το κόστος. Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης (STC) κατά την προσομοίωση λήφθηκε 10% μικρότερος από αυτόν που δίνει ο κατασκευαστής. Ο βαθμός απόδοσης των φ/β πλαισίων μειώνεται με τα έτη λειτουργίας. Οι κατασκευαστές πλαισίων εγγυώνται πως η μείωση δεν θα είναι μεγαλύτερη από το 10% για τα πρώτα δέκα χρόνια λειτουργίας. Έτσι, επειδή η προσομοίωση είναι ετήσια, αλλά η οικονομική ανάλυση γίνεται για τη διάρκεια ζωής του έργου λήφθηκε ο συγκεκριμένος, μικρότερος, βαθμός απόδοσης. Το κόστος συντήρησης των πλαισίων αφορά κυρίως τον καθαρισμό τους 2 φορές το έτος με ειδικό κόστος $\alpha_{PV} = 0.4 \epsilon/m^2$. Ο ισοδύναμος συντελεστής εκπομπής από Φ/Β για μονο-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ



Εικόνα 4.2: Η Α/Γ Proven 15.

κρυσταλλικά συστήματα λήφθηκε από τη βιβλιογραφία $f_{PV_{\rm CO_2}}=140\,{\rm kg}_{\rm CO_2}/{\rm kWp}$ [104].

4.3.3 Ηλεκτρικός Συσσωρευτής

Ο συσσωρευτής που έχει επιλεγεί είναι ο Sun Xtender PVX-2120L της εταιρίας Concorde. Είναι τύπου οξέος μολύβδου (Lead-Acid). Η ονομαστική τάση του κάθε κελιού είναι $V_{bat,c} = 12$ V ενώ η χωρητικότητα για πλήρη εκφόρτιση σε 24 ώρες είναι 212 Ah ανά κελί. Οι καμπύλες εκφόρτισης για ένα κελί παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.3 [109]. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται το ποσοστό της χωρητικότητας σε σχέση με την ονομαστική χωρητικότητα της 24ώρης εκφόρτισης ενώ στον κάθετο άξονα δίνεται η αντίστοιχη τάση των ακροδεκτών. Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης (1 hr, 2 hr, 4 hr, 8 hr, 24 hr και 120 hr). Οι καμπύλες αυτές θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των παραμέτρων που απαιτούνται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφτηκε στην ενότητα του μοντέλου KiBaM (Παράγραφος 2.1.3). Λαμβάνονται τα σημεία από όλες τις καμπύλες και εισάγονται στο λογισμικό "KiBaM Parameter Finder". Έτσι προκύπτουν για ένα κελί τα χαρακτηριστικά:

 $q_{max} = 151.13 \,\mathrm{Ah}$ k = 0.0786 c = 0.6761

4.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ

Wuxi Guofei Green En	Proven $15\mathrm{kW}$				
Χαρακτηριστικό Μονάδες Τιμή			Χαρακτηριστικό	Μονάδες	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	Ονομαστική ισχύς ${ m Wp}$ 185		Ονομαστική ισχύς	kW	15
Τάση MPP V 36.2		36.2	Ταχύτητα εκκίνησης	m/s	2.5
Ένταση ΜΡΡ Α		5.11	Ταχύτητα ονομ. ισχύος	m/s	12
Μήκος mm		1580	Ύψος κεφαλής	m	15 ή 25
Πλάτος mm 803		803	Ταχύτητα περιστροφής	RPM	150
Επιφάνεια m^2 1.29		1.29	Διάμετρος κεφαλής	m	9
Θερμ. συντελεστής ισχύος	%/° C	-0.47			
Τιμή Φ/Β πλαισίου	€	220	Τιμή Α/Γ	€	55,000

Πίνακας 4.2: Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας.

Εάν πολλαπλασιαστεί η ονομαστική τάση του κελιού με το q_{max} προκύπτει η τιμή $E_{max,c}$, δηλαδή η ονομαστική ενέργεια που μπορεί να αποδώσει ένα κελί.

$$E_{max,c} = q_{max} \cdot V_{bat,c} = 1.814 \,\mathrm{kWh}$$
 (4.1)

Εάν πολλαπλασιαστεί και ο αριθμός των κελιών που χρησιμοποιούνται προκύπτει η τελική τιμή της χωρητικότητας της συστοιχίας των συσσωρευτών E_{max} που θα εισαχθεί στο μοντέλο που περιγράφτηκε, δηλαδή:

$$E_{max,bat} = N_{bat} \cdot E_{max,c} \tag{4.2}$$

Εδώ θα πρέπει να παρατηρήσουμε πως η συστοιχία των συσσωρευτών έχει ονομαστική χωρητικότητα 212 Ah αλλά για τη μοντελοποίηση η τιμή του q_{max} που έδωσε το πρόγραμμα KiBaM Parameter Finder ήταν αρκετά μικρότερη. Το κόστος του κάθε κελιού θεωρήθηκε στα $UC_{BT} = 515$ € μετά από έρευνα αγοράς [110]. Ως ετήσιο κόστος συντήρησης λαμβάνεται το ποσοστιαίο κόστος αλλαγής των συσσωρευτών το οποίο είναι $\alpha_{BT} = 0.20$ δηλαδή η αντικατάσταση τους γίνεται κάθε 5 χρόνια, ενώ όταν επιλέγεται να γίνεται πλήρης αποφόρτιση η αλλαγή τους να γίνεται κάθε 4 χρόνια $\alpha_{BT} = 0.25$. Η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών είναι παραδοχή βασιζόμενη στο [111]. Ο ισοδύναμος συντελεστής εκπομπής λήφθηκε, για συσσωρευτή όμοιου τύπου, ίσος με $f_{BTco_2} = 150 \text{ kg}_{CO_2}/\text{kWh}$ [107].



Εικόνα 4.3: Καμπύλες εκφόρτισης του συσσωρευτή που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.

4.3.4 Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που έχει επιλεχθεί είναι της Αγγλικής εταιρείας Perkins με τον εμπορικό τύπο 404C-22G. Είναι μηχανή εσωτερικής καύσης 4 κυλίνδρων και έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ $P_{r,el} = 16.3 \,\mathrm{kWe}$. Από τα στοιχεία που υπάρχουν στο φυλλάδιο του κατασκευαστή [112] μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές a_0 και a_1 της σχέσης 2.41 που δίνει την κατανάλωση του καυσίμου για τη ζητούμενη ισχύ. Έτσι από το φυλλάδιο του κατασκευαστή υπολογίζονται οι συντελεστές:

$$a_{DG0} = 0.6852 \qquad \qquad a_{DG1} = 0.2335$$

όπου στη σχέση 2.41 η ισχύς δίνεται σε kW και η κατανάλωση σε kg/hr. Το κόστος του H/Z μετά από έρευνα αγοράς βρέθηκε στα $UC_{DG} = 4000$ €. Το κόστος συντήρησης αφορά κυρίως το κόστος λίπανσης και δίνεται ως συνάρτηση των ωρών λειτουργίας, με ειδικό κόστος $UC_{lbr} = 0.1$ €/hr λειτουργίας. Η τιμή αυτή προέκυψε από την προβλεπόμενη, από τον κατασκευαστή, συντήρηση της μηχανής καθώς και μια εκτίμηση για το κόστος του ελαίου λίπανσης. Η τιμή του καυσίμου για την περιοχή εγκατάστασης είναι $UC_{DSL} = 0.62$ €/L ή 0.745 €/kg [113]. Ο συντελεστής εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου από την καύση είναι $f_{DSL_{CO_2}} = 3.2 \text{ kg}_{CO_2}$ [114].

4.4. ΜΟΝΑΔΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ



Εικόνα 4.4: Η ειδική κατανάλωση της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης σε σχέση με την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας.

4.4 Μονάδα αφαλάτωσης

Η μονάδα αφαλάτωσης που επιλέχθηκε έχει ονομαστική δυναμικότητα $Q_{cap} = 24 \text{ m}^3/\text{hr}$ και είναι της ισπανικής εταιρίας SETA. Από τη στιγμή που η ημερήσια ζήτηση είναι όση η δυναμικότητα της μονάδας, τότε η μονάδα θα λειτουργεί συνεχώς, 24 ώρες την ημέρα. Η ειδική κατανάλωση της μονάδας αφαλάτωσης μεταβάλλεται σε σχέση με τη συγκέντρωση άλατος στο νερό (Εικόνα 4.4). Έτσι για τη συγκεκριμένη περιοχή, με μέση αλατότητα 16,000 mg/L, η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι $SEC = 3560 \text{ Wh/m}^3$. Το κόστος αγοράς της μονάδας αφαλάτωσης ανέρχεται σε $IC_{RO} = 65,000$ €. Το κόστος των χημικών προεπεξεργασίας του νερού της μονάδας αφαλάτωσης έχει ληφθεί από τη βιβλιογραφία ίσο με $UC_{CH} = 0.05 \text{ €/m}^3$ παραγόμενου νερού ενώ η αλλαγή των μεμβρανών πραγματοποιείται με ρυθμό ανανέωσης α_{memb} = 10% ανά έτος [115]. Το κόστος των 4 μεμβρανών 4 in υπολογίζεται σε $UC_{MEMB} = 1000 \text{ €}$.

4.5 Άλλα κόστη και παραδοχές

Το κόστος του αντιστροφέα λαμβάνεται ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Για τα αυτόνομα συστήματα το κόστος υπολογίστηκε μετά από έρευνα αγοράς στα $SC_{INV} = 900$ €/kW. Το συγκεκριμένο κόστος αφορά τη συνδεσμολογία της εικόνας 2.1. Ο βαθμός απόδοσης του κάθε αντιστροφέα θεωρείται $\eta_{inv} = 0.95$. Το κόστος σχεδιασμού και κατασκευής (BOS - Balance of System) είναι ίσο με το 20% της συνολικής εγκατάστασης άρα $\alpha_{BOS} = 0.25$. Η διάρκεια ζωής του έργου είναι n = 20 yr και το επιτόκιο αναγωγής i = 4%.

Παράμετρος	Τιμή
Ύψος μετρήσεων (m)	10
Μέση ταχύτητα ανέμου ($ m m/s$)	4.99
Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου ($ m m/s$)	0
Μέγιστη ταχύτητα ανέμου ($ m m/s$)	18.5
Παράμετρος μορφής Weibull k	1.519
Παράμετρος κλίμακας Weibull c (${ m m/s}$)	5.54
Τυπική απόκλιση ($ m m/s$)	3.36
Συντελεστής εκθετικού νόμου	0.14

Πίνακας 4.3: Ανεμολογικά δεδομένα στην περιοχή εγκατάστασης.

4.6 Δυναμικό πόρων

4.6.1 Αιολικό δυναμικό

Δεδομένα του ανέμου για την περιοχή της μελέτης δίνονται στον πίνακα 4.3. Τα δεδομένα λήφθηκαν από μετρήσεις. Με μέση ταχύτητα 5 m/s η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m θεωρείται μέτρια. Όμως σε ύψος κεφαλής της Α/Γ 30 m η ταχύτητα είναι ικανοποιητική. Οι μέσες μηνιαίες τιμές που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση δίνονται στον πίνακα 4.4. Η παραγωγή της χρονοσειράς έγινε με τη χρήση του προγράμματος Homer.

4.6.2 Ηλιακό δυναμικό

Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζεται η μηνιαία και η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για κλίση επιπέδου 30° επειδή σε αυτή την κλίση θα τοποθετηθούν τα πλαίσια. Η παραγωγή της χρονοσειράς έγινε με τη χρήση του προγράμματός Homer.

4.6.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος απαιτείται για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας επιφανείας των φωτοβολταϊκών όπου καθορίζει το στιγμιαίο βαθμό απόδοσης. Η χρονοσειρά της θερμοκρασίας λήφθηκε από τη βάση δεδομένων του συστήματος Copernicus/Soda-Pro [116] για την περιοχή μελέτης.

Μήνας	Μέση ταχύτητα ($ m m/s$)		
Ιανουάριος	5.29		
Φεβρουάριος	5.67		
Μάρτιος	5.44		
Απρίλιος	5.63		
Μάιος	5.35		
Ιούνιος	4.38		
Ιούλιος	4.08		
Αύγουστος	4.74		
Σεπτέμβριος	4.37		
Οκτώβριος	5.01		
Νοέμβριος	5.01		
Δεκέμβριος	5.27		

Πίνακας 4.4: Μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης.

Πίνακας 4.5: Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή εγκατάστασης και για τη βέλτιστη κλίση και μέση μηνιαία θερμοκρασία.

	Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία	Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία	Μέση θερμοκρασία
	(kWh/m ²)	(kWh/m ²)	(°C)
Ιανουάριος	123	3.97	10.73
Φεβρουάριος	122	4.36	10.21
Μάρτιος	169	5.45	13.16
Απρίλιος	175	5.83	17.82
Μάιος	204	6.80	20.25
Ιούνιος	211	7.03	24.49
Ιούλιος	227	7.32	28.90
Αύγουστος	217	7.00	28.55
Σεπτέμβριος	194	6.47	26.20
Οκτώβριος	173	5.58	19.56
Νοέμβριος	139	4.63	16.03
Δεκέμβριος	125	4.03	11.31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα περίπτωσης εφαρμογής

Για τα δεδομένα που δόθηκαν στο κεφάλαιο 4, ακολουθείται η μεθοδολογία των βημάτων σχεδιασμού που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Για την κάθε εναλλακτική περίπτωση σχεδιασμού ακολουθείται συγκεκριμένη ονοματολογία που περιλαμβάνει 3 μέρη. Στο πρώτο μέρος περιγράφεται η ενεργειακή διαχείριση, στο δεύτερο μέρος εάν ο μήνας σχεδιασμού είχε υψηλό ή χαμηλό δυναμικό και στο τρίτο η μεταβλητή σχεδιασμού της συμμετοχής της κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό μείγμα. Για παράδειγμα ένα σενάριο θα έχει όνομα EnerSc1 LowRes 25PV/75WEC και έτσι είναι πλήρως ορισμένο. Η περίπτωση εφαρμογής υλοποιήθηκε με το λογισμικό που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διατριβής και παρουσιάζεται συνοπτικά στο παράρτημα Π.1.

5.1 Βιωσιμότητα και προκαταρκτικός σχεδιασμός

Κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό (δηλαδή τη διαστασιολόγηση των συστημάτων), δημιουργούνται διαφορετικά συστήματα μεταβάλλοντας τις μεταβλητές σχεδιασμού, δηλαδή το ποσοστό κάλυψης της κάθε ανανεώσιμης τεχνολογίας και του μήνα σχεδιασμού. Ως μήνες σχεδιασμού επιλέχθηκαν αυτοί που έχουν υψηλό και χαμηλό δυναμικό έτσι ώστε να ληφθούν τα 2 άκρα. Έτσι, για 5 διαφορετικές περιπτώσεις ενεργειακής κάλυψης, δηλαδή για 5 τιμές της μεταβλητής α_{em} (0%, 25%, 50%, 75% και 100% - Εξίσωση 3.2) και για 2 μήνες σχεδιασμού δημιουργούνται 10 διαφορετικά/εναλλακτικά σενάρια (Εικόνα 5.1). Αυτά τα δέκα βασικά συστήματα θα χρησιμοποιηθούν για τα επόμενα στάδια. Για τα δεδομένα ζήτησης ενέργειας και νερού και για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης στους πίνακες 5.1 και 5.2 για την περίπτωση σχεδιασμού με υψηλό δυναμικό και χαμηλό αντίστοιχα.



Εικόνα 5.1: Παράσταση του τρόπου που προκύπτουν τα εναλλακτικά σενάρια κατά την διαστασιολόγηση.

Όπως αναμένεται κατά το σχεδιασμό με χαμηλό δυναμικό (**LowRes**) η χρήση της βοηθητικής ενέργειας μηδενίζεται αλλά η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών συστημάτων σχεδόν διπλασιάζεται ενώ των φωτοβολταϊκών τριπλασιάζεται. Αυτός ο λόγος παραμένει για όλα τα ποσοστά κάλυψης. Αντίθετα, η χωρητικότητα των συσσωρευτών δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα από σχεδιασμό χαμηλού δυναμικού σε σχεδιασμό υψηλού δυναμικού (**HiRes**) αλλά ούτε και ανάμεσα στα ποσοστά κάλυψης με εξαίρεση την περίπτωση όπου η ανανεώσιμη ενέργεια παράγεται από φωτοβολταϊκά. Η ημερήσια ζήτηση ενέργειας είναι 181.44 kWh και έτσι προκύπτει πως η χωρητικότητα του υποσυστήματος των συσσωρευτών μεταβάλλεται έτσι ώστε να μπορεί να παρέχει αυτονομία (*BLR* - Battery to Daily Load Ratio) από 0.8 έως 1.5 μέρες.

