



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΝΟΥΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ
ΕΛΕΓΧΟ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ Γ. ΚΑΡΑΒΑΣ

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π., MSc

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Παπαδάκης

ΑΘΗΝΑ, 2019



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διδακτορική Διατριβή με τίτλο:

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΝΟΥΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ
ΕΛΕΓΧΟ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ**

**DEVELOPMENT OF ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON
COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FOR THE DESIGN AND CONTROL OF
AUTONOMOUS MICROGRIDS**

ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ Γ. ΚΑΡΑΒΑΣ

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π., MSc

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γεώργιος Παπαδάκης (Επιβλέπων), Καθηγητής Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

Κωνσταντίνος Αρβανίτης, Καθηγητής Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

Αναστάσιος Ντούνης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

ΑΘΗΝΑ, 2019

.....
Χρήστος - Σπυρίδων Καραβάς

Copyright © Χρήστος - Σπυρίδων Καραβάς, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Στον Πατέρα μου, Γεώργιο, τη Μητέρα μου, Σωτηρία και την Αδερφή μου, Βασιλική

Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Παπαδάκης Γεώργιος, Καθηγητής

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής

Δρ. Αρβανίτης Κωνσταντίνος, Καθηγητής

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής

Δρ. Ντούνης Αναστάσιος, Καθηγητής

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

Δρ. Τσούτσος Θεοχάρης, Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Δρ. Καδέλης Ιωάννης, Καθηγητής

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Δρ. Φθενάκης Βασίλειος, Καθηγητής

Columbia University, USA
Center for Life Cycle Analysis, Department of Earth and Environmental Engineering

Δρ. Μανωλάκος Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής

Περίληψη

Η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, η αστικοποίηση και ο εκσυγχρονισμός του τρόπου ζωής έχουν οδηγήσει σε ένα από τα πιο αξιοσημείωτα ζητήματα της παγκόσμιας ατζέντας, που είναι η συνεχής αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας. Σήμερα, εκατομμύρια άνθρωποι δε μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες και επίσης υπάρχουν πολλές περιοχές παγκοσμίως χωρίς πρόσβαση σε δίκτυο ηλεκτροδότησης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το πρόβλημα της ηλεκτροδότησης αντιμετωπίζεται κυρίως με τη χρήση ηλεκτρογεννητριών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα που έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μια εναλλακτική, βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον λύση. Η ραγδαία χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει οδηγήσει στην αλλαγή της λειτουργίας των δικτύων, όπου η χρήση υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης και ηλεκτρογεννήτριες σχηματίζουν επιμέρους υποδίκτυα, τα οποία ονομάζονται μικροδίκτυα. Τα μικροδίκτυα βασίζονται στην καταναλωμένη παραγωγή ισχύος με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών και αναδεικνύονται στα πιο εξελιγμένα τεχνολογικά δίκτυα. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν είτε σε διασύνδεση με κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης είτε αυτόνομα καλύπτοντας τις ανάγκες της περιοχής που εξυπηρετούν. Ένα ακόμη σημαντικό διεθνές κοινωνικό πρόβλημα αποτελεί η διαθεσιμότητα πόσιμου νερού. Οι περισσότερες περιοχές στο κόσμο που αντιμετωπίζουν έλλειψη πόσιμου νερού είναι κυρίως παράκτιες ή νησιωτικές, που όμως διαθέτουν υψηλό ηλιακό ή/και αιολικό δυναμικό. Οπότε, ο συνδυασμός συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με συστήματα αφαλάτωσης αποτελεί μία ιδανική λύση για τη παροχή υψηλής ποιότητας καθαρού νερού.

Επίσης, ένας πολύ σημαντικός λόγος της αύξησης στη κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων αποτελεί η χρήση τους ως καύσιμο για μετακινήσεις. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό οικολογικό καύσιμο των μετακινήσεων καθώς μπορεί να παραχθεί μέσω μονάδων ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ισχύ και νερό. Τόσο τα συστήματα αφαλάτωσης όσο και οι μονάδες ηλεκτρόλυσης καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια και μπορούν να αποτελέσουν μονάδες ενός μικροδικτύου. Καθώς το μικροδίκτυο γίνεται όλο

και πιο περίπλοκο, συστήματα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου είναι απαραίτητα για τη βέλτιστη λειτουργία του.

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης και ελέγχου υβριδικών συστημάτων ενέργειας και μικροδικτύων με τη χρήση ευφυών πρακτόρων που ενσωματώνουν τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης, με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία τους.

Αρχικά δίδεται μια σύντομη περιγραφή των αποκεντρωμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας σε ενεργειακά συστήματα, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους σε σχέση με τα συγκεντρωτικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας, και γίνεται αναφορά στη χρήση της τεχνολογίας των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων, δίδοντας παράλληλα κάποια βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής τους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης που μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα σύστημα ευφυών πρακτόρων.

Κατόπιν παρουσιάζεται ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται σε ένα σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων για ένα αυτόνομο μικροδίκτυο. Κάθε μονάδα του μικροδικτύου ελέγχεται από ένα ευφυή πράκτορα. Οι πράκτορες επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους με σκοπό την ομαλή λειτουργία του μικροδικτύου. Μερικές μονάδες του μικροδικτύου (η μονάδα αφαλάτωσης, η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η κυψέλη καυσίμου) μπορούν να λειτουργούν σε μερικό φορτίο. Ο ευφυής πράκτορας που ελέγχει την αντίστοιχη μονάδα επιλέγει το σημείο λειτουργίας της, χρησιμοποιώντας τη θεωρία των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία σμηνών για την εύρεση του βέλτιστου οικονομικά μικροδικτύου που καλύπτει πλήρως τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, πόσιμο νερό και υδρογόνο ως καύσιμο, της περιοχής που εξυπηρετεί. Μέσω της βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε η διαστασιολόγηση της κάθε μονάδας του μικροδικτύου. Το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης ενέργειας συγκρίθηκε με ένα συγκεντρωτικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου με τη χρήση ευφυών συνεργατικών πρακτόρων μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στο σχεδιασμό και στον έλεγχο ενός μικροδικτύου, παρουσιάζοντας μικρότερο κίνδυνο πλήρους κατάρρευσης του

συστήματος, καθώς μια πιθανή αποτυχία ορισμένων πρακτόρων δεν μεταφράζεται σε ολική κατάρρευση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας, και παράλληλα κατάφερε να αξιοποιήσει και να ελέγξει καλύτερα τις διαθέσιμες μονάδες του μικροδικτύου, γεγονός που με τη σειρά του οδήγησε σε ένα οικονομικότερο αποτέλεσμα.

Ένα άλλο πρόβλημα που εξετάστηκε είναι η εύρεση του βέλτιστου συστήματος που περιλαμβάνει μια μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενη με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, η πειραματική διερεύνηση μια μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού. Έπειτα, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια ως προς τη βέλτιστη, τεχνικά και οικονομικά, σχεδίαση του συστήματος τροφοδοτούμενο με ενέργεια από φωτοβολταϊκά. Μελετήθηκαν οι περιπτώσεις όπου το σύστημα είτε τροφοδοτείται απευθείας από τη φωτοβολταϊκά συστοιχία, είτε περιλαμβάνει και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας με τη στήριξη διαφόρων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το βέλτιστο σύστημα είναι το σύστημα που περιλαμβάνει μια μικρής χωρητικότητας συστοιχίας συσσωρευτών και ελέγχεται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που ενσωματώνει τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης.

Έπειτα, σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο ένα αυτόνομο μικροδίκτυο για τη τροφοδοσία μια μονάδας αφαλάτωσης. Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει δύο μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Η πρώτη αποτελεί μία καινοτόμα μονάδα ηλεκτρικής αποθήκευσης που αποτελείται από μια συστοιχία υβριδικών πυκνωτών, ενώ η δεύτερη αποτελεί μια υδραυλική αποθήκη ενέργειας μέσω της χρήσης πιεστικών δοχείων. Το μικροδίκτυο ελέγχεται από ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται σε συνεργατικούς ευφυείς πράκτορες με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής πόσιμου νερού μέσω της βέλτιστης αξιοποίησης των μονάδων παραγωγής ενέργειας και των μονάδων αποθήκευσης.

Τέλος, καθώς εξετάστηκε, τόσο μέσω προσομοίωσης όσο και πειραματικά, η χρήση συνεργατικών ευφύων πρακτόρων για ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου ενός μικροδικτύου και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής αυτής, στη συνέχεια εξετάστηκε η χρήση ανταγωνιστικών ευφύων πρακτόρων. Σε ένα μικροδίκτυο μπορεί

οι πράκτορες να έχουν ως κοινό σκοπό τη πλήρη κάλυψη των αναγκών αλλά μπορεί να έχουν παράλληλα και διαφορετικούς στόχους ή οι στρατηγικές του καθενός να επηρεάζουν τις ενέργειες των άλλων. Στη βάση αυτή, σχεδιάστηκε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων για ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός μικροδικτύου, όπου οι πράκτορες είτε συνεργάζονται είτε ανταγωνίζονται. Δημιουργήθηκαν δύο παίγνια ελέγχου, ένα συνεργατικό και ένα ανταγωνιστικό. Για την επίλυση και την εύρεση του σημείου ισορροπίας των παιγνίων χρησιμοποιήθηκε η ισορροπία Nash. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση του προτεινόμενου συστήματος πολλαπλών πρακτόρων για ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός αυτόνομου μικροδικτύου, παρουσιάζει λιγότερες απώλειες ενέργειας και δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού ενός οικονομικότερου μικροδικτύου.

Abstract

The increase of human population, urbanization and modernization have led to one of the most notable issues of the worldwide agenda, which is the outstanding growth of global energy demand. Today, millions of people are still left without basic energy services and most of these people reside in remote areas, which are not interconnected to any major electrical power system network. Taking into consideration that the problem of electrification is mainly addressed by the use of fossil fuel power stations which have a significant environmental impact, renewable energy generation is an alternative, sustainable and environmentally friendly solution. The rapid use of renewable energy has led to a change in the operation of electrical grids and the use of hybrid renewable energy systems, including storage systems and generators form the microgrids. Microgrids are usually small-scale, low-voltage, integrated energy systems, which can call for sufficient load to warrant local generation and distribution and can address the grid congestion problems as far as high introduction of distributed renewable energy generators are concerned. Microgrids can operate at either grid-connected or islanded (autonomous) mode and their primary aim is to cover all the needs present in the area that they serve. Another major issue of the worldwide agenda is the availability of drinking water. There are many areas in the world, such as islands, coastal regions and arid main lands, which although have a significant shortage in potable water supply, their solar and wind potential is very high. With the fact that around 97% of the earth's water is salty, desalination process emerged as an attractive solution to the water scarcity problem. A prominent challenge associated with desalination is its high energy consumption, which is often covered largely by fossil fuels. Therefore, the combination of desalination plants with renewable energy sources (RES) have been identified as a sustainable and economically viable solution compared to conventional fossil fuel-powered desalination plants. Moreover, the consumption of fossil fuels is increasing due to the use of fuels for transportation. Hydrogen is an energy carrier the use of which has been rising constantly throughout recent years and it can be used as a fuel for transportation, as well as a medium to long-term energy storage. A hydrogen subsystem is usually composed of a water electrolyzer, which produces the hydrogen, a hydrogen storage tank which acts as energy storage, a refuelling system which

supports the dispensing hydrogen into fuel cell vehicles and a fuel cell which produces electricity from the stored hydrogen. The desalination and hydrogen systems consume electrical energy and hence can both constitute subsystems of a microgrid. As the microgrids become more complex, advanced energy storage systems and corresponding advanced energy management systems are required for optimal operation.

The concept behind this thesis is the design and the development of energy management systems based on distributed intelligence for the design, control and optimum operation of microgrids.

A brief description of decentralized energy management systems is presented, including their advantages instead of the use of centralized energy management systems. In addition, the multi agent systems approach in electrical power systems is mentioned. Then, the computational intelligence techniques that can be integrated into a multi agent system are presented.

A decentralized energy management system based on multi-agent system for the control and management of an autonomous microgrid is presented. In the proposed system of intelligent agents, each unit of the network is controlled by its own processing unit, which is able to act as an independent agent. Every agent communicates and cooperates with other agents, thus forming an intelligent distributed computing system. The decisions concerning the energy production and storage, the production and storage of potable water and the production and utilization of hydrogen as fuel are made by this multi-agent system. Every agent receives information from sensors or through other agents and determines the operation point of the particular controlled unit, which correspond to full or partial load of the electrolyzer, fuel cell and desalination unit. The intelligent agents make decisions using the Fuzzy Cognitive Maps theory. The proposed decentralized energy management system is afterwards compared techno-economically to a centralized energy management system, based on a combined Petri Nets – Fuzzy Cognitive Maps approach. The results of the comparison revealed that the decentralized energy management system utilize the available devices better, which in turn led to a lower net present cost for a 20 year investment period and the managed

microgrid has much higher chances of partial operation in cases when malfunctions occur at different parts of it.

Another important issue that has been addressed is the determination of the optimal configuration of a renewable energy desalination system so that the system meets the water load demand at the minimum cost. Initially, a seawater reverse osmosis desalination plant was experimentally investigated at the laboratory of Agriculture University of Athens. Then, five different configurations for a seawater desalination system powered by photovoltaics were effectuated and compared in order to define the optimum technical and economic configuration of system components for autonomous mode operation. The results showed that the optimum system is the system that includes a small capacity conventional energy storage system (lead acid batteries) and an energy management system that incorporates computational intelligence techniques.

An experimental investigation of a PV powered small-scale SWRO desalination system which employs hydraulic energy recovery, based on a DC microgrid concept was designed and tested in the laboratory. The DC microgrid incorporates a short term electric energy storage in the form of hybrid capacitors and a short term hydraulic energy storage in the form of pressure vessels. A multi-agent decentralized energy management system which relies on intelligent agents and employs Fuzzy Cognitive Maps for its implementation, allowing for efficient operation of the desalination system under variable conditions (variable feed pressure) was designed and experimentally investigated in order to maximize the fresh water production, optimizing the use of power plants and storage units.

Finally, after being tested, both through simulation and experimentation, the beneficial application of multi agent systems in microgrids has been discussed to solve the energy management problem in distributed energy management systems by exploiting a theoretical framework relying on the cooperation among the agents, then the use of competing intelligent agent was examined. In several cases, an interactive operation among multiple agents in an energy system appears very often. In these cases, the goals of each agent are influenced by the actions of the remaining agents, while it is often possible that cooperation of the agents cannot be established, because they have competitive goals or different strategies which influence

agents' actions. On this basis, a multi-agent decentralized energy management system for a microgrid was designed and the energy management problem was formulated through the application of game theory, in order to model the set of strategies between two players/agents, as a non-cooperative power control game or a cooperative one, according to the level of the energy produced by the renewable energy sources and the energy stored in the battery bank, for the purpose of accomplishing optimal energy management and control of the microgrid operation. The Nash equilibrium was used to compromise the possible diverging goals of the agents by maximizing their preferences. The results obtained from the proposed energy management system, demonstrate that the application of game theory based control, in autonomous microgrids, can lead to a higher efficiency, fewer power losses and a lower cost system.

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά

1. **Christos-Spyridon Karavas**, George Kyriakarakos, Konstantinos G. Arvanitis, and George Papadakis. “A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 166-179, 2015. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.021
Impact factor: 6.377, 5-Year Impact Factor: 6.161.
Η εργασία έχει λάβει 114 αναφορές και βρίσκεται στη κατηγορία των “Most Cited articles” του περιοδικού που δημοσιεύθηκαν από το 2015.
2. **Christos-Spyridon Karavas**, Konstantinos Arvanitis, and George Papadakis. “A Game Theory Approach to Multi-Agent Decentralized Energy Management of Autonomous Polygeneration Microgrids”. *Energies*, Vol. 10, issue 11, pp. 1756, 2017. DOI: 10.3390/en10111756
Impact factor: 2.676, 5-Year Impact Factor: 3.045
Η εργασία έχει λάβει 21 αναφορές και έχει επιλεγθεί στις κατηγορίες “Editor’s Choice” και “Feature Paper” του περιοδικού.
3. **Christos-Spyridon Karavas**, Konstantinos G. Arvanitis, George Kyriakarakos, Dimitrios D. Piromalis, and George Papadakis. “A novel autonomous PV powered desalination system based on a DC microgrid concept incorporating short-term energy storage”. *Solar Energy*, Vol. 159, pp. 947-961, 2018. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.057.
Impact Factor: 4.374, 5-Year Impact Factor: 4.831
Η εργασία έχει λάβει 12 αναφορές.
4. **Christos-Spyridon Karavas** and George Papadakis. “Renewable Energy Driven Small-Scale Sea Water Reverse Osmosis Desalination Systems: A Survey”. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, Vol. 7, pp. 1-3. DOI: 10.4172/2090-4541.1000e115.
Impact Factor: 0.76, 5-Year Impact Factor: 1.66
Η εργασία έχει λάβει 1 αναφορά.

5. **Christos-Spyridon Karavas**, Konstantinos G. Arvanitis, and George Papadakis. "Optimal technical and economic configuration of photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems operating in autonomous mode". *Desalination*, Vol. 466, pp. 97-106. DOI: 10.1016/j.desal.2019.05.007.
Impact Factor: 6.035, 5-Year Impact Factor: 6.566

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Συνέδρια

1. **Ch.-S. Karavas**, K.G. Arvanitis, G. Papadakis. "Photovoltaic powered reverse osmosis desalination: Optimum technical and economic configuration of system components in autonomous operation mode". *Euromed, Desalination for the Environment Clean Water and Energy*, Athens, Greece, 3 - 6 September 2018.
2. **Ch.-S. Karavas** and G.Papadakis. "Integration of renewable energy technologies in the community of the agricultural university of Athens". *33th EU PVSEC, European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, 25 - 29 September 2017.
3. **Ch.-S. Karavas**, K.G.Arvanitis, G.Kyriakarakos, D.D.Piromalis and G.Papadakis. "PV powered Reverse Osmosis desalination system operating at variable pressure conditions and controlled by a Multi - Agent Decentralized Energy Management System". *33th EU PVSEC, European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, Netherlands, 25 - 29 September 2017.
4. **Ch.-S. Karavas**, K.G.Arvanitis, E.Sh.Mohamed, E. Dimitriou, and G.Papadakis. "Direct driven of a small scale sea water reverse osmosis desalination unit powered by PV: case study in Aegean Island, Greece". *Euromed, Desalination for Clean Water and Energy: Cooperation around the World*, Tel Aviv, Israel, 9 - 12 May 2017.
5. **Ch.-S. Karavas** and G. Papadakis. "Multi-agent decentralized energy management system for the control of an autonomous desalination system comprising computational intelligence". *Technical and Economic Aspects of Renewable Energies - Know-How Transfer as Development Opportunity for Southern Europe*, Berlin, Germany, 3 - 7 July 2016.

Άρθρα σε Περιοδικό με Τεχνικό Περιεχόμενο

1. **Καραβάς Χρήστος - Σπυρίδων** και Γεώργιος Παπαδάκης. “Ενσωμάτωση Τεχνολογιών ΑΠΕ στην «κοινότητα» του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών”. ECOTEC, Μάιος 2017.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα της ερευνητικής μου δραστηριότητας που πραγματοποιήθηκε στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Γ.Π.Α.) στη Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της, είχα την τιμή να γνωρίσω και να συνεργαστώ με αξιόλογους ανθρώπους και δράττομαι της ευκαιρίας να τους εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την πολύτιμη βοήθειά τους και τη συνεχή στήριξη που μου παρείχαν για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Παπαδάκη, Καθηγητή του Γ.Π.Α., για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω ένα πολύ ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο, την εμπιστοσύνη και την πίστη που έδειξε στις ικανότητές μου καθώς και την άρτια και συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να επισημάνω την αμέριστη συνεισφορά του με την επιλογή μου στην ερευνητική ομάδα πολλών ερευνητικών έργων που συνέβαλαν στη στήριξη της διατριβής μου, καθώς και την ευκαιρία που μου προσέφερε να συμμετέχω σε διεθνή συνέδρια για την προβολή των αποτελεσμάτων της διατριβής μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Κωνσταντίνο Αρβανίτη, Καθηγητή του Γ.Π.Α, ο οποίος συνέβαλε στην εισαγωγή μου σε νέα πεδία επιστημονικής έρευνας και είχα τη χαρά και την τιμή να συνεργάζομαι κατά τη διάρκεια όλων των χρόνων των διδακτορικών μου σπουδών. Τον ευχαριστώ θερμά για το χρόνο που αφιέρωσε για την διατριβή μου όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και στην καταλυτική συμβολή του για την ολοκλήρωσή της και τη συμβολή του στη συγγραφή πολλών επιστημονικών εργασιών.

Επίσης, ευχαριστώ το τρίτο μέλος της τριμελούς επιτροπής της διατριβής μου, τον κ. Αναστάσιο Ντούνη, Καθηγητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τη συμβολή του στην επίβλεψη και διόρθωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Ιωάννη Καλδέλη, τον κ. Βασίλειο Φθενάκη, τον κ. Θεοχάρη Τσούτσο και τον κ. Δημήτριο Μανωλάκο, για τη συμμετοχή τους στην επιτροπή και τα σχόλιά τους στο περιεχόμενο της διατριβής.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Κυριακαράκο για την εποικοδομητική συνεργασία μας, και την καθοριστική του συμβολή στην συγγραφή αρκετών επιστημονικών εργασιών που ανέδειξαν τα αποτελέσματα της διατριβής αυτής σε διεθνές επίπεδο.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον πολύ καλό φίλο και συνεργάτη Δρ. Αθανάσιο Μπαλαφούτη, Ερευνητή (Βαθμός Γ') στο Ινστιτούτο Βιο-οικονομίας & Αγρο-τεχνολογίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, για το συνεχές ενδιαφέρον του, τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθημερινή ενθάρρυνσή του.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Εσάμ Μοχάμεντ, Επίκουρο Καθηγητή του Αμερικάνικου Πανεπιστημίου του Καΐρου, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την άρτια συνεργασία μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Γ.Π.Α. και ιδιαιτέρως τους κ. Ευάγγελο Δημητρίου και κ. Σταματία Βουλγαράκη, για το ευχάριστο και φιλικό κλίμα συνεργασίας που υπήρχε αυτά τα χρόνια στο εργαστήριο.

Κλείνοντας, οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και το μεγαλύτερο ευχαριστώ στους γονείς μου Γεώργιο Καραβά και Σωτηρία Τερζιάδου καθώς και στην αδερφή μου Βασιλική Καραβά, για την αμέριστη συμπαράσταση, την κατανόηση και την αγάπη τους όλο αυτό το διάστημα και στους οποίους αφιερώνω τη διδακτορική μου διατριβή.

Θα ήθελα επιπλέον να αναφέρω ότι τμήμα της Διδακτορικής μου Διατριβής διεξήχθη στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου «ΑΡΙΣΤΕΙΑ Ι», «Smart Desalination» με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαδάκη, το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου (ΕΚΤ) και από Εθνικούς Πόρους στο πλαίσιο του ΕΠΕΔΒΜ.