5.2 Επιδόσεις συστημάτων

Για την εκτίμηση των επιδόσεων χρησιμοποιείται το εργαλείο της προσομοίωσης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.2 χρησιμοποιώντας τα μοντέλα του κεφαλαίου 2. Εκτός από τους δείκτες που έχουν περιγραφεί, έχουν υπολογιστεί πολλά μεγέθη που θα βοηθήσουν στην αξιολόγηση των εναλλακτικών συστημάτων. Από τα δέκα εναλλακτικά σενάρια της διαστασιολόγησης

5.2. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

		0% WEC	25% WEC	50% WEC	75% WEC	100% WEC
Μέγεθος		100% PV	75% PV	50% PV	25% PV	0% PV
Αιολικό σύστημα						
Απαιτούμενη ισχύς	kW	0	7.3	14.6	21.9	29.2
Αριθμός Α/Γ		0	1	1	2	2
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	0	16.02	16.02	32.04	32.04
Φωτοβολταϊκό σύστημα						
Απαιτούμενη ισχύς	kW	33.45	25.09	16.73	8.36	0
Αριθμός Φ/Β πλαισίων		181	136	91	46	0
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	33.49	25.16	16.84	8.51	0
Σύστημα αποθήκευσης						
Απαιτούμενη χωρητικότητα	kWh	235.4	180.82	159.04	153.57	146.68
Αριθμός κελιών		96	72	64	64	60
Εγκατεστημένη χωρητικότητα	kWh	241.92	181.44	161.28	161.28	151.2
Συμβατικό σύστημα						
Απαιτούμενη ισχύς	kW	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56
Αριθμός Η/Ζ		1	1	1	1	1
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	19	19	19	19	19
Ενεργειακά μεγέθη						
Ζήτηση ενέργειας	kWh	66225.60	66225.60	66225.60	66225.60	66225.60
Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέχθηκε	kWh	43306.26	60982.82	50216.07	67892.62	56886.61
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση	kWh	43300.15	56964.23	50216.07	61944.76	56021.06
Ανανεώσιμη ενέργεια που απορρίφθηκε	kWh	6.11	4018.59	0	5947.86	865.55
Ενέργεια από Η/Ζ	kWh	22925.45	9261.37	16009.53	4280.84	10204.54
Λόγος ΑΠΕ που αποδόθηκε προς ζήτηση ενέργειας		0.65	0.86	0.76	0.94	0.85
Λόγος ΑΠΕ που αποδόθηκε προς ΑΠΕ που συλλέχθηκε		1	0.93	1	0.91	0.98

Πίνακας 5.1: Τα αποτελέσματα σχεδιασμού για το μήνα με πλούσιο δυναμικό (HiRes).

		0% WEC	25% WEC	50% WEC	75% WEC	100% WEC
Μέγεθος		100% PV	75% PV	50% PV	25% PV	0% PV
Αιολικό σύστημα						
Απαιτούμενη ισχύς	kW	0	12.63	25.27	37.9	50.54
Αριθμός Α/Γ		0	1	2	3	4
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	0	16.02	32.04	48.06	64.08
Φωτοβολταϊκό σύστημα						
Απαιτούμενη ισχύς	kW	107.62	80.72	53.81	26.91	0
Αριθμός Φ/Β πλαισίων		582	437	291	146	0
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	107.67	80.85	53.84	27.01	0
Σύστημα αποθήκευσης						
Απαιτούμενη χωρητικότητα	kWh	262.54	168.65	168.65	158.59	152.07
Αριθμός κελιών		108	68	68	64	64
Εγκατεστημένη χωρητικότητα	kWh	272.16	171.36	171.36	161.28	161.28
Συμβατικό σύστημα						
Απαιτούμενη ισχύς	kW	7.56	7.56	7.56	7.56	7.56
Αριθμός Η/Ζ		1	1	1	1	1
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	19	19	19	19	19
Ενεργειακά μεγέθη						
Ζήτηση ενέργειας	kWh	66225.60	66225.60	66225.60	66225.60	66225.60
Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέχθηκε	kWh	139249.97	133000.41	126511.59	120262.04	113773.22
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση	kWh	66223.69	66229.45	66235.22	66240.98	66246.75
Ανανεώσιμη ενέργεια που απορρίφθηκε	kWh	73026.28	66770.96	60276.38	54021.06	47526.48
Ενέργεια από Η/Ζ	kWh	0	0	0	0	0
Λόγος ΑΠΕ που αποδόθηκε προς ζήτηση ενέργειας		1	1	1	1	1
Λόγος ΑΠΕ που αποδόθηκε προς ΑΠΕ που συλλέχθηκε		0.48	0.52	0.52	0.55	0.58

Πίνακας 5.2: Τα αποτέλεσματα σχεδιασμού για το μήνα με φτωχό δυναμικό (LowRes).

5.2. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Εικόνα 5.2: Σύγκριση ενεργειακών δεικτών ανάμεσα στην εκτίμηση κατά την διαστασιολόγηση και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

της εικόνας 5.1 μπορούν να προκύψουν περισσότερες εναλλακτικές εφαρμόζοντας διαφορετικούς κανόνες ενεργειακής διαχείρισης.

5.2.1 1° Σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (EnerSc1)

Στο πρώτο σετ των 10 προσομοιώσεων δεν επιτρέπεται η εξάντληση των συσσωρευτών και το σύστημα μπορεί να δώσει ενέργεια από ΑΠΕ στο εξωτερικό φορτίο. Το σύστημα διαχείρισης με αυτούς τους κανόνες λαμβάνει την ονομασία **EnerSc1**. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 και 5.4 ενώ για λόγους οικονομίας χώρου έχουν αφαιρεθεί οι δείκτες *Ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που* ζητείται, Σταθερή λειτουργία μονάδας RO και Nερό που αποδίδεται / νερό που ζητείται όπου σε όλες τις περιπτώσεις είναι μονάδα ενώ έχει αφαιρεθεί και ο δείκτης Ποσοστό χρόνου όπου οι συσσωρευτές βρίσκονται κάτω από το κρίσιμο βάθος εκφόρτισης όπου λόγω κανόνα ενεργειακής διαχείρισης είναι μηδέν. Από τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Και στις 2 περιπτώσεις LowRes και HiRes η καλύτερη οικονομικά λύση είναι το 25% WEC 75% PV, δηλαδή η περίπτωση διαστασιολόγησης όπου η ενέργεια παράγεται περισσότερο από φωτοβολταϊκά και και λιγότερο από αιολικά. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να είναι χαμηλή για μεγάλο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να μην μπορεί να παραχθεί καθόλου ηλεκτρική ενέργεια όσες ανεμογεννήτριες και να είναι εγκατεστημένες. Αντίθετα, τα φωτοβολταϊκά μπορούν να παράξουν ενέργεια και σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας συνεισφέροντας σημαντικά στο ενεργειακό ισοζύγιο.
- Η χρήση του συσσωρευτή, αν και είναι περίπου ίδιου μεγέθους και στις 2 περιπτώσεις, στην



Εικόνα 5.3: Σύγκριση σεναρίων ενεργειακής διαχείρισης.

περίπτωση HiRes γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη χρήση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των ενεργειακών μεγεθών της διαστασιολόγησης και της προσομοίωσης μπορούν να κατασκευαστούν τα γραφήματα στις εικόνες 5.2 και 5.3. Τα ενεργειακά μεγέθη στην περίπτωση των δεικτών είναι σχετικά κοντά στην περίπτωση όπου το σύστημα συμπεριλαμβάνει και Φ/Β. Στην περίπτωση όπου υπάρχει μόνο το αιολικό σύστημα υπάρχει σημαντική απόκλιση. Όμως από το διάγραμμα 5.3 συμπεραίνεται πως η ενέργεια που συλλέγεται είναι σχεδόν όση έχει προβλεφθεί από το σύστημα. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η κατανομή του ενεργειακού πόρου του ανέμου κατά την διαστασιολόγηση ίσως να χρειάζεται κάποια καλύτερη προσέγγιση από πλευράς μορφής ή παραμέτρων. Σε γενικές γραμμές όμως η εκτίμηση των ενεργειακών δεικτών κατά την διαστασιολόγηση σε σχέση με την προσομοίωση, στην περίπτωση των υβριδικών είναι λιγότερη από 20%.

5.2.2 2° Σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (EnerSc2)

Στο δεύτερο σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (**EnerSc2**) που εξετάζεται δίνεται ενέργεια στο δίκτυο από το συσσωρευτή αλλά επιτρέπεται η βαθιά εκφόρτισή του. Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι δείκτες αξιολόγησης. Συγκρίνοντας τα 2 ενεργειακά σενάρια γίνεται σαφές πως δεν υπάρχει βελτίωση των οικονομικών μεγεθών αλλά υπάρχει μικρή βελτίωση των ενεργειακών μεγεθών στην περίπτωση **LowRes**. Η βαθιά εκφόρτιση του σεναρίου στις περιπτώσεις που υπάρχει Α/Γ βοηθάει την καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας από ΑΠΕ. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να οδηγήσει στη παραμετρική εξέταση σεναρίων με Α/Γ σε σχέση με το μέγεθος του συσσωρευτή.

5.2. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc1-HiRes.

		0% WEC	25% WEC	50% WEC	75% WEC	100% WEC
Μέγεθος		100% PV	75% PV	50% PV	25% PV	0% PV
Ζήτηση Ενέργειας	kWh	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6
Ενέργεια που συλλέχθηκε Α/Γ	kWh	0	28601.12	28601.12	57202.24	57202.24
Ενέργεια που συλλέχθηκε Φ/Β	kWh	49717.24	37356.6	24995.96	12635.32	0
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση	kWh	46205.17	58162.08	49870.7	53488.83	44886.06
Ενέργεια από Η/Ζ	kWh	22591.72	11477.58	19089.59	16313.82	24262.42
Κατανάλωση καυσίμου	kg	8388.81	4657.84	7797.75	6934.98	9314.39
Χρόνος λειτουργίας	hr	3535	2079	3510	3205	4078
Αριθμός ON/OFFs		368	261	316	281	299
Ενέργεια δια μέσου του συσσωρευτή	kWh	15914.01	16155.43	10438.37	11929.9	10705.74
Απώλειες συσσωρευτή	kWh	3719.37	3779.39	2439.48	2790.03	2502.76
Δείκτες						
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται		0.7	0.88	0.75	0.81	0.68
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται		0.93	0.88	0.93	0.77	0.78
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας Η/Ζ	%	29.43	23.73	40.07	36.59	46.55
Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ		0.98	0.72	0.87	0.77	0.82
Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται		0.33	0.24	0.16	0.18	0.16
Κεφαλαιακό κόστος	€	181575	222500	204975	261350	246125
Κόστος καυσίμου	€	6249.66	3470.09	5809.32	5166.56	6939.22
Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου	$\mathrm{kg}_{\mathrm{CO}_2}$	35887.97	24102.09	33109.62	32316.39	39183.05
Κόστος ενέργειας	€/kWh	0.38	0.35	0.36	0.42	0.42
Κόστος νερού	€/m ³	1.96	1.86	1.88	2.09	2.11

		0% WEC	25% WEC	50% WEC	75% WEC	100% WEC
Μέγεθος		100% PV	75% PV	50% PV	25% PV	0% PV
Ζήτηση Ενέργειας	kWh	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6
Ενέργεια που συλλέχθηκε Α/Γ	kWh	0	28601.12	57202.24	85803.36	114404.5
Ενέργεια που συλλέχθηκε Φ/Β	kWh	159864.3	120035.6	79932.14	40103.41	0
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση	kWh	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6	58560.28
Ενέργεια από Η/Ζ	kWh	63.23	576.34	1475.02	3750.92	13639.87
Κατανάλωση καυσίμου	kg	43.71	303.54	717.44	1612.87	5187.78
Χρόνος λειτουργίας	hr	13	125	318	719	2231
Αριθμός ON/OFFs		4	56	105	144	218
Ενέργεια δια μέσου του συσσωρευτή	kWh	34547.66	24269.36	19596.93	16155.56	14020.42
Απώλειες συσσωρευτή	kWh	8096.34	5687.77	4594.08	3788.62	3288.74
Δείκτες Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται Αναγεώσιμη ενέργεια που		1	1	1	1	0.88
αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται		0.47	0.45	0.48	0.53	0.51
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας Η/Ζ	%	0.15	1.43	3.63	8.21	25.47
Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ		0.01	0.15	0.29	0.39	0.6
Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται		0.52	0.37	0.3	0.24	0.21
Κεφαλαιακό κόστος	€	299575	310425	331300	357600	386200
Κόστος καυσίμου	€	32.56	226.14	534.49	1201.59	3864.9
Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου	$\mathrm{kg}_{\mathrm{CO}_2}$	13.99	13685.30	15093.03	18656.13	31086.30
Κόστος ενέργειας	€/kWh	0.43	0.41	0.43	0.47	0.55
Κόστος νερού	ϵ/m^3	2.15	2.08	2.13	2.28	2.57

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc1-LowRes.
5.2. ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

		0% WEC	25% WEC	50% WEC	75% WEC	100% WEC
Δείκτες		100% PV	75% PV	50% PV	25% PV	0% PV
Ποοσοιιοίωση	σεναρίου	susousiarác	διανείοισης	EnorSc2_Hil	Roc	
Αναγεώστια εγέργεια που	οεναριου	ενεργειακης	σιαχειρισης	, LITEI 302-I III	163	
αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται		0.9	0.84	0.76	0.9	0.71
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται		0.93	0.9	0.94	0.8	0.82
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας Η/Ζ	%	40.29	20.53	38.32	31.58	42.58
Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ		1.01	0.59	0.83	0.64	0.73
Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται		0.24	0.27	0.17	0.21	0.19
Ποσοστό χρόνου κάτω από το κρίσιμο βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή	%	98.29	64.89	81.94	59.42	68.29
Κεφαλαιακό κόστος	€	181575	222500	204975	261350	246125
Κόστος καυσίμου	€	6238.15	3013.06	5562.29	4483.93	6360.8
Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου	$\mathrm{kg}_{\mathrm{CO}_2}$	37652.89	23499.78	33258.14	30593.89	37832.57
Κόστος ενέργειας	€/kWh	0.42	0.37	0.38	0.43	0.44
Κόστος νερού	ϵ/m^3	2.09	1.93	1.95	2.14	2.16
Προσομοίωση α	εναρίου ε	νεργειακής	διαχείρισης	EnerSc2-Low	/Res	
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται		1	1	1	1	0.92
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται		0.47	0.5	0.53	0.56	0.53
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας Η/Ζ	%	0	0.07	0.46	4.35	20.84
Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ		0	0.01	0.03	0.2	0.48
Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται		0.52	0.37	0.32	0.27	0.25
Ποσοστό χρόνου κάτω από το κρίσιμο βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή	%	3.33	7.47	11.56	22.4	40.91
Κεφαλαιακό κόστος	€	299575	310425	331300	357600	386200
Κόστος καυσίμου	€	11.41	42.26	98.71	654.27	3176.93
Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου	$\mathrm{kg}_{\mathrm{CO}_2}$	15920.84	14407.48	14506.39	17514.82	29340.89
Κόστος ενέργειας	€/kWh	0.48	0.44	0.45	0.49	0.57
Κόστος νερού	ϵ/m^3	2.3	2.18	2.2	2.34	2.62

Πινακας 5.5. Αποτελευματα προσομοιωσης επείδες (Νιονό δεικτες).

5.2.3 3° Σενάριο ενεργειακής διαχείρισης (EnerSc3)

Στο τρίτο σενάριο ενεργειακής διαχείρισης επιτρέπεται η φόρτιση του συσσωρευτή από το συμβατικό σύστημα. Αυτός ο ενεργειακός κανόνας έχει θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά που πρέπει να αξιολογηθούν. Η φόρτιση του συσσωρευτή από το συμβατικό σύστημα δημιουργεί επιπλέον ενεργειακές απώλειες λόγω φόρτισης/εκφόρτισης σε σχέση με την άμεση χρήση της ενέργειας από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Όμως, η φόρτιση του συσσωρευτή επιτρέπει, πιθανόν, στο Η/Ζ να λειτουργεί σε αποδοτικότερο σημείο λειτουργίας με αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Αυτές οι 2 αντικρουόμενες λογικές μπορούν να εξεταστούν και να αξιολογηθούν ενεργειακά και οικονομικά. Εξετάζονται μόνο οι περιπτώσεις σχεδιασμού HiRes αφού στη περίπτωση LowRes η επίδραση της ενέργειας από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος είναι μικρή εκ σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.6.

Ανάμεσα στα συστήματα που εξετάζονται με αυτή την ενεργειακή διαχείριση, η περίπτωση 50PV/50WEC έχει το χαμηλότερο κόστος νερού, αλλά δεν διαφέρει σημαντικά από το σενάριο 75PV/25WEC. Για άμεση σύγκριση των σεναρίων EnerSc1-HiRes (Πίνακας 5.3) και EnerSc3-HiRes σχετικά με τη χρήση του Η/Ζ μπορεί να κατασκευαστεί το γράφημα της εικόνας 5.4. Οι εναλλακτικές λύσεις του συστήματος ενεργειακής διαχείρισης EnerSc3 παρουσιάζουν ταυτόχρονα και μεγαλύτερη συμμετοχή του Η/Ζ στο ενεργειακό σύστημα (το οποίο δεν είναι επιθυμητό γενικά) αλλά όμως σημαντικά λιγότερη κατανάλωση καυσίμου από τις αντίστοιχες εναλλακτικές με σύστημα EnerSc1. Αυτό συμβαίνει τελικά γιατί το Η/Ζ λειτουργεί με μεγαλύτερη ισχύ σε αποδοτικότερο σημείο.