Επίσης σημαντικό μέρος της Διδακτορικής Διατριβής χρηματοδοτήθηκε, από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών της Ελλάδας (Ι.Κ.Υ.), στα πλαίσια του προγράμματος με τίτλο «ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ ΙΚΥ / SIEMENS», ως ένα ερευνητικό πρόγραμμα, όπου επιλέχτηκε κατόπιν διαγωνιστικής διαδικασίας. Το ερευνητικό πρόγραμμα

υποβλήθηκε στη σχετική προκήρυξη, συμμετέχοντας στον επιστημονικό τομέα ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ και ειδικότερα στην εξειδίκευση ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	2
1.1	Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.2	Κεντρική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	3
1.3	Διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	4
1.4	Μικροδίκτυα	5
1.5	Δομή της διδακτορικής διατριβής	8
2	Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας σε Μικροδίκτυα.....	12
2.1	Εισαγωγή	12
2.2	Συγκεντρωτικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας.....	13
2.2.1	Εισαγωγή.....	13
2.2.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση στα CEMS	14
2.3	Αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.....	15
2.3.1	Εισαγωγή.....	15
2.3.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση στα DEMS	17
3	Ευφείς Πράκτορες	20
3.1	Εισαγωγή	20
3.2	Συστήματα πολλαπλών ευφύων πρακτόρων	23
4	Τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης	26
4.1	Εισαγωγή	26
4.2	Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)	30
4.3	Ασαφείς Γνωστικοί Χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps)	33
4.4	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων	36
4.5	Θεωρία Παιγνίων	38
5	Αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφύων πρακτόρων και υπολογιστικής νοημοσύνης για τον σχεδιασμό και έλεγχο αυτόνομου μικροδικτύου.....	42
5.1	Εισαγωγή	42
5.2	Διαμόρφωση μικροδικτύου.....	43
5.3	Πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων για τον έλεγχο του μικροδικτύου....	46
5.3.1	Πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων	46
5.4	Επισκόπηση πρακτόρων.....	48
5.4.1	RES πράκτορας	48
5.4.2	Battery πράκτορας.....	49
5.4.3	Desalination πράκτορας	50
5.4.4	Electrolyzer πράκτορας	54
5.4.5	Fuel cell πράκτορας.....	57

5.5	Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης.....	59
5.6	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	61
5.6.1	Σύγκριση του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων με ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας.....	67
5.7	Συμπεράσματα.....	70
6	Τεχνική και οικονομική διερεύνηση συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης τροφοδοτούμενο από φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	72
6.1	Εισαγωγή.....	72
6.2	Μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης.....	76
6.2.1	Περιγραφή λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης.....	76
6.2.2	Πειραματική διερεύνηση της μονάδας αφαλάτωσης.....	81
6.2.3	Εργαστηριακά αποτελέσματα.....	82
6.3	Αυτόνομη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης τροφοδοτούμενη από φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	85
6.3.1	Εισαγωγή.....	85
6.3.2	Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με χρήση ON/OFF συστήματος διαχείρισης ενέργειας (Σενάριο 1).....	86
6.3.3	Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με απευθείας σύνδεση με τη Φ/Β συστοιχία (Σενάριο 2).....	87
6.3.4	Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία και σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε λογική ελέγχου υστέρησης (Σενάριο 3).....	88
6.3.5	Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία και σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ασαφή λογική (Σενάριο 4).....	90
6.3.6	Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία και σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες (Σενάριο 5)....	93
6.4	Μελέτη Περίπτωσης.....	95
6.4.1	Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης.....	96
6.4.2	Σύγκριση των διαφορετικών σεναρίων.....	101
6.4.3	Σύγκριση με λύση μεταφοράς νερού.....	106
6.5	Συμπεράσματα.....	107
7	Πειραματική διερεύνηση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων για τον έλεγχο αυτόνομου μικροδικτύου.....	110
7.1	Εισαγωγή.....	110
7.2	Διαμόρφωση μικροδικτύου.....	112
7.2.1	Φωτοβολταϊκή Συστοιχία.....	117
7.2.2	Μονάδα αφαλάτωσης.....	118
7.2.3	Μονάδες αποθήκευσης ενέργειας.....	119

7.2.4	Σύστημα καταγραφής δεδομένων	131
7.3	Πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων για τον έλεγχο του μικροδικτύου..	131
7.3.1	Πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων	131
7.3.2	Επισκόπηση πρακτόρων	134
7.4	Πειραματικά αποτελέσματα του μικροδικτύου	141
7.5	Συμπεράσματα.....	148
8	Χρήση ανταγωνιστικών πρακτόρων σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύων	152
8.1	Εισαγωγή	152
8.2	Διαμόρφωση μικροδικτύου.....	154
8.3	MAS - DEMS του μικροδικτύου	155
8.3.1	Επισκόπηση του MAS - DEMS.....	155
8.3.2	Επισκόπηση ευφύων πρακτόρων	158
8.3.3	Θεωρία Παιγνίων για το MAS - DEMS.....	161
8.4	Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης.....	172
8.5	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	174
8.6	Αξιολόγηση του MAS - DEMS.....	179
8.7	Συμπεράσματα.....	180
9	Σύνοψη Αποτελεσμάτων - Γενικά Συμπεράσματα Διατριβής - Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας.....	184
9.1	Εισαγωγή	184
9.2	Γενικά Συμπεράσματα.....	185
9.3	Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας	187
	Βιβλιογραφία.....	191

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1 PAGE του MAS.....	47
Πίνακας 5-2 Αλγόριθμος του RES πράκτορα	49
Πίνακας 5-3 Αλγόριθμος του Battery πράκτορα.....	50
Πίνακας 5-4 Αλγόριθμος του Desalination πράκτορα	53
Πίνακας 5-5 Αλγόριθμος του Electrolyzer πράκτορα	57
Πίνακας 5-6 Αλγόριθμος του Fuel cell πράκτορα.....	59
Πίνακας 5-7 Βελτιστοποίηση των μεταβλητών του DEMS	61
Πίνακας 5-8 Βελτιστοποίηση μεταβλητών του CEMS	69
Πίνακας 6-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης.....	79
Πίνακας 6-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας τροφοδοσίας	79
Πίνακας 6-3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα τροφοδοσίας	79
Πίνακας 6-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας Clark	80
Πίνακας 6-5 Αισθητήρες της μονάδας αφαλάτωσης.....	81
Πίνακας 6-6 Τα πέντε διαφορετικά σενάρια.....	86
Πίνακας 6-7 Ανάλυση κόστους	99
Πίνακας 6-8 Βελτιστοποίηση των μεταβλητών	100
Πίνακας 6-9 Αποτελέσματα σύγκρισης των σεναρίων	101
Πίνακας 6-10 Ποσοστιαία μείωση του κόστους.....	103
Πίνακας 6-11 Ποσοστιαία συμμετοχή (%) κάθε παράγοντα στο συνολικό κόστος	104
Πίνακας 7-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα DC-to-DC.....	114
Πίνακας 7-2 Χαρακτηριστικά DC οδηγού	116
Πίνακας 7-3 Χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλασιών	118
Πίνακας 7-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά υβριδικών πυκνωτών	120
Πίνακας 7-5 Πειραματικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της φόρτισης.....	124
Πίνακας 7-6 Πειραματικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης.....	127
Πίνακας 7-7 Τεχνικά χαρακτηριστικά του πιεστικού δοχείου.....	128
Πίνακας 7-8 Τοποθέτηση των αισθητηρίων στο μικροδίκτυο (Εικόνα 7-1)	131
Πίνακας 7-9 PAGE του MAS.....	132
Πίνακας 7-10 Αλγόριθμος του RES agent	135
Πίνακας 7-11 Αλγόριθμος του Pressure Vessel agent	136
Πίνακας 7-12 Αλγόριθμος του Hybrid capacitor agent	137
Πίνακας 7-13 Βάρη του FCM	139
Πίνακας 7-14 Αλγόριθμος του Desalination agent	140
Πίνακας 8-1 PAGE του MAS.....	156
Πίνακας 8-2 Μεταβλητές βελτιστοποίησης	175

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1 Βασική αρχιτεκτονική ενός μικροδικτύου	6
Εικόνα 2-1 Τυπική αρχιτεκτονική ενός CEMS.....	13
Εικόνα 2-2 Τυπική αρχιτεκτονική ενός DEMS	16
Εικόνα 3-1 Λειτουργία ενός ευφυούς πράκτορα	20
Εικόνα 4-1 Συναρτήσεις συμμετοχής στο Matlab.....	31
Εικόνα 4-2 Δομή ασαφούς λογικής.....	33
Εικόνα 4-3 Ένας τυπικός ασαφής γνωστικός χάρτης.....	34
Εικόνα 5-1 Αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής.....	45
Εικόνα 5-2 Η δομή της πλατφόρμας λογισμικού	46
Εικόνα 5-3 Τοπολογία του MAS και ανταλλαγή δεδομένων	48
Εικόνα 5-4 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του Desalination πράκτορα	51
Εικόνα 5-5 Αρχιτεκτονική του Desalination πράκτορα	54
Εικόνα 5-6 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του Electrolyzer πράκτορα	55
Εικόνα 5-7 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του Fuel cell πράκτορα.....	58
Εικόνα 5-8 Ετήσια παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας.....	64
Εικόνα 5-9 Αρχιτεκτονική του CEMS	68
Εικόνα 6-1 Μονάδα αφαλάτωσης.....	77
Εικόνα 6-2 Ανακτητής υδραυλικής ενέργειας	77
Εικόνα 6-3 Δεξαμενή τροφοδοσίας.....	78
Εικόνα 6-4 Αντλία και κινητήρας τροφοδοσίας.....	80
Εικόνα 6-5 Απεικόνιση του συστήματος μονάδας αφαλάτωσης του Σεναρίου 1.....	87
Εικόνα 6-6 Απεικόνιση του συστήματος μονάδας αφαλάτωσης του Σεναρίου 2.....	88
Εικόνα 6-7 Απεικόνιση του συστήματος μονάδας αφαλάτωσης του Σεναρίου 3.....	89
Εικόνα 6-8 Συνάρτηση συμμετοχής για κάθε είσοδο: (α) Αποθηκευμένη ποσότητα νερού, (β) Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών και (γ) Παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ.....	92
Εικόνα 6-9 Συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου.....	93
Εικόνα 6-10 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του Σεναρίου 5.....	94
Εικόνα 6-11 Κατανάλωση νερού ανά μήνα	96
Εικόνα 6-12 Κόστος νερού (€/m ³)	103
Εικόνα 6-13 Απώλειες ενέργειας για κάθε σενάριο.....	106
Εικόνα 7-1 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.....	113
Εικόνα 7-2 Σασί της Flexiva και ο αμφίδρομος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές ρεύμα.....	114
Εικόνα 7-3 Δομή λειτουργίας του συστήματος Flexiva (PM3: Μετατροπείς).....	115
Εικόνα 7-4 Διάταξη DC μικροδικτύου: (i) DC τροφοδοτικό, (ii) Φωτοβολταϊκή συστοιχία, (iii) Συστοιχία υβριδικών πυκνωτών, (iv) Μετατροπείς, (v) DC driver, (vi) Αντλία και κινητήρας τροφοδοσίας, (vii) Μονάδα αφαλάτωσης, (viii) Αεροθυλάκια	116
Εικόνα 7-5 Γραφικό περιβάλλον LabVIEW της εφαρμογής ελέγχου των μετατροπέων	117
Εικόνα 7-6 Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλατισίων.....	118

Εικόνα 7-7 Ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών	120
Εικόνα 7-8 Η πρωτότυπη μονάδα με 21 υβριδικούς πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά.....	121
Εικόνα 7-9 Συνδεσμολογία φόρτισης των πυκνωτών.....	122
Εικόνα 7-10 Συνδεσμολογία εκφόρτισης των πυκνωτών.....	125
Εικόνα 7-11 Σύστοιχία πιεστικών δοχείων.....	128
Εικόνα 7-12 Σχηματική απεικόνιση σύνδεσης της μονάδας αφαλάτωσης με τα πιεστικά δοχεία (αεροθυλάκια).....	129
Εικόνα 7-13 Τοπολογία του MAS.....	133
Εικόνα 7-14 Αρχιτεκτονική του MAS - DEMS.....	133
Εικόνα 7-15 Επικοινωνία μεταξύ των συσκευών.....	134
Εικόνα 7-16 Το FCM του Desalination agent.....	139
Εικόνα 7-17 Συνάρτηση συμμετοχής για τις γνώμες των ειδικών.....	140
Εικόνα 8-1 Σχηματική αναπαράσταση του μικροδικτύου.....	155
Εικόνα 8-2 Τοπολογία του MAS.....	157
Εικόνα 8-3 Αρχιτεκτονική του MAS - DEMS.....	158
Εικόνα 8-4 Συνάρτηση συμμετοχής για κάθε είσοδο: (α) Αποθηκευμένη ποσότητα νερού, (β) Αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου, (γ) Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών και (δ) Παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ.....	166
Εικόνα 8-5 Συνάρτηση συμμετοχής για κάθε έξοδο: (α) w_1 και (β) w_3	168
Εικόνα 8-6 Επιφάνειες ελέγχου του συστήματος ασαφούς λογικής.....	171

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4-1 Διάγραμμα ενημέρωσης σωματιδίων στη PSO	37
Διάγραμμα 5-1 Αποθηκευμένη ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια του έτους.....	62
Διάγραμμα 5-2 Αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του έτους	63
Διάγραμμα 5-3 Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του έτους.	64
Διάγραμμα 5-4 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας, (1 ^η Απριλίου).....	65
Διάγραμμα 5-5 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας, (1 ^η Αυγούστου) ...	66
Διάγραμμα 5-6 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας, (15 ^η Οκτωβρίου).....	67
Διάγραμμα 6-1 Πίεση νερού εισόδου στη μεμβράνη, πίεση νερού τροφοδοσίας και ροή νερού τροφοδοσίας ως προς την παρεχόμενη ισχύ	83
Διάγραμμα 6-2 Ροή παραγόμενου νερού και ηλεκτρική αγωγιμότητα ως προς την πίεση εισόδου στη μεμβράνη.....	84
Διάγραμμα 6-3 Ειδική κατανάλωση ενέργειας ως προς την πίεση εισόδου στη μεμβράνη.....	85
Διάγραμμα 6-4 Λογική ελέγχου υστέρησης	90
Διάγραμμα 6-5 Παραγωγή νερού και κόστος παραγόμενου νερού ανά μήνα	104
Διάγραμμα 7-1 Καμπύλες φόρτισης των υβριδικών πυκνωτών. (α) Φόρτιση συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών με 8 A, (β) Φόρτιση συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών με 12 A, (γ) Φόρτιση συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών με 16 A	124
Διάγραμμα 7-2 Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος των πυκνωτών και του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης κατά την εκφόρτιση της συστοιχίας των πυκνωτών σε λειτουργία του κινητήρα της μονάδας σε 600 rpm, 700 rpm και 800 rpm.....	127
Διάγραμμα 7-3 Συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με τα πιεστικά δοχεία κατά τη διάρκεια της φόρτισης των δοχείων	130
Διάγραμμα 7-4 Συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με τα πιεστικά δοχεία κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης των δοχείων	130
Διάγραμμα 7-5 Μέγιστη παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας ως προς την ηλιακή ακτινοβολία	135
Διάγραμμα 7-6 Ηλιακή ακτινοβολία των δύο ημερών	141
Διάγραμμα 7-7 Παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκή συστοιχία, καταναλισκόμενη ενέργεια του κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης και SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών.....	143
Διάγραμμα 7-8 Ροή πόσιμου νερού, ροή νερού τροφοδοσίας και ηλεκτρική αγωγιμότητα πόσιμου νερού	144
Διάγραμμα 7-9 Πίεση του νερού εισόδου στη μεμβράνη και πίεση του αποθηκευμένου νερού στα πιεστικά δοχεία	145
Διάγραμμα 7-10 Παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκή συστοιχία, καταναλισκόμενη ενέργεια του κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης και SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών.....	146
Διάγραμμα 7-11 Ροή πόσιμου νερού, ροή νερού τροφοδοσίας και ηλεκτρική αγωγιμότητα πόσιμου νερού	147

Διάγραμμα 7-12 Πίεση του νερού εισόδου στη μεμβράνη και πίεση του αποθηκευμένου νερού στα πιεστικά δοχεία	148
Διάγραμμα 8-1 Αποθηκευμένη ποσότητα πόσιμου νερού κατά τη διάρκεια του χρόνου	176
Διάγραμμα 8-2 Αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του έτους	176
Διάγραμμα 8-3 Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών	177
Διάγραμμα 8-4 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας	178
Διάγραμμα 8-5 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της χειμωνιάτικης ημέρας.....	179

Κατάλογος Συντομογραφιών

Λατινικά

APM	Autonomous Polygeneration Microgrids	Αυτόνομα μικροδίκτυα πολυπαραγωγής
CEMS	Centralized Energy Management System	Συγκεντρωτικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας
CF	Cost Function	Συνάρτηση κόστους
DEMS	Decentralized Energy Management System	Αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας
DOD	Depth of Discharge	Βάθος εκφόρτισης
ED	Electrodialysis	Ηλεκτροδιάλυση
EMS	Energy Management System	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας
FCM	Fuzzy Cognitive Maps	Ασαφείς γνωστικοί χάρτες
IA	Intelligent Agent	Ευφυής πράκτορας
MAS	Multi Agent Systems	Σύστημα πολλαπλών πρακτόρων
MPP	Maximum power point	Σημείο μέγιστης ισχύος
NPC	Net Present Cost	Καθαρό παρόν κόστος
O&M	Operation and Maintenance	Λειτουργία και συντήρηση
PAGE	Percepts, Actions, Goals, Environment	Αντιλήψεις, Δράσεις, Στόχοι και Περιβάλλον
PEM	Proton Exchange Membrane	Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων
PSO	Particle Swarm Optimization	Βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων
RO	Reverse Osmosis	Αντίστροφη όσμωση
SOC	State Of Charge	Κατάσταση φόρτισης
SWRO	Sea Water Reverse Osmosis	Αφαλάτωση θαλασσινού νερού με αντίστροφη όσμωση
VDC	Voltage Direct Current	Τάση συνεχούς ρεύματος

Ελληνικά

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΣΗΕ	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κεφάλαιο 1:

Εισαγωγή

1 Εισαγωγή

1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) περιλαμβάνουν όλες τις εγκαταστάσεις και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο δίκτυο, που σκοπός του είναι να παρέχει με ηλεκτρική ενέργεια τους καταναλωτές που βρίσκονται στη περιοχή ευθύνης του. Στις βασικές μέριμνες που πρέπει να διακρίνει ένα ΣΗΕ, περιλαμβάνονται (α) η ικανοποίηση της διαρκώς μεταβαλλόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των περιοχών κατανάλωσης που εξυπηρετούνται από αυτό, (β) η παροχή υψηλής ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, με όσο το δυνατόν πιο μικρή και πάντα εντός επιτρεπτών ορίων διακύμανση της τάσης και της συχνότητας, (γ) η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό οικονομικά κόστος, (δ) η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση όλων των τοπικών φυσικών πόρων που προσφέρονται για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, υδάτινο δυναμικό, ηλιακή και αιολική ενέργεια, βιομάζα, γεωθερμία ή άλλες πηγές ενέργειας) και (ε) το βέλτιστο περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

Στη σύγχρονη εποχή ευνοείται διεθνώς η ανάπτυξη συνθηκών ευρέως ανταγωνισμού στην παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και προωθείται η λήψη μέτρων για δραστική μείωση των εκπομπών που επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ή επιβαρύνουν το περιβάλλον. Η κατάσταση αυτή συμβάλλει στη διαμόρφωση νέου τύπου δικτύων που περιέχουν διασπαρμένη παραγωγή ισχύος, ευνοούν τη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιλαμβάνουν μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και δίνουν τη δυνατότητα στους καταναλωτές να είναι συγχρόνως και παραγωγοί ρεύματος. Τα εν λόγω δίκτυα αποκαλούνται έξυπνα δίκτυα.

Για την παρακολούθηση των σύνθετων αυτών δικτύων, για τον έλεγχο της λειτουργίας τους και για τη ρύθμισή τους με σκοπό τη διασφάλιση του βέλτιστου οικονομικού αποτελέσματος στη παραγωγή και κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος, έχουν επινοηθεί και εφαρμοστεί πρωτότυπα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου.

1.2 Κεντρική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα ηλεκτρικά δίκτυα μέχρι σήμερα, μέχρι δηλαδή τη διείσοδυση σε μεγάλη κλίμακα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), βασιζόνταν στην κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, από λίγους και μεγάλης ισχύος σταθμούς παραγωγής που λειτουργούν καταναλώνοντας κυρίως ορυκτά καύσιμα, πυρηνική ενέργεια ή υδροηλεκτρική ενέργεια. Οι σταθμοί παραγωγής συνδέονται μέσω ενός ενιαίου δικτύου μεταφοράς με υποσταθμούς, όπου γίνεται ανύψωση ή υποβιβασμός της τάσης. Το δίκτυο περιλαμβάνει γραμμές με υψηλή ή υπερυψηλή τάση και από τους υποσταθμούς τους εκκινούν τα δίκτυα διανομής που παρέχουν το ηλεκτρικό ρεύμα στους καταναλωτές.

Στα συγκεντρωτικά συστήματα εντάσσονται οι μονάδες βάσης, που είναι συνήθως τα θερμοηλεκτρικά ή τα πυρηνικά εργοστάσια, τα οποία λειτουργούν αδιάλειπτα, με μια περιοδική διακύμανση της ισχύος τους ανάλογα με τη ζήτηση, οι μονάδες αιχμής, στις οποίες εντάσσονται τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια και οι μονάδες αεριοστρόβιλων που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου ή τη κάλυψη των αιχμών της ζήτησης. Κύριο χαρακτηριστικό των συγκεντρωτικών συστημάτων είναι η μονόδρομη ροή της ισχύος από τις κεντρικές μονάδες παραγωγής προς τους καταναλωτές.

Το κύριο πλεονέκτημα στα συστήματα με συγκεντρωτική παραγωγή αποτελεί η ευστάθεια που προσδίδουν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μονάδες βάσης τους μπορούν να λειτουργούν αδιάλειπτα, χωρίς να επηρεάζονται από μεταβαλλόμενες πηγές ενέργειας και επιπλέον είναι εξοπλισμένες με σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος, οι οποίες διαθέτουν ρυθμιστές με σκοπό να μπορούν να ανταποκρίνονται άμεσα στις μεταβολές του φορτίου και να διατηρούν σταθερές τις τιμές της τάσης και της συχνότητας, ενώ οι μονάδες αιχμής είναι πάντοτε σε ετοιμότητα με σκοπό να μπορούν να ανταποκριθούν άμεσα σε απότομη μεταβολή του φορτίου και να διασφαλίσουν τη σταθερότητα στο δίκτυο.

Στα μειονεκτήματα των συγκεντρωτικών συστημάτων περιλαμβάνονται, (α) τα υψηλά κόστη επενδύσεων για τη κατασκευή νέων μονάδων ή για την αναβάθμιση των υπαρχουσών ώστε να ανταποκρίνονται στα όρια των ρύπων που επιβάλλουν οι διεθνείς κανονισμοί, (β) οι μεγάλες απώλειες ενέργειας στα δίκτυα μεταφοράς λόγω του μεγάλου τους μήκους, (γ) το

υψηλό κόστος ηλεκτροδότησης απομακρυσμένων περιοχών (π.χ. τα νησιά), (δ) το υψηλό κόστος εκκίνησης των μονάδων τους, (ε) το πρόσθετος κόστος από τα δικαιώματα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κυρίως (ζ) οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν λόγω της μεγάλης εξάρτησής τους από τα ορυκτά καύσιμα.

1.3 Διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Από τις αρχές του 1990 παρατηρείται η συνεχώς αυξανόμενη και μάλιστα με έντονους ρυθμούς σύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στα δίκτυα διανομής. Οι μικρές μονάδες περιλαμβάνουν κυρίως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνθέτοντας μια ολοένα και αυξανόμενη διεσπαρμένη παραγωγή. Σύμφωνα με το [1], «Διεσπαρμένη παραγωγή υπάρχει όταν μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται άμεσα με το δίκτυο διανομής ή βρίσκεται κοντά στον μετρητή του πελάτη».

Οι τεχνολογίες που ανήκουν στη διεσπαρμένη παραγωγή είναι κυρίως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα αιολικά πάρκα, οι μονάδες βιομάζας, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού – θερμότητας (ΣΗΘ), οι μικροστρόβιλοι, οι μονάδες γεωθερμίας και οι κυψέλες καυσίμου. Στη διεσπαρμένη παραγωγή, τα συστήματα διανομής αποκτούν ενεργό ρόλο καθόσον διαθέτουν τόσο μονάδες κατανάλωσης όσο και μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, με αποτέλεσμα η ροή της ισχύος να μην είναι πλέον μονόδρομη αλλά αμφίδρομη.

Η μεγάλη διείσδυση των μονάδων ΑΠΕ αποδίδεται κυρίως στην απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι καταναλωτές έχουν τη δυνατότητα να είναι και παραγωγοί, στα αυστηρά μέτρα που επιβάλλονται για τη προστασία του περιβάλλοντος από τις διεθνείς συνθήκες, όπως η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και από το γεγονός ότι λόγω των ατυχημάτων που συνέβησαν στα πυρηνικά εργοστάσια έχει υπάρξει μεγάλη αμφισβήτηση της αξιοπιστίας τους [2].

Τα πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς, η αποσυμφόρηση των δικτύων διανομής, η συμβολή τους στη συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος και η αξιοποίηση των τοπικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επίσης, στη διεσπαρμένη παραγωγή,

οι μονάδες του συστήματος συνδέονται ταχύτερα στο δίκτυο χωρίς πρόσθετο κόστος, ο κίνδυνος των επενδύσεων κεφαλαίων μειώνεται και διασφαλίζεται η αδιάλειπτη τροφοδότηση ρεύματος σε περίπτωση διακοπής του κεντρικού δικτύου [3].

Στα μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής περιλαμβάνονται το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, η κυμαινόμενη παραγόμενη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ που επηρεάζονται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες, οι διαταραχές που μπορεί να προκαλέσει στο δίκτυο η αμφίδρομη ροή ισχύος κυρίως από τη χαμηλή στη μέση τάση και η ανάγκη αναβάθμισης των σύγχρονων δικτύων διανομής για να ανταποκρίνονται στις νέες προκλήσεις [4].

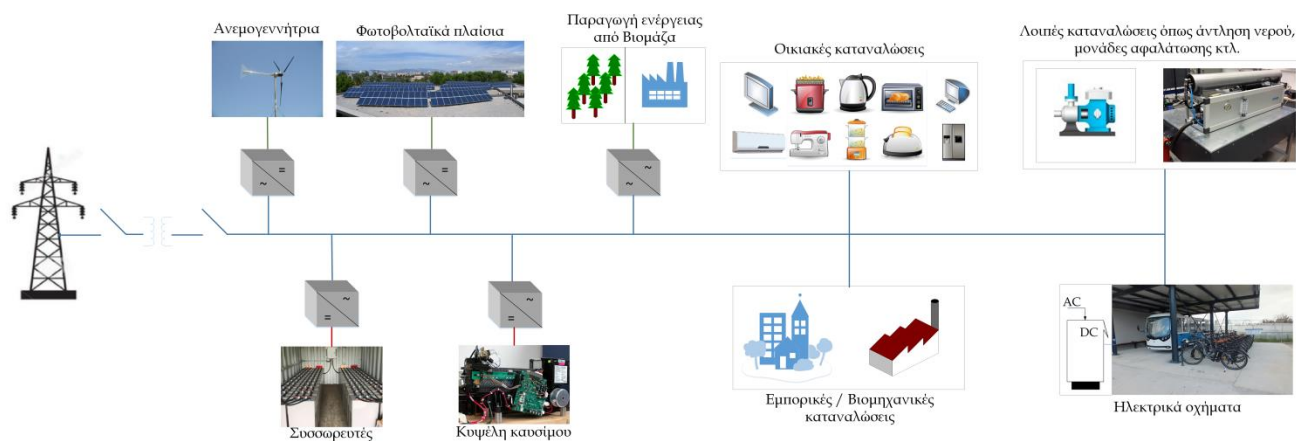
1.4 Μικροδίκτυα

Στη διεσπαρμένη παραγωγή, η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ, οι οποίες λειτουργούν αυτόνομα και ανεξάρτητα από τη ρύθμιση του φορτίου των κεντρικών μονάδων και η ανάγκη για εποπτεία και έλεγχο των νέων δικτύων διανομής που παρουσιάζουν συνεχώς σημαντική εξέλιξη, οδήγησαν στην ανάγκη ανάπτυξης μικρών έξυπνων δικτύων, τα οποία είναι γνωστά ως μικροδίκτυα. Ο όρος μικροδίκτυο εισήχθη για πρώτη φορά στο [5] ώστε να προσδιοριστεί ένα ελεγχόμενο ενεργειακό σύστημα που αποτελείται από φορτία και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να παρέχει ηλεκτρική ισχύ και θερμότητα σε μία περιοχή. Αργότερα, πολλές εργασίες και δημοσιεύσεις εισήγαγαν τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας στα μικροδίκτυα.

Τα Μικροδίκτυα είναι δίκτυα χαμηλής ή μέσης τάσης που μπορούν να ενσωματώνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμβατικές γεννήτριες, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και μονάδες κατανάλωσης ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να ενεργεί ως μία ξεχωριστή οντότητα σε σχέση με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο και έχει την ικανότητα να συνδέεται και να αποσυνδέεται από αυτό όποτε κρίνεται αναγκαίο. Οπότε, τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν είτε σε σύνδεση με το υπόλοιπο δίκτυο είτε σε συνθήκες νησιδοποίησης (αυτόνομη λειτουργία) [6]. Σε συνθήκες διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο, το μικροδίκτυο λαμβάνει ενέργεια από το δίκτυο ή εγχέει ενέργεια σε αυτό, προκειμένου να ρυθμίζει την ισορροπία

ισχύος ανάμεσα στην παραγωγή και τη ζήτηση ρεύματος και να μεγιστοποιεί τα λειτουργικά οφέλη [7]. Σε συνθήκες νησιδοποίησης, το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα και παρέχει ισχύ στους καταναλωτές διατηρώντας σταθερή τη συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης [8].

Καθοριστικό ρόλο στα μικροδίκτυα έχουν τα ηλεκτρονικά ισχύος, δηλαδή οι συσκευές ανόρθωσης εναλλασσομένου ρεύματος (AC-to-DC), οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-to-AC), οι μετατροπείς ανύψωσης ή υποβιβασμού συνεχούς τάσης (DC-to-DC) και οι μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (AC-to-AC), καθόσον τα δίκτυα διαθέτουν μονάδες που παράγουν συνεχές ρεύμα ή το παραγόμενο ρεύμα έχει μεταβαλλόμενη τάση [9-11]. Η Εικόνα 1-1 αποτυπώνει ένα τυπικό μικροδίκτυο.



Εικόνα 1-1 Βασική αρχιτεκτονική ενός μικροδικτύου

Καθοριστικό χαρακτηριστικό στη λειτουργία του μικροδικτύου αποτελεί το γεγονός ότι κάθε μονάδα του μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα ή και να τεθεί εκτός λειτουργίας χωρίς να επηρεάσει τη ευστάθειά του. Επίσης, οι μονάδες παραγωγής μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, χωρίς να αλλάζει η αξιόπιστη λειτουργία του.

Καθώς τα μικροδίκτυα γίνονται όλο και πιο σύνθετα, απαιτούνται προηγμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας [12] και αντίστοιχα προηγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου [13] για τη βέλτιστη λειτουργία τους. Η επιλογή των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας ποικίλει σημαντικά και εξαρτάται από το μέγεθος (ισχύς, αποθηκευτική ικανότητα, διάρκεια ζωής κτλ.) και τις λειτουργίες που καλείται να επιτελέσει στο μικροδίκτυο

[14]. Οι κύριες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο είναι οι συσσωρευτές (μολύβδου οξέος, λιθίου, κτλ.). Τα τελευταία χρόνια νέες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ενσωματώνονται στα μικροδίκτυα, όπως είναι οι στρεφόμενοι σφόνδυλοι, οι υπερπυκνωτές, τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά και η αποθήκευση συμπιεσμένου αέρα [15-17]. Οι μονάδες αποθήκευσης έχουν σημαντικό ρόλο καθώς μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα το σύστημα με ενέργεια, όταν οι μονάδες παραγωγής δεν μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση, στηρίζοντας παράλληλα τη τάση και τη συχνότητα του δικτύου [18-23]. Επιπλέον, καθώς οι κύριες μονάδες παραγωγής ενέργειας στα μικροδίκτυα είναι ανανεώσιμες και εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες (ηλιακή και αιολική ενέργεια), δημιουργούνται απότομες μεταβολές οι οποίες προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στην ισχύ εξόδου διαταράσσοντας την ισορροπία του μικροδικτύου. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας βελτιώνουν την ποιότητα της ισχύος και εξομαλύνουν τη καμπύλη ισχύος καθώς απορροφούν τις απότομες μεταβολές ισχύος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [24-28].

Παρά την ανάγκη που τα διακρίνει για προηγμένη αποθήκευση, προστασία, έλεγχο και διαχείριση, τα μικροδίκτυα έχουν ένα σημαντικό αριθμό τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών οφελιών. Τα οφέλη αυτά προκύπτουν από το ότι χρησιμοποιούν λιγότερη αρχική ενέργεια από τα συγκεντρωτικά συστήματα παραγωγής, είναι αρθρωτά, επεκτάσιμα, ασφαλή και αξιόπιστα, απαιτούν λιγότερες επενδύσεις από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας και μειώνουν τη χρήση ορυκτών καυσίμων ενσωματώνοντας γεννήτριες χαμηλής ή μηδενικής εκπομπής ρύπων, ελαχιστοποιώντας έτσι τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ανεπιθύμητων αερίων στην ατμόσφαιρα, όπως οξείδια του άνθρακα (CO, CO₂) και του αζώτου (NO, NO₂) [29-31].

Τα αυτόνομα μικροδίκτυα πολυπαραγωγής (Autonomous Polygeneration Microgrids – APM) χρησιμοποιούν την ιδέα του μικροδικτύου ως ραχοκοκαλιά τους και την επεκτείνουν για να δημιουργήσουν περισσότερα προϊόντα, ενώ παράλληλα αξιοποιούν τη διαθέσιμη ενέργεια πιο αποτελεσματικά. Τα μικροδίκτυα καθιστούν δυνατή την κατανομημένη παραγωγή και ο πρωταρχικός στόχος τους είναι να καλύψουν όλες τις ανάγκες που παρουσιάζονται στη περιοχή που υπηρετούν. Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν ένα μικροδίκτυο βιώσιμο και φιλικό

προς το περιβάλλον. Σε ένα μικροδίκτυο πολυπαραγωγής, οι τοπικά διαθέσιμοι πόροι όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και η βιομάζα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη αναγκών όπως η ηλεκτρική ενέργεια, η θέρμανση και ο κλιματισμός των χώρων, η ψύξη, ο φωτισμός, η άντληση και η αφαλάτωση νερού.

1.5 Δομή της διδακτορικής διατριβής

Η διάρθρωση της διατριβής έχει ως ακολούθως:

Στο 2ο Κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας των μικροδικτύων.

Στο 3ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση πολλαπλών ευφυών πρακτόρων για τη βέλτιστη λειτουργία μικροδικτύων. Με τη χρήση των πολλαπλών πρακτόρων, κάθε μονάδα του μικροδικτύου ελέγχεται από τοπικούς ελεγκτές και οι πράκτορες επικοινωνούν και συνεργάζονται ή ανταγωνίζονται μεταξύ τους, με σκοπό την επίτευξη των στόχων τους.

Στο 4ο Κεφάλαιο εισάγεται η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης στα συστήματα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου των μικροδικτύων. Για το λόγο αυτό παρατίθενται οι διαφορετικές τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων με στόχο το βέλτιστο έλεγχο των μικροδικτύων. Επίσης, προτείνεται η χρήση της Θεωρίας Παιγνίων για την εύρεση του βέλτιστου σημείου ισορροπίας όταν οι πράκτορες δεν συνεργάζονται μεταξύ τους, καθώς οι στόχοι του ενός πράκτορα έρχονται σε αντίθεση με τους στόχους των υπολοίπων πρακτόρων.

Στο 5ο Κεφάλαιο προτείνεται ένα καινοτόμο αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου αυτόνομων μικροδικτύων, το οποίο βασίζεται στη θεωρία των πολλαπλών πρακτόρων. Κάθε μονάδα του μικροδικτύου ελέγχεται από ένα ευφυή πράκτορα και οι ευφείς πράκτορες επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Μερικές μονάδες του μικροδικτύου όπως η μονάδα αφαλάτωσης, η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η κυψέλη καυσίμου, επιτρέπεται να λειτουργούν σε μερικό φορτίο και οι ευφείς πράκτορες που ελέγχουν τις εν λόγω μονάδες χρησιμοποιούν τη θεωρία των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών για να καθορίσουν το βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους.

Στο 6ο Κεφάλαιο μελετάται μέσω πειραματικών δοκιμών μίας μικρής κλίμακας μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού, εξοπλισμένη με μια συσκευή ανάκτησης ενέργειας (αντλία Clark). Ο στόχος ήταν να μελετηθεί η απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης σε λειτουργία μεταβλητού φορτίου. Επιπλέον, εξετάζεται η βέλτιστη τεχνικά και οικονομικά διαμόρφωση της μονάδας αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού συγκρίθηκαν τεχνικά και οικονομικά πέντε διαφορετικά σενάρια. Η οικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις τιμές αγοράς και η οικονομική διάρκεια ζωής του συστήματος θεωρήθηκε στα 20 χρόνια.

Στο 7ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση ενός αυτόνομου μικροδικτύου για την τροφοδοσία μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Το μικροδίκτυο χρησιμοποιεί δύο βραχυπρόθεσμες εναλλακτικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, μια ηλεκτρική που περιλαμβάνει υβριδικούς πυκνωτές και μια υδραυλική αποτελούμενη από πιεστικά δοχεία (αεροθυλάκια) θαλασσινού νερού, με σκοπό να τροφοδοτούν το σύστημα με την απαιτούμενη ενέργεια (ηλεκτρικά ή υδραυλικά) για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, για μικρά χρονικά διαστήματα. Στο μικροδίκτυο ενσωματώθηκε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του με τη χρήση ευφυών πρακτόρων. Ο ευφυής πράκτορας που καθορίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης χρησιμοποιεί τη θεωρία των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών.

Στο 8ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διερεύνηση μέσω προσομοίωσης μιας στρατηγικής ελέγχου με τη χρήση πολλαπλών πρακτόρων και της Θεωρίας Παιγνίων για ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου ενός αυτόνομου μικροδικτύου πολυπαραγωγής. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου διατυπώθηκε σε δύο παίγνια ελέγχου. Το πρώτο παίγνιο αποτελεί ένα μη συνεργατικό παίγνιο καθώς οι στόχοι των πρακτόρων είναι ανταγωνιστικοί και οι στρατηγικές του κάθε πράκτορα επηρεάζουν τις ενέργειες του άλλου. Το δεύτερο παίγνιο είναι ένα συνεργατικό παίγνιο καθώς οι πράκτορες έχουν κοινό στόχο. Η ισορροπία Nash χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του σημείου ισορροπίας για τα δύο παίγνια με σκοπό να μεγιστοποιήσει σε κάθε περίπτωση τα κέρδη των πρακτόρων, αντιμετωπίζοντας όλους τους πράκτορες εξίσου το ίδιο.

Στο 9ο Κεφάλαιο παρατίθεται τα συνολικά συμπεράσματα της διατριβής μαζί με τα πεδία που δημιουργούνται για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2:

Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας σε Μικροδίκτυα

2 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας σε Μικροδίκτυα

2.1 Εισαγωγή

Ένα βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα μικροδίκτυα από τα συμβατικά δίκτυα διανομής είναι η χρήση των προηγμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Systems - EMS), τα οποία απαιτούνται για την ορθή λειτουργία τους. Η κατάλληλη επιλογή EMS αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη βέλτιστη διαχείριση των μικροδικτύων, κυρίως λόγω της κατανεμημένης φύσης τους [32]. Η διαλείπουσα συμπεριφορά των μονάδων παραγωγής πρέπει να συνδυάζεται με τον βέλτιστο τρόπο με τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, ώστε να παρέχεται σταθερή ροή ισχύος μεταξύ των μονάδων και να εξασφαλίζεται σταθερή τάση και συχνότητα στο δίκτυο.

Ως εκ τούτου, οι στρατηγικές ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας για τα μικροδίκτυα αποτελούν ένα μεγάλο πεδίο για έρευνα, προκειμένου να βρεθεί το πιο κατάλληλο, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Γενικά, τα χαρακτηριστικά που πρέπει να πληροί ένα EMS για μικροδίκτυα είναι τα ακόλουθα:

- Σταθερότητα: ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας με σκοπό τη σταθερή και αξιόπιστη διασύνδεση των μονάδων παραγωγής, των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας και των φορτίων
- Προστασία: παρακολούθηση της ενεργειακής ροής
- Ισορροπία ισχύος: βέλτιστη κατανομή ισχύος μεταξύ των μονάδων του μικροδικτύου
- Βελτιστοποίηση: βέλτιστη διαχείριση των μονάδων του μικροδικτύου για τη μείωση του κόστους του, τη βέλτιστη απόδοσή του κλπ.

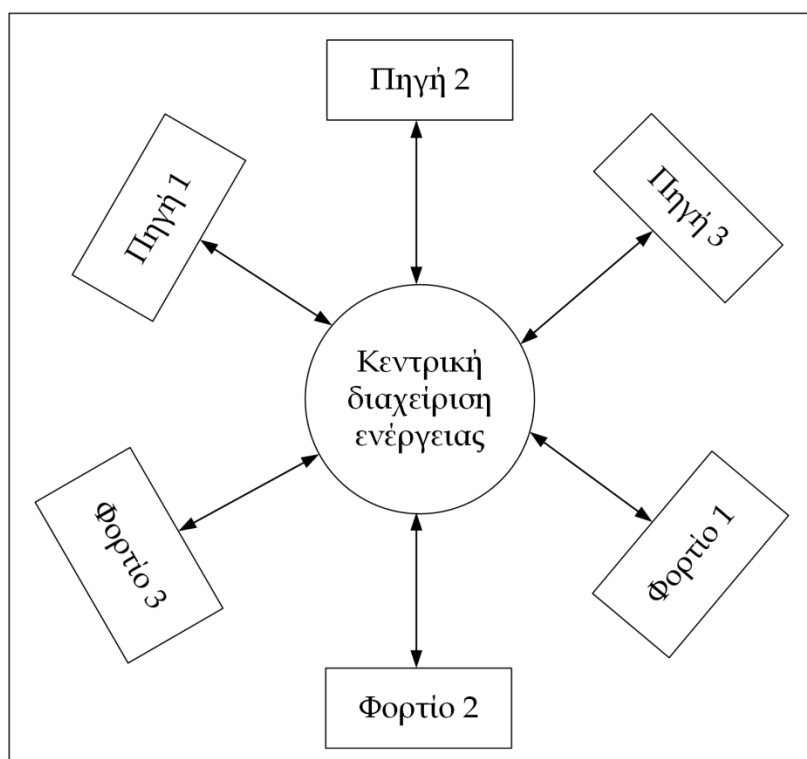
Στη βιβλιογραφία, τα EMS για τα μικροδίκτυα έχουν κατανεμηθεί σε δύο κύριες κατηγορίες [33]:

- (α) τα Συγκεντρωτικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Centralized - EMS), και
- (β) τα Αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Decentralized - EMS).

2.2 Συγκεντρωτικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας

2.2.1 Εισαγωγή

Τα συγκεντρωτικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Centralized Energy Management System - CEMS) είναι ιεραρχικά συστήματα, όπου ο κεντρικός ελεγκτής βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχίας και λειτουργεί ως ένα συνολικό σύστημα διαχείρισης [34]. Ο έλεγχος των συστημάτων ισχύος μεγάλης κλίμακας συνήθως πραγματοποιείται μέσω ενός κεντρικού συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων [35]. Στην περίπτωση διαχείρισης και ελέγχου των μικροδικτύων, ο κεντρικός ελεγκτής διαχειρίζεται όλα τα στοιχεία του μικροδικτύου, με αποτέλεσμα να είναι υπεύθυνος για την ορθή λειτουργία του συστήματος, διασφαλίζοντας τη ζήτηση φορτίου και την οικονομική λειτουργία του [36]. Οι ελεγκτές στα χαμηλότερα επίπεδα συγκεντρώνουν τα λειτουργικά δεδομένα και τα αποστέλλουν στον κύριο ελεγκτή, ο οποίος με τη σειρά του, μετά την επεξεργασία τους, αποστέλλει τις εντολές λειτουργίας στους ελεγκτές χαμηλότερου επιπέδου και λαμβάνει τις τελικές αποφάσεις. Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζεται η τυπική αρχιτεκτονική ενός CEMS.



Εικόνα 2-1 Τυπική αρχιτεκτονική ενός CEMS

2.2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των CEMS

Οι αρχιτεκτονικές CEMS για τα μικροδίκτυα έχουν εφαρμοστεί κυρίως για τον έλεγχο τους [37]. CEMS με σκοπό τη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας σε μικροδίκτυα παρουσιάστηκε στο [38] και μία παρόμοια μελέτη για μικροδίκτυα DC στο [39]. Ένα CEMS μελετήθηκε και προτάθηκε στο [40], όπου ο κεντρικός ελεγκτής συλλέγει όλες τις πληροφορίες από τις μονάδες παραγωγής και παράγει αναφορές σχετικά με την ενεργό και άεργο ισχύ της κάθε συσκευής του μικροδικτύου. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια ισορροπημένη κατανομή ισχύος μεταξύ των ελεγχόμενων μονάδων του μικροδικτύου. Μια άλλη προσέγγιση χρήσης CEMS για τον έλεγχο μικροδικτύων παρουσιάζεται στο [41], όπου αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για τη βέλτιστη ροή ισχύος μεταξύ των μονάδων του μικροδικτύου.

Επιπλέον, CEMS έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας ενός μικροδικτύου [42]. Ένα μοντέλο ελαχιστοποίησης κόστους για τη βέλτιστη διαχείριση ενέργειας ενός μικροδικτύου παρουσιάζεται στο [43]. Στο [44], παρουσιάζεται ένα CEMS για τη βέλτιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του, όπου η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει το κόστος επένδυσης, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας και το κόστος αποκοπής φορτίου. Στο [45], οι συγγραφείς ανέπτυξαν ένα CEMS για την ενεργειακή διαχείριση ενός μικροδικτύου, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος του συγκεκριμένου CEMS είναι η μείωση του κόστους λειτουργίας του μικροδικτύου και παράλληλα η μεγιστοποίηση του κέρδους από την συναλλαγή ενέργειας με το κεντρικό δίκτυο.

Το κύριο πλεονέκτημα των συγκεντρωτικών συστημάτων είναι η ελαχιστοποίηση των αλληλοσυγκρούσεων κατά τη λειτουργία, επειδή όλα αποφασίζονται στο υψηλότερο επίπεδο. Επίσης, δεδομένου ότι όλες οι πληροφορίες από τις κατανεμημένες πηγές ενέργειας καταλήγουν στον κύριο ελεγκτή, όπου πραγματοποιείται η επιτήρηση της λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος, ο προσδιορισμός των βέλτιστων λύσεων και η εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης πραγματοποιούνται εύκολα και αποτελεσματικά ώστε να επιτευχθεί η οικονομική και αποδοτική λειτουργία ενός μικροδικτύου. Προφανώς, στα πλεονεκτήματα των CEMS, περιλαμβάνεται η δυνατότητα επιτήρησης της λειτουργίας ενός μικροδικτύου σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, εάν ένα CEMS έχει σχεδιαστεί σωστά τότε παρέχει

ισχυρή εποπτεία και ευρύ έλεγχο του μικροδικτύου. Επιπλέον, τα CEMS παρέχουν τη δυνατότητα της προστασίας εμπιστευτικών και ιδιωτικών πληροφοριών σε μία κεντρική μονάδα [46-56].

Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα στη χρησιμοποίηση ενός CEMS. Καθώς τα συστήματα γίνονται μεγαλύτερα σε μέγεθος και πιο περίπλοκα, η υπολογιστική ισχύς της κεντρικής μονάδας πρέπει να είναι σύμφωνη και ικανή για την εκτέλεση της διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου των συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Το συγκεκριμένο γεγονός μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη για μεγάλες και ισχυρές κεντρικές μονάδες, οι οποίες αυξάνουν το κόστος του συστήματος και το κάνουν λιγότερο ευέλικτο. Επιπλέον, αν υπάρχει οποιαδήποτε αλλαγή στη διαμόρφωση του μικροδικτύου τότε χρειάζεται η κεντρική στρατηγική ελέγχου να αναβαθμίζεται και σε πολλές περιπτώσεις να σχεδιάζεται από την αρχή. Επίσης, ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα αποτελεί το γεγονός ότι εάν υπάρξει κάποιο σφάλμα και η κύρια κεντρική μονάδα δεν λειτουργεί τότε ολόκληρο το σύστημα καταρρέει.

Καταλήγοντας, η χρήση CEMS είναι συνήθως πιο κατάλληλη για τις ακόλουθες περιπτώσεις μικροδικτύων [57-59]:

- Σε μικροδίκτυα μικρής κλίμακας όπου όλη η πληροφορία συγκεντρώνεται κεντρικά και η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται με χαμηλό κόστος επικοινωνίας και χρόνου εκτέλεσης υπολογισμών.
- Σε μικροδίκτυα όπου όλες οι μονάδες έχουν κοινό στόχο, οπότε το CEMS μπορεί να διαχειριστεί το μικροδίκτυο ως μία και μοναδική οντότητα.
- Σε μικροδίκτυα όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εγκαταστάσεις όπου απαιτείται προστασία των δεδομένων, π.χ. σε στρατιωτικές μονάδες.
- Σε μικροδίκτυα που δεν απαιτούν υψηλή ευελιξία και δυνατότητες επέκτασης.

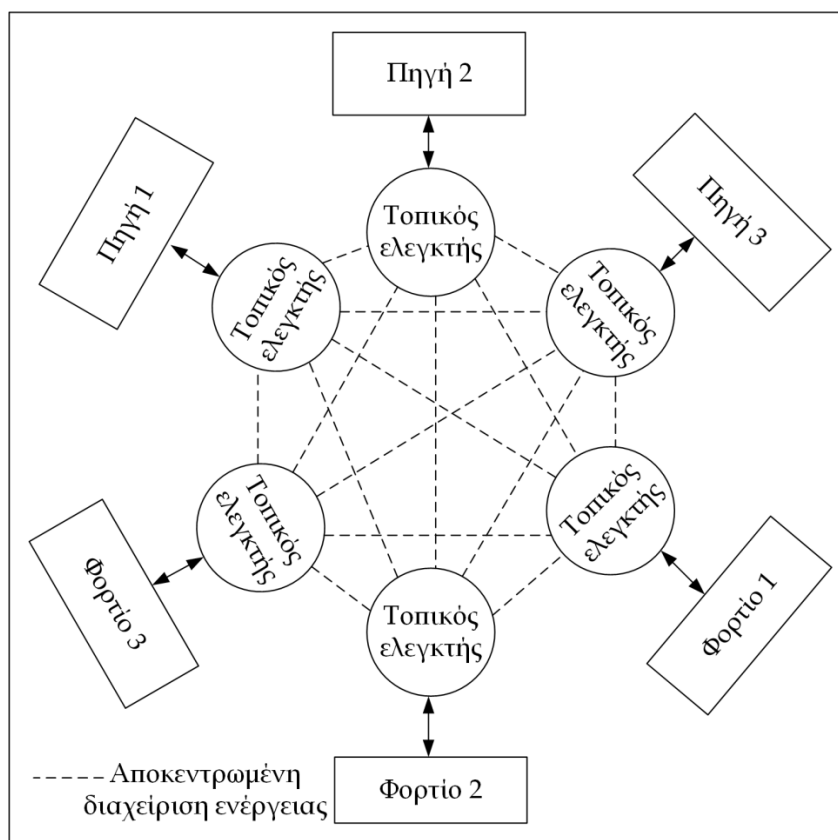
2.3 Αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας

2.3.1 Εισαγωγή

Τα αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Decentralized Energy Management System – DEMS) βασίζονται σε ένα δίκτυο αυτόνομων τοπικών ελεγκτών, χωρίς

την ύπαρξη ενός μόνο κεντρικού ελεγκτή [60]. Κάθε στοιχείο του συστήματος είναι εφοδιασμένο με μία μονάδα ελέγχου και ο καθένας ελεγκτής είναι υπεύθυνος για το αντίστοιχο στοιχείο. Στα αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, οι ελεγκτές μπορούν να επικοινωνούν και να διαπραγματεύονται απευθείας μεταξύ τους, προκειμένου να επιτυγχάνουν τους στόχους τους χωρίς κάποια κεντρική επιρροή [61]. Προκειμένου αυτή η προσέγγιση να είναι ρεαλιστική, είναι ουσιώδης η ύπαρξη τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένων αλγορίθμων.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της αποκεντρωμένης διαχείρισης ενέργειας είναι η υψηλή αξιοπιστία που αποδίδει στο σύστημα που εφαρμόζεται, καθώς στην περίπτωση εμφάνισης βλάβης σε οποιοδήποτε ελεγκτή δεν επηρεάζεται το υπόλοιπο σύστημα και μπορεί να λειτουργήσει χωρίς να επηρεάζεται η συνολική απόδοση του [62]. Επίσης, οι αποκεντρωμένες προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές ελέγχου που ενσωματώνουν εφαρμογές υπολογιστικής νοημοσύνης [63].



Εικόνα 2-2 Τυπική αρχιτεκτονική ενός DEMS

2.3.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση των DEMS

Τα DEMS έχουν μεγάλη εφαρμογή σε μικροδίκτυα, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου των μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ξεχωριστά, διατηρώντας την συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ μονάδων παραγωγής και κατανάλωσης σταθερή. Στο [64], προτείνεται ένα DEMS για τη βέλτιστη λειτουργία ενός διασυνδεδεμένου μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του κόστους των μονάδων παραγωγής, του κόστους των συσσωρευτών και τη μείωση των απωλειών ισχύος. Στο [65], το αναπτυγμένο DEMS δεν απαιτεί οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ των μονάδων του μικροδικτύου αλλά βασίζεται σε τοπικές μετρήσεις, με αποτέλεσμα τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος ακόμα και σε απότομες μεταβολές του φορτίου.

Πολλές εργασίες και άρθρα έχουν πραγματοποιηθεί παρουσιάζοντας τη σύγκριση μεταξύ των CEMS και DEMS. Για παράδειγμα, στο [66] εντοπίζονται και συγκρίνονται τα πλεονεκτήματα της CEMS και DEMS αρχιτεκτονικής. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το CEMS αποτελεί μια καλή λύση για μικρής κλίμακας μικροδίκτυα, αλλά το DEMS προσφέρει ένα πιο ευέλικτο σύστημα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρήσης μιας αποκεντρωμένης αρχιτεκτονικής σε μικροδίκτυο είναι το γεγονός ότι προσδίδει στο μικροδίκτυο πολύ μεγαλύτερες πιθανότητες μερικής λειτουργίας σε περιπτώσεις που παρουσιάζονται δυσλειτουργίες σε διάφορα μέρη του. Επιπλέον, χάρη στις πρόσφατες προόδους των μικροελεγκτών, το κόστος των DEMS έχει μειωθεί σημαντικά, οπότε η αποκεντρωμένη προσέγγιση μπορεί να παρουσιάσει χαμηλότερο επενδυτικό κόστος σε σύγκριση με ένα συγκεντρωτικό σύστημα, όπου απαιτείται ένας ακριβός κεντρικός διακομιστής. Οπότε, η χρήση του DEMS προσδίδει βέλτιστη κατανομή της ισχύος σε ένα μικροδίκτυο και αποτελεί μια οικονομικά εφικτή λύση [67].

Καταλήγοντας, η χρήση DEMS είναι επιθυμητή όταν [68-70]:

- Το μέγεθος του μικροδικτύου είναι μεγάλο ή οι μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και τα φορτία είναι ευρέως διασκορπισμένα, καθιστώντας τη συλλογή των δεδομένων σε κεντρική μονάδα δύσκολη ή δαπανηρή.
- Οι μονάδες του μικροδικτύου έχουν δικούς τους στόχους και απαιτούν συστήματα τοπικής λήψης αποφάσεων

- Απαιτούνται περιοδικές και γρήγορες αναδιοργανώσεις στο μικροδίκτυο, όπως η προσθήκη ή αφαίρεση μονάδων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η προσέγγιση της κεντρικής διαχείρισης ενέργειας παρουσιάζεται ως βέλτιστη χρήση σε μικροδίκτυα όπου όλες οι μονάδες του μοιράζονται τα ίδια συμφέροντα. Ως εκ τούτου, οι εφαρμογές του είναι λίγες καθώς χρησιμοποιούνται σε μικροδίκτυα, όπου υπάρχει ένας περιορισμένος αριθμός ελεγχόμενων συσκευών. Ωστόσο, τα μικροδίκτυα που ελέγχονται από ένα DEMS αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών, καθώς προσφέρουν υψηλό επίπεδο ευελιξίας .

Κεφάλαιο 3:

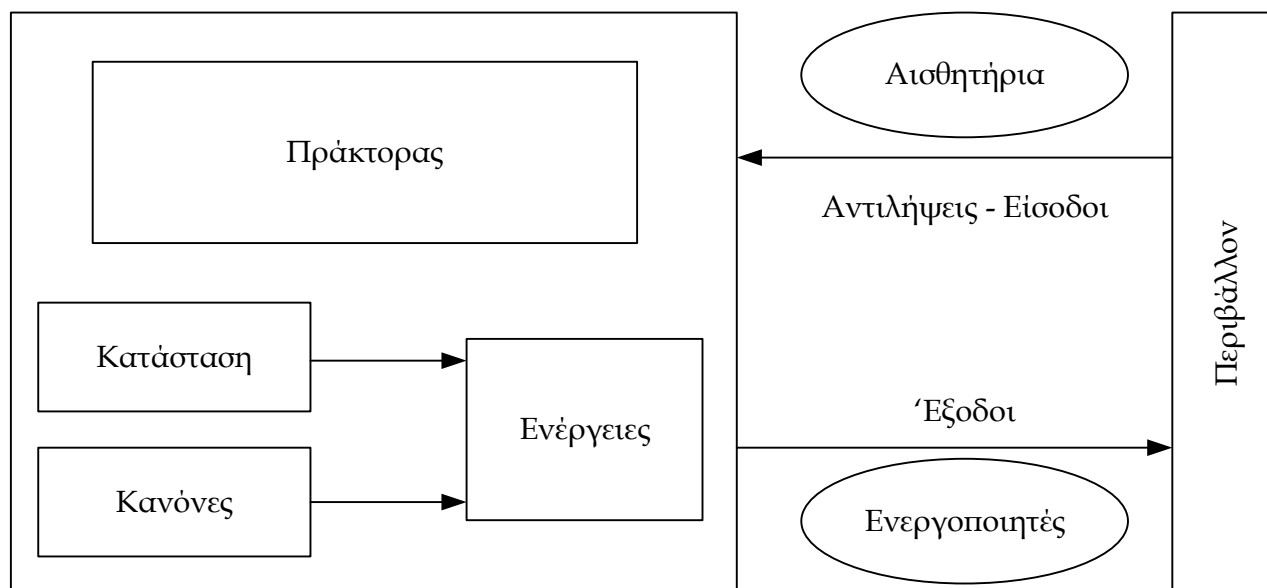
Ευφυείς Πράκτορες

3 Ευφυείς Πράκτορες

3.1 Εισαγωγή

Οι πράκτορες (agents) και ειδικότερα οι ευφυείς πράκτορες (intelligent agents) αποτελούν σύγχρονα συστήματα του κλάδου της τεχνητής νοημοσύνης, έχοντας προσφέρει ριζικές αλλαγές στην επικοινωνία μεταξύ χρήστη και λογισμικού, προσφέροντας παράλληλα συνδυασμό μεθόδων ως προς την επίλυση προβλημάτων. Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει αισθητή η παρουσία των ευφύων πρακτόρων σε πληθώρα εφαρμογών, όπως είναι η αναζήτηση πληροφοριών στο διαδίκτυο, η παροχή υπηρεσιών εξυπηρέτησης πελατών, καθώς και ο έλεγχος σωστής λειτουργίας μονάδων.

Ένας ευφυής πράκτορας (Intelligent Agent - IA) είναι μια αυτόνομη οντότητα που παρακολουθεί το περιβάλλον μέσω αισθητήρων και ενεργεί επάνω σε αυτό χρησιμοποιώντας ενεργοποιητές. Ο ευφυής πράκτορας επεξεργάζεται τις ληφθείσες πληροφορίες από το περιβάλλον, κάνει συγκρίσεις με ορισμένους κανόνες, διερευνά πιθανές αποφάσεις και τελικά επιλέγει τη βέλτιστη λύση με σκοπό την επίτευξη των στόχων του [71, 72]. Στην Εικόνα 3-1 παρουσιάζεται η λειτουργία ενός ευφυούς πράκτορα.



Εικόνα 3-1 Λειτουργία ενός ευφυούς πράκτορα

Ένας ευφυής πράκτορας πρέπει να κατανοεί το περιβάλλον που δρα, καθώς ο τύπος του περιβάλλοντος καθορίζει τη συμπεριφορά του πράκτορα.

Τα είδη των περιβαλλόντων μπορούν να περιγραφούν με τους ακόλουθους όρους [73]:

- Προσβάσιμα ή Μη Προσβάσιμα (Accessible vs Inaccessible)
- Αιτιοκρατικά ή Μη Αιτιοκρατικά (Deterministic vs not Deterministic)
- Επεισοδιακά ή Μη Επεισοδιακά (Episodic vs not Episodic)
- Δυναμικά ή Στατικά (Dynamic vs Static)
- Διακριτά ή Συνεχή (Discrete vs Continuous)

Καθώς ο ευφυής πράκτορας έχει αντιληφθεί το περιβάλλον του, μπορεί να αποφασίσει τις δράσεις του με σκοπό την επίτευξη των στόχων του. Οπότε, για να περιγραφεί ένας πράκτορας πρέπει να οριστούν οι Αντιλήψεις του, οι Δράσεις του, οι Στόχοι του και το Περιβάλλον του (Percepts, Actions, Goals, Environment – PAGE).

Ένα βασικό στοιχείο για τον προσδιορισμό ενός ευφυή πράκτορα είναι η λογική του, που μπορεί να οριστεί μαθηματικά ως συνάρτηση. Προκειμένου να προσδιοριστεί η λειτουργία ενός πράκτορα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα:

- Το σύνολο των δυνατών καταστάσεων του περιβάλλοντος: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$
- Το σύνολο των δυνατών ικανοτήτων του πράκτορα: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$
- Οι αντιλήψεις του πράκτορα: P
- Το σύνολο των δυνατών εσωτερικών καταστάσεων: $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$

Η συνάρτηση του πράκτορα μπορεί να οριστεί ως $S \rightarrow A$.

Τα πέντε κοινά χαρακτηριστικά των ευφύων πρακτόρων είναι [74, 75]:

- Αυτονομία: Ο ευφυής πράκτορας πρέπει να διακατέχει το στοιχείο της αυτονομίας, δηλαδή να έχει την ικανότητα να ενεργεί με σκοπό την ολοκλήρωση διαφόρων εργασιών χωρίς την ενεργοποίηση από το χρήστη.
- Κοινωνικότητα: Ο ευφυής πράκτορας πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες με σκοπό να αποκτά πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με την παρούσα κατάσταση του περιβάλλοντος ώστε να μπορεί να πετύχει τους αντικειμενικούς του σκοπούς.

- Ικανότητα συνεργασίας: Ο ευφυής πράκτορας πρέπει να έχει τη δυνατότητα συνεργασίας με άλλους πράκτορες με σκοπό την επίτευξη είτε αμοιβαίων στόχων ή να επιτυγχάνει ο καθένας τους δικούς του στόχους.
- Προσαρμοστική συμπεριφορά: Ο ευφυής πράκτορας πρέπει να μπορεί να εξετάζει το περιβάλλον και τις επιτυχημένες προηγούμενες ενέργειές του με σκοπό να αυξάνονται οι πιθανότητες επιτυχίας των νέων ενεργειών του.
- Αξιοπιστία: Ο πράκτορας πρέπει να δίνει ειλικρινή αναφορά στο χρήστη του και ο χρήστης να είναι πεπεισμένος ότι ο πράκτορας ενεργεί για το συμφέρον του.

Σύμφωνα με τους Russell and Norving [76, 77], υπάρχουν πέντε διαφορετικά είδη πρακτόρων:

- Απλοί αντιδραστικοί πράκτορες (Simple reflex agents): Αυτοί οι πράκτορες λαμβάνουν κίνητρα και αντιδρούν άμεσα στο περιβάλλον σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες.
- Αντανακλαστικοί Πράκτορες με Εσωτερικό Μοντέλο (Model – based reflex agents): Αυτοί οι πράκτορες ερμηνεύουν τις πληροφορίες που λαμβάνουν από το περιβάλλον για να καθορίσουν τη δράση τους.
- Πράκτορες στόχου (Goal based agents): Αυτοί οι πράκτορες αποτελούν μια επέκταση των αντιδραστικών πρακτόρων με εσωτερικό μοντέλο, με τη διαφορά ότι είναι σε θέση να θέτουν στόχους για τη λήψη αποφάσεων.
- Πράκτορες βασισμένοι στη χρησιμότητα (Utility agents): Η εφαρμογή μπορεί να απεικονιστεί σαν μια συνάρτηση που αντιστοιχεί κάθε κατάσταση με ένα πραγματικό αριθμό. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός τόσο μεγαλύτερος ο βαθμός ικανοποίησης. Οι πράκτορες προσπαθούν με τις δράσεις τους να μεγιστοποιήσουν τη συνάρτηση εφαρμογής. Αυτοί οι πράκτορες χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα εποπτείας και επικοινωνούν με τους άλλους πράκτορες με σκοπό να αντιμετωπίσουν καταστάσεις όταν οι στόχοι των πρακτόρων βρίσκονται σε σύγκρουση.
- Πράκτορες με δυνατότητα μάθησης (Learning agents): Αυτοί οι πράκτορες χρησιμοποιούν τη μάθηση, η οποία παρέχει το πλεονέκτημα στους πράκτορες να λειτουργούν σε άγνωστα περιβάλλοντα.

Η αρχιτεκτονική ενός πράκτορα σχεδιάζεται σε επίπεδα, τα οποία αλληλεπιδρούν και είναι ιεραρχικά διευθετημένα. Δύο είδη αρχιτεκτονικών παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία με βάση τη ροή ελέγχου [78].

- Αρχιτεκτονική Οριζόντιας Ροής Ελέγχου: Σε αυτή την αρχιτεκτονική, τα επίπεδα (layers) του πράκτορα συνδέονται άμεσα με τους αισθητήρες εισόδου και λειτουργούν ως ανεξάρτητοι πράκτορες. Ένα σύστημα ελέγχου είναι υπεύθυνο για το ποιο επίπεδο θα ενεργοποιηθεί κάθε φορά.
- Αρχιτεκτονική Κατακόρυφης Ροής Ελέγχου: Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, η εντολή ελέγχου περνάει από κάθε επίπεδο, έως ότου το τελευταίο επίπεδο να είναι έτοιμο να εκτελέσει τη δράση της εξόδου. Υπάρχουν δύο διακεκριμένες κατηγορίες στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, ο έλεγχος ενός περάσματος και ο έλεγχος δύο περασμάτων. Στην επιλογή του ενός περάσματος, ο έλεγχος ρέει μέσα από κάθε επίπεδο μέχρι το τελικό επίπεδο, το οποίο παράγει τη δράση της εξόδου. Στην αρχιτεκτονική δύο περασμάτων, ο έλεγχος ρέει μέσα από κάθε επίπεδο, όπως στην επιλογή ενός περάσματος, αλλά η ροή επιστρέφει στα πρώτα επίπεδα όπου παράγεται η δράση της εξόδου.

3.2 Συστήματα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων

Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα ευφυών πολλαπλών πρακτόρων (Multi Agent System – MAS) αποτελούν την κύρια τάση της έρευνας και ανάπτυξης συστημάτων DEMS, εξαιτίας των σημαντικών ιδιοτήτων τους [79]. Σε ένα MAS, οι ευφείς πράκτορες αλληλεπιδρούν εντός ενός δεδομένου περιβάλλοντος. Με την επέκταση αυτού του ορισμού, το MAS μπορεί να οριστεί ως ένα σύστημα που αποτελείται από δύο ή περισσότερους πράκτορες, όπου κάθε ένας από αυτούς έχει τους δικούς του στόχους και εκτελεί τη λειτουργία του αυτόνομα [80]. Η γενική αρχιτεκτονική ενός DEMS βασισμένο σε MAS έχει περιγραφεί στο [81].

Στο πλαίσιο των μικροδικτύων, έχουν αναπτυχθεί με επιτυχία διάφορα συστήματα DEMS που βασίζονται σε συστήματα πολλαπλών πρακτόρων με σκοπό την ορθή λειτουργία τους [82]. Ένα MAS για την ορθή λειτουργία ενός μικροδικτύου σε πραγματικό χρόνο παρουσιάζεται στο [83], όπου οι κύριοι στόχοι του είναι ο βέλτιστος προγραμματισμός της παραγωγής, η

βέλτιστη διαχείριση της ζήτησης και η σταθερότητα της λειτουργίας του συστήματος διανομής. Ένα DEMS βασισμένο σε MAS για τη βέλτιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου συνδεδεμένου στο κεντρικό δίκτυο παρουσιάζεται στο [84], όπου όλοι οι καταναλωτές, οι μονάδες αποθήκευσης, οι μονάδες παραγωγής και το δίκτυο ελέγχονται από ευφυείς πράκτορες. Στη συγκεκριμένη εργασία, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο χρόνος λήψης αποφάσεων με τη προτεινόμενη προσέγγιση είναι μικρότερος σε σχέση με τη χρήση μιας κεντρική προσέγγισης λήψης αποφάσεων. Στο [85], το MAS χρησιμοποιήθηκε για ένα διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο, όπου το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης ενέργειας αναπτύχθηκε με σκοπό την ενεργειακή ισορροπία μεταξύ των μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Ένα DEMS με βάση ένα MAS για την αποτελεσματική λειτουργία ενός μικροδικτύου χρησιμοποιείται στο [86], όπου ο στόχος είναι η κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών και η θερμική άνεση των καταναλωτών. Στο [87], το MAS - DEMS αποσκοπεί στη μείωση της ζήτησης αιχμής στο μικροδίκτυο και στην ελαχιστοποίηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στο [88] οι πράκτορες αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, του κόστους εκπομπών και των απωλειών ισχύος.

Επίσης, MAS - DEMS σε μικροδίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της συχνότητας [89], για τη διαχείριση των κρίσιμων φορτίων [90], για τον έλεγχο της τάσης από τις κατανεμημένες μονάδες παραγωγής ενέργειας [91], καθώς και για τη διασύνδεση των μικροδικτύων με το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [92]. Επιπλέον, MAS έχουν εφαρμοστεί για τη προσομοίωση της αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό τη μεγιστοποίηση των εσόδων και των κερδών από τα μικροδίκτυα [93]. Οι προαναφερθείσες μελέτες καταδεικνύουν την ευεργετική εφαρμογή των MAS σε DEMS στα μικροδίκτυα.

Κεφάλαιο 4:

Τεχνικές Υπολογιστικής Νοημοσύνης

4 Τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης

4.1 Εισαγωγή

Τα μικροδίκτυα αποτελούν την επόμενη εξέλιξη των ηλεκτρικών συστημάτων και δικτύων, όχι μόνο στις αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αλλά και στις αστικές κοινότητες. Καθώς αναμένεται να συνυπάρχουν τα μικροδίκτυα με τα παραδοσιακά ηλεκτρικά δίκτυα, η διαδικασία σχεδιασμού τους πρέπει να αντιμετωπιστεί με οικονομική σκοπιμότητα, ως εγγύηση μακροπρόθεσμης σταθερότητας. Ο σχεδιασμός συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας των μικροδικτύων είναι μια περίπλοκη διαδικασία λόγω των υφισταμένων εναλλακτικών λύσεων, των στόχων, των περιορισμών και των αβεβαιοτήτων. Συνήθως στον προγραμματισμό των στόχων αντιπαραβάλλεται ο ένας με τον άλλο και ως εκ τούτου εμφανίζονται διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

Αρκετά συστήματα ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας έχουν αναπτυχθεί κατά βάση με χρήση παραδοσιακών προσεγγίσεων ελέγχου, όπως μέθοδοι γραμμικού και μη γραμμικού προγραμματισμού [94-99], και μέθοδοι βασισμένες σε κανόνες και σε δυναμικό προγραμματισμό [100-107]. Καθώς όμως τα μικροδίκτυα γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, ο έλεγχος με κλασσικές προσεγγίσεις έχει αποδειχθεί ανεπαρκής και για αυτό το λόγο προσεγγίσεις με χρήση τεχνητής νοημοσύνης έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των EMS.