5.3 Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίων

5.3.1 Σενάριο μόνο με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (DGOnly)

Εάν γινόταν ένα σενάριο σχεδιασμού μόνο με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος **DGOnly** τότε θα μπορούσε βρεθεί το κόστος της ενέργειας στην περίπτωση που καλύπτονται οι ανάγκες μόνο από συμβατική ενέργεια. Η τιμή του κόστους θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση ή μείωση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο σύστημα. Στην περίπτωση αυτή το κόστος της ενέργειας υπολογίζεται $EnergyCost_{DGOnly} = 0.27$ €/kWh και το κόστος του νερού $WaterCost_{DGOnly} = 1.57$ €/m³. Αρκετά χαμηλότερα από όλες τις περιπτώσεις.

Η χαμηλότερη τιμή νερού που έχει ληφθεί για υβριδικό σύστημα είναι για το 50%WEC-50%PV HiRes-EnerSc3 και έχει τιμή WaterCost = 1.81 €/m³. Με τη βοήθεια της ανάλυσης ευαισθησίας, μπορεί να

5.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

}		·····				
		0% WEC	25% WEC	50% WEC	75% WEC	100% WEC
Μέγεθος		100% PV	75% PV	50% PV	25% PV	0% PV
Ζήτηση ενέργειας	kWh	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6	66225.6
Ενέργεια που συλλέχθηκε Α/Γ	kWh	0	28601.12	28601.12	57202.24	57202.24
Ενέργεια που συλλέχθηκε Φ/Β	kWh	49717.24	37356.6	24995.96	12635.32	0
Ανανεώσιμη Ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση	kWh	46205.17	57741.73	49589.07	52886.86	44354.55
Ενέργεια από Η/Ζ	kWh	22591.72	14018	22754.8	19902.3	29046.6
Κατανάλωση καυσίμου	kg	8388.81	3969.1	6417.81	5622.28	8177.61
Χρόνος λειτουργίας	hr	3535	860	1396	1221	1782
Αριθμός ON/OFFs		368	815	1331	1177	1687
Ενέργεια δια μέσου του συσσωρευτή	kWh	15914.01	24656.01	24529.7	24064.93	28257.47
Απώλειες συσσωρευτή	kWh	3719.37	5774.97	5745.63	5636.9	6620.74
Δείκτες						
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται		0.7	0.87	0.75	0.8	0.67
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται		0.93	0.88	0.93	0.76	0.78
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας H/Z	%	40.35	9.82	15.94	13.94	20.34
Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ		1.01	2.23	3.65	3.22	4.62
Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται		0.24	0.37	0.37	0.36	0.43
Κεφαλαιακό κόστος	€	181575	222500	204975	261350	246125
Κόστος καυσίμου	€	6249.66	2956.98	4781.27	4188.6	6092.32
Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου	$\mathrm{kg}_{\mathrm{CO}_2}$	35887.97	21898.12	28693.82	28115.75	35545.35
Κόστος ενέργειας	ε/kWh	0.38	0.34	0.34	0.4	0.41
Κόστος νερού	ϵ/m^3	1.96	1.83	1.81	2.03	2.05

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης EnerSc3-HiRes.



Εικόνα 5.4: Σύγκριση σεναρίων ενεργειακής διαχείρισης.



Εικόνα 5.5: Ανάλυση ευαισθησίας για την εύρεση της τιμής καυσίμου που κάνει ανταγωνιστική τη χρήση ΑΠΕ.

εντοπιστεί η τιμή του καυσίμου όπου τα κόστη αυτά θα είναι ίσα. Γραφικά και με βάση την εικόνα 5.5 λ αμβάνεται τιμή καυσίμου $FC_{parity} = 0.95$ (kg.

5.3.2 Ανάλυση ευαισθησίας σεναρίου EnerSc1 HiRes 75PV/25WEC

Για το σενάριο ενεργειακής διαχείρισης EnerSc1 που έχει το χαμηλότερο κόστος παραγωγής νερού, μπορεί να εξεταστεί η επίδραση στο δείκτη του κόστους νερού και στην κατανάλωση καυσίμου μιας σειράς παραμέτρων, όπως η μεταβολή του μεγέθους της χωρητικότητας της συστοιχίας των συσσωρευτών και η ταχύτητα του ανέμου. Στην εικόνα 5.6i παρατηρείται πως το μέγεθος των συσσωρευτών έχει αρνητική επίδραση στο κόστος, δηλαδή αυξάνεται γραμμικά, σχεδόν από το σημείο σχεδιασμού

5.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΕΝΑΡΙΩΝ





και πάνω, όσο αυξάνεται η χωρητικότητα. Για μικρότερου μεγέθους συσσωρευτές παρατηρείται πως το κόστος ελαχιστοποιείται σχεδόν όταν μηδενίζεται η χωρητικότητα. Στην εικόνα 5.6ii παρατηρείται πως υπάρχει μεγάλη και απότομη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου με την αύξηση της χωρητικότητας των συσσωρευτών.

Τα δύο αυτά γραφήματα οδηγούν στο συμπέρασμα πως αν και το μέγεθος των συσσωρευτών έχει ευεργετική συνεισφορά ως προς την κατανάλωση καυσίμου, το κόστος του νερού δεν μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο κόστος τους και στη χαμηλή τιμή του καυσίμου όπου και υποκαθιστά. Πιθανή αύξηση της τιμής του καυσίμου στο μέλλον, ενδέχεται να καταστήσει συμφέρουσα την επιλογή μεγάλου υποσυστήματος συσσωρευτών.

Η αύξηση της ταχύτητας ανέμου έχει ευεργετική επίδραση και στο κόστος νερού αλλά και στην κατανάλωση καυσίμου όπως αναμενόταν (Εικόνες 5.7i και 5.7ii). Η αύξηση της ταχύτητας σε μια περιοχή δεν προγραμματίζεται, όμως μπορεί να φανεί το οικονομικό όφελος-επίδραση που έχει έτσι ώστε να εγκατασταθεί το αιολικό σύστημα π.χ. σε μια άλλη γειτονική περιοχή με με καλύτερο δυναμικό αλλά ίσως και μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση της μεταβολής του κόστους του νερού και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τον αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ο αριθμός των πλαισίων είναι 136, που αντιστοιχεί σε ισχύ $25.16 \,\mathrm{kWp}$. Εάν μεταβληθεί ο αριθμός τους από τα 136 στα 380 τότε σύμφωνα με την εικόνα 5.8i το κόστος του νερού ελαχιστοποιείται στα 194 Φ/Β πλαίσια (δηλαδή $35.89 \,\mathrm{kWp}$) και το κόστος του νερού γίνεται $1.82 \,/\mathrm{m}^3$, δηλαδή 4 λεπτά λιγότερα ανά κυβικό παραγόμενου νερού. Όμοια, και οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ παρουσιάζουν ελάχιστο στα 295 Φ/Β πλαίσια, γεγονός που οφείλεται στη μη περαιτέρω εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και στο περιθώριο μείωσης στους ρύπους του συμβατικού καυσίμου και τελικά οι ισοδύναμες εκπομπές από τα Φ/Β να επικρατούν.



Εικόνα 5.7: Ανάλυση ευαισθησίας των δεικτών της κατανάλωσης συμβατικού καυσίμου και του κόστους του νερού ως προς τη μεταβολή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου.



Εικόνα 5.8: Ανάλυση ευαισθησίας των δεικτών του κόστους νερού και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με τν μεταβολή του αριθμού των Φ/Β πλαισίων

5.4 Ανάλυση επικινδυνότητας

Για να διερευνηθεί και να αξιολογηθεί η επίδραση πολλών παραμέτρων επάνω στους δείκτες αξιολόγησης εφαρμόζεται η ανάλυση επικινδυνότητας με τη μέθοδο MONTE CARLO έτσι όπως έχει παρουσιαστεί στην ενότητα 3.4 για την περίπτωση EnerSc1-HiRes 75PV/25WEC. Αρχικά θα πρέπει να δοθούν οι κατανομές των διαφόρων μεγεθών αβεβαιότητας οι όποιες έχουν προκύψει από ιστορικά στοιχεία. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7 ενώ η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για 500 επαναλήψεις.

Μεταβλητή αβεβαιότητας		Τύπος Κατανομής	Μέση τιμή	Παράμετροι
Κόστος καυσίμου	(€/ kg)	Κανονική	0.745	$\sigma = 0.05$
Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου	(m/s)	Κανονική	5.02	$\sigma = 0.5$
Μέση ετήσια ακτινοβολία	(W/m^2)	Κανονική	237.47	$\sigma = 15$
Ζήτηση νερού	(${ m m}^3/{ m day}$)	Τριγωνική	24	Μεγ. = 26, Ελαχ. = 15
Ζήτηση ισχύος	(kW/day)	Τριγωνική	4	Μέγ. = 5, Ελαχ. = 3

Πίνακας 5.7: Ο πίνακας των μεταβλητών αβεβαιότητας με τις παραμέτρους τους.

Από την ανάλυση προέκυψε η κατανομή συχνοτήτων καθ' ενός από τους 14 δείκτες αξιολόγησης. Στις εικόνες 5.9i και 5.9ii παρουσιάζοντα ενδεικτικά οι κατανομές των δεικτών του κόστους νερού και του κόστους καυσίμου αντίστοιχα. Η μέση τιμή της κατανομής του κόστους του νερού είναι 1.87 $€/m^3$ ενώ η μέση τιμή που υπολογίστηκε κανονικά από την προσομοίωση είναι σχεδόν ίση. Το κόστος του καυσίμου είναι συνολικά 3624 € ενώ έχει υπολογιστεί από την προσομοίωση 154 € λιγότερο. Στην ανάλυση επικινδυνότητας εκτός από τις κατανομές και τη μέση τιμή, σημασία έχουν στο σχεδια-

σμό και τη λειτουργία των συστημάτων οι ακραίες τιμές των μεγεθών καθώς ο σχεδιαστής ή ο λειτουργός ενός συστήματος θα πρέπει να είναι έτοιμος να αντεπεξέλθει σε αυτά τα σενάρια τα οποία έχουν όμως μικρή πιθανότητα να πραγματοποιηθούν.

5.5 Επισκόπηση

5.5.1 Ανάλυση διαδρομής

Η ανάλυση διαδρομής παρουσιάζει γραφικά τις σχετικές επιδόσεις των διάφορων εναλλακτικών συστημάτων σε κάθε δείκτη. Η ανάλυση διαδρομής για τις εναλλακτικές σχεδιασμού EnerSc1 HiRes και EnerSc3 HiRes, παρουσιάζεται στην εικόνα 5.10 και φαίνεται πως δεν υπάρχει εναλλακτική που επι-



Εικόνα 5.9: Κατανομές μεγεθών κόστους που προέκυψαν μετά από ανάλυση επικινδυνότητας.



Εικόνα 5.10: Ανάλυση διαδρομής εναλλακτικών σεναρίων.

κρατεί. Παρατηρείται, πως στις περιπτώσεις όπου υπάρχει καλή επίδοση στον δείκτη 4 (Χρόνος λειτουργίας Η/Ζ), στους δείκτες 5 και 6 (Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ και ενέργεια διαμέσου του συσσωρευτή/ζητούμενη ενέργεια) υπάρχει κακή επίδοση και το αντίθετο ενώ στους άλλους δείκτες δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια συγκεκριμένη τάση. Περαιτέρω μπορεί να γίνει διερεύνηση με την ανάλυση trade-off.

5.5.2 Ανάλυση Trade-off

Στην ανάλυση Trade-off γίνεται σύγκριση των εναλλακτικών συστημάτων με τη βοήθεια γραφήματος ανά δύο επιλεγμένους δείκτες. Στη συνέχεια εξετάζονται οι περιπτώσεις HiRes για όλα συστήματα

5.5. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ



Εικόνα 5.11: Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στο χρόνο λειτουργίας και τους ημερήσιους κύκλους του Η/Ζ.

όπου συμμετέχουν και οι δύο τεχνολογίες ΑΠΕ και για όλα τα σενάρια ενεργειακής διαχείρισης σε επιλεγμένους δείκτες.

- Χρόνος και ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ Στη συγκεκριμένη περίπτωση (Εικόνα 5.11) όλες οι εναλλακτικές με σενάριο ενεργειακής διαχείρισης EnerSc3 έχουν μειωμένη χρονική λειτουργία αλλά το Η/Ζ ανοίγει και κλείνει πάνω από 2 φορές την ημέρα κατά μέσο όρο. Οι άλλες περιπτώσεις με διαφορετική ενεργειακή διαχείριση έχουν μεγαλύτερη χρονικά συμμετοχή όμως ανοίγουν και κλείνουν σημαντικά λιγότερο. Τα συστήματα 75PV/25WEC έχουν την καλύτερη επίδοση ανάμεσα στα διαφορετικά συστήματα ενεργειακής διαχείρισης.
- Κόστος εγκατάστασης και κόστος νερού Για όλα τα εναλλακτικά συστήματα αλλά και για την περίπτωση DGonly παρουσιάζονται γραφικά στην εικόνα 5.12 οι δείκτες του κόστους του νερού και του κόστους εγκατάστασης. Φαίνεται πως η περίπτωση DGonly έχει τις καλύτερες οικονομικές επιδόσεις όχι μόνο λόγω του χαμηλού κόστους του καυσίμου στη συγκεκριμένη περιοχή αλλά και λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης. Στα υπόλοιπα συστήματα φαίνεται πως στις περιπτώσεις 75/25 και 50/50 αν και το κόστος εγκατάστασης αλλάζει σημαντικά, η τιμή του νερού γενικά δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα.
- Χρόνος λειτουργίας Η/Ζ και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου Η περίπτωση EnerSc3 HiRes
 75PV/25WEC έχει τις καλύτερες επιδόσεις και σε εκπομπές και με περιορισμένη λειτουργία του



Εικόνα 5.12: Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στους δείκτες του κόστους εγκατάστασης και του κόστους νερού.

H/Z (Εικόνα 5.13). Οι περιπτώσεις 75PV/25WEC έχουν τις χαμηλότερες εκπομπές ρύπων γεγονός που οφείλεται εν μέρει στις ίδιες ισοδύναμες εκπομπές της εγκατάστασης. Η φόρτιση του συσσωρευτή από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (EnerSc3) έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, αφού το H/Z λειτουργεί σε καλύτερο σημείο λειτουργίας καθώς και λιγότερες ώρες λειτουργίας που επιδρά θετικά και στο κόστος συντήρησης.

 Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / ενέργεια που ζητείται και ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται Η σύγκριση των συγκεκριμένων ενεργειακών δεικτών μπορεί να εντοπίσει το σύστημα που είναι καλύτερα σχεδιασμένο από ενεργειακής άποψης, δηλαδή που καλύπτει το μεγαλύτερο κομμάτι της ζήτησης από ΑΠΕ αλλά ταυτόχρονα αξιοποιεί και το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας από ΑΠΕ που συλλέγεται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση (Εικόνα 5.14) το σενάριο ενεργειακής διαχείρισης EnerSc2 φαίνεται να έχει τις καλύτερες επιδόσεις ανάμεσα στα όμοια συστήματα καθώς αξιοποιείται περισσότερη ενέργεια από ΑΠΕ διαμέσου των συσσωρευτών. Τα σενάρια εγκατάστασης 25PV/75WEC έχουν την χειρότερη επίδοση από όλα ενώ τα συστήματα 50PV/50WEC κάνουν καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας από ΑΠΕ.
 Γενικά την καλύτερη επίδοση την έχει το σύστημα 75PV/25WEC καθώς μεγιστοποιούν τον δείκτη κάλυψης της ζήτησης από ΑΠΕ ενώ αξιοποιούν αρκετά καλά την ενέργεια από ΑΠΕ που συλλέ



Εικόνα 5.13: Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στο χρόνο λειτουργίας του Η/Ζ και στις ισοδύναμες εκπομπές ρύπων.



Εικόνα 5.14: Ανάλυση Trade-Off ανάμεσα στο λόγο της ανανεώσιμης ενέργεια που αποδίδεται / ενέργεια που ζητείται και την ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται.

γουν.

5.5.3 Ισοβαρής κατάταξη

Η ισοβαρής κατάταξη περιγράφηκε στην ενότητα 3.5.3. Για την ανάλυση θα επιλεχθούν τα 4 εναλλακτικά συστήματα με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Αυτά είναι:

- Η περίπτωση με το χαμηλότερο κόστος νερού, δηλαδή η EnerSc3 HiRes 50PV/50WEC
- Η περίπτωση με το αμέσως υψηλότερο κόστος νερού, δηλαδή η EnerSc3 HiRes 75PV/25WEC
- Η περίπτωση EnerSc1 HiRes 75PV/25WEC
- Η περίπτωση με τη μεγαλύτερη απορρόφηση ανανεώσιμης ενέργειας, δηλαδή η EnerSc2 HiRes 50PV/50WEC

Έτσι, κανονικοποιώντας όλους τους δείκτες ως προς τον καλύτερο και αθροίζοντας τους για την κάθε εναλλακτική προκύπτει η ισοβαρής κατάταξη (Πίνακας 5.8). Παρατηρούμε πως και με αυτόν τρόπο αξιολόγησης η εναλλακτική με το μικρότερο κόστος έχει τις καλύτερες επιδόσεις.

Εναλλακτική	Θέση	Τιμή
EnerSc1 HiRes 75PV/25WEC	1	0.94
EnerSc3 HiRes 75PV/25WEC	2	0.93
EnerSc3 HiRes 50PV/50WEC	3	0.83
EnerSc2 HiRes 50PV/50WEC	4	0.80

Πίνακας 5.8: Ισοβαρής κατάταξη των τριών εναλλακτικών συστημάτων.

5.6 Πολυκριτηριακή ανάλυση και επιλογή συστήματος

Για τις τέσσερις εναλλακτικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα μπορούμε να θέσουμε βάρη σημαντικότητας για τον κάθε δείκτη αξιολόγησης με τιμή από το 1 έως το 100. Για καλύτερη αξιολόγηση οι 14 δείκτες είναι κατηγοριοποιημένοι σε οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς.

Τα σενάρια αξιολόγησης τα καθορίζει ο σχεδιαστής ανάλογα το σύστημα που σχεδιάζει και μπορούν

5.6. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

να αντιπροσωπεύουν π.χ. πως η μονάδα θα εγκατασταθεί σε μια οικία ή ένα ξενοδοχείο ή μια βιομηχανική μονάδα. Οι Afgan και Carvalho [6] προτείνουν 7 διαφορετικά σενάρια αξιολόγησης για τα βάρη των δεικτών, δίνοντας την σχετική σημαντικότητα των δεικτών μεταξύ τους.

- Σενάριο αξιολόγησης 1 Απόδοση Απόδοση συστήματος (Ind3-Ind7) > Κόστος παραγωγής (Ind9, Ind12, Ind13) = Κόστος εγκατάστασης (Ind8) = Περιβαλλοντικά κριτήρια (Ind2, Ind10) = Κοινωνικά κριτήρια (Ind1, Ind11, Ind14)
 Στο σενάριο αυτό δίνεται προτεραιότητα στους δείκτες απόδοσης ενώ όλοι οι άλλοι δείκτες έχουν την ίδια βαρύτητα.
- Σενάριο αξιολόγησης 2 Κόστος παραγωγής Κόστος παραγωγής > Απόδοση συστήματος = Κόστος εγκατάστασης = Περιβαλλοντικά κριτήρια = Κοινωνικά κριτήρια
 Το κόστος παραγωγής είναι το σημαντικότερο κριτήριο ενώ όλοι οι άλλοι δείκτες έχουν την ίδια βαρύτητα. Σε αυτό το σενάριο αξιολόγησης δίνεται έμφαση στο σύστημα που παράγει το φθηνότερο νερό και τη φθηνότερη ενέργεια.
- Σενάριο αξιολόγησης 3 Κόστος εγκατάστασης Κόστος εγκατάστασης > Απόδοση συστήματος =
 Κόστος παραγωγής = Περιβαλλοντικά κριτήρια = Κοινωνικά κριτήρια
 Το κόστος εγκατάστασης αποτελεί το βασικό κριτήριο.
- Σενάριο αξιολόγησης 4 Περιβάλλον 1 Περιβαλλοντικά κριτήρια > Απόδοση συστήματος = Κόστος παραγωγής = Κόστος εγκατάστασης = Κοινωνικά κριτήρια
 Η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί τη σημαντικότερη επιδίωξη σε αυτό το κριτήριο ενώ όλοι οι άλλοι δείκτες έχουν την ίδια βαρύτητα.
- Σενάριο αξιολόγησης 5 Κοινωνικό Κοινωνικά κριτήρια > Κόστος παραγωγής = Κόστος εγκατάστασης = Περιβαλλοντικά κριτήρια = Απόδοση συστήματος
 Το κοινωνικό κριτήριο αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο ενώ όλοι οι άλλοι δείκτες έχουν την ίδια.
- Σενάριο αξιολόγησης 6 Κόστος Κόστος παραγωγής > Απόδοση συστήματος > Κόστος εγκατάστασης > Περιβαλλοντικά κριτήρια > Κοινωνικά κριτήρια
 Στο συγκεκριμένο σενάριο οι παράγοντες του κόστους είναι οι σημαντικότεροι ενώ λιγότερη σημασία έχουν τα περιβαλλοντικά και τα κοινωνικά κριτήρια.

 Σενάριο αξιολόγησης 7 - Περιβάλλον 2 Περιβαλλοντικά κριτήρια > Απόδοση συστήματος > Κόστος παραγωγής > Κόστος εγκατάστασης > Κοινωνικά κριτήρια
 Στο συγκεκριμένο σενάριο το περιβαλλοντικό κριτήριο είναι το σημαντικότερο με δεύτερο σημαντικότερο την απόδοση του συστήματος, τρίτο το κόστος παραγωγής, τέταρτο το κόστος εγκατάστασης ενώ λιγότερο σημαντικά είναι τα κοινωνικά κριτήρια.

Τα σενάρια που προτείνονται, δίνουν οι σχετικές επιδράσεις ενός βάρους ως προς άλλο. Στα πλαίσια της διατριβής, δόθηκαν βάρη σύμφωνα με αυτές τις σχετικές επιδράσεις. Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει διάφορα βάρη:

 Σενάριο αξιολόγησης 8 - Μεικτό Τα βάρη για το συγκεκριμένο σενάριο αξιολόγησης δίνονται στον πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Τα βάρη ανά δείκτη αξιολόγησης και ανά κατηγορία για το 8ο σενάριο αξιολόγησης.

Κατ. Δ	Δεικτ	Βάρος	Κατ. Δεικτ		ος Κατ. Δεικτ Βάρος Κατ. Δεικτ		Δεικτ	Βάρος
Οικονο	ομικοί	80	Περιβαλλοντικοί		50	Κοινωνικοί		90
Δείκτες	Βάρος		Δείκτες	Βάρος		Δείκτες	Βάρος	
Ind 3	50		Ind 2	90		Ind 1	100	
Ind 4	100		Ind 10	50		Ind 11	100	
Ind 5	20					Ind 14	100	
Ind 6	20							
Ind 7	20							
Ind 8	100							
Ind 9	100							
Ind 12	100							
Ind 13	100							

Πίνακας 5.10: Τα αποτελε	ματα των 8 σεναρ	ίων αξιολόγησης.
--------------------------	------------------	------------------

Σενάρια αξιολόγησης	1	2	3	4	5	6	7	8
EnerSc1 HiRes 75PV/25WEC	24.93	24.51	24.49	25.03	21.98	25.54	22.01	23.72
EnerSc3 HiRes 75PV/25WEC	24.58	24.81	24.5	24.59	22.11	25.79	22.25	24.5
EnerSc3 HiRes 50PV/50WEC	21.39	21.67	21.71	21.48	19.91	22.9	19.84	20.79
EnerSc2 HiRes 50PV/50WEC	20.79	20.68	20.97	20.56	19.34	21.05	19.84	19.57

Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης (Πίνακας 5.10) στις περισσότερες περιπτώσεις αξιο-

158





λόγησης αναδεικνύουν, ως καλύτερη τη μονάδα (κόκκινο χρώμα) την EnerSc3 HiRes 75PV/25WEC. Ενδεικτικά για το 8ο σενάριο αξιολόγησης παρουσιάζονται οι επιδόσεις ανά κατηγορία στην εικόνα 5.15.

5.7 Επίδραση συμπαραγωγής ενέργειας και νερού

Ένα ενδιαφέρον σενάριο θα ήταν η σύγκριση ανάμεσα σε ένα σύστημα που παράγει μόνο ενέργεια (EnergyOnly) και σε ένα σύστημα που παράγει μόνο νερό (WaterOnly) σε σχέση με ένα σύστημα που παράγει και τα 2 αγαθά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα βήματα της διαστασιολόγησης και της προσομοίωσης. Για λόγους σύγκρισης θα εφαρμοστεί η διαστασιολόγηση με τον κανόνα HiRes - 100PV/0WEC, δηλαδή μόνο φωτοβολταϊκά. Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού παρουσιάζονται στον πίνακα 5.11 μαζί με το αντίστοιχο σενάριο σχεδιασμού και για την κάλυψη των 2 αναγκών ταυτόχρονα. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η προσομοίωση των δύο συστημάτων για το σενάριο ενεργειακής διαχείρισης EnerSc1 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12.

Από τον πίνακα 5.12, εξετάζοντας το κόστος της ενέργειας, φαίνεται πως μειώνεται 6 με 7 λεπτά ανά m kWh, ή περίπου 13%. Αντίστοιχα το κόστος του νερού μειώνεται 25 λεπτά ανά $m m^3$ νερού, δηλαδή περίπου 11%. Η μείωση αυτή οφείλεται στο ότι και τα δύο συστήματα επωφελούνται από την ύπαρξη κοινών υποσυστημάτων και κυρίως του μεγαλύτερου συσσωρευτή

		WaterOnly	EnergyOnly	HiRes - 100PV/0WEC
Φωτοβολταϊκο σύστημα				
Απαιτούμενη ισχύς	kW	15.75	17.7	33.45
Αριθμός Φ/Β πλαισίων		86	96	181
Εγκατεστημένη ισχύς	kW	15.91	17.76	33.49
Σύστημα αποθήκευσης				
Απαιτούμενη χωρητικότητα	kWh	110.82	124.54	235.4
Αριθμός κελιών		44	52	96
Εγκατεστημένη χωρητικότητα	kWh	110.88	131.04	241.92

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα σχεδιασμού των περιπτώσεων που το σύστημα παράγει μόνο νερό και μόνο ενέργεια σε σύγκριση με το όμοιο σύστημα που παράγει και 2 αγαθά.

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης των περιπτώσεων που το σύστημα παράγει μόνο νερό και μόνο ενέργεια σε σύγκριση με το όμοιο σύστημα που παράγει και 2 αγαθά.

		WaterOnly	EnergyOnly	HiRes - 100PV/0WEC
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέγεται		0.7	0.7	0.7
Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδίδεται / Ενέργεια που ζητείται		0.93	0.93	0.93
Ποσοστό χρόνου λειτουργίας Η/Ζ	%	39.83	40.23	40.35
Ημερήσιοι κύκλοι λειτουργίας Η/Ζ		1.01	1.01	1.01
Ενέργεια που αποδίδεται από το συσσωρευτή / Ενέργεια που ζητείται		0.24	0.24	0.24
Κεφαλαιακό κόστος	€	121975	64875	181575
Κόστος καυσίμου	€	4886.4	4966.57	6249.66
Εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου	$\rm kg/CO2$	25181.99	26227.93	35887.97
Σταθερή λειτουργία μονάδας RO		0	0	0
Κόστος ενέργειας	€/kWh	0.45	0.44	0.38
Κόστος νερού	ϵ/m^3	2.21	-	1.96

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ενότητες: στα συμπεράσματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη της μεθοδολογίας της εύρεσης της καλύτερης εναλλακτικής πρότασης σχεδιασμού ενός υβριδικού συστήματος για την συνδυασμένη κάλυψη ενεργειακών και υδατικών αναγκών και στα συμπεράσματα που σχετίζονται με την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μια συγκεκριμένη περίπτωση.

Η ανάπτυξη αυτόνομων υβριδικών συστημάτων με ΑΠΕ που καλύπτουν ανάγκες ενέργειας και νερού είναι ένα πρόβλημα πολλών παραμέτρων σε τεχνικό αλλά και διαχειριστικό επίπεδο. Καθώς η συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας και νερού κερδίζει έδαφος λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων, όλο και περισσότερα παρόμοια συστήματα σαν και αυτά που μελετήθηκαν, θα εγκαθίστανται. Το μέγεθος των αυτόνομων συστημάτων κυμαίνεται από μικρό για την κάλυψη αναγκών μιας οικίας ή μιας απομονωμένης κοινότητας, ή μπορεί να είναι μεγάλο για την κάλυψη των αναγκών ενός μεγάλου νησιού. Τα ελληνικά μη διασυνδεδεμένα νησιά, στην πράξη είναι μεγάλα αυτόνομα συστήματα τα οποία σε πολλές περιπτώσεις, όντας άνυδρα καλύπτουν τις ανάγκες τους για νερό με αφαλάτωση.

Οι παράμετροι σχεδιασμού αυτών των συστημάτων μεταβάλλονται χωρικά (π.χ. αιολικό δυναμικό) και χρονικά (π.χ. κόστος καυσίμου, κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων) με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν εύκολα γενικοί κανόνες (Rules of Thumps) για το σχεδιασμό και την αξιολόγησή τους.

Η ύπαρξη μιας απλής προκαταρκτικής μεθοδολογίας διαστασιολόγησης αποτελεί βασικό κομμάτι κάθε σχεδιαστικής προσέγγισης και έτσι με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία παράγονται, με απλά βήματα, εναλλακτικά συστήματα τα οποία καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες. Η ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας στη βάση λογικών κανόνων και με επιλογή για τα ποσοστά ενεργειακής κάλυψης εγγυάται πως οι λύσεις που προτείνονται είναι μέσα στις βέλτιστες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προσομοίωση και η ανάλυση ευαισθησίας μπορούν να οδηγήσουν σε συστήματα με διαφορετικά μεγέθη εγκατεστημένης ισχύος των υποσυστημάτων ΑΠΕ ή χωρητικότητα συσσωρευτή από αυτά που υπολογίστηκαν καθώς και σε εκτίμηση για τις τιμές βασικών χαρακτηριστικών μεγεθών που σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων. Η ανάλυση επικινδυνότητας μπορεί να οδηγήσει εκ νέου σε επανεξέταση των διάφορων μεγεθών αλλά και σε εκτίμηση κατανομών των χαρακτηριστικών μεγεθών.

Από τα χαρακτηριστικά μεγέθη ή παράγωγα τους, προκύπτουν οι 14 δείκτες αξιολόγησης που περιγράφουν τη συμπεριφορά των συστημάτων έτσι ώστε στη συνέχεια να αξιολογηθούν με βάση διαφορετικά σενάρια αξιολόγησης με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης. Τα κριτήρια του σχεδιαστή (με βάση τα σενάρια αξιολόγησης που παρουσιάστηκαν για όλες τις κατηγορίες κριτηρίων δηλαδή τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά) θα αναδείξουν τελικά το κατάλληλο σύστημα.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μελέτης περίπτωσης είναι συνοπτικά:

- Τα οικονομικά μεγέθη εξαρτώνται σημαντικά από τη χρήση της βοηθητικής ενέργειας. Στην περιοχή της Τυνησίας όπου το κόστος του πετρελαίου είναι αρκετά χαμηλό συμφέρει να γίνεται μεγάλη κάλυψη των αναγκών από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.
- Η κάλυψη των αναγκών εξ ολοκλήρου από ΑΠΕ προκαλεί δυσανάλογα μεγάλο κόστος στο νερό και την ενέργεια.
- Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ενεργειακής διαχείρισης μπορεί να συνεισφέρει θετικά στους περισσότερους δείκτες ενεργειακής αξιολόγησης.
- Η κάλυψη των αναγκών ενέργειας και νερού μόνο από αιολικά ή φωτοβολταϊκά δεν αποτελεί την καλύτερη λύση.
- Η συνδυασμένη κάλυψη των αναγκών ενέργειας και νερού προκαλεί σημαντική μείωση στο κόστος και των δύο αγαθών.
- Η χωρητικότητα των συσσωρευτών αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο που βελτιώνει σημαντικά τις επιδόσεις αλλά επειδή αναπληρώνει το συμβατικό καύσιμο, η χωρητικότητα της τελικά αποτελεί αντικείμενο βελτιστοποίησης.

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας και νερού φαίνεται πως αποτελεί το υποσχόμενο βήμα στην ενεργειακή διαχείριση. Στα πλαίσια των προκλήσεων που έρχονται, η συγκεκριμένη διατριβή θα μπορούσε να επεκταθεί εξετάζοντας μια σειρά από διάφορες εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης αλλά και νέους δείκτες αξιολόγησης. Επιγραμματικά:

- Διαχείριση δεξαμενής Η ύπαρξη δεξαμενής κατάλληλου μεγέθους θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν βραχυπρόθεσμη αποθήκη νερού παράγοντας νερό τις ημέρες που υπάρχει περίσσεια ενέργειας από ΑΠΕ και κατανάλωση τις ημέρες με χαμηλό δυναμικό.
- Πρόβλεψη μετεωρολογικών δεδομένων Η πρόβλεψη της ταχύτητας ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας θα μπορούσε να προσαρμόζει το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και να μεγιστοποιεί την χρήση των ΑΠΕ.
- Εναλλακτικές μέθοδοι ύδρευσης Σε πολλές περιοχές όπου η κατανάλωση νερού πραγματοποιείται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους (π.χ. νερό από γεώτρηση, αφαλάτωση, μεταφορά) η εύρεση του κατάλληλου μείγματος θα αποτελούσε μια επιπλέον μεταβλητή απόφασης για ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ενέργειας για νερό συνολικά.
- Ανάλυση κύκλου ζωής Η ροή ενέργειας για την κατασκευή των συστημάτων της κάθε μονάδας
 μαζί με τις ροές των υλικών θα μπορούσαν να αποτελούν δείκτες προς αξιολόγηση.
- Διασυνδεδεμένα συστήματα Η ίδια μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε μη αυτόνομα συστήματα, διασυνδεδεμένα ή όχι (χωρίς συσσωρευτή ενώ το βοηθητικό σύστημα θα είναι το δίκτυο). Η περίσσεια της ενέργειας θα πωλείται και το έλλειμμα ενέργειας θα αγοράζεται από το δίκτυο ή θα εφαρμόζεται η μέθοδος του ενεργειακού συμψηφισμού (Netmeetering).