Ένα σημαντικό μέρος των EMS που έχουν αναπτυχθεί, χρησιμοποιούν τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης, όπως Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic), Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks), Ασαφείς Γνωστικοί Χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps) κτλ.. Ένα EMS βασισμένο σε ασαφή λογική με σκοπό την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων ισχύος και διατηρώντας τη κατάσταση των συσσωρευτών σε υψηλά επίπεδα με σκοπό τη βελτίωση της διάρκειας ζωής τους, παρουσιάζεται στο [108]. Στο [109], οι συγγραφείς ανέπτυξαν ένα EMS με ασαφή λογική για ένα αυτόνομο μικροδίκτυο. Οι πειραματικές δοκιμές έδειξαν ότι το EMS διασφαλίζει την αποδοτική χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένα EMS για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας και των εκπομπών αερίων ρύπων ενός μικροδικτύου, προτάθηκε στο

[110], όπου τα ποσοστά φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών προσδιορίζονται από ένα σύστημα βασισμένο στην ασαφή λογική. Ένα EMS που χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα προτάθηκε στο [111] για ένα διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο. Στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση της εισαγωγής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο και η μεγιστοποίηση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές. Επίσης, ρυθμίζεται το κατώτερο όριο εκφόρτισης των συσσωρευτών με σκοπό τη βελτίωση της διάρκειας ζωής τους. Στο [112] προτάθηκε ένα EMS που χρησιμοποιεί ασαφείς γνωστικούς χάρτες για τον έλεγχο των μονάδων ενός αυτόνομου μικροδικτύου και συγκρίθηκε με ένα EMS που χρησιμοποιεί ασαφούς λογικής για τον ίδιο λόγο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση EMS με ασαφείς γνωστικούς χάρτες αποδίδει ένα αποτελεσματικότερο και οικονομικότερο μικροδίκτυο.

Οπότε, σύμφωνα και με το Κεφάλαιο 3, ο απωκεντρωμένος τρόπος λειτουργίας ενός ενεργειακού συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών πρακτόρων με τη βοήθεια τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης. Η εφαρμογή της θεωρίας πολλαπλών πρακτόρων βοηθά στην επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης της ενέργειας σε συστήματα καταναμημένης ενέργειας, εκμεταλλεύοντας ένα θεωρητικό πλαίσιο που βασίζεται στη συνεργασία μεταξύ των πρακτόρων. Εντούτοις, σε πολλές περιπτώσεις, η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλό κόστος των δικτύων επικοινωνίας, δεδομένου ότι απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων επικοινωνίας για την επίτευξη της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ τους, για την αποτελεσματική λειτουργία των μικροδικτύων. Επιπλέον, οι στόχοι κάθε πράκτορα επηρεάζονται από τις ενέργειες των υπόλοιπων πρακτόρων, ενώ είναι συχνά πιθανό ότι η συνεργασία των πρακτόρων δεν μπορεί να καθιερωθεί, επειδή έχουν ανταγωνιστικούς στόχους ή διαφορετικές στρατηγικές που επηρεάζουν τις ενέργειές του. Οι τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης που αναφέρθηκαν δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε ενεργειακά προβλήματα όπου οι πράκτορες δεν συνεργάζονται. Το μοντέλο μη συνεργατικών πρακτόρων υιοθετείται ευρέως στην περίπτωση που συμμετέχουν ανταγωνιστικοί πράκτορες. Η Θεωρία Παιγνίων παρέχει ένα εννοιολογικό και αναλυτικό πλαίσιο με ένα σύνολο μαθηματικών εργαλείων που επιτρέπουν τη μελέτη περίπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ παιχτών / πρακτόρων, ακόμη και σε περίπτωση μη συνεργασίας. Η θεωρία των παιγνίων έχει προταθεί και χρησιμοποιηθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για να

αντιπροσωπεύει τις αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων και να επιτυγχάνει τις βέλτιστες στρατηγικές στις περιπτώσεις που οι πράκτορες δεν συνεργάζονται μεταξύ τους [113-116].

Τα παίγνια ή η Θεωρία Παιγνίων (game theory), εντάσσονται στον ευρύτερο χώρο της τεχνητής νοημοσύνης και αποτελούν μια ραγδαία αναπτυσσόμενη νέα επιστήμη. Ξεκίνησε σαν κλάδος των οικονομικών [117] με κύριο αντικείμενό της την ανάλυση των αποφάσεων σε καταστάσεις στρατηγικής αλληλεξάρτησης. Ένας χαρακτηριστικός ερευνητής του χώρου ήταν ο John Forbes Nash, ο οποίος γενίκευσε το πρόβλημα σε παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος και προσέφερε σαν λύση την ισορροπία Nash (Nash Equilibrium) [118]. Η έννοια της ισορροπίας Nash είναι η πιο ευνοϊκή λύση για να μπορούν οι παίχτες να επιτύχουν τους βέλτιστους στόχους τους στα μη συνεργατικά παίγνια. Οπότε, στόχος της Θεωρίας Παιγνίων, είναι να χρησιμοποιήσει τα μαθηματικά και την τεχνητή νοημοσύνη, ως μέσο ανάλυσης και επίλυσης προβλημάτων που αφορούν τον τρόπο λήψης αποφάσεων, τόσο σε καταστάσεις σύγκρουσης όσο και σε καταστάσεις συνεργασίας.

Στο πλαίσιο έρευνας των EMS για μικροδίκτυα, η Θεωρία Παιγνίων αποτελεί ένα καινούργιο πεδίο έρευνας. Στο [119] προτείνεται η χρήση της θεωρίας παιγνίων για τη βέλτιστη διαχείριση και ανταλλαγή ενέργειας, όπου το μικροδίκτυο ενεργεί ως ηγέτης και όλοι οι παραγωγοί ως ακόλουθοι (leader-follower model). Στο προτεινόμενο μοντέλο, οι αβεβαιότητες της ηλιακής ενέργειας και της ζήτησης φορτίου αντιμετωπίζονται με μια στρατηγική τιμολόγησης. Σε αυτή την προσέγγιση, οι στόχοι είναι η μεγιστοποίηση της κερδοφορίας και η μέγιστη αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων. Μία αντίστοιχη εργασία όπου χρησιμοποιείται η θεωρία παιγνίων και η ισορροπία κατά Stackelberg μεταξύ του μικροδικτύου και των παραγωγών με σκοπό να εξασφαλιστεί δίκαιο μερίδιο του κέρδους μεταξύ τους, παρουσιάζεται στο [120]. EMS με θεωρία παιγνίων χρησιμοποιήθηκε στο [121], για την ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις της παραγωγής από ανεμογεννήτριες με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου.

Επιπλέον, η θεωρία παιγνίων έχει εφαρμοστεί στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας για την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας [122], σε συστήματα καταναμημένης παραγωγής για την ελαχιστοποίηση του κόστους των πόρων [123], σε συστήματα με σκοπό την εξισορρόπηση φορτίου [124], καθώς και σε συστήματα διαχείρισης της ενεργειακής ζήτησης σε μικροδίκτυα

[125-127]. Επιπλέον, η θεωρία παιγνίων αναμένεται να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για το σχεδιασμό, την ανάλυση, τη διαχείριση ενέργειας και τον έλεγχο των μελλοντικών έξυπνων δικτύων [128].

Οι υπολογιστικές τεχνικές βελτιστοποίησης αποτελούν τμήμα της τεχνητής νοημοσύνης και αναφέρονται σε μια ομάδα μαθηματικών τεχνικών που εστιάζονται στην επιλογή μιας βέλτιστης λύσης (με βάση ορισμένα κριτήρια) από μια σειρά διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων, με λιγότερη υπολογιστική προσπάθεια όταν το πρόβλημα είναι περίπλοκο, μη κυρτό και μη διαφορίσιμο [7]. Πράγματι, η βελτιστοποίηση περιλαμβάνει την εύρεση των καλύτερων διαθέσιμων τιμών κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης δεδομένου ενός καθορισμένου τομέα ή ενός συνόλου περιορισμών. Η γενίκευση της θεωρίας και των τεχνικών βελτιστοποίησης σε άλλες συνθέσεις περιλαμβάνει μια μεγάλη περιοχή εφαρμοσμένων μαθηματικών. Επίσης, είναι χρήσιμες προσεγγίσεις για προβλήματα βελτιστοποίησης όταν οι κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης δεν είναι σε θέση να βρουν τη βέλτιστη λύση και αποτελούν κατάλληλες τεχνικές για να βρεθεί μια βέλτιστη λύση από ένα διακριτό χώρο αναζήτησης.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης των ενεργειακών συστημάτων αντιμετωπίζονται παραδοσιακά με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους στοχεύοντας στο βέλτιστο σχεδιασμό τους και στη βέλτιστη διαστασιολόγησή τους [129-131]. Πέραν των οικονομικών στόχων, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού μπορούν να εξεταστούν άλλοι διαφορετικοί στόχοι, όπως ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος, η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας και η αξιοπιστία.

Οι πιο δημοφιλείς αλγόριθμοι αυτών των τεχνικών βασίζονται είτε σε μεθόδους τροχιάς (trajectory), όπου οι κύριες μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing - SA) και η Αναζήτηση Μεταβλητής Γειτνίασης (Variable Neighbourhood Search - NS), είτε σε μεθόδους βασισμένοι στον πληθυσμό (population - based), όπου κύριες μέθοδοι είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithm - GA) και η θεωρία σμηνών (Particle Swarm Optimization - PSO).

Η PSO χρησιμοποιείται ευρέως στην διαστασιολόγηση και επιλογή παραγωγών ενέργειας για υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η PSO αποτελεί μια αποδοτική μέθοδο βελτιστοποίησης τόσο για συνεχείς όσο και για διακριτές μεταβλητές και υλοποιείται εύκολα με λίγες παραμέτρους.

Η επιλογή των κατάλληλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για ένα μικροδίκτυο αποτελεί τον κύριο λόγο για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του μικροδικτύου. Επιπλέον, οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν ένα σημαντικό πεδίο διερεύνησης. Οπότε, το μέγεθος του προβλήματος δεν αφορά μόνο τις πηγές ενέργειας, αλλά και τις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

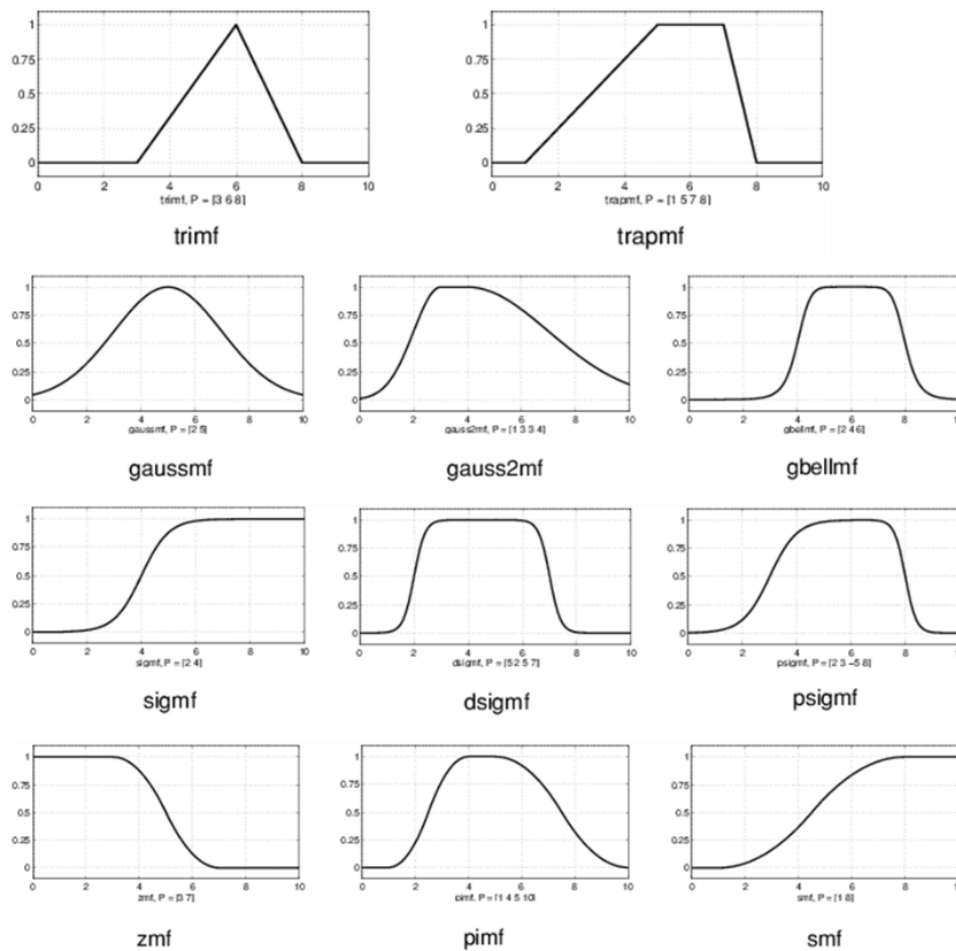
4.2 Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)

Οι ασαφείς λογικοί ελεγκτές οι οποίοι χρησιμοποιούν σύστημα ασαφούς διεπαφής βασισμένο σε θεωρία ασαφών συνόλων έχουν εκτεταμένες εφαρμογές σε διάφορες διαδικασίες ελέγχου [132]. Η χρήση των λειτουργιών ασαφούς λογικής έχει το πλεονέκτημα της επίτευξης λύσης που βασίζεται σε γλωσσικούς ασαφείς κανόνες και μεταβλητές που έχουν σαφείς φυσικές σημασίες.

Ένα ασαφές σύνολο A μπορεί να περιγραφεί ως μια συνάρτηση συμμετοχής $g_a : X \rightarrow [0, 1]$. Ένας πραγματικός ασαφής αριθμός μπορεί να περιγραφεί ως ασαφές σύνολο A πραγματικών αριθμών και ο βαθμός συμμετοχής του, κατά πόσο το σύνολο X ανήκει στο σύνολο A , μπορεί να οριστεί με την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής [133, 134].

$$g_A(x) = \begin{cases} g_L(x), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ g_R(x), & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, A = \{(x, g_a(x)) / x \in X\}. \quad (4.2)$$

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συναρτήσεων συμμετοχής που αναπαριστούν τα ασαφή σύνολα όπως είναι η τριγωνική μορφή, η τραπεζοειδής, η καμπανοειδής, η γκαουσιανή, η σιγμοειδής ή ακόμα και μια συγκεκριμένη μαθηματική τιμή. Το σχήμα της συνάρτησης συμμετοχής επιλέγεται συνήθως με βάση τη βιβλιογραφία ή ανάλογα με το λόγο χρήσης της από ειδικούς. Στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται όλες οι συναρτήσεις συμμετοχής που είναι διαθέσιμες στο fuzzy logic toolkit του Matlab.



Εικόνα 4-1 Συναρτήσεις συμμετοχής στο Matlab

Πηγή: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html#bp78170-2>

Η τριγωνική και τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής είναι οι πιο συνηθισμένες και μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά ως εξής:

$$g_A(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{b-a}\right), & a \leq x \leq b \\ \left(\frac{c-x}{c-b}\right), & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.3)$$

Όπου $x \in A$, $g_A(x) : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ είναι η συνάρτηση συμμετοχής του τριγωνικού ασαφούς αριθμού.

$$g_B(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{b-a}\right), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \left(\frac{d-x}{d-c}\right), & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.4)$$

Όπου $x \in A$, $g_A(x): \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$ είναι η συνάρτηση συμμετοχής του τραπεζοειδούς ασαφούς αριθμού.

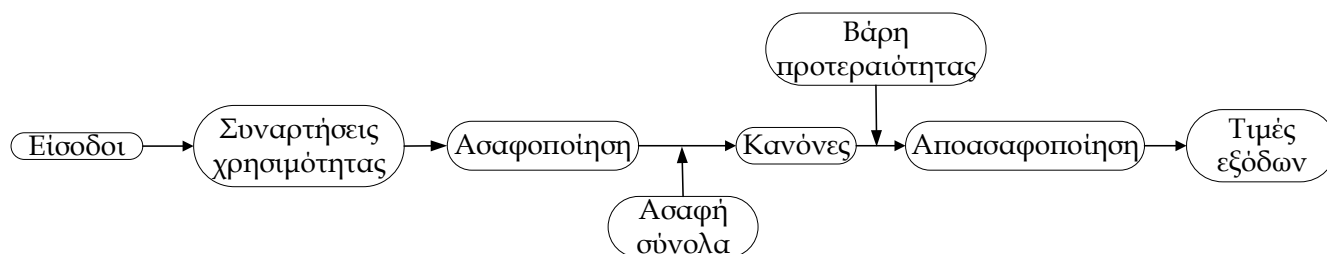
Μεταξύ των ασαφών συνόλων ορίζονται συγκεκριμένες πράξεις όπως είναι η ένωση, η τομή, το γινόμενο, το αλγεβρικό άθροισμα και το συμπλήρωμα ενός ασαφούς συνόλου.

Σε ένα ασαφές σύστημα ελέγχου, τα δεδομένα εισόδου ταξινομούνται στις συναρτήσεις συμμετοχής μέσω των οποίων μετατρέπονται σε ασαφείς τιμές. Στη συνέχεια, τυπικοί ασαφείς κανόνες χρησιμοποιούνται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι τυπικοί ασαφείς κανόνες χρησιμοποιούν τους κανόνες «if-then else» και ένα πρόβλημα με N δεδομένα αποκτά την ακόλουθη μορφή [135]:

If : x_1 is A_{i1} AND x_2 is A_{i2} AND ... x_n is A_{in} THEN D_i

Όπου $D = (D_1, D_2, D_3, \dots, D_k)$ είναι οι αποφάσεις K για ένα πρόβλημα αποφάσεων με N δεδομένα, $x \in X \subseteq \mathbb{R}^n$, $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ και το A_{in} αντιπροσωπεύει το ασαφές σύνολο.

Μετά τη διατύπωση και την εφαρμογή των κανόνων είναι απαραίτητος ο καθορισμός του ασαφούς τύπου συνεπαγωγής, ο οποίος παράγει και υπολογίζει το βαθμό εκπλήρωσης του κανόνα. Τέλος, η διαδικασία της αποασαφοποίησης χρησιμοποιείται με σκοπό την κατάληξη ενός ασαφούς συνόλου σε σαφή αριθμό. Η δομή της ασαφούς λογικής παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-2 Δομή ασαφούς λογικής

4.3 Ασαφείς Γνωστικοί Χάρτες (Fuzzy Cognitive Maps)

Οι Ασαφείς Γνωστικοί Χάρτες (FCMs) αποτελούν επέκταση των γνωστικών χαρτών που εισήχθησαν περί το 1986 από τον Bart Kosko [136, 137]. Το FCM αποτελεί μια μεθοδολογία μοντελοποίησης βασισμένη στην ανθρώπινη γνώση και ανήκει στην κατηγορία των ευέλικτων υπολογιστικών μεθόδων (soft computing methods). Το FCM ενσωματώνει αποτελεσματικά την ανθρώπινη γνώση για τη μοντελοποίηση συστημάτων, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά την ασάφεια και την αβεβαιότητα και έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται σε άγνωστο ή μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Το FCM είναι κατάλληλο να χειρίζεται τις διαθέσιμες πληροφορίες από την αφηρημένη γνώση. Η κατασκευή του FCM βασίζεται κυρίως σε εμπειρογνώμονες που καθορίζουν τις έννοιες κόμβους του μοντέλου και τις αιτιατές διασυνδέσεις μεταξύ κόμβων με βάρη και περιγράφουν το βαθμό και τον είδος της αλληλεπίδρασης μεταξύ κόμβων.

Ένα FCM περιλαμβάνει κόμβους - έννοιες (C_i):

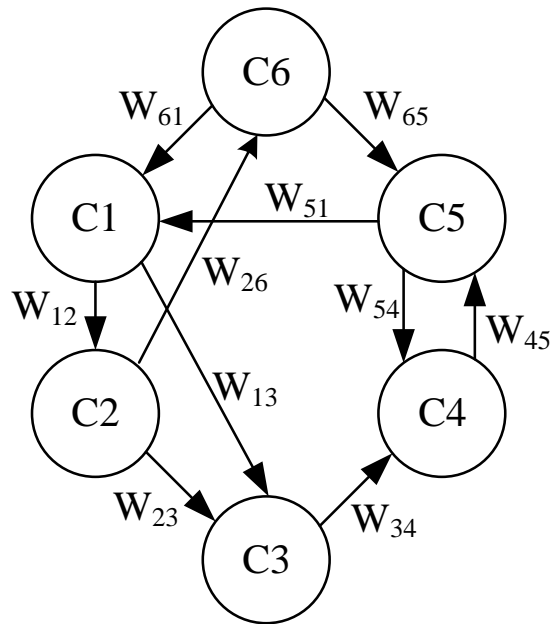
$$C_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

Όπου N είναι το σύνολο των κόμβων. Οι κόμβοι μπορεί να είναι εισοδοι, έξοδοι, κανόνες ή ενδιάμεσες καταστάσεις. Κάθε έννοια χαρακτηρίζεται από μια τιμή (A_i) στο διάστημα $[0,1]$.

$$A_i \in [0,1], \quad i = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

Ένα τυπικό FCM παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-3. Οι έννοιες - κόμβοι (C_i) είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους από βέλη και οι σχέσεις τους εκφράζονται μέσω των βαρών (W_{ij}). Η ανθρώπινη γνώση και η εμπειρία χρησιμοποιείται για να δοθούν τιμές στα βάρη.

$$W_{ij} \in [-1,1], i = 1, \dots, N \text{ και } j = 1, \dots, N \quad (4.7)$$



Εικόνα 4-3 Ένας τυπικός ασαφής γνωστικός χάρτης

Υπάρχουν τρεις τύποι βαρών:

$W_{ij} > 0$, εκφράζει σχέση θετικής αιτιότητας μεταξύ των κόμβων

$W_{ij} < 0$, εκφράζει σχέση αρνητικής αιτιότητας μεταξύ των κόμβων

$W_{ij} = 0$, δεν υπάρχει σχέση αιτιότητας μεταξύ των κόμβων

Οι τιμές των βαρών κυμαίνονται μεταξύ $[-1,1]$ και μπορούν να παρουσιαστούν σε μορφή πίνακα:

$$W_{i,j} = \begin{pmatrix} 0 & W_{12} & W_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{23} & 0 & 0 & W_{26} \\ 0 & 0 & 0 & W_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{45} & 0 \\ W_{51} & 0 & 0 & W_{54} & 0 & 0 \\ W_{51} & 0 & 0 & 0 & W_{65} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Κάθε κόμβος, C_i , έχει μια τιμή A_i . Αυτή η τιμή επηρεάζεται από τους υπόλοιπους κόμβους σύμφωνα με την Εξίσωση 4.9. Το FCM οδηγείται σε μια κατάσταση σύγκλισης μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων [138].

$$A_i(k+1) = f(A_i(k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n W_{ji} A_j(k)) \quad (4.10)$$

Όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων.

Η συνάρτηση $f(x)$ είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης. Έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία τέσσερις συναρτήσεις ενεργοποίησης [139].