Παράρτημα Π.1

Υλοποίηση λογισμικού

Για την υποστήριξη της λήψης απόφασης έχουν αναπτυχθεί σε αυτόνομο λογισμικό τα εργαλεία υπολογισμών έτσι όπως έχουν περιγραφεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου 3 καθώς και μια σειρά από βοηθητικά εργαλεία. Το λογισμικό έχει αναπτυχθεί σε Visual Basic .NET ενώ η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των τεχνικών χαρακτηριστικών, των μετεωρολογικών δεδομένων, των χρονοσειρών και των αποτελεσμάτων έχει αναπτυχθεί σε Microsoft Access. Το λογισμικό εκτελείται σε περιβάλλον Microsoft Windows (XP SP2 ή νεότερα).

ΠΠ.1 Κεντρικό περιβάλλον εργασίας

Η αρχική οθόνη του λογισμικού (Εικόνα Π.1.1) δίνει πρόσβαση σε όλα τα εργαλεία. Συγκεκριμένα:

- Στα έξι βασικά υπολογιστικά εργαλεία
- Στο διαχειριστή των εναλλακτικών σεναρίων
- Στο διαχειριστή της βάσης δεδομένων

Κάθε φορά, ο χρήστης επιλέγει μέσα από μια λίστα το σενάριο σχεδιασμού που θέλει να επεξεργαστεί στα εργαλεία της διαστασιολόγησης, της προσομοίωσης, της ανάλυσης ευαισθησίας και της ανάλυσης επικινδυνότητας. Στα εργαλεία της επισκόπησης και της αξιολόγησης τα σενάρια που συμμετέχουν καθορίζονται εντός του εκάστοτε εργαλείου από εκείνα τα σενάρια στα οποία έχουν υπολογιστεί οι δείκτες που απαιτούνται στο εργαλείο της προσομοίωσης. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των εργαλείων.



Εικόνα Π.1.1: Το κεντρικό περιβάλλον εργασίας του λογισμικού.

New Edit Delete	Duplicate	
ibrary of Cases	Selected Case	
Cony nerSc1 HiRes 0PV/100WEC nerSc1 HiRes 100PV/0WEC nerSc1 HiRes 50PV/50WEC nerSc1 HiRes 50PV/50WEC nerSc1 LiwRes 0PV/100WEC nerSc1 LowRes 100PV/100WEC nerSc1 LowRes 100PV/0WEC	Name: DGOnly Description	
nersc I Loweles 25/V//SWEC nersc I Loweles 55/V/SWEC nersc I Loweles 55/V/SWEC nersc 24 Hies 100/V/00WEC nersc 24 Hies 25/V/SWEC nersc 24 Hies 55/V/SWEC nersc 24 Hies 57/V/SWEC nersc 22 Loweles 0F/V/I00WEC	Design Completed?: Yes Performance Assesment Completed?: Yes Risk Analysis Completed?: No	

Εικόνα Π.1.2: Διαχείριση των σεναρίων σχεδιασμού.

ΠΠ.1.1 Διαχειριστής σεναρίων

Στο συγκεκριμένο βοηθητικό εργαλείο (Εικόνα Π.1.2), ο χρήστης μπορεί να διαχειριστεί τα διάφορα σενάρια σχεδιασμού, δηλαδή να δημιουργήσει νέα, να αντιγράψει, να μετονομάσει και να σβήσει. Το κάθε σενάριο, πέρα από το όνομα του, περιέχει και τις διάφορες ιδιότητές του όπως τους τύπους των συστημάτων που χρησιμοποιούνται, τις επιλογές ενεργειακής διαχείρισης, τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης και της προσομοίωσης καθώς και ποιο βήμα σχεδιασμού έχει υλοποιηθεί. Η ονομασία που δίνει ο χρήστης στο κάθε σενάριο πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό και με κάποιο τρόπο να παραπέμπει στις ιδιότητες του συστήματος.

ΠΠ.1.2 Βάση δεδομένων

Η βάση δεδομένων είναι ένα βοηθητικό μέρος του λογισμικού αλλά διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του. Στη βάση εισάγονται όλα τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν κατά το σχεδιασμό (Εικόνα Π.1.5). Περιληπτικά η βάση δεδομένων περιλαμβάνει 3 ενότητες.

- Βάση δεδομένων υποσυστημάτων Components Database Στη συγκεκριμένη ενότητα περιλαμβάνονται όλα τα υποσυστήματα που συμμετέχουν στον σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος. Δηλαδή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι ανεμογεννήτριες, τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, οι αντιστροφείς, οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές και οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης. Για κάθε ένα από αυτά εισάγονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους στις σωστές μονάδες και κατά τη χρήση του προγράμματος αρκεί μόνο η επιλογή του ονόματος του μοντέλου. Η εικόνα της βάσης για τις Α/Γ παρουσιάζεται ενδεικτικά στην εικόνα Π.1.6
- 2. Βάση δεδομένων περιοχών Sites Database Στην ενότητα αυτή ο χρήστης έχει τρεις επιλογές:
 - Μπορεί να εισάγει την περιοχή που θέλει να μελετήσει (Sites Manager) καθώς και όλα της τα στοιχεία, δηλαδή τις συντεταγμένες, τις μέσες μηνιαίες τιμές ανέμου, ηλιακής ακτινο-βολίας και θερμοκρασίας οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την διαστασιολόγηση. Επίσης, μπορεί να εισάγει τη μέση πυκνότητα του αέρα, τον εκθετικό συντελεστή για τη μετατροπή των ταχυτήτων ανέμου καθ' ύψος και τους συντελεστές που απαιτούνται για την εκτίμηση της ημερήσιας κατανομής της ταχύτητας του ανέμου (Εικόνα Π.1.3).
 - Μπορεί να εισάγει τις χρονοσειρές των πόρων αλλά και της ζήτησης στην επιλογή *Time* Series (Εικόνα Π.1.4). Υπάρχουν 6 τύποι διαθέσιμων χρονοσειρών που μπορεί να εισάγει ο χρήστης (Ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ζήτηση νερού, ζήτηση ενέργειας, αλατότητα). Κάθε περιοχή μπορεί να έχει παραπάνω από μια χρονοσειρές ίδιου τύπου π.χ. μπορεί να υπάρχουν δύο χρονοσειρές ανέμου, τρεις χρονοσειρές ζήτησης ενέργειας κτλ. Οι χρονοσειρές των ανανεώσιμων πόρων είναι απαραίτητες για την προσομοίωση καθώς και στα επόμενα στάδια του σχεδιασμού.
 - Τέλος, υπάρχει το βοηθητικό πεδίο Countries οπού ο χρήστης μπορεί να προσθέσει μια νέα χώρα (στην περίπτωση που δεν υπάρχει).
- Βοηθητικοί πίνακες δεδομένων Υπάρχουν τέσσερις βοηθητικοί πίνακες δεδομένων: α) ο πίνακας των κατασκευαστών, όπου ο χρήστης εισάγει έναν νέο κατασκευαστή υποσυστημάτων και

Site Name	Country				Average Monthly	values		
	Name	Site Lattude	Site Longitude	<u>^</u>	Month Name	Monthly Radiation (kWh/day/m ²)	Mean Speed (m/s)	Monthly Temperature (
	Antarctica	-90	0		January	9.26	3.8	-27.7
badeh	Iran	31.18	52.67		February	5.2	4.6	-40.6
ieneral	Antarctica	-77.87	-34.63		March	0.86	5.1	-53.4
bong M	Cameroon	3.99	13.17		April	0	5.2	-57.1
ddis Ab	Ethiopia	8.98	38.8		May	0	5.5	-57.8
gia Napa	Cyprus	34.99	34		June	0	5.9	-58.2
leumaye	Germany	-70.62	-8.37		July	0	6.2	-60.1
anae IV	Antarctica	-70.3	-2.37		August	0	5.9	-59.5
rogress	Antarctica	-69.23	76.23		September	0.14	5.9	-59.4
yowa J	Japan	-69	39.58		October	3.34	5.5	-51.1
hwar	Yemen	13.52	46.7		November	8.33	4.4	-38.4
an-Marti	Argentina	-68.13	-67.13		December	10.74	3.7	-27.8
in el Melh	Algeria	34.85	4.16		4			-
jo	Uruguay	32.37	-112.86		Average Hourty F	amand Values		
lothera	Antarctica	-67.57	68.12	*	Hour	Power Demand	Water Demand	
		Devet	1.005					
		r Density:	1.225					
E	oponential C	oefficient:	0.14					
		Duimal:						

Εικόνα Π.1.3: Η εισαγωγή των διάφορων περιοχών και των μέσων μηνιαίων τιμών τους.

1	9644 of 964	4 돈 원 속 (× 🖬		10.55	1	
	Site Name	Country Name	Site Latitude	Site ^	12.47	2	
	Eureka	Canada	79.98	-85.5	12.93	3	
	Krenkel Polar (Isl)	Russian Federati	80.62	58.0	12.77	4	
	Nord Aws	Greenland	81.6	-16.6	13.2	5	
	Hall Land (Aut)	Greenland	81.73	-59	12.38	6	
	Alert	Canada	82.5	-62.3	9.73	7	
	Cape Morris Jesup	Greenland	83.63	-33.3	10.68	8	
	CRTEn	Tunisia	35.66	10	10.32	9	
*					10.93	10	
•		m		- F	9.85	11	
_	Name	Commente	Height	Quantita	9.27	12	
	Word Speed 30	Commerica	29.8	Wood Se	12.52	13	
	Solar		20.0	Radiatio	11	14	
	Temperature			Ambient	13.47	15	
	CRTEs Water D		-	Water D	12.87	16	
	CRTEn Power D			Power D	11.73	17	
	CRTEn Saloty			Water O	10.45	18	
	Wind Speed App		30	Wod So	11.48	19	
	Solar Annual		0	Radiatio	10.17	20	
	Temperature Mer		0	Ambient	8.08	21	
	Wind Speed Merra		10	Wood Se	9.6	22	
	the sheer mend		10	op	10.00		

Εικόνα Π.1.4: Η φόρμα εισαγωγής χρονοσειρών στη βάση.

καθορίζει το πεδίο δραστηριότητας του, π.χ. κατασκευαστής Φ/Β, β) ο πίνακας καυσίμων, όπου ο χρήστης εισάγει τους διαφορετικούς τύπους καυσίμων μαζί με την τιμή τους και τις ιδιότητες τους (πυκνότητα, θερμογόνος ικανότητα, συντελεστές εκπομπής αερίων), γ) ο πίνακας των καυσίμων είναι συνδεδεμένος με τον πίνακα των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, όπου για κάθε μοντέλο καθορίζεται ο τύπος του καυσίμου του, και δ) ο πίνακας των υλικών κατασκευής των Φ/Β πλαισίων και των συσσωρευτών είναι δύο γενικοί πίνακες όπου ο χρήστης διαχειρίζεται τα Φ/Β υλικά (π.χ. πολυκρυσταλλικό, μονοκρυσταλλικό κτλ) και τους τύπους των συσσωρευτών (π.χ. οξέος μολύβδου κτλ). Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι απαραίτητη καθώς πρέπει στα αντίστοιχα πεδία των φωτοβολταϊκών και των συσσωρευτών ο χρήστης να ορίσει τον τύπο του κάθε μοντέλου έτσι ώστε να γίνει χρήση τυπικών τιμών για τις διάφορες παραμέτρους που υπάρχουν και λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση.

mponents Database	Sites Database
Photovoltaics	Sites Manager
WEC	Countries
Engines	Time Series
Inverter	
Battery	
RO Units	
xiliary Tables	
Manufacturers	PV Materials
Fuel	Battery Types

Εικόνα Π.1.5: Οι διαθέσιμες επιλογές για εισαγωγή δεδομένων στη βάση.



Εικόνα Π.1.6: Εισαγωγή δεδομένων στη βάση με τις Α/Γ.

ΠΠ.2 Διαστασιολόγηση

Το εργαλείο της διαστασιολόγησης στην κεντρική του οθόνη (Εικόνα Π.1.7) περιλαμβάνει 4 περιοχές όπου ο χρήστης εισάγει τα χαρακτηριστικά της εναλλακτικής που εξετάζεται:

- Δεδομένα ζήτησης Ο χρήστης εισάγει τη μέση ημερήσια ποσότητα νερού, την αλατότητα του νερού και τη μέση ισχύ του εξωτερικού φορτίου.
- 2. Επιλογή εξαρτημάτων για τα υποσυστήματα Ο χρήστης επιλέγει από τη βάση δεδομένων τα διάφορα χαρακτηριστικά που απαρτίζουν τα υποσυστήματα, δηλαδή την Α/Γ, τα Φ/Β, το Η/Ζ, τον αντιστροφέα, τον ηλεκτρικό συσσωρευτή και τη μονάδα αφαλάτωσης. Η επιλογή τους γίνεται μέσα από ένα ειδικό παράθυρο (Εικόνα Π.1.8) όπου επιλέγονται ο κατασκευαστής και στη συνέχεια το μοντέλο. Τέλος, υπάρχει επιλογή για πρόσβαση του χρήστη κατ' ευθείαν στη βάση δεδομένων έτσι ώστε να εισάγει άμεσα το μοντέλο της επιλογής του.
- Μετεωρολογικά δεδομένα Από τη βάση δεδομένων ο χρήστης επιλέγει την περιοχή προς εγκατάσταση.
- Μεταβλητές σχεδιασμού Εδώ εισάγονται οι μεταβλητές του σχεδιασμού, δηλαδή το ποσοστό της συμμετοχής της κάθε τεχνολογίας στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας καθώς και ο μήνας σχεδιασμού σύμφωνα με ότι έχει ειπωθεί στην ενότητα της διαστασιολόγησης (Κεφάλαιο 3.1).

Με τη χρήση του κουμπιού *Run Model* γίνεται η εφαρμογή της διαστασιολόγησης και εμφανίζεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων (Εικόνα Π.1.9). Ο πίνακας αυτός αποτελείται από 5 περιοχές.

- Μέγεθος αιολικού υποσυστήματος WEC System Size Δίνονται τα αποτελέσματα για την απαιτούμενη αιολική εγκατεστημένη ισχύ για τον αριθμό των Α/Γ και τελικά για τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των Α/Γ.
- Μέγεθος φωτοβολταϊκού υποσυστήματος PV System Size Δίνονται τα αποτελέσματα για τη συνολικά απαιτούμενη φωτοβολταϊκή ισχύ, για τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων και τελικά για τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των Φ/Β.
- Μέγεθος υποσυστήματος συσσωρευτών Battery System Size Δίνονται τα αποτελέσματα για το συνολικό μέγεθος των συσσωρευτών, δηλαδή για την απαιτούμενη ενέργεια αποθήκευσης, για τον αριθμό των κελιών και για την εγκατεστημένη χωρητικότητά τους.

Water	and Power [)emand		2 Svetam Comp	onente	
. matci				z. System comp	Select System	
later Den	nand (m³/day)	24		Wind Turbine	Proven 15	ır 185W
/ater Salir	nity (mg/l)	16000	~	PV Module	Green Solar 1	
				Diesel Engine	Perkins 404C-	22G
demal Lo	ad (kW)	4		Inverter	SMA SMC 800	OTL
terconne	cted	Yes		RO Unit	Sun Extenter (Seta 24	Concorde
Meteo	rological Dat	a		4. Design Rules		
Country Tunisia	Tunisia	~	Site	Share of Wind En	ergy 100 %	
ite	CRTEn	~	DB	to total Renewable Energy	Ű	
) Solar F	Radiation from [)atabase		WEC System De	sign Approach	
) Solar F	Radiation from 1	Depretical Equations		For Best Mont	th O For Worst Ma	onth
				O For Specific M	Month	~
				PV System Desig	gn Approach	
				For Best Mon	th O For Worst Mo	onth
				O Fre Creater I	and the second se	

Εικόνα Π.1.7: Η κεντρική οθόνη του εργαλείου της διαστασιολόγησης.