1. Σιγμοειδής συνάρτηση. Η συνάρτηση παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4-11.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (4.11)$$

Όπου $\lambda \in (0, +\infty)$, καθορίζει την κλίση της συνάρτησης. Για μια μεγάλη τιμή, προσομοιώνει μια διακριτή συνάρτηση και για μια μικρή τιμή, προσομοιώνει μια γραμμική συνάρτηση.

2. Υπερβολική εφαιπτομενική συνάρτηση. Η συνάρτηση παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4.12.

$$f(x) = \frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}} \quad (4.12)$$

Η έξοδος της συνάρτησης είναι στο διάστημα $[-1,1]$ για μια τιμή του λ κοντά στο 5.

3. Βηματική συνάρτηση. Η συνάρτηση παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4.13.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq T \\ 1, & x > T \end{cases} \quad (4.13)$$

Η τιμή της παραμέτρου T κυμαίνεται στο διάστημα $[0,1]$. Με σκοπό τη μείωση της υποκειμενικότητας της βηματικής συνάρτησης προτείνεται μια τιμή του T ίση με 0.5.

4. Γραμμική συνάρτηση ορίου. Η συνάρτηση είναι παράγωγη της βηματικής συνάρτησης και παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4.14.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq T \\ (x - T), & x > T \end{cases} \quad (4.14)$$

Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι η πιο διαδεδομένη συνάρτηση, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει σε σχέση με τις υπόλοιπες.

4.4 Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Η αρχή ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης με τη χρήση σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο [140] και αποτελεί μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης που βασίζεται στη λογική κίνηση ενός σμήνους. Κάθε μεμονωμένη οντότητα του σμήνους καλείται σωματίδιο (particle) και ο αριθμός των σωματιδίων που συνθέτουν το σμήνος ονομάζεται πληθυσμός. Το κάθε σωματίδιο αποτελεί την πιθανή λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης ενώ ο πληθυσμός το σύνολο σε κάθε δεδομένο χρονικό βήμα σύγκλισης. Κάθε σωματίδιο αντιμετωπίζεται ως σημείο ενός χώρου N διαστάσεων, και η θέση του i -στού σωματιδίου και οι συντεταγμένες της θέσης του συμβολίζονται με x_{in} ($n= 1, \dots, N$). Η επίδοση κάθε σωματιδίου μετριέται σύμφωνα με μία προκαθορισμένη μαθηματική συνάρτηση, η οποία ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση και η τιμή της εξαρτάται από τις συντεταγμένες της θέσης του σωματιδίου:

$$F = F(\bar{X}_i) = F(x_{i1}, \dots, x_{in}, \dots, x_{iN}) \quad (4.15)$$

Η θέση του σωματιδίου βελτιώνεται καθώς ελαττώνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η προηγούμενη καλύτερη θέση του i -στού σωματιδίου είναι η μέχρι στιγμής καλύτερη θέση στην οποία βρέθηκε το σωματίδιο. Η νέα θέση του i -στού σωματιδίου δίνεται από τη σχέση

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4.16)$$

Η ταχύτητα του i -στου σωματιδίου μετά από μία σταθερά χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 \text{rnd}(t)[p_i(t) - x_i(t)] + c_2 \text{rnd}(t)[g(t) - x_i(t)] \quad (4.17)$$

Όπου: $p_i(t)$ είναι η θέση του σωματιδίου που παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή από όλες τις γενεές

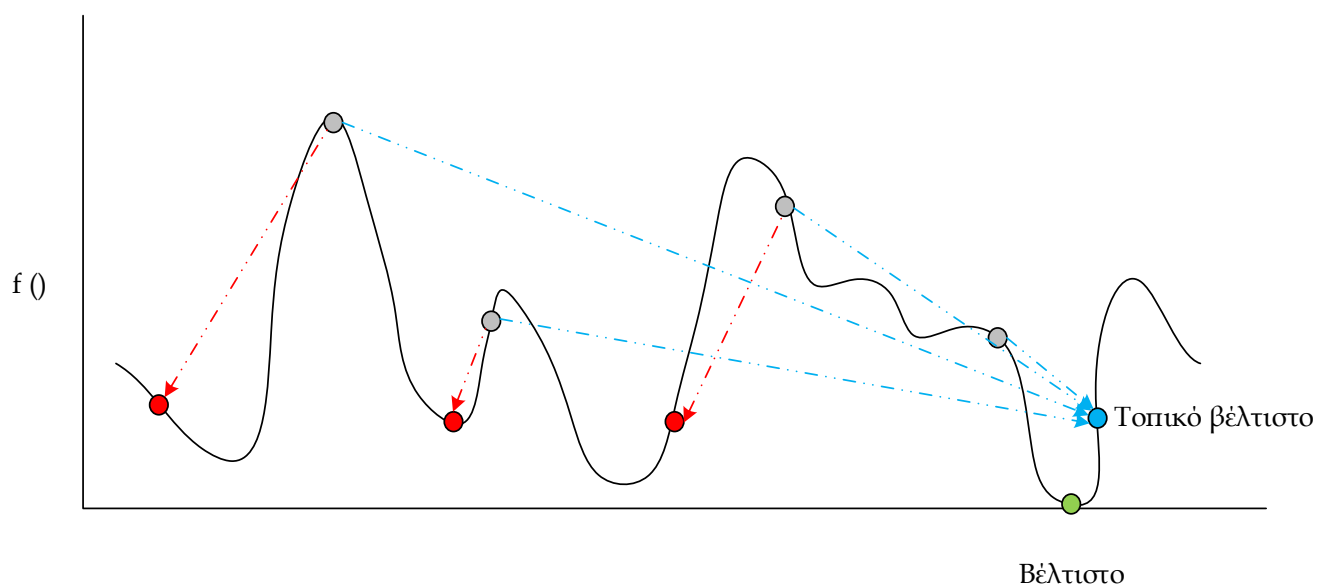
$g(t)$ είναι η θέση του καλύτερου σωματιδίου όλων των γενεών

c_1 είναι η σταθερά γνωστικής επιτάχυνσης - γνωστικός συντελεστής

c_2 είναι η σταθερά κοινωνικής επιτάχυνσης - κοινωνικός συντελεστής

$\text{rnd}(t)$ είναι μια συνάρτηση όπου παράγει τυχαίους πραγματικούς αριθμούς ομοιόμορφα κατανεμημένους μεταξύ 0 και 1.

Στο Διάγραμμα 4-1 απεικονίζεται ο τρόπος ενημέρωσης κάθε σωματιδίου στη θέση του σμήνους σε σχέση με τις καλύτερες (μπλε) και προσωπικές καλύτερες θέσεις (κόκκινο) από τον αλγόριθμο PSO.



Διάγραμμα 4-1 Διάγραμμα ενημέρωσης σωματιδίων στη PSO

Στα παρακάτω κεφάλαια χρησιμοποιήθηκε η PSO για την εύρεση της βέλτιστης διαστασιολόγησης μικροδικτύων και υβριδικών συστημάτων καλύπτοντας παράλληλα όλους τους τεχνικούς περιορισμούς. Οι μεταβλητές προς βελτιστοποίηση σε αυτά τα συστήματα είναι διακριτές, οπότε χρησιμοποιείται η έκδοση του αλγορίθμου PSO που προτάθηκε στο [141], όπου οι διακριτές ανεξάρτητες μεταβλητές κωδικοποιούνται σε μια σειρά δυαδικών αριθμών.

Το x_i , όπου $i \in \{1, \dots, n_d\}$, είναι το τμήμα της διακριτής ανεξάρτητης μεταβλητής και $\psi_i \in \{0, 1\}^m$ είναι η δυαδική αντιστοιχία του x_i [142]. Οι δυαδικές αντιστοιχίσεις των $p_{i,i}$ και $p_{g,i}$ είναι οι $\pi_{i,i}$ και $\pi_{g,i}$. Για κάθε γενεά ισχύει:

$$\begin{aligned} u_i^j(t+1) &= u_i^j(t) + c_1 \text{rnd}(t)(\pi_{i,i}^j(t) - \psi_i^j(t)) + c_2 \text{rnd}(t)(\pi_{g,i}^j(t) - \psi_i^j(t)) \\ u_i^j(t+1) &= \text{sign}(u_i^j(t+1)) \min\{|u_i^j(t+1)|, u_{\max}\} \\ \psi_i^j(t+1) &= \begin{cases} 0, & \rho_{i,j}(t) \geq s(u_i^j(t+1)) \\ 1 & \end{cases} \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.5 Θεωρία Παιγνίων

Η Θεωρία Παιγνίων είναι ένα μαθηματικό πλαίσιο που μοντελοποιεί και αναλύει καταστάσεις στις οποίες αλληλεπιδρούν πολλοί παίχτες για τη λήψη αποφάσεων [143]. Χρησιμοποιώντας στρατηγικές αποφάσεις, κάθε συμμετέχων / παίχτης προσπαθεί να επιτύχει τους στόχους του [144].

Ένα παίγνιο ορίζεται ως $\langle N, (A_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N} \rangle$, όπου:

- N είναι ο αριθμός των παιχτών.
- A_i είναι ο αριθμός των δράσεων του κάθε παίχτη i , όπου:

$$A := \{a \mid a = (a_i)_{i \in N}, a_i \in A_i, \forall i \in N\} \quad (4.1)$$

- $u_i : A \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του παίχτη i , η οποία μπορεί να είναι κέρδος (μεγιστοποίηση) ή κόστος (ελαχιστοποίηση).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι παιγνίων και αντίστοιχες αναπαραστάσεις. Τα δύο κύρια παίγνια είναι τα συνεργατικά και τα μη συνεργατικά. Στα συνεργατικά παίγνια, οι παίχτες

ζητούν βέλτιστες συντονισμένες ενέργειες ή λογικούς κανόνες κατανομής κόστους / ανταμοιβής που καθιστούν τους μεταξύ τους συνασπισμούς σταθερούς. Επίσης, επιτρέπεται στους παίχτες να επικοινωνούν και να λαμβάνουν πλασματικές πληρωμές προκειμένου να ενεργούν ως μία οντότητα, με σκοπό να βελτιώνουν τη θέση τους στο παίγνιο. Η μη συνεργάσιμη θεωρία παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση διαδικασιών λήψης αποφάσεων μεταξύ ανεξάρτητων παιχτών, των οποίων οι στόχοι συγκρούονται. Σε αυτά τα παίγνια, κάθε παίχτης λαμβάνει υπόψη τις ενέργειες των άλλων εμπλεκόμενων παιχτών και βελτιστοποιεί αυτόματα τη συνάρτηση χρησιμότητάς του χωρίς να συντονίζει τις ενέργειές του μαζί με τις στρατηγικές επιλογές των άλλων παιχτών.

Η ισορροπία Nash είναι μία από τις πιο σημαντικές λύσεις για τη θεωρία των παιγνίων [38]. Στην ισορροπία Nash, κανένας παίχτης δεν μπορεί να αυξήσει τα έσοδά του αλλάζοντας μονομερώς τη στρατηγική του, δεδομένου ότι οι ενέργειες των άλλων παιχτών είναι σταθερές. Επομένως, επιτυγχάνεται μια αμοιβαία βέλτιστη ανταπόκριση από όλους τους παίχτες.

Η ισορροπία Nash στα μη συνεργατικά παίγνια είναι η βέλτιστη λύση όταν δεν υπάρχει σχέση ηγέτη-ακολούθου (leader-follower) και κάθε παίχτης ανταγωνίζεται τους άλλους με σκοπό να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητάς του. Στα συνεργατικά παίγνια, οι στρατηγικές επιτυγχάνονται όταν το σύνολο των στρατηγικών μπορεί να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του κάθε παίχτη.

Κεφάλαιο 5:

Αποκεντρωμένο σύστημα
διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση
ευφυών πρακτόρων και
υπολογιστικής νοημοσύνης για τον
σχεδιασμό και έλεγχο αυτόνομου
μικροδικτύου

5 Αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων και υπολογιστικής νοημοσύνης για τον σχεδιασμό και έλεγχο αυτόνομου μικροδικτύου

5.1 Εισαγωγή

Ένα σημαντικό ζήτημα για την ορθή λειτουργία ενός μικροδικτύου, αποτελεί ο σχεδιασμός του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 2, αναλύθηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης αποκεντρωμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας έναντι της χρήσης των συγκεντρωτικών. Επίσης στα Κεφάλαια 3 και 4 αναλύθηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνητής νοημοσύνης για τα αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση πολλαπλών ευφυών πρακτόρων για τον έλεγχο ενός αυτόνομου μικροδικτύου πολυπαραγωγής. Στο προτεινόμενο σύστημα ευφυών πρακτόρων, κάθε μονάδα του μικροδικτύου ελέγχεται από τη δική της μονάδα επεξεργασίας και είναι σε θέση να ενεργεί ως ανεξάρτητος πράκτορας.

Στο σύστημα πολλαπλών πρακτόρων, ο κάθε πράκτορας μπορεί να επικοινωνεί και να συνεργάζεται με τους άλλους πράκτορες, δημιουργώντας ένα έξυπνο καταναμημένο υπολογιστικό σύστημα. Οι ευφείς πράκτορες καλούνται να διαχειριστούν με τον καλύτερο τρόπο όλες τις μονάδες του μικροδικτύου. Οι πράκτορες λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας, την παραγωγή και αποθήκευση πόσιμου νερού και την παραγωγή και χρήση υδρογόνου ως καυσίμου. Σκοπός του συστήματος ευφυών πρακτόρων δεν αποτελεί μόνο η έναρξη ή ο τερματισμός της λειτουργίας των μονάδων του αλλά ο πλήρης έλεγχός τους. Ο κάθε πράκτορας λαμβάνει πληροφορίες είτε από αισθητήρες είτε από τους άλλους πράκτορες με σκοπό να καθορίσει το σημείο λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας που ελέγχει. Οι μονάδες του μικροδικτύου που μπορούν να λειτουργήσουν σε μερικό φορτίο είναι η μονάδα αφαλάτωσης, η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η μονάδα κυψέλης καυσίμου, γεγονός που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό των αλγορίθμων των αντίστοιχων πρακτόρων που ελέγχουν τις μονάδες. Οι ευφείς πράκτορες χρησιμοποιούν τη θεωρία των Ασαφών

Γνωστικών Χαρτών με σκοπό να λαμβάνουν τη βέλτιστη απόφαση σχετικά με το σημείο λειτουργίας των μονάδων.

Το προτεινόμενο αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται σε πολλαπλούς πράκτορες, οι οποίοι συνεργάζονται και επικοινωνούν μεταξύ τους με κατανομημένη νοημοσύνη, ερευνήθηκε και εφαρμόστηκε με επιτυχία για τον έλεγχο ενός αυτόνομου μικροδικτύου. Το προτεινόμενο DEMS συγκρίθηκε με ένα CEMS που βασίζεται σε ένα συνδυασμό Petri Net και FCM για το ίδιο μικροδίκτυο.

5.2 Διαμόρφωση μικροδικτύου

Το αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένο σε ένα μικρό νησί των Κυκλάδων με σκοπό τη κάλυψη των αναγκών ενός πολύ μικρού οικισμού. Το προφίλ των καταναλώσεων λαμβάνει υπόψη τις διάφορες ηλεκτρικές συσκευές, τις ανάγκες σε πόσιμο νερό καθώς και το υδρογόνο που απαιτείται ως καύσιμο για τις ανάγκες μετακινήσεων των κατοίκων. Όλες οι ηλεκτρικές συσκευές είναι ενεργειακής κλάσης A+. Ρεαλιστικά ωριαία προφίλ ηλεκτρικών καταναλώσεων σε ετήσια βάση αναπτύχθηκαν με τη χρήση του λογισμικού πακέτου HOMER [145-148]. Η ζήτηση αιχμής φορτίου είναι 7.72 kW και η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι 62.5 kWh ανά ημέρα. Επίσης, εκτιμήθηκε το πόσιμο νερό που χρειάστηκε για τους κατοίκους σε 2.88 m³ ανά ημέρα (πόση, προσωπική καθαριότητα, μαγείρεμα και πλύσιμο ρούχων). Οι ανάγκες μετακίνησης των κατοίκων καλύπτονται μέσω υβριδικών σκούτερ που χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο. Η μέση ημερήσια κατανάλωση υδρογόνου για τα σκούτερ είναι 2.4 Nm³ H₂, με σκοπό να μπορούν να καλύψουν 50 km ημερησίως. Με σκοπό τη προσομοίωση του μικροδικτύου χρησιμοποιήθηκαν τυπικά μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής.

Η σχηματική απεικόνιση του πλήρους λειτουργικού πρωτότυπου συστήματος παρουσιάζεται στο Εικόνα 5-1. Το μικροδίκτυο αποτελείται από τις παρακάτω μονάδες:

1. Μονάδες παραγωγής ενέργειας:

(α) Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συστοιχία αποτελείται από τυπικά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου και θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένη σε κατακόρυφο ιχνηλάτη ενός άξονα (σταθερή κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος και ρύθμιση αζιμούθιου).

(β) Μία ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

(γ) Μία κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell).

2. Μονάδες κατανάλωσης ενέργειας:

(α) Οικιακές ηλεκτρικές καταναλώσεις (π.χ. φωτισμός, ψύξη, αντλίες θερμότητας για θέρμανση και ψύξη κ.λπ.)

(β) Υβριδικά σκούτερ που χρησιμοποιούνται για την μετακίνηση των κατοίκων.

(γ) Μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με ανάκτηση υδραυλικής ενέργειας, με σκοπό την παραγωγή πόσιμου νερού, προκειμένου να καλύψει τις καθημερινές ανάγκες για νερό των κατοίκων.

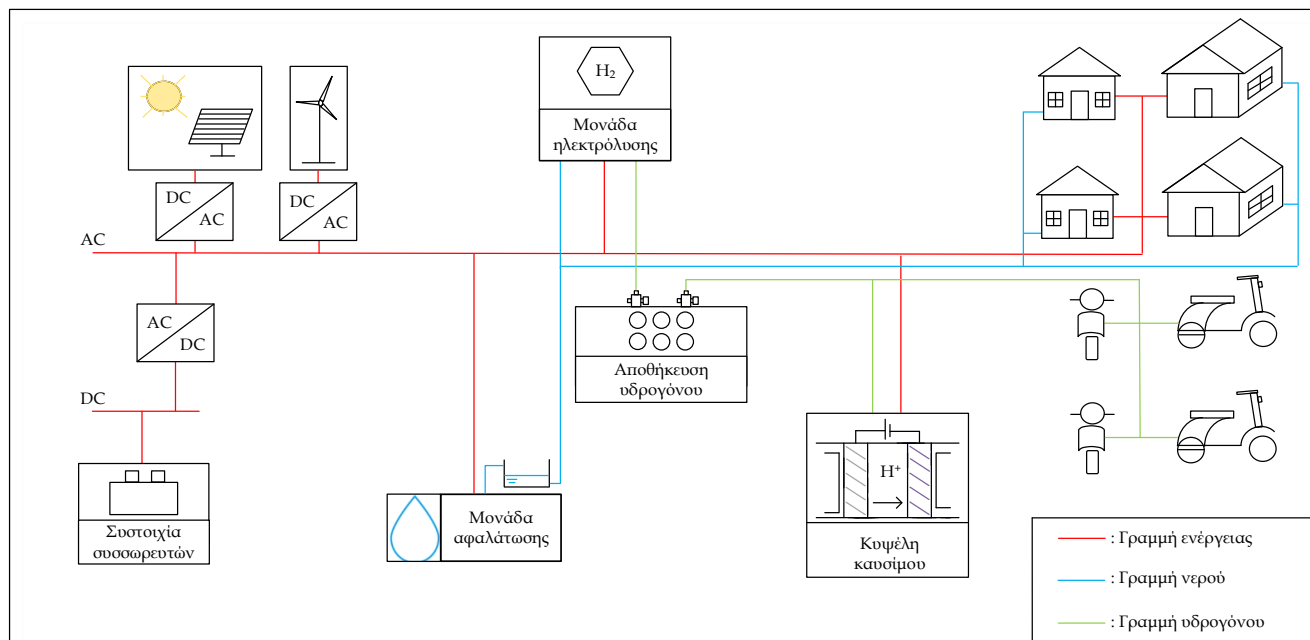
(δ) Μια μονάδα ηλεκτρόλυσης για τη παραγωγή υδρογόνου (H_2).

3. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας:

(α) Μια τυπική συστοιχία ηλιακών συσσωρευτών μολύβδου βαθιάς εκφόρτισης, που συνδέονται σε τάση 48 VDC.

(β) Μία δεξαμενή νερού για την αποθήκευση του πόσιμου νερού.

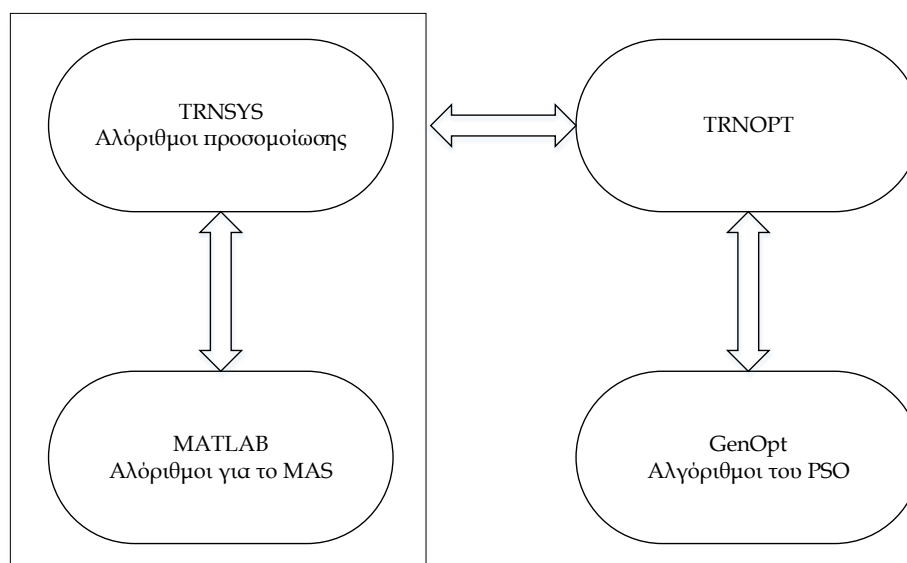
(γ) Μια τυπική δεξαμενή υδρογόνου χαμηλής πίεσης για την αποθήκευση του υδρογόνου.



Εικόνα 5-1 Αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής

Η προσομοίωση του αυτόνομου μικροδικτύου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια πλατφόρμα λογισμικού, η οποία αποτελείται από τα πακέτα λογισμικού TRNSYS, MATLAB, TRNOPT και GenOpt. Το TRNSYS είναι ένα δυναμικό λογισμικό πακέτο προσομοίωσης ενεργειακών συστημάτων. Το TRNSYS περιλαμβάνει ρουτίνες για τη προσομοίωση διαφόρων στοιχείων και είναι διαθέσιμες στους χρήστες του. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό του TRNSYS είναι η ανοιχτή δομή του, που επιτρέπει στους χρήστες να αναπτύξουν τις δικές τους ρουτίνες γραμμένες σε Fortran και να τις ενσωματώσουν στο λογισμικό πακέτο. Χρησιμοποιήθηκαν υπάρχουσες ρουτίνες του TRNSYS για τη προσομοίωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, της ανεμογεννήτριας και των συσσωρευτών. Όσο αφορά τις υπόλοιπες μονάδες του μικροδικτύου όπως η μονάδα αφαλάτωσης, η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η κυψέλη καυσίμου, χρησιμοποιήθηκαν ρουτίνες που περιλαμβάνουν τα μοντέλα ισχύος των μονάδων βασισμένα σε καμπύλες απόδοσης [149-151]. Το σύστημα ευφών πρακτόρων σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab, το οποίο είναι ένα σύγχρονο διαδραστικό πρόγραμμα. Το λογισμικό βελτιστοποίησης GenOpt χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση του αυτόνομου μικροδικτύου. Το TRNOPT χρησιμοποιείται ως διεπαφή μεταξύ του TRNSYS και του GenOpt με σκοπό τη μεταφορά των

δεδομένων μεταξύ των δύο λογισμικών. Η δομή της πλατφόρμας λογισμικού παρουσιάζεται στο Εικόνα 5-2.