PV Manufacturer:	Green Solar	~	PV Model:	185W	~		PV DB
WEC Manufacturer:	Proven	~	WEC Model:	15	~		WEC DE
Engine Manufacturer:	Perkins	~	Engine Model:	404C-22G	~		Diesel DI
nverter Manufacturer:	SMA	~	Inverter Model:	SMC 8000TL	~		Inverter D
Battery Manufacturer:	Sun Extenter	~	Battery Model:	Concorde	~		Battery D
RO Manufacturer:	Seta	~	RO Model:	24	~		RO DB
						-	

Εικόνα Π.1.8: Φόρμα επιλογή των υποσυστημάτων.

uts nesults			
WEC System Size		PV System Size	
Required Installed Power (kW)	12.63	Required Installed Power (kWp)	80.72
Number of Wind Turbines	1	Number of PV Modules	437
Installed Power (kW)	16.02	Installed Power (kWp)	80.85
Battery System Size		Diesel Engine Size	
Required Installed Capacity (kWh)	193.93	Required Installed Power (kW)	7.56
Number of Battery Cells	80	Number of Engines	1
Installed Capacity (kWh)	201.60	Installed Power (kW)	19.00
Annual Energy Balance			
Energy Demand (kWh)	66225.60	RE Delivered / Energy Demand	1.00
Renewable Energy Collected (kWh)	133000.41	RE Delivered / RE Collected	0.50
Renewable Energy Delivered (kWh)	66229.45		
Renewable Energy Undelivered (kWh)	66770.96		
Energy from Diesel Engine (kWh)	-3.85		

Εικόνα Π.1.9: Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης.

- 4. Μέγεθος συμβατικής μονάδας Diesel Engine Size Δίνονται τα αποτελέσματα για την απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ, για τον αριθμό των συμβατικών μονάδων και τέλος για την εγκατεστημένη ισχύ τους.
- 5. Ετήσια ενεργειακά ισοζύγια Annual Energy Balance Δίνονται εκτιμήσεις για την ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος. Έτσι, δίνεται η ετήσια ζήτηση, η ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέχθηκε, η ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση, η ανανεώσιμη ενέργεια που δεν αποδόθηκε και η ποσότητα συμβατικής ενέργειας που απαιτείται. Τέλος, υπολογίζονται και οι δείκτες Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε / Ενεργειακή ζήτηση και Ανανεώσιμη ενέργεια που συλλέχθηκε / Ανανεώσιμη ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση.

Από τη στιγμή που η διαστασιολόγηση έχει ολοκληρωθεί, μπορεί να πραγματοποιηθεί το βήμα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης περνάνε αυτόματα στο εργαλείο της προσομοίωσης.

ΠΠ.3 Προσομοίωση

Στην κεντρική οθόνη της προσομοίωσης υπάρχουν 4 βασικές περιοχές όπου ο χρήστης μπορεί να επέμβει (Εικόνα Π.1.10):

- Επιλογή υποσυστημάτων System Components Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει εάν θα κρατήσει τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των τεσσάρων ενεργειακών υποσυστημάτων ή θα τα αλλάξει σύμφωνα με τις ανάγκες του. Επίσης, μπορεί να αλλάξει και το μοντέλο (π.χ. το φωτοβολταϊκό) που έχει επιλέξει στο στάδιο του σχεδιασμού.
- 2. Ζήτηση νερού και ισχύος Water and Power Demands Ο χρήστης μπορεί να θέσει την ζήτηση νερού, την αλατότητα (που επηρεάζει την ενεργειακή κατανάλωση της αφαλάτωσης) και τη ζήτηση του εξωτερικού φορτίου. Συγκεκριμένα μπορεί είτε να αφήσει τα ίδια όπως στη διαστασιολόγηση, να επιλέξει μια άλλη σταθερή τιμή ή να θέσει μια χρονοσειρά, αφού προηγουμένως την έχει εισάγει στη βάση δεδομένων.
- 3. Κανόνες ενεργειακής διαχείρισης Energy Management Rules Εδώ τίθενται οι κανόνες ενεργειακής διαχείρισης, δηλαδή εάν επιτρέπεται η πλήρης αποφόρτιση των συσσωρευτών, εάν το Η/Ζ μπορεί να φορτίσει τους συσσωρευτές και εάν οι συσσωρευτές μπορούν να δώσουν ισχύ στο εξωτερικό φορτίο ή μόνο στην αφαλάτωση.
- Χρονοσειρές πόρων Resource Time Series Configurator Επιλέγονται οι χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση.

Όταν όλα τα δεδομένα είναι καθορισμένα τότε εκτελείται το μοντέλο και εμφανίζεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων (Εικόνα Π.1.11). Υπάρχουν 5 πεδία με αποτελέσματα:

- Ισοζύγιο ενέργειας Energy Balance Εμφανίζονται τα ενεργειακά ποσά, δηλαδή η ζήτηση ενέργειας, η ενέργεια που συλλέχθηκε από ΑΠΕ (Α/Γ και Φ/Β), η ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση από ΑΠΕ και η ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση από το Η/Ζ.
- Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Diesel Engine Εδώ παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα του Η/Ζ όπως η κατανάλωση καυσίμου, οι ώρες λειτουργίας και οι συνολικές φορές που ξεκίνησε και σταμάτησε (κύκλοι λειτουργίας).

cription:								
uts								
System Components					Lindate Ca			
WEC System		PV System			opulate eta			
From Design Results O Custom		From Design F	I From Design Results O Custom					
Wind Turbine Proven 15		PV Module	PV Module Green Solar 185W					
Number of Turbines 1		Number of Meduler	427					
Number of Taibines		Number of Modules	43/	457				
Engine System		Battery System						
From Design Results Custom		From Design F	Results O Cu	stom				
Facility 0.100 000		Dan Made	0.51	C				
Erigine Perkins 404C-22G		Battery Module	Sun Exten	ter Concorde				
Number of Engines 1		Capacity (kWh)	201.6					
Water and Power Demands								
Water Demand	Water Sal	inity		External Load				
 As in Design Phase (24 m³/day) 	As in D	Design Phase (16000 m	g./l)	As in Design Phase (4 kW)				
Constant Value (m³/day)	Consta	ant Value (mg/l)		Constant Value (kW)				
Hourly Values from Site Database	Hourty	Values from Site Databa	ise	Hourly Values from Site Database	ð			
CRTEn Water Demand *	CRTEn Sa	alinity	+	CRTEn Power Demand	Ŧ			
Energy Management Rules		Resource Time Se	ries Configura	itor				
Grid Connected	Discharge	Wind Speed	Wind Sp	eed Annual				
	eep Discharge	Solar Radiation	Color An	augl –				
Engine can be used to charge the Battery Sy	stem	Solar Radiation	Solar An	nual 👻				

Εικόνα Π.1.10: Η κεντρική εικόνα της προσομοίωσης, με τον καθορισμό των διαφόρων παραμέτρων.

- 3. Σύστημα συσσωρευτών Battery System Παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τους συσσωρευτές, δηλαδή η ενέργεια που αποδόθηκε στη ζήτηση διαμέσου των συσσωρευτών, οι ώρες που ο συσσωρευτής είναι κάτω από το κρίσιμο βάθος εκφόρτισης και οι απώλειες φόρτισης και εκφόρτισης.
- Οικονομικά και περιβαλλοντικά κόστη Δίνεται το κόστος εγκατάστασης, το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου και η παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου.
- Δείκτες αξιολόγησης Το πρόγραμμα υπολογίζει τους 14 δείκτες αξιολόγησης, έτσι όπως έχουν παρουσιαστεί στον πίνακα 3.3.

Μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση, ο χρήστης μπορεί να περάσει στα επόμενα βήματα του σχεδιασμού. Ότι δεδομένο δόθηκε σε αυτό το στάδιο, θα χρησιμοποιηθεί και στα επόμενα, π.χ. στην ανάλυση ευαισθησίας και στην ανάλυση επικινδυνότητας.

ΠΠ.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Ο χρήστης επιλέγει μέσα από μια λίστα με τις 8 παραμέτρους που έχουν αναφερθεί στον πίνακα 3.4 ποια θα είναι αυτή που θα μεταβληθεί ώστε να βρεθεί η επίδρασή της στους δείκτες ενεργειακής αξιολόγησης. Δίνει αρχική τιμή, ελάχιστη τιμή και βήμα μεταβολής του μεγέθους που έχει επιλεχθεί

to Results			
Energy Balance		Indicators	
Energy Demand (kWh)	66225.60	1. Energy Delivered / Energy Demand	1.00
Energy Collected from WEC System (kWh)	28601.12	2. Renewable Energy Delivered / Energy Demand	1.00
Energy Collected from PV System (kWh)	120035.55	3. Renewable Energy Delivered / Renewable Energy Collected	0.49
Renewable Energy Delivered (kWh)	73395.45	A Direct Earlier Occurring Time (%)	1.42
Energy Delivered from Diesel Engine (kWh)	576.34	4. Diesei Engine Operation Time (%)	1.43
		5. Daily Average Diesel Engine Cycles	0.15
Diesel Consumption (kg)	303 54	6. Energy Delivered by the Battery / Energy Demand	0.37
Diesel Engine Operation Time (hours)	125.00	7. Battery Time below Critical Depth of Discharge (%)	0.00
Number of Diesel Engine Cycles	56	8. Capital Cost (E)	310425.00
		9 Direct Consumption Cost (Páxoze)	226.14
Battery System		5. Diesei Consumption Cost (c/year)	220.14
Energy Delivered by the Battery (kWh)	24269.36	10. Green House Gases Emissions (tonnes CO2/year)	97.13
Battery Time below Critical DoD (hours)	0.00	11. RO Unit Stable Operation Time (%)	100
Battery Losses (kWh)	5687.77	0.41	
Financial and Environmental Costs		13. Water Cost (€/m³)	2.08
Capital Cost (€)	310425.00	14. Water Delivered / Water Demand	1.00
Diesel Consumption Cost (€)	226.14		1.00
Green House Gases Emissions (tonnes CO2)	97.13		

Εικόνα Π.1.11: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

(Εικόνα Π.1.12). Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να δει πως μεταβάλλεται κάποιος συγκεκριμένος δείκτης αξιολόγησης επιλέγοντάς τον από τη σχετική λίστα.

ΠΠ.5 Ανάλυση επικινδυνότητας

Στην κύρια οθόνη (Εικόνα Π.1.13) υπάρχει η περιοχή εισαγωγής των δεδομένων. Για κάθε μια από τις διαθέσιμες παραμέτρους που έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3.4 εισάγεται η κατανομή και τα χαρακτηριστικά της. Οι κατανομές εμφανίζονται και γραφικά. Τέλος, ο χρήστης επιλέγει τον αριθμό των επαναλήψεων και εκτελεί τη διαδικασία.

Με το τέλος της διαδικασίας των επαναλήψεων εμφανίζεται η οθόνη των αποτελεσμάτων (Εικόνα Π.1.14). Παρουσιάζεται το γράφημα της κατανομής του κάθε δείκτη αξιολόγησης και το γράφημα Tornado που δείχνει την σχετική επιρροή της κάθε παραμέτρου στο αποτέλεσμα. Τέλος, παρουσιάζονται και τα χαρακτηριστικά της κατανομής του δείκτη, όπως: μέση τιμή, απόκλιση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή.

ΠΠ.6 Επισκόπηση

Η επισκόπηση είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για τη σύγκριση των επιδόσεων ανάμεσα στις εναλλακτικές. Σύμφωνα με αυτά που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 3.5, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει



Εικόνα Π.1.12: Η ανάλυση ευαισθησίας.

Diesel Price (E/L) Ansual Mean Wind Daily Mean Solar Ri Daily Water Deman Daily Average Powe	Speed (m/s) sdiation (M/n/m) r Demand (kW) Mean Value Stdev	n v atribution v e 0.745 0.05	8.00 6.00 4.00 2.00 0.00 0.50 0.0	50 0.70 0.80 Value for Variation	0.90 1.00
Summary of Risk Pa	nameters Diesel Rice	Mann Wind Speed	Solar Padiation	Water Demand	Rower Demand
Distribution	Normal Distribution	Normal Distribution	Normal Distribution	Triangular	Triangular
Mean Value	0.745	5.02	237.47	24	4
Parameters	Stdev= 0.05	Stdev= 0.5	Stdev= 15	Max Value= 26 Min Valu	Max Value= 5 Min Value
Parameters	Stdev= 0.05	Stdev= 0.5	Stdev= 15	Max Value= 26 Min Valu	Max Value= 5 Min Value

Εικόνα Π.1.13: Εισαγωγή των δεδομένων για την ανάλυση επικινδυνότητας.



Εικόνα Π.1.14: Αποτελέσματα ανάλυσης επικινδυνότητας.

τις εναλλακτικές στις οποίες έχει εκτελέσει τουλάχιστον την προσομοίωση και να τις συγκρίνει. Η σύγκριση μπορεί να γίνει με τέσσερις τρόπους:

- Πίνακας δεικτών Indicators table Με χρήση του πίνακα όπου είναι συγκεντρωμένοι όλοι οι δείκτες των εναλλακτικών περιπτώσεων (Εικόνα Π.1.15).
- Ανάλυση Trade-off Trade-Off analysis Γίνεται επιλογή 2 από τους 14 δείκτες αξιολόγησης για σύγκριση μεταξύ τους για τις επιλεγμένες εναλλακτικές (Εικόνα Π.1.16). Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται σε γράφημα όπου στους άξονες είναι οι επιδόσεις του κάθε δείκτη.
- Ανάλυση διαδρομής Value path analysis Η ανάλυση διαδρομής (Εικόνα Π.1.17) παρουσιάζει (κανονικοποιημένες και γραφικά) για τις επιλεγμένες εναλλακτικές όλες τις επιδόσεις τους. Οι καλύτερες επιδόσεις είναι αυτές που βρίσκονται υψηλότερα από τις άλλες.
- 4. Ισοβαρής κατάταξη Equal weight ranking Εδώ αθροίζονται οι κανονικοποιημένες επιδόσεις και έτσι προκύπτει η εναλλακτική με την καλύτερη βαθμολογία, χωρίς να τεθεί βάρος/σημαντικότητα στους δείκτες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και αριθμητικά αλλά και σε γράφημα με μπάρες (Εικόνα Π.1.18).

UNINEC A	Indicators Table	Trac	de-Off Analysi:	s Value P	ath Analysis	Equal Weig	hts Ranking						
VEC 0	Case		Ind 1	Ind 2	Ind 3	Ind 4	Ind 5	Ind 6	Ind 7	Ind 8	Ind 9	Ind 10	Ind 11
	DGOnly		1.00	0.00	NaN	100.00	0.00	0.00	0.00	70000.00	16603.59	7131.74	
	EnerSc1 HiRes	1	1.00	0.70	0.93	40.35	1.01	0.24	0.00	116575.00	6249.66	2684.42	
	EnerSc1 HiRes	2	1.00	0.81	0.77	36.59	0.77	0.18	0.00	196350.00	5166.56	2219.19	
	EnerSc1 HiRes	5	1.00	0.75	0.93	40.07	0.87	0.16	0.00	139975.00	5809.32	2495.28	
	EnerSc1 HiRes	7	1.00	0.88	0.88	23.73	0.72	0.24	0.00	157500.00	3470.09	1490.51	
	EnerSc1 LowRe	s	1.00	0.88	0.51	25.47	0.60	0.21	0.00	321200.00	3864.90	1660.09	
	EnerSc1 LowRe	s	1.00	1.00	0.47	0.15	0.01	0.52	0.00	234575.00	32.56	13.99	
	EnerSc1 LowRe	s	1.00	1.00	0.55	8.21	0.39	0.24	0.00	292600.00	1201.59	516.12	
	EnerSc1 LowRe	s	1.00	1.00	0.52	3.63	0.29	0.30	0.00	266300.00	534.49	229.58	
	EnerSc1 LowRe	s	1.00	1.00	0.49	1.43	0.15	0.37	0.00	310425.00	226.14	97.13	
	EnerSc2 HiRes	D	1.00	0.71	0.82	42.58	0.73	0.19	68.29	246125.00	6360.80	2732.16	
	EnerSc2 HiRes	1	1.00	0.70	0.93	40.29	1.01	0.24	98.29	181575.00	6238.15	2679.47	
	EnerSc2 HiRes	2	1.00	0.84	0.80	31.58	0.64	0.21	59.42	261350.00	4483.93	1925.98	
	EnerSc2 HiRes	5	1.00	0.76	0.94	38.32	0.83	0.17	81.94	204975.00	5562.29	2389.17	
	EnerSc2 HiRes	7	1.00	0.90	0.90	20.53	0.59	0.27	64.89	222500.00	3013.06	1294.20	
	<												

Εικόνα Π.1.15: Συγκριτικός πίνακας δεικτών αξιολόγησης.



Εικόνα Π.1.16: Ανάλυση trade-off.



Εικόνα Π.1.17: Ανάλυση διαδρομής.