Εικόνα 5-2 Η δομή της πλατφόρμας λογισμικού

5.3 Πολυπρακτορικό σύστημα ευφών πρακτόρων για τον έλεγχο του μικροδικτύου

5.3.1 Πολυπρακτορικό σύστημα ευφών πρακτόρων

Το πολυπρακτορικό σύστημα (Multi-Agent System) ευφών πρακτόρων του μικροδικτύου αποτελείται από πέντε (5) ευφείς πράκτορες, οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίτευξη των στόχων τους. Για τη περιγραφή του πολυπρακτορικού συστήματος ευφών πρακτόρων είναι απαραίτητο να οριστούν οι Αντιλήψεις (Percepts), οι Δράσεις (Actions), οι Στόχοι (Goals) και το Περιβάλλον (Environment) όπου ενεργεί ο κάθε πράκτορας (PAGE: Percepts, Actions, Goals and Environment). Το PAGE του συστήματος ευφών πρακτόρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1 PAGE του MAS

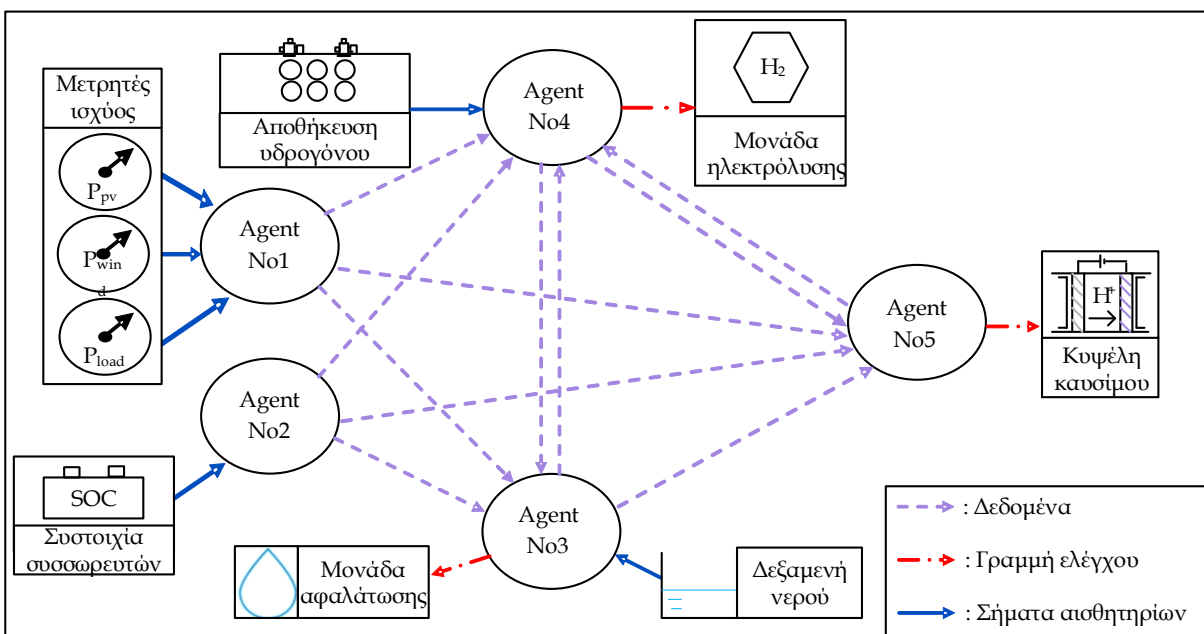
Αντιλήψεις	Η στιγμιαία παραγόμενη και η καταναλισκόμενη ισχύς από τις μονάδες του μικροδικτύου, το διαθέσιμο πόσιμο νερό στη δεξαμενή νερού, το διαθέσιμο υδρογόνο στο μεταλλικό υδρίδιο και η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών
Δράσεις	Προσδιορίστε τα σημεία λειτουργίας των στοιχείων του συστήματος
Στόχοι	Πληρούνται πλήρως οι απαιτήσεις όσον αφορά την ισχύ, το πόσιμο νερό και τα καύσιμα για τη μεταφορά με τρόπο οικονομικά αποδοτικό
Περιβάλλον	Όλες οι μονάδες του αυτόνομου μικροδικτύου πολυπαραγωγής

Οι 5 πράκτορες του συστήματος είναι:

1. Ο RES πράκτορας (Agent No1)
2. Ο Battery πράκτορας (Agent No2)
3. Ο Desalination πράκτορας (Agent No3)
4. Ο Electrolyzer πράκτορας (Agent No4)
5. Ο Fuel cell πράκτορας (Agent No5)

Οι ευφυείς πράκτορες ενημερώνονται για τη κατάσταση του μικροδικτύου μέσω αισθητήρων και της ασύρματης μεταξύ τους επικοινωνίας. Ο κάθε πράκτορας χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που χρειάζεται. Συγκεκριμένα ο RES πράκτορας είναι υπεύθυνος για τη μέτρηση της παραγόμενης ενέργειας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της καταναλισκόμενης ενέργειας από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις (P_{load}). Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται από τους πράκτορες No3, No4 και No5. Ο Battery πράκτορας συνδέεται με αισθητήρα για τη μέτρηση της κατάστασης φόρτισης (State Of Charge – SOC) της συστοιχίας των συσσωρευτών. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται από τους πράκτορες No3, No4 και No5. Ο Desalination πράκτορας συνδέεται με αισθητήρα για τη μέτρηση της στάθμης της δεξαμενής νερού ($W_{level}(t)$), ελέγχει τη μονάδα αφαλάτωσης και αποφασίζει το σημείο λειτουργίας της. Αυτές τις πληροφορίες χρησιμοποιούνται από τους πράκτορες No4 και No5. Ο Electrolyzer πράκτορας συνδέεται με αισθητήρα που μετράει τη ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου στο μεταλλικό υδρίδιο ($H_{2level}(t)$), ελέγχει τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και αποφασίζει για το σημείο λειτουργίας της. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται από τους πράκτορες No3 και No5. Ο Fuel cell πράκτορας ελέγχει την μονάδα κυψέλης καυσίμου και αποφασίζει το σημείο

λειτουργίας της. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται από τον πράκτορα Νο4. Η τοπολογία του συστήματος ευφών πρακτόρων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-3.



Εικόνα 5-3 Τοπολογία του MAS και ανταλλαγή δεδομένων

5.4 Επισκόπηση πρακτόρων

5.4.1 RES πράκτορας

Ο πράκτορας RES είναι ένας απλός αντανακλαστικός πράκτορας (simple reflex agent). Ο πράκτορας λαμβάνει υπόψη την ενέργεια που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την ενέργεια που ζητείται από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις, προκειμένου να υπολογίσει ένα ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος για χρονικό διάστημα μιας ώρας, σύμφωνα με την Εξίσωση 5.1. Ο πράκτορας RES έχει αρχιτεκτονική οριζόντιας ροής ελέγχου και ο αλγόριθμός του παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-2.

$$\Delta P = P_{pv} + P_{wind} - P_{load} \quad (\text{Wh}) \quad (5.1)$$

Όπου P_{pv} είναι η παραγόμενη ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, P_{wind} είναι η παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια και P_{load} είναι η ζήτηση ενέργειας από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις.

Πίνακας 5-2 Αλγόριθμος του RES πράκτορα

Αλγόριθμος - RES πράκτορας	
Συνάρτηση του RES πράκτορα – απλός αντανακλαστικός πράκτορας	
Δεδομένα : P_{pv} , P_{wind} , P_{load}	
Αρχικοποίηση	
Έναρξη	
Ενέργειες :	<ul style="list-style-type: none"> - Υπολογισμός του ενεργειακού ισοζυγίου (ΔP) χρησιμοποιώντας την Εξ. 5.1 - Αποστολή σημάτων στους άλλους πράκτορες σχετικά με το ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP)
Επιστροφή στις ενέργειες	
Τέλος	

5.4.2 Battery πράκτορας

Ο Battery πράκτορας είναι ένας απλός αντανακλαστικός πράκτορας (simple reflex agent). Ο πράκτορας λαμβάνει ως είσοδο το SOC της συστοιχίας των συσσωρευτών και στη συνέχεια, υπολογίζει τη διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργειά τους (B_{power}). Ο πράκτορας προστατεύει τους συσσωρευτές, μη επιτρέποντας τη βαθιά εκφόρτισή τους, καθώς δεν επιτρέπει το SOC των συσσωρευτών να πέσει κάτω από το 20%. Ο συντελεστής B_{power} υπολογίστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 5.2. Ο Battery πράκτορας έχει αρχιτεκτονική οριζόντιας ροής ελέγχου και ο αλγόριθμος του παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-3.

$$B_{power} = \frac{(SOC - 20)}{100} * (battery_capacity) \quad (5.2)$$

Όπου $battery_capacity$ είναι η μέγιστη δυνατή ενέργεια (Wh) που μπορεί να αποδώσει η συστοιχία των συσσωρευτών.

Πίνακας 5-3 Αλγόριθμος του Battery πράκτορα

Αλγόριθμος – Battery πράκτορας

Συνάρτηση του Battery πράκτορα – απλός αντανακλαστικός πράκτορας

Δεδομένα : Κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών (SOC)

Αρχικοποίηση

Έναρξη

Κανόνες : $SOC \geq 20\%$

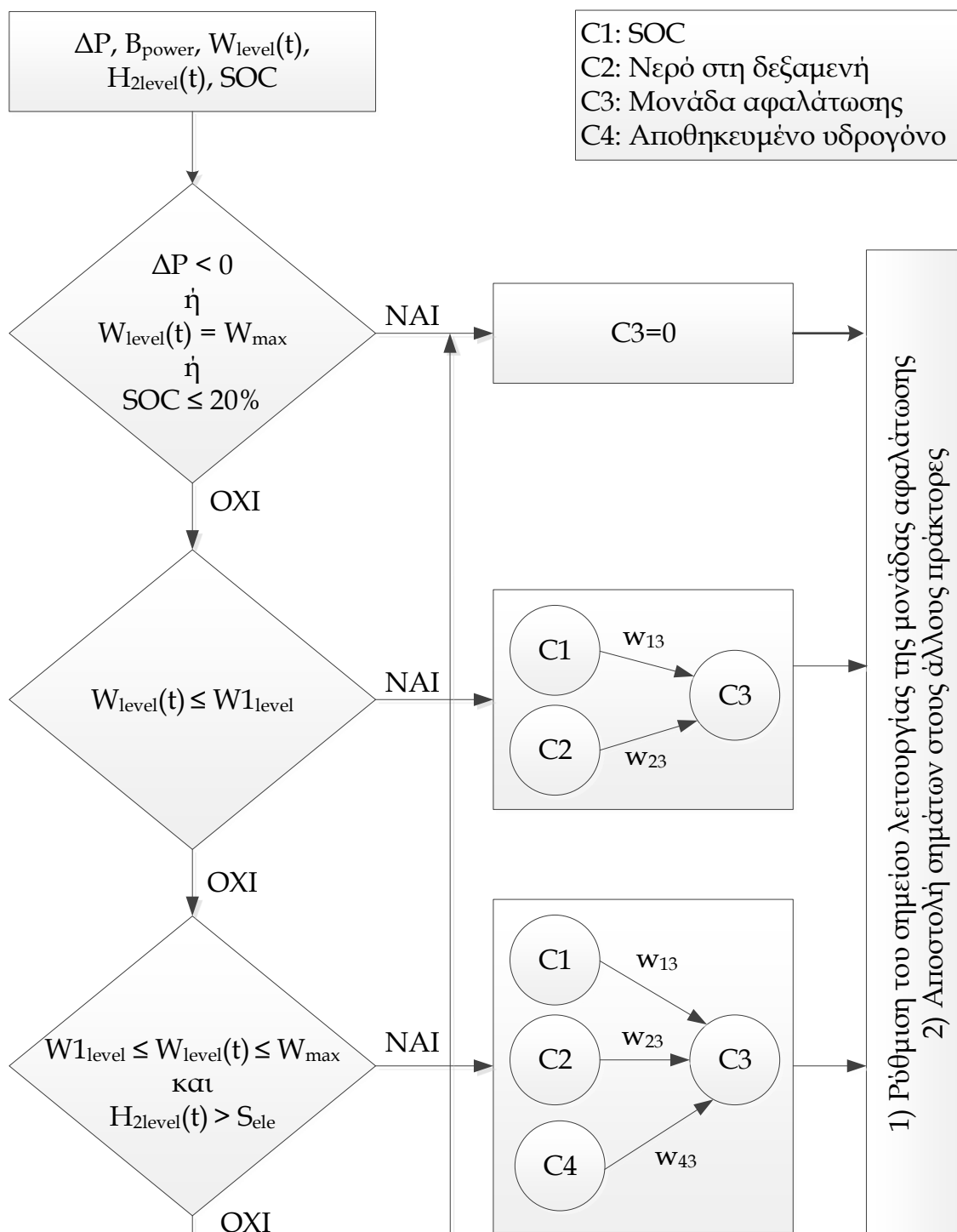
- Ενέργειες :
- Υπολογισμός της διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας των συσσωρευτών χρησιμοποιώντας την Εξ. 5.2
 - Αποστολή σημάτων στους άλλους πράκτορες σχετικά με τη κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών και τη διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια της συστοιχίας

Επιστροφή στις ενέργειες

Τέλος

5.4.3 Desalination πράκτορας

Ο Desalination πράκτορας είναι ένας πράκτορας στόχου (Goal based agent). Ο πράκτορας λαμβάνει ως εισόδους τη στάθμη της δεξαμενής νερού ($W_{level}(t)$), την κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών, την ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου ($H_{2level}(t)$) και το ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP). Ο πρώτος στόχος του πράκτορα είναι να καλύπτει τις ανάγκες για πόσιμο νερό των κατοίκων και ο δεύτερος στόχος είναι να μην αδειάσει ποτέ η δεξαμενή νερού. Η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργήσει με μερικό φορτίο (P_{des}) και θεωρείται ότι είναι ικανή να παράγει πόσιμο νερό μόνο όταν λειτουργεί πάνω από το 30% της ονομαστικής ισχύος (P_{desnom}) [152, 153]. Επίσης, ο Desalination πράκτορας καθορίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Το λογικό διάγραμμα ελέγχου του Desalination πράκτορα παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-4.



Εικόνα 5-4 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του Desalination πράκτορα

Σύμφωνα με το λογικό διάγραμμα (Εικόνα 5-4), εάν η δεξαμενή νερού είναι γεμάτη, δηλαδή η στάθμη του νερού είναι στο υψηλότερο σημείο της δεξαμενής (W_{max}) ή η παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές δεν μπορεί να καλύψει τη ζήτηση ενέργειας των

ηλεκτρικών καταναλώσεων ($\Delta P < 0$) ή η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι χαμηλότερη ή ίση με 20% ($SOC \leq 20\%$), τότε η μονάδα αφαλάτωσης τίθεται εκτός λειτουργίας (το σημείο λειτουργίας ορίζεται ίσο με μηδέν ($C3=0$)). Σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση, ο πράκτορας αποφασίζει για το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης μέσω δύο ασαφών γνωστικών χαρτών (2 FCM). Οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται στα δύο FCM είναι ο C1 για να απεικονίσει την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών, ο C2 για να απεικονίσει τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή νερού, ο C3 για να απεικονίσει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης και ο C4 για να απεικονίσει την αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου στο μεταλλικό υδρίδιο.

Το πρώτο FCM χρησιμοποιείται όταν η στάθμη της δεξαμενής του νερού είναι χαμηλότερη από μία ενδιάμεση στάθμη ($W1_{level}$), η οποία τέθηκε ως ένα επίπεδο έκτακτης ανάγκης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται προτεραιότητα στη μονάδα αφαλάτωσης σε σχέση με τη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Χρησιμοποιώντας την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (C1) και τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή νερού (C2), ο πράκτορας με τη χρήση του 1^{ου} FCM προσδιορίζει και θέτει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης.

Το δεύτερο FCM χρησιμοποιείται όταν αρχικά οι παραπάνω περιορισμοί καλύπτονται και όταν η αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου στο μεταλλικό υδρίδιο είναι μικρότερη από μία ποσότητα (S_{ele}), η οποία τέθηκε ως μία ποσότητα έκτακτης ανάγκης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προτεραιότητα δίνεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης σε σχέση με τη μονάδα αφαλάτωσης. Χρησιμοποιώντας τη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (C1), τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή νερού (C2) και την αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου στο μεταλλικό υδρίδιο (C4), ο πράκτορας με τη χρήση του 2^{ου} FCM προσδιορίζει και θέτει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Στην περίπτωση όπου η αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου είναι μεγαλύτερη από το S_{ele} , τότε το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης ορίζεται ίσο με μηδέν, δηλαδή η μονάδα αφαλάτωσης τίθεται εκτός λειτουργίας.

Όλες οι τιμές του κάθε κόμβου (και για τα δύο FCM), ασαφοποιούνται στο διάστημα [0,1]. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αποασαφοποίησης (defuzzification centroid), η τιμή του κόμβου C3, λαμβάνει μια αριθμητική τιμή στο διάστημα [0,100]. Αυτή η τιμή αποτελεί ένα ποσοστό της ονομαστικής

ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Τα βάρη W_{ij} εκφράζουν τη σχέση μεταξύ των κόμβων και των τιμών τους στο διάστημα $[0,1]$. Το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 30%, σε αντίθετη περίπτωση η μονάδα αφαλάτωσης παραμένει απενεργοποιημένη.

Ο αλγόριθμος του Desalination πράκτορα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-4.

Πίνακας 5-4 Αλγόριθμος του Desalination πράκτορα

Αλγόριθμος – Desalination Πράκτορας

Συνάρτηση του Desalination πράκτορα – Πράκτορας στόχου

Δεδομένα: Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (SOC), Στάθμη νερού στη δεξαμενή ($W_{level}(t)$), Αποθηκευμένη ποσότητα του υδρογόνου ($H_{2level}(t)$), Ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP)

Αρχικοποίηση

Αρχή

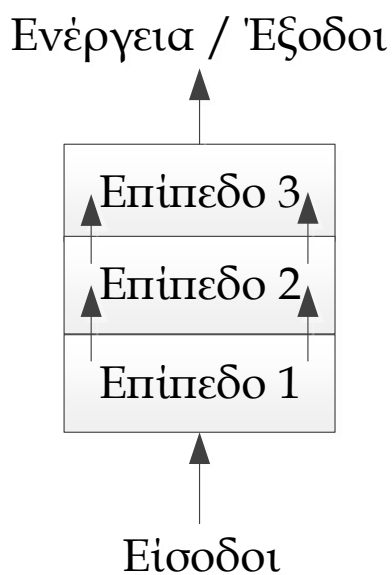
Κανόνες : - $W_{level}(t) \geq$ καθημερινής κατανάλωσης νερού
 - $P_{des} > 0.3 * P_{desnom}$

Ενέργειες : - Ρύθμιση του σημείου λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (Εικόνα 5-4)
 - Αποστολή σημάτων στους άλλους πράκτορες σχετικά με τη κατανάλωση ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης και τη στάθμη του νερού στη δεξαμενή

Επιστροφή στις ενέργειες

Τέλος

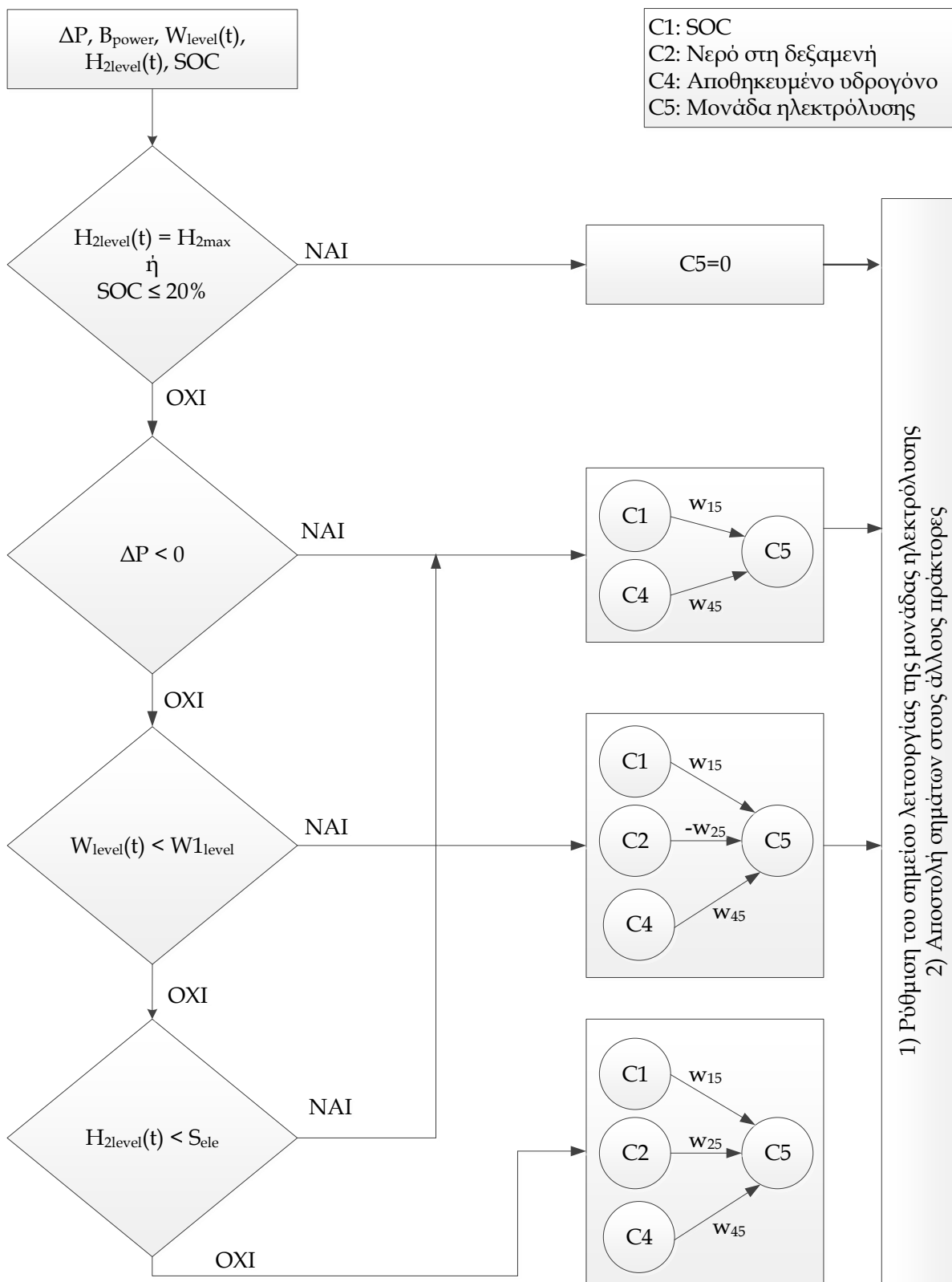
Ο Desalination πράκτορας έχει αρχιτεκτονική κάθετης ροής ελέγχου με τρία επίπεδα στη δομή του, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-5. Συγκεκριμένα, στο πρώτο επίπεδο, ενημερώνονται οι πληροφορίες του πράκτορα. Στο δεύτερο επίπεδο, αποφασίζεται το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Στο τρίτο επίπεδο, ρυθμίζεται και ελέγχεται η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης και ο πράκτορας επικοινωνεί με τους άλλους πράκτορες του μικροδικτύου με σκοπό να στείλει τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζονται και να λάβει τις αντίστοιχες πληροφορίες που χρειάζεται ο ίδιος.