EnerSc1 HiRes 0PV/100WEC ()	weights Scores Table	Scores Chart		
EnerSc1 HiRes 100PV/0WEC () EnerSc1 HiRes 25PV/75WEC ()	Economic Indica	ators O Enviromental Indicators O Social Indicators		
inerSc1 HiRes 50PV/50WEC () inerSc1 HiRes 75PV/25WEC ()	Economic Indicators	Description	Weight	^
herSc1 LowRes 100PV/0WEC ()	Ind 3	Renewable Energy Delivered / Renewable Energy Collected	100	100 100 100
erSc1 LowRes 25PV/75WEC ()	Ind 4	Diesel Engine Operation Time (%)	100	
rSc1 LowRes 50PV/25WEC ()	Ind 5	Daily Average Diesel Engine Cycles	100	
rSc2 HiRes 0PV/100WEC ()	Ind 6	Energy Delivered by the Battery / Energy Demand	100	
rSc2 HiRes 100PV/0WEC () rSc2 HiRes 25PV/75WEC ()	Ind 7	Battery Time below Critical Depth of Discharge (%)	100	
EnerSc2 HiRes 50PV/50WEC 0	Ind 8	Capital Cost (Euro)	100	
rSc2 HiRes /5PV/25WEC () rSc2 LowRes ()PV/100WEC ()	Ind 9	Diesel Consumption Cost (Euro/year)	100	
rSc2 LowRes 100PV/0WEC ()	Ind 12	Energy Cost (Euro/kWh)	100	
rSc2 LowRes 25PV/75WEC () rSc2 LowRes 50PV/50WEC ()	Ind 13	100	~	
rSc2 LowRes 75PV/25WEC () ing KiBaM (Second Alternative)	Group of Indicators	Description	Weight	
Case (Open-Gain Prototype)	Economic	Economic Group	roge	100
	Enviromental	Enviromental Group		100
	Social	Social Group		100

Εικόνα Π.1.19: Η οθόνη απόδοσης βαρών στου δείκτες αξιολόγησης.

ΠΠ.7 Πολυκριτηριακή ανάλυση

Στην πολυκριτηριακή ανάλυση ο χρήστης επιλέγει τις περιπτώσεις που θέλει να αναλύσει από τη διαθέσιμη λίστα όπως και στην περίπτωση της επισκόπησης. Στη συνέχεια αποδίδει τα βάρη της προτίμησής του στον κάθε δείκτη (Εικόνα Π.1.19), και στη συνέχεια δίνει τα βάρη στα τρία γκρουπ των δεικτών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακα, συνολικά άλλα και ανά κατηγορία ενώ δημιουργούνται και εδώ γραφήματα με μπάρες με την σχετική επίδραση της κάθε κατηγορίας δεικτών στο τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα Π.1.20).



Εικόνα Π.1.20: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης.
Παράρτημα Π.2

Υπολογισμοί ηλιακών δεδομένων

ΠΠ.8 Υπολογισμός ωρών ανατολής και δύσης Ηλίου

Ο τρόπος υπολογισμού της ώρας ανατολής και δύσης του Ηλίου περιγράφεται αναλυτικά στο [99]. Για τον υπολογισμό της ώρας ανατολής και δύσης αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η ηλιακή απόκλιση δ για την ημέρα του έτους n που ενδιαφέρει:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \tag{P.1}$$

Η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου ω_s , σε γεωγραφικό πλάτος ϕ υπολογίζεται από την εξίσωση Π.2.

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)) \tag{(I.2)}$$

Επειδή στη γενική περίπτωση ενδιαφέρει η ώρα ανατολής και δύσης σε κεκλιμένο επίπεδο (το οποίο βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο και βλέπει προς νότο), τότε στη σχέση Π.2 γίνεται η μετατροπή:

$$\omega'_s = \arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan(\delta)) \tag{I.3}$$

όπου β η κλίση του επιπέδου. Τελικά η ωριαία γωνία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι η ελάχιστη των σχέσεων Π.2 και Π.3, δηλαδή:

$$\omega_{st} = \min(\omega_s, \omega_s') \tag{I.4}$$

και ο χρόνος δύσης του ήλιου (σε ηλιακή ώρα) είναι:

$$AST_{ss} = 12hr + \omega_{st} \cdot \frac{hr}{15^{\circ}} \tag{(I.5)}$$

Ενώ ο χρόνος ανατολής είναι:

$$AST_{sr} = 12hr - \omega_{st} \cdot \frac{hr}{15^{\circ}} \tag{(I.6)}$$

Οι χρόνοι, όπως έχει αναφερθεί είναι σε ηλιακή ώρα και θα πρέπει να μετατραπούν σε τοπική ώρα.

ΠΠ.9 Μετατροπή ηλιακής ώρας σε τοπική ώρα

Ο (φαινόμενος) ηλιακός χρόνος ονομάζεται ο χρόνος που μετράται με βάση την κίνηση του ήλιου στον ουρανό (όπως την καταγράφει παρατηρητής στην επιφάνεια της Γης). Ως εξίσωση χρόνου ορίζεται η διαφορά μεταξύ του φαινόμενου ηλιακού χρόνου και του μέσου ηλιακού χρόνου:

$$ET = 9.87 \cdot \sin\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{n-81}{364}\right) - 7.53 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n-81}{364}\right) - 1.5 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n-81}{364}\right)$$
(П.7)

Ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος τέμνει το μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο (t), την ώρα δηλαδή που δείχνει το ρολόι. Ο φαινόμενος ηλιακός χρόνος, τότε, δίνεται από τη σχέση:

$$AST = \begin{cases} t + ET - 4\frac{\min}{\circ} \cdot (LSM - \lambda) & 180^{\circ} > \lambda > 0^{\circ} \\ t + ET + 4\frac{\min}{\circ} \cdot (LSM - \lambda) & 0^{\circ} > \lambda > -180^{\circ} \end{cases}$$
(П.8)

Όπου LSM είναι ο τοπικός κανονικός μεσημβρινός της ζώνης ώρας οπού ανήκει η περιοχή που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος λ . Έτσι με αντικατάσταση των εξισώσεων Π.6 και Π.5 στη σχέση Π.8 προκύπτει η τοπική ώρα t_{sr} και t_{ss} αντίστοιχα.

ΠΠ.10 Μέση ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Ο συντελεστής αιθριότητας εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας το οποίο φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Ο μέσος συντελεστής αφορά το αντίστοιχο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο ώρας ή μέρας ή μήνα. Έτσι ο μέσος συντελεστής αιθριότητας είναι:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \tag{1.9}$$

όπου:

- H_0 Ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας
- H Ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια

Η ηλιακή ακτινοβολία για μια συγκεκριμένη μέρα του έτους δίνεται από την εξίσωση:

$$H_0 = \frac{24 \cdot G_0}{\pi} \cdot \left(\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta)\right) \tag{I.10}$$

όπου G_0 η στιγμιαία ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας τη συγκεκριμένη ημέρα.

$$G_0 = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{n}{365}\right)\right)$$
(П.11)

όπου G_{sc} η ηλιακή σταθερά. Τιμές του συντελεστή αιθριότητας είναι διαθέσιμες για τους μετεωρολογικούς σταθμούς όπου υπάρχουν μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία σε επιφάνεια υπό κλίση (H_T) είναι ένα ποσοστό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο (H) και εκφράζεται μέσω του συντελεστή $R(\beta)$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$H_T = R(\beta) \cdot H \tag{(I.12)}$$

Ο συντελεστής $R(\beta)$ είναι συνάρτηση της κλίσης του επιπέδου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R(\beta) = R_b \cdot \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) + \frac{H_d}{H} \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + r \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right)$$
(II.13)

όπου H_d είναι η διάχυτη ακτινοβολία, R_b είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και r ο συντελεστής ανάκλασης της περιοχής. Ο συντελεστής ανάκλασης r δίνεται από πίνακες και εξαρτάται από το χαρακτήρα της περιοχής (οικιστικός, αγροτικός, κτλ) (Πίνακας Π.15). Η παράμετρος R_b μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_{st}) + \omega_{st} \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\delta)}$$
(П.14)

Είδος επιφανείας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός με χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βράχια	0.2
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0.3
Χιόνι	0.6

Πίνακας Π.15: Τιμές του συντελεστή ανάκλασης για διάφορα είδη επιφάνειας.

Η εξίσωση Π.14 (και Π.3 όπως έχει ειπωθεί), αφορά επιφάνεια που είναι στο βόρειο ημισφαίριο και κοιτάει προς το νότο. Για επιφάνεια που είναι στο νότο και κοιτάει το βορρά πρέπει στις σχέσεις αυτές όπου $-\beta$ να γίνει $+\beta$. Το μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιφάνειες που δεν έχουν αζιμούθιο $\gamma = 0$ για επιφάνεια στο βορρά ή $\gamma = \pi$ για επιφάνεια που είναι στο νότο. Στην εξίσωση υπολογισμού του $R(\beta)$ εμφανίζεται ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας προς τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία. Ο δείκτης αιθριότητας (K_T) καθορίζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία διαχέεται στο περιβάλλον. Η σχέση που δίνει το λόγο $\frac{H_d}{H}$ εξαρτάται από το δείκτη αιθριότητας και έχουν προταθεί αρκετές διαφορετικές εξισώσεις συσχέτισης. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στους περισσότερους υπολογισμούς είναι:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases}
0.99 & K_T \le 0.17 \\
1.188 - 2.272 \cdot K_T + 9.473 \cdot K_T^2 - 21.865 \cdot K_T^3 + 14.648 \cdot K_T^4 & 0.17 < K_T \le 0.75 \\
-0.54 \cdot K_T + 0.632 & 0.75 < K_T \le 0.80 \\
0.2 & K_T \ge 0.80
\end{cases}$$
(Π.15)

Βιβλιογραφία

- Scott, Christopher A.; Pierce, Suzanne A.; Pasqualetti, Martin J.; Jones, Alice L.; Montz, Burrell E.; Hoover, Joseph H. (2011): Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus. In Energy Policy 39 (10), pp. 6622–6630.
- [2] Siddiqi, Afreen; Anadon, Laura Diaz (2011): The water-energy nexus in Middle East and North Africa. In Energy Policy 39 (8), pp. 4529–4540.
- [3] EIP-Water (2015): Water-energy nexus. Available online at www.eip-water.eu/priorities/ water-energy-nexus.
- [4] IEA (2012): World Energy Outlook 2012. Paris, France: International Energy Agency (World energy outlook special report). Available online at www.worldcat.org/oclc/814446459.
- [5] Gan, Leong Kit; Shek, Jonathan K.H.; Mueller, Markus A. (2015): Hybrid wind–photovoltaic–diesel– battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland. In Energy Conversion and Management 106, pp. 479–494.
- [6] Afgan, Nain H.; Carvalho, Maria G. (2008): Sustainability assessment of a hybrid energy system. In Energy Policy 36 (8), pp. 2903–2910.
- [7] Celik, Ali Naci (2003): Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods. In Energy Conversion and Management 44 (12), pp. 1951–1968.
- [8] McKenna, Ed; Olsen, Timothy L. (1999): Performance and Economics of a Wind-Diesel Hybrid Energy System: Naval Air Landing Field, San Clemente Island, California. NREL/SR-500-24663. Available online at www.nrel.gov/docs/fy99osti/24663.pdf.
- [9] Jurado, Francisco; Saenz, José R. (2002): Possibilities for biomass-based power plant and wind system integration. In Energy 27 (10), pp. 955–966.

- [10] Pilavachi, P.A.; Roumpeas, C.P.; Minett, S.; Afgan, N.H. (2006): Multi-criteria evaluation for CHP system options. In Energy Conversion and Management 47 (20), pp. 3519–3529.
- [11] El-Nashar, Ali M. (2001): Cogeneration for power and desalination state of the art review. In Desalination 134 (1-3), pp. 7–28.
- [12] Kaldellis, J.K. (Ed.) (2009): Technology of Stand-alone and Hybrid Wind Energy Production and Storage: CRC Pr I Llc. Available online at www.worldcat.org/oclc/255899536.
- [13] Rizzuti L., Ettouney H., Cipollina A. (2006) Solar Desalination for the 21st Century A Review of Modern Technologies and Researches on Desalination Coupled to Renewable Energies, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Springer
- [14] Ma, Qingfen; Lu, Hui (2011): Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. In Desalination 277 (1-3), pp. 274–280.
- [15] D. Assimacopoulos, Water water everywhere... : Desalination powered by renewable energy sources, Refocus Vol. 2, Issue 6, pp. 38-40, 2001
- [16] Koroneos, C.; Dompros, A.; Roumbas, G. (2007): Renewable energy driven desalination systems modelling. In Journal of Cleaner Production 15 (5), pp. 449–464.
- [17] Kalogirou, Sotiris A. (2005): Seawater desalination using renewable energy sources. In Progress in Energy and Combustion Science 31 (3), pp. 242–281.
- [18] Abraham, Tinu; Luthra, Amit (2011): Socio-economic & technical assessment of photovoltaic powered membrane desalination processes for India. In Desalination 268 (1-3), pp. 238–248.
- [19] Aybar, H. Ş.; Akhatov, J. S.; Avezova, N. R.; Halimov, A. S. (2010): Solar powered RO desalination: Investigations on pilot project of PV powered RO desalination system. In Appl. Sol. Energy 46 (4), pp. 275–284.
- [20] Badreddin, E.; Gambier, A.; Aboul-Fotouh, F. (2004): Laboratory set-up for education and research on automation of reverse osmosis plants employing a sustainable energy source. In Desalination 166, pp. 307–314.
- [21] Childs, Willard D.; Dabiri, Ali E.; Al-Hinai, Hilal A.; Abdullah, Hussein A. (1999): VARI-RO solarpowered desalting technology. In Desalination 125 (1-3), pp. 155–166.

- [22] El-Shaarawi, Maged A.I; Al Awjan, Hussain; Al Ramadhan, Dawood; Hussain, Mustafa (2011): Effect of thermodynamic limitations on PV initial cost estimations for solar-powered RO desalination. In Desalination 276 (1-3), pp. 28–37.
- [23] Herold, D.; Horstmann, V.; Neskakis, A.; Plettner-Marliani, J.; Piernavieja, G.; Calero, R. (1998):
 Small scale photovoltaic desalination for rural water supply demonstration plant in Gran Canaria.
 In Renewable Energy 14 (1-4), pp. 293–298.
- [24] Jijakli, Kenan; Arafat, Hassan; Kennedy, Scott; Mande, Prasad; Theeyattuparampil, Vijo Varkey (2012): How green solar desalination really is? Environmental assessment using life-cycle analysis (LCA) approach. In Desalination 287, pp. 123–131.
- [25] Joyce, António; Loureiro, David; Rodrigues, Carlos; Castro, Susana (2001): Small reverse osmosis units using PV systems for water purification in rural places. In Desalination 137 (1-3), pp. 39–44.
- [26] Lamei, A.; van der Zaag, P.; Münch, E. von (2008): Impact of solar energy cost on water production cost of seawater desalination plants in Egypt. In Energy Policy 36 (5), pp. 1748–1756.
- [27] Davies, P.A (2011): A solar-powered reverse osmosis system for high recovery of freshwater from saline groundwater. In Desalination 271 (1-3), pp. 72–79.
- [28] Mathioulakis, E.; Belessiotis, V.; Delyannis, E. (2007): Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. In Desalination 203 (1-3), pp. 346–365.
- [29] Karytsas, C; Alexandrou, V; Boukis, I (2002): The Kimolos Geothermal Desalination Project. In : Proceedings on International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy. Greece. UNESCO/IGA.
- [30] Palenzuela, Patricia; Zaragoza, Guillermo; Alarcón, Diego; Blanco, Julián (2011): Simulation and evaluation of the coupling of desalination units to parabolic-trough solar power plants in the Mediterranean region. In Desalination 281, pp. 379–387.
- [31] Salcedo, R.; Antipova, E.; Boer, D.; Jiménez, L.; Guillén-Gosálbez, G. (2012): Multi-objective optimization of solar Rankine cycles coupled with reverse osmosis desalination considering economic and life cycle environmental concerns. In Desalination 286, pp. 358–371.

- [32] Saffarini, Rasha B.; Summers, Edward K.; Arafat, Hassan A.; Lienhard V, John H. (2012): Technical evaluation of stand-alone solar powered membrane distillation systems. In Desalination 286, pp. 332–341.
- [33] Zuo, Lu; Zheng, Yuan; Li, Zhenjie; Sha, Yujun (2011): Solar chimneys integrated with sea water desalination. In Desalination 276 (1-3), pp. 207–213.
- [34] Karagiannis, Ioannis C.; Soldatos, Petros G. (2008): Water desalination cost literature: review and assessment. In Desalination 223 (1-3), pp. 448–456.
- [35] Kershman, Sultan A.; Rheinlander, Jurgen; Neumann, Thomas; Goebel, Olaf (2005): Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya—GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder. In Desalination 183.
- [36] Kershman, Sultan A.; Rheinländer, Jürgen; Gabler, Hansjörg (2003): Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources - hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for smallscale desalination in Libya. In Desalination 153 (1-3), pp. 17–23.
- [37] Kim, Jong Suk; Chen, Jun; Garcia, Humberto E. (2016): Modeling, control, and dynamic performance analysis of a reverse osmosis desalination plant integrated within hybrid energy systems. In Energy 112, pp. 52–66.
- [38] Scrivani, A. (2005): Energy management and DSM techniques for a PV-diesel powerd sea water reverse osmosis desalination plant in Ginostra, Sicily. In Desalination 183, pp. 63–72.
- [39] Spyrou, Ioannis D.; Anagnostopoulos, John S. (2010): Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. In Desalination 257 (1-3), pp. 137–149.
- [40] Cuenca, Juan Canovas (2012): Report on Water Desalination Status in The Mediterranean Countries: IMIDA.
- [41] Mohamed, Essam Sh.; Papadakis, G. (2004): Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics. In Desalination 164 (1), pp. 87–97.

- [42] Manolakos, D.; Papadakis, G.; Papantonis, D.; Kyritsis, S. (2001): A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas. In Energy 26 (7), pp. 679–704.
- [43] Bourouni, K.; Ben M'Barek, T.; Al Taee, A. (2011): Design and optimization of desalination reverse osmosis plants driven by renewable energies using genetic algorithms. In Renewable Energy 36 (3), pp. 936–950.
- [44] Koutroulis, E.; Kolokotsa, D. (2010): Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources. In Desalination 258 (1-3), pp. 171–181.
- [45] Voivontas, D.; Misirlis, K.; Manoli, E.; Arampatzis, G.; Assimacopoulos, D. (2001): A tool for the design of desalination plants powered by renewable energies. In Desalination 133 (2), pp. 175– 198.
- [46] McMordie Stoughton, K. L.; Duan, X; Wendel, E. M. (2013): Reverse Osmosis Optimization: Federal Energy Management Program, U.S. Department of Energy (Energy Efficiency & Renewable Energy).
 Available online at femp.energy.gov.
- [47] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας: Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Available online at www.rae.gr/site/ categories_new/electricity/market/mdn.csp#, checked on 1/2/2017.
- [48] Βιτέλλας, Ισίδωρος (2008): Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις Κυκλάδες. Το Ενεργειακό Πρόβλημα των Κυκλάδων. Ενεργειακή Τροφοδοσία Κυκλάδων. ΙΕΝΕ. Ερμούπολη, Σύρος, 6/20/2008, checked on www.iene.gr/syros08/index.html.
- [49] Delyannis, E. (2003): *Historic background of desalination and renewable energies*. In Solar Energy 75 (5), pp. 357–366.
- [50] Delyannis, E.-E.; Belessiotis, V. (1995): Solar application in desalination: the Greek Islands experiment. In Desalination 100 (1-3), pp. 27–34.
- [51] Delyannis, A.; Piperoglou, E. (1968): The Patmos solar distillation plant. In Solar Energy 12 (1), pp. 113–115.
- [52] Βακόνδιος, Γ. (2015) Παραγωγή πόσιμου νερού με Αφαλάτωση Επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ημερίδα: Τεχνολογίες Αφαλάτωσης - Αναδυόμενες Τάσεις, Ηράκλειο 22-5-2015

www.edeya.gr/2013-09-23-10-58-06/2013-09-23-11-11-03/uliko/hmerides-1/ texnologies-afalatwsis-anaduomenes-taseis-1/294-vakondiosg-irakleio220515/ file.

- [53] Δάφνης, Ι. (2005) Τοπικές Μονάδες Αντίστροφης Ώσμωσης Δήμου Κερκυραίων. Ημερίδα: Πόσιμο νερό: Έλεγχος Ποιότητας, Νομοθεσία, Προβλήματα Ποιότητας και Διαχείρισης Νερού στο Νομό Κέρκυρας. Κέρκυρα 9-11-2005 library.tee.gr/digital/ker/ker_m278/ker_m278_dafnis.pdf.
- [54] Arnold, John W. (1979): Operating experiences of a 15,000 cubic meter per day municipal desalting plant at Corfu, Greece. In Desalination 30 (1), pp. 145–153.
- [55] Tzen, Eftihia; Narbutiene, Neringa; Edwards, Robert; EPP, Christian; Papapetrou, Michael; Suarez, Baltasar Penate et al. (2005): Autonomous Desalination Units Using RES. INCO PROGRAMME -MPC-1-50 90 93 (Work Package 2).
- [56] Τσαμόπουλος, Μηνάς (2014): Κυκλάδες: Καταρρέει σύστημα αφαλάτωσης στην Ηρακλειά. Available online at www.protothema.gr/greece/article/400961/ kuklades-katarrei-sustima-afalatosis-stin-irakleia-/, checked on 7/5/2016.
- [57] Bundschuh, Jochen; Hoinkis, Jan (2012): Renewable energy applications for freshwater production. Leiden, London: CRC Press; IWA Pub. (Sustainable Energy Developments, v. 2).
- [58] Kartalidis, A.; Tzen, E.; Kampragkou, E.; Assimacopoulos, D. (2015): Responding to water challenges in Greece through desalination: energy considerations. In International Journal of Water Resources Development 32 (3), pp. 428–441.
- [59] Δαγκαλίδης, Αθανάσιος (2009): Αφαλάτωση Νερού. Κλαδική Μελέτη 12. Τράπεζα Πειραιώς. Available online at www.piraeusbankgroup.com/~/media/Com/Downloads/ Greek-Sectoral-Studies/2010/afalatosi_nerou.pdf
- [60] Δαλμύρα, Άννα-Τερέζα (2013): Μονάδα αφαλάτωσης για τη Σχοινούσα. Available online at www.koinignomi.gr/news/politiki/politiki-kyklades/2013/12/27/ monada-afalatosis-gia-ti-shoinoysa.html, updated on 12/27/2013, checked on 7/7/2016.

- [61] Ημερησία (2009): Νέα Μονάδα Αφαλάτωσης από την TEMAK. Available online at www.imerisia. gr/article.asp?catid=26519&subid=2&pubid=7421123.
- [62] Καμπουράκης, Νικόλαος (2013): Απολογισμός Έργου ΔΕΥΑΘ 2011-2012. ΔΕΥΑ Θήρας. Available online at www.thira.gr/nomika-proswpa/deya-thiras/16-dimos/ nomika-proswpa-synthesi/deya-thiras.html?layout=blog, checked on 7/7/2016.
- [63] Karagiannis, Ioannis C.; Soldatos, Petros G. (2007): Current status of water desalination in the Aegean Islands. In Desalination 203 (1-3), pp. 56–61.
- [64] SYCHEM (2011): Αφαλάτωση θαλασσινού νερού στον Δήμο Πάρου. Available online at www.sychem.gr/el/erga/afalatosi-yperdiithisi-erga/item/ 112-afalatwsh-thalassinoy-neroy-ston-dhmo-paroy, updated on 7/7/2016.
- [65] Βεντούρης, Κωνσταντίνος (2013): Έργο αφαλάτωσης στην Κίμωλο. Δήμος Κιμώλου. Available online at www.gokimolos.gr/el/component/content/article/15-news/ 68-dimos-kimolou.html.
- [66] ΔΕΔΔΗΕ (2012): Δελτία ΑΠΕ Μηνιαία και Θερμικής Παραγωγής στα Available Mη Διασυνδεδεμένα Νησιά. online at www.deddie.gr/en/ miniaia-deltia-ape-kai-thermikis-paragwgis-sta-mi-diasundedemena-nisia/ 2012.
- [67] ΔΕΥΑ Σύρου (2014): Προσωπική επικοινωνία
- [68] Watereuse Association Desalination Committee (2011): Seawater Desalination Power Consumption. White Paper.
- [69] ΕΥΔΑΠ (2011): Ετήσιος Απολογισμός & Ετήσιο Δελτίο
- [70] Γεωργαλάς, Λουκάς (2011): Προσέγγιση της σχέσης νερού-ενέργειας στο σύστημα ύδρευσηαποχέτευση. In Ανεμολόγια, pp. 31–35. Available online at www.nomosphysis.org.gr/ articles.php?artid=4237&lang=1&catpid=2.
- [71] ΕΥΑΘ (2010): Ετήσιο δελτίο εταιρικής χρήσης 2009. Θεσσαλονίκη.
- [72] AAi, B.; Yang, H.; Shen, H.; Liao, X. (2003): Computer-aided design of PV/wind hybrid system. In Renewable Energy 28 (10), pp. 1491–1512.

- [73] Morgan, T.R; Marshall, R.H; Brinkworth, B.J (1997): 'ARES'—A refined simulation program for the sizing and optimisation of autonomous hybrid energy systems. In Solar Energy 59 (4-6), pp. 205– 215.
- [74] McGowan, J.G; Manwell, J.F; Avelar, C.; Warner, C.L (1996): Hybrid wind/PV/diesel hybrid power systems modeling and South American applications. In Renewable Energy 9 (1-4), pp. 836–847.
- [75] Dalton, G.J; Lockington, D.A; Baldock, T.E (2009): Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel. In Renewable Energy 34 (4), pp. 955–964.
- [76] Kershman, Sultan A.; Rheinlander, Jurgen; Neumann, Thomas; Goebel, Olaf (2005): Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya—GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder. In Desalination 183.
- [77] Celik, A.N (2006): A simplified model for estimating yearly wind fraction in hybrid-wind energy systems. In Renewable Energy 31 (1), pp. 105–118.
- [78] MEDRC (2002): Development of a Logistic Model for the design of autonomous desal systems. With assistance of E. Tzen (MEDRC Series of R&D Reports, 00-AS-014).
- [79] Slootweg, J.G; Polinder, H.; Kling, W.L: Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations, p. 6.
- [80] Roy, Anindita; Kedare, Shireesh B.; Bandyopadhyay, Santanu (2009): Application of design space methodology for optimum sizing of wind–battery systems. In Applied Energy 86 (12), pp. 2690– 2703.
- [81] Pallabazzer, Rodolfo (2004): Previsional estimation of the energy output of windgenerators. In Renewable Energy 29 (3), pp. 413–420.
- [82] Yang, Hongxing; Lu, Lin; Zhou, Wei (2007): A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system. In Solar Energy 81 (1), pp. 76–84.
- [83] Slootweg, J.G; Polinder, H.; Kling, W.L: Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator, pp. 644–649.
- [84] Sánchez, J.A; Veganzones, C.; Martínez, S.; Blázquez, F.; Herrero, N.; Wilhelmi, J.R (2008): Dynamic model of wind energy conversion systems with variable speed synchronous generator and full-

size power converter for large-scale power system stability studies. In Renewable Energy 33 (6), pp. 1186–1198.

- [85] Ortiz-Rivera, E.I; Peng, F.Z: Analytical Model for a Photovoltaic Module using the Electrical Characteristics provided by the Manufacturer Data Sheet, pp. 2087–2091.
- [86] Pacific Northwest National Laboratory (2011): Extend EnergyPlus to Support Evaluation, Design, and Operation of Low Energy Buildings. U.S. Department of Energy.
- [87] Jongerden, M. R.; Haverkort, B. R. (2008): Battery Modeling. Enschede: Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente (CTIT technical report series). Available online at doc.utwente.nl/64556/.
- [88] Ross, Michael (2001): A Simple but Comprehensive Lead-Acid Battery Model for Hybrid System Simulation. In : Workshop on Photovoltaic Hybrid Systems. Proceedings of PV Horizon. Montréal, Qc, September 10.
- [89] Copetti, J.B; Chenlo, F. (1994): Lead/acid batteries for photovoltaic applications. Test results and modeling. In Journal of Power Sources 47 (1-2), pp. 109–118.
- [90] Shepherd, C. M. (1965): Design of Primary and Secondary Cells. In J. Electrochem. Soc. 112 (7), p. 657.
- [91] Guasch, D.; Silvestre, S. (2003): Dynamic battery model for photovoltaic applications. In Prog. Photovolt: Res. Appl. 11 (3), pp. 193–206.
- [92] Zhou, Wei; Yang, Hongxing; Fang, Zhaohong (2008): Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar–wind power generation system. In Renewable Energy 33 (6), pp. 1413–1423.
- [93] Manwell, James F.; McGowan, Jon G. (1993): Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. In Solar Energy 50 (5), pp. 399–405.
- [94] Manwell, James F.; McGowan, Jon G. (1994): A combined probabilistic/time series model for wind diesel systems simulation. In Solar Energy 53 (6), pp. 481–490.
- [95] Ackermann, Thomas (2005): Wind power in power systems. Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ: John Wiley.

- [96] Zhu, Aihua; Christofides, Panagiotis D.; Cohen, Yoram (2009): Effect of Thermodynamic Restriction on Energy Cost Optimization of RO Membrane Water Desalination. In Ind. Eng. Chem. Res. 48 (13), pp. 6010–6021.
- [97] Kartalidis A., Georgopoulou M., Arampatzis G., Assimacopoulos D. *Desalination in Greek Islands by Using Res* (2011). CEST2011 Congress, Rhodes
- [98] Ephrath, J.E.; Goudriaan, J.; Marani, A. (1996): Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics. In Agricultural Systems 51 (4), pp. 377–393.
- [99] Duffie, John A.; Beckman, William A. (2006): Solar engineering of thermal processes. 3rd ed. Hoboken, N.J: Wiley.
- [100] Kartalidis A., Arampatzis G., Assimacopoulos D. Rapid Sizing of Renewable Energy Power Components in Hybrid Power Plants for Reverse Osmosis Desalination Process, iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software, Main Proceedings, pp. 1264-1271
- [101] Michelez, Jean; Blazquez, Rosario; Martin, Juan Manuel; Mera, Emilio; Christensen, Dana; Peineke, Christian et al. (2011): Risk Quantification and Risk Management in Renewable Energy Projects: IEA - RETD.
- [102] Krauter, S.; Rüther, R. (2004): Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy. In Renewable Energy 29 (3), pp. 345–355.
- [103] Peng, Jinqing; Lu, Lin; Yang, Hongxing (2013): Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. In Renewable and Sustainable Energy Reviews 19, pp. 255–274.
- [104] Pearsall, Nicola: The performance of photovoltaic (PV) systems. Modelling, measurement and assessment (Woodhead Publishing series in energy, Number 105).
- [105] Amor, Mourad Ben; Lesage, Pascal; Pineau, Pierre-Olivier; Samson, Réjean (2010): Can distributed generation offer substantial benefits in a Northeastern American context? A case study of smallscale renewable technologies using a life cycle methodology. In Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (9), pp. 2885–2895.

- [106] Greening, Benjamin; Azapagic, Adisa (2013): Environmental impacts of micro-wind turbines and their potential to contribute to UK climate change targets. In Energy 59, pp. 454–466.
- [107] Spanos, Constantine; Turney, Damon E.; Fthenakis, Vasilis (2015): Life-cycle analysis of flowassisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction. In Renewable and Sustainable Energy Reviews 43, pp. 478–494.
- [108] Proven Energy Ltd: *Proven 15. Grid Connect, Installation Manual*. Available online at www.provenenergy.com.
- [109] Concorde Battery Corporation (2014): Technical Manual for Sun Xtender Batteries. Revision E.
- [110] Battery Prices. Available online at www.wholesalesolar.com/brands/concorde, checked on 11/20/2016.
- [111] Dufo-López, Rodolfo; Lujano-Rojas, Juan M.; Bernal-Agustín, José L. (2014): Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. In Applied Energy 115, pp. 242–253.
- [112] Perkins Engines Company Limited (2003): 404C-22G Data Sheet. Available online at www. raad-eng.com/techdata/perkins/404C-22G.pdf.
- [113] Global Petrol Prices: Tunisia Diesel prices. Available online at www.globalpetrolprices.com/ Tunisia/diesel_prices, checked on 11/20/2016.
- [114] US. Energy Information Administration: Voluntary Reporting of Greenhouse Gases Program. Fuel Emission Coefficients. Available online at www.eia.gov/oiaf/1605/coefficients.html.
- [115] Moch, Irving; Querns, William; Steward, Darlene (2008): Modeling the Capital and Operating Costs of Thermal Desalination Processes Utilizing a Recently Developed Computer Program that Evaluates Membrane Desalting, Electrodialysis, and Ion Exchange Plants. Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 130.
- [116] Copernicus. Soda-Pro Database. Available online at www.soda-pro.com/web-services# radiation.
- [117] Αυλωνίτης Σ. Εισαγωγή στην Τεχνολογία Νερού και Αφαλάτωσης, Εκδόσεις Ιών, 2006

- [118] Celik, A.N (2003): A simplified model for estimating the monthly performance of autonomous wind energy systems with battery storage. In Renewable Energy 28 (4), pp. 561–572.
- [119] Greenlee, Lauren F.; Lawler, Desmond F.; Freeman, Benny D.; Marrot, Benoit; Moulin, Philippe (2009): Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. In Water Research 43 (9), pp. 2317–2348.
- [120] Castaner, Luis; Silvestre, Santiago (2002): Modelling Photovoltaic Systems using PSpice[®]: John Wiley & Sons.
- [121] Stevens, J.W; Corey, G.P (1996): A study of lead-acid battery efficiency near top-of-charge and the impact on PV system design. In : Photovoltaic Specialists Conference Proceedings. Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, pp. 1485–1488.
- [122] Delgado-Torres, Agustín M.; García-Rodríguez, Lourdes; Romero-Ternero, Vicente J. (2007): Preliminary design of a solar thermal-powered seawater reverse osmosis system. In Desalination 216 (1-3), pp. 292–305.
- [123] Karagiannis, Ioannis C.; Soldatos, Peter G. (2010): Estimation of critical CO2 values when planning the power source in water desalination: The case of the small Aegean islands. In Energy Policy 38 (8), pp. 3891–3897.
- [124] Abdin, E.S; Osheiba, A.M; Khater, M.M (1999): Modeling and optimal controllers design for a stand-alone photovoltaic-diesel generating unit. In IEEE Trans. On Energy Conversion 14 (3), pp. 560–565.
- [125] Chedid, Riad; El Khoury, Hiba (2007): Design of a Hybrid Wind-PV-Fuel Cell System for Powering a Desalination Plant. Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, 24-28 June 2007. IEEE. Piscataway, N.J: IEEE Xplore.