Εικόνα 5-5 Αρχιτεκτονική του Desalination πράκτορα

5.4.4 *Electrolyzer* πράκτορας

Ο Electrolyzer πράκτορας είναι ένας πράκτορας στόχου (Goal based agent). Ο πράκτορας λαμβάνει ως εισόδους τη στάθμη της δεξαμενής νερού ($W_{level}(t)$), την κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών, την ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου ($H_{2level}(t)$) και το ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP). Ο πράκτορας έχει ως στόχους να ικανοποιεί τις ανάγκες υδρογόνου και να εξασφαλίζει μια ελάχιστη ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου στο μεταλλικό υδρίδιο. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης μπορεί να λειτουργεί σε μερικό φορτίο και η ελάχιστη ισχύς της μπορεί να είναι ίση με 30% της ονομαστικής ισχύος της (P_{elenom}). Ο Electrolyzer πράκτορας καθορίζει και θέτει το σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης (P_{ele}) σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάζεται στη Εικόνα 5-6, όπου παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα ελέγχου του πράκτορα.



Εικόνα 5-6 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του Electrolyzer πράκτορα

Σύμφωνα με το λογικό διάγραμμα (Εικόνα 5-6), ένα ποσοστό της χωρητικότητας της δεξαμενής υδρογόνου ορίστηκε ως επίπεδο έκτακτης ανάγκης (S_{ele}). Αν η δεξαμενή υδρογόνου είναι γεμάτη (H_{2max}) ή η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι μικρότερη από 20%, τότε το σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης (C5) ορίζεται ίσο με το μηδέν και η μονάδα τίθεται εκτός λειτουργίας. Στην περίπτωση όπου το ενεργειακό ισοζύγιο είναι αρνητικό και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι υψηλότερη από 20%, τότε ο πράκτορας χρησιμοποίησε ένα FCM για να αποφασίσει το σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Οι κόμβοι του FCM είναι ο C1 και ο C4. Το ίδιο συμβαίνει όταν η στάθμη του νερού στη δεξαμενή νερού βρίσκεται υψηλότερα από το επίπεδο έκτακτης ανάγκης ($W1_{level}$) και η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου είναι μικρότερη από το S_{ele} . Σε αντίθετη περίπτωση, ο Electrolyzer πράκτορας αποφασίζει για το σημείο λειτουργίας, χρησιμοποιώντας ένα άλλο FCM. Οι κόμβοι αυτού του FCM είναι ο C1, ο C2 και ο C4. Εάν η στάθμη του νερού στη δεξαμενή νερού είναι χαμηλότερη από το $W1_{level}$ τότε η σχέση μεταξύ των κόμβων C2 και C5 δηλαδή το βάρος w_{25} λαμβάνει αρνητική τιμή, καθώς η στάθμη του νερού επηρεάζει αρνητικά την παραγωγή υδρογόνου. Οπότε, παρατηρείται η συνεργασία μεταξύ των πρακτόρων και προτεραιότητα δίνεται είτε στη μονάδα ηλεκτρόλυσης είτε στη μονάδα αφαλάτωσης, όπως αντίστοιχα κάνει και ο Desalination πράκτορας.

Όλες οι τιμές του κάθε κόμβου (και για τα δύο FCM), ασαφοποιούνται στο διάστημα [0,1]. Στη συνέχεια, όπως και στον παράγοντα αφαλάτωσης, χρησιμοποιείται η μέθοδος αποασαφοποίησης για να αποσαφηνιστεί η τιμή του κόμβου C5 σε αριθμητική τιμή. Αυτή η τιμή παριστάνει ένα ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Το σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 30%, σε αντίθετη περίπτωση η μονάδα ηλεκτρόλυσης παραμένει απενεργοποιημένη.

Ο αλγόριθμος του Electrolyzer πράκτορα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-5. Ο Electrolyzer πράκτορας έχει την ίδια αρχιτεκτονική με τον Desalination πράκτορα.

Πίνακας 5-5 Αλγόριθμος του Electrolyzer πράκτορα

Αλγόριθμος – Electrolyzer πράκτορας

Συνάρτηση Electrolyzer πράκτορα – πράκτορας στόχου

Δεδομένα: Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (SOC), Στάθμη του νερού στη δεξαμενή ($W_{\text{level}}(t)$), Αποθηκευμένη ποσότητα του υδρογόνου ($H_{2\text{level}}(t)$), Ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP)

Αρχικοποίηση

Έναρξη

Κανόνες : - $H_{2\text{level}}(t) \geq$ καθημερινή κατανάλωση υδρογόνου
- $P_{\text{ele}} > 0.3 * P_{\text{elenom}}$

Ενέργειες : - Ρύθμιση του σημείου λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης (Εικόνα 5-6)
- Αποστολή σημάτων στους άλλους πράκτορες σχετικά με τη κατανάλωση ισχύος της μονάδας ηλεκτρόλυσης και την αποθηκευμένη ποσότητα του υδρογόνου ($H_{2\text{level}}(t)$)

Επιστροφή στις ενέργειες

Τέλος

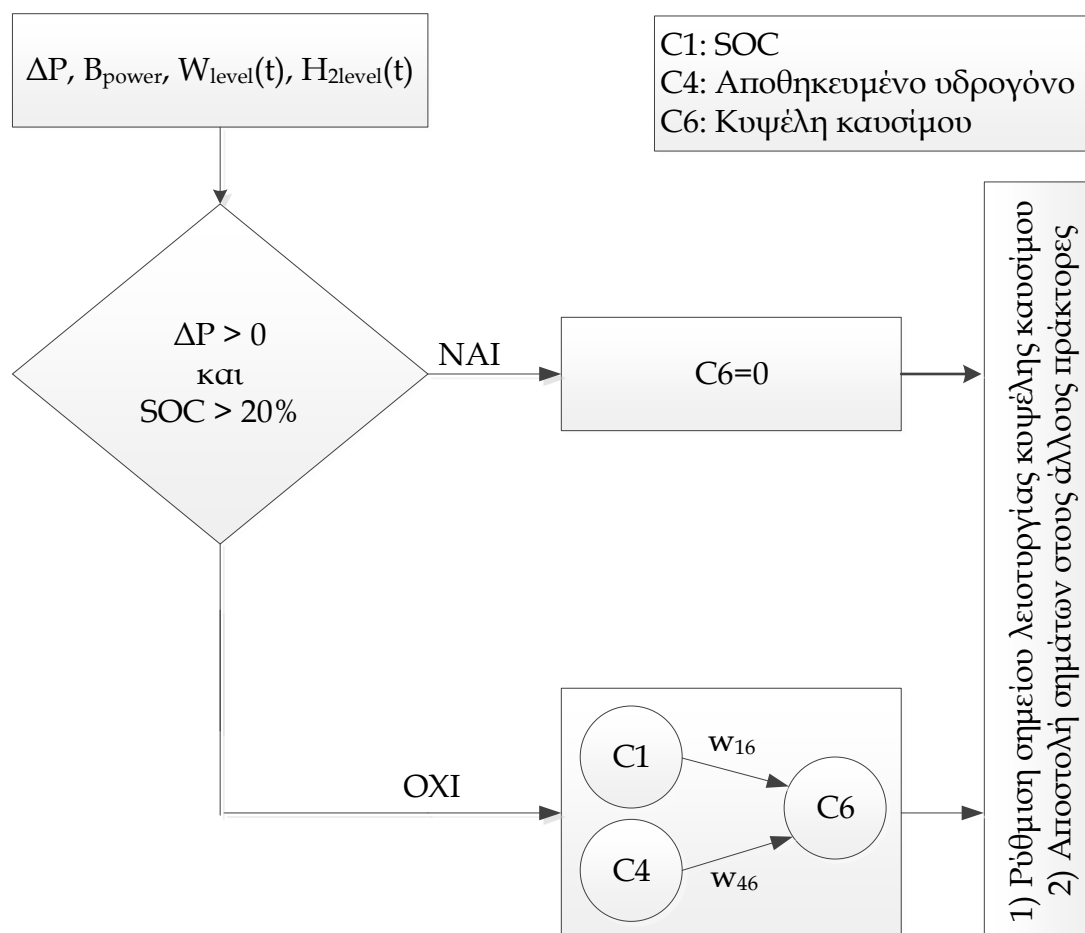
5.4.5 Fuel cell πράκτορας

Ο Fuel cell πράκτορας είναι ένας αντανακλαστικός πράκτορας με εσωτερικό μοντέλο (model-based reflex agent). Οι εισοδοί του πράκτορα είναι η αποθηκευμένη ποσότητα στο μεταλλικό υδρίδιο ($H_{2\text{level}}(t)$) και το ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP). Καθώς η κυψέλη καυσίμου αποτελεί μια εφεδρική μονάδα ενέργειας, ο πράκτορας ενεργοποιεί την κυψέλη καυσίμου όταν η ισχύς από τις πηγές ενέργειας δεν είναι αρκετή, με σκοπό να καλύψει την εναπομένουσα ηλεκτρική ζήτηση. Μια τυπική κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων εξετάστηκε και μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με το [150]. Η κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει σε μερικό φορτίο και η ελάχιστη ισχύς θεωρήθηκε ίση με το 30% της ονομαστικής ισχύος (P_{fuelnom}) της.

Στην Εικόνα 5-7, παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα ελέγχου του πράκτορα. Ο Fuel cell πράκτορας υπολογίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας κυψέλης καυσίμου και τη θέτει σε κατάσταση λειτουργίας. Συγκεκριμένα, εάν το ισοζύγιο ενέργειας είναι αρνητικό, τότε ο πράκτορας προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, χρησιμοποιώντας ένα FCM. Οι κόμβοι του FCM είναι ο C1 και ο C4, που παριστάνουν τη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών και την αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου στο μεταλλικό υδρίδιο, αντίστοιχα. Όλες οι τιμές του κάθε κόμβου, ασαφοποιούνται στο διάστημα [0,1]. Στη συνέχεια,

χρησιμοποιείται η μέθοδος αποασαφοποίησης για να αποσαφηνιστεί η τιμή του κόμβου C6 σε αριθμητική τιμή. Αυτή η τιμή παριστάνει ένα ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της κυψέλης καυσίμου. Το σημείο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 30%, σε αντίθετη περίπτωση η κυψέλη καυσίμου παραμένει απενεργοποιημένη.

Ο αλγόριθμος του Fuel cell πράκτορα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-6. Ο Fuel cell πράκτορας έχει την ίδια αρχιτεκτονική με τον Desalination πράκτορα.



Εικόνα 5-7 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του Fuel cell πράκτορα

Πίνακας 5-6 Αλγόριθμος του Fuel cell πράκτορα

Αλγόριθμος - Fuel cell πράκτορας

Συνάρτηση Fuel cell πράκτορα - αντανακλαστικός πράκτορας με εσωτερικό μοντέλο

Δεδομένα: Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (SOC), Αποθηκευμένη ποσότητα του υδρογόνου ($H_{2level}(t)$), Ενεργειακό ισοζύγιο (ΔP)

Αρχικοποίηση

Έναρξη

Κανόνες : $-P_{fuel} > 0.3 * P_{fuelnom}$

- Φόρτιση των συσσωρευτών και διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος

Ενέργειες : - Ρύθμιση του σημείου λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου (Εικόνα 5-7)

- Αποστολή σημάτων στους άλλους πράκτορες σχετικά με τη παραγόμενη ενέργεια της κυψέλης καυσίμου

Επιστροφή στις ενέργειες

Τέλος

5.5 Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης

Προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός του μικροδικτύου από την άποψη κόστους, διαμορφώθηκε μια συνάρτηση κόστους. Η βελτιστοποίηση αποσκοπούσε να ελαχιστοποιήσει το Καθαρό Παρόν Κόστος (Net Present Cost - NPC) του μικροδικτύου για μια περίοδο λειτουργίας 20 ετών, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι καλύπτει τους τεχνικούς περιορισμούς.

Οι τεχνικοί περιορισμοί που πρέπει να καλύπτονται με σκοπό να διασφαλίζεται η σταθερότητα του μικροδικτύου και η ασφαλής λειτουργία του είναι:

(α) Όλες οι ανάγκες πρέπει να καλύπτονται κατά 100% καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

(β) Η δεξαμενή νερού δεν πρέπει να αδειάσει ποτέ.

(γ) Η δεξαμενή υδρογόνου χαμηλής πίεσης για την αποθήκευση του υδρογόνου δεν πρέπει να αδειάσει ποτέ.

(δ) Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι βαθιές εκφορτίσεις των συσσωρευτών μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη γήρανσή τους, η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών δεν πρέπει να πέσει κάτω από το 20% ανά πάσα στιγμή.

(ε) Για να εξασφαλιστεί η συνεχής λειτουργία του μικροδικτύου κάθε χρόνο υπό πραγματικές συνθήκες, οι ποσότητες νερού και υδρογόνου που αποθηκεύονται στις αντίστοιχες δεξαμενές στο τέλος του έτους θα πρέπει να είναι ίσες ή μεγαλύτερες από τις αρχικές

τους τιμές. Σε κάθε άλλη περίπτωση, ενδέχεται το μικροδίκτυο να μην είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες για το επόμενο έτος, καθώς λαμβάνει χώρα η εποχιακή αποθήκευση, ειδικά για το πόσιμο νερό.

Οι μεταβλητές που πρέπει να βελτιστοποιηθούν είναι τα μεγέθη των μονάδων του μικροδικτύου και οι παράμετροι του συστήματος διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου του μικροδικτύου. Τα στοιχεία του μικροδικτύου που πρέπει να βελτιστοποιηθούν είναι:

- Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών
- Η ονομαστική ισχύ του συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, το οποίο είναι εξοπλισμένο με υδραυλικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας
- Η ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης
- Η ονομαστική ισχύς της μονάδας κυψέλης καυσίμου
- Το μέγεθος της δεξαμενής νερού όπου αποθηκεύεται το πόσιμο νερό
- Η χωρητικότητα του μεταλλικού υδριδίου όπου αποθηκεύεται το παραγόμενο υδρογόνο

Για το αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου, οι παράμετροι που επρόκειτο να βελτιστοποιηθούν είναι τα βάρη FCM (W_{13_DEMS} , W_{23_DEMS} , W_{43_DEMS}) για τον Desalination πράκτορα, τα βάρη FCM (W_{15_DEMS} , W_{25_DEMS} , W_{45_DEMS}) για τον Electrolyzer πράκτορα, τα βάρη FCM (W_{16_DEMS} , W_{46_DEMS}) για τον Fuel cell πράκτορα και οι τιμές των σημείων W_{max} , W_{1level} , H_{2max} και S_{ele} .

Οι μεταβλητές είναι συνεχείς και διακριτές και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization καθώς έχει τη δυνατότητα να βελτιστοποιεί τις μικτές συνεχείς και διακριτές μεταβλητές [154-156].

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση και την εύρεση των βέλτιστων μεγεθών των μονάδων του μικροδικτύου είναι σε ακολουθία με τις τιμές της αγοράς. Η συνάρτηση κόστους $CostF$ που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί παρουσιάζεται στην Εξίσωση 5.3, στην οποία προκειμένου να ικανοποιηθούν οι τεχνικοί περιορισμοί, προστίθενται κυρώσεις-πέναλι. Οι κυρώσεις είναι ίσες με το μηδέν όταν πληρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί. Διαφορετικά, προστίθεται ένα τεράστιο ποσό στη συνάρτηση κόστους.

$$\text{CostF} = \text{NPC} + \sum_{i=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{i=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{i=1}^{8760} P_w(t) + P_{wt} + P_{H_2T} \quad (5.3)$$

όπου NPC είναι το καθαρό παρόν κόστος, P_b είναι η ποινή για τη συστοιχία των συσσωρευτών αν η κατάσταση φόρτισής τους είναι χαμηλότερη από 20%, P_{H_2} είναι η ποινή εάν το μεταλλικό υδρίδιο αδειάσει, P_w είναι η ποινή εάν η δεξαμενή νερού αδειάσει, P_{wt} είναι η ποινή εάν το αποθηκευμένο νερό στο τέλος του έτους είναι μικρότερο από ότι στην αρχή του έτους και P_{H_2T} είναι η ποινή εάν η αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου στο τέλος του έτους είναι μικρότερη από ότι στην αρχή του έτους.

5.6 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του συστήματος παρουσιάζονται στον

Πίνακα 5-7, εφαρμόζοντας την πλατφόρμα λογισμικού που αναπτύχθηκε στην Ενότητα 5.2 (Εικόνα 5-2). Η εγκατεστημένη ισχύς από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια ήταν ίση με 21.24 kWp.

Πίνακας 5-7 Βελτιστοποίηση των μεταβλητών του DEMS

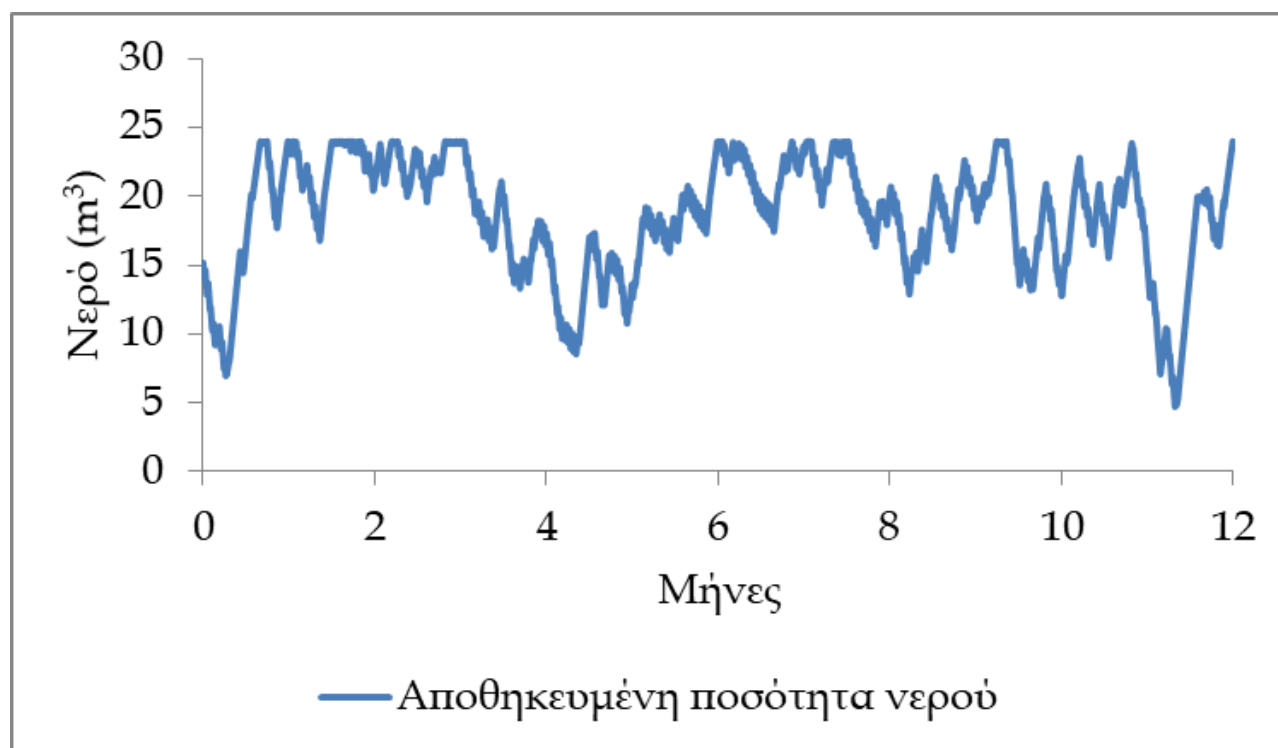
Μεταβλητή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Βήμα	Βέλτιστη Τιμή
Στοιχεία Συστήματος				
Χωρητικότητα του κάθε συσσωρευτή (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 48 V DC (2 V κάθε συσσωρευτής)	800, 1000, 1200, 1500, 1600, 2000, 3000			1600
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ονομαστικής ισχύς 180 Wp το καθένα σε σειρά	90	125	1	118
Ονομαστική ισχύς της κυψέλης καυσίμου (W)	300	1200	100	500
Ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης (W)	600	1700	100	700
Χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου (Nm ³ of H ₂)	20	40	1	22
Χωρητικότητα της δεξαμενής νερού (m ³)	18	35	1	24
Ονομαστική ισχύς της μονάδας αφαλάτωσης (W)	700	1700	100	1300
Ενδιάμεσο επίπεδο ασφάλειας στη δεξαμενή νερού (m ³) (W _{1level})	18	30	1	21

Ενδιάμεσο επίπεδο ασφάλειας της μονάδας ηλεκτρόλυσης (%) (S_{ele})	0.57	100	1	0.01
--	------	-----	---	------

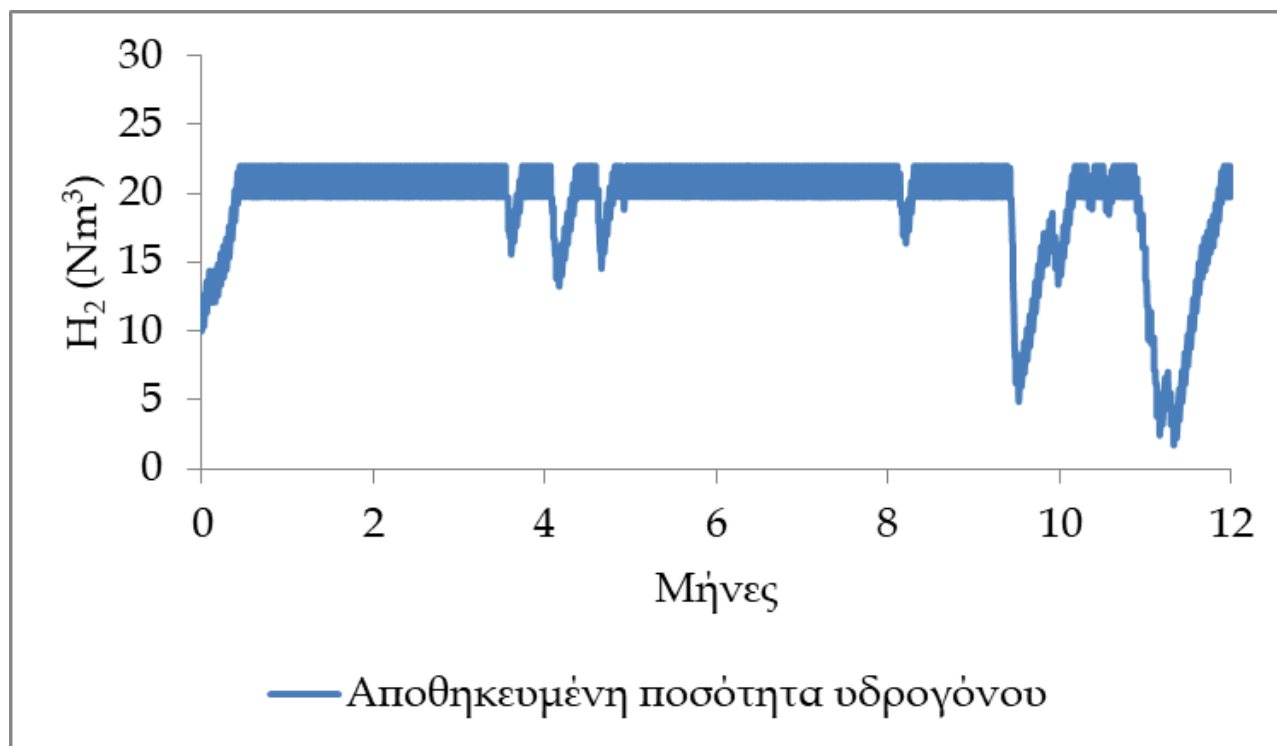
Μεταβλητές του συστήματος διαχείρισης ενέργειας

W_{13_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.38
W_{23_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.50
W_{43_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.72
W_{15_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.57
W_{45_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.12
W_{25_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.79
W_{16_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.52
W_{46_DEMS}	0	1	Συνεχής	0.38

Στο Διάγραμμα 5-2 και στο Διάγραμμα 5-3, παρουσιάζονται η ετήσια διακύμανση του πόσιμου νερού και του υδρογόνου αντίστοιχα. Είναι σαφές ότι οι δεξαμενές δεν αδειάζουν ποτέ και η στάθμη του αποθηκευμένου νερού και του υδρογόνου στο τέλος του έτους είναι υψηλότερα από ότι στην αρχή του έτους. Οπότε, οι ανάγκες των κατοίκων για νερό και υδρογόνο καλύπτονται πλήρως.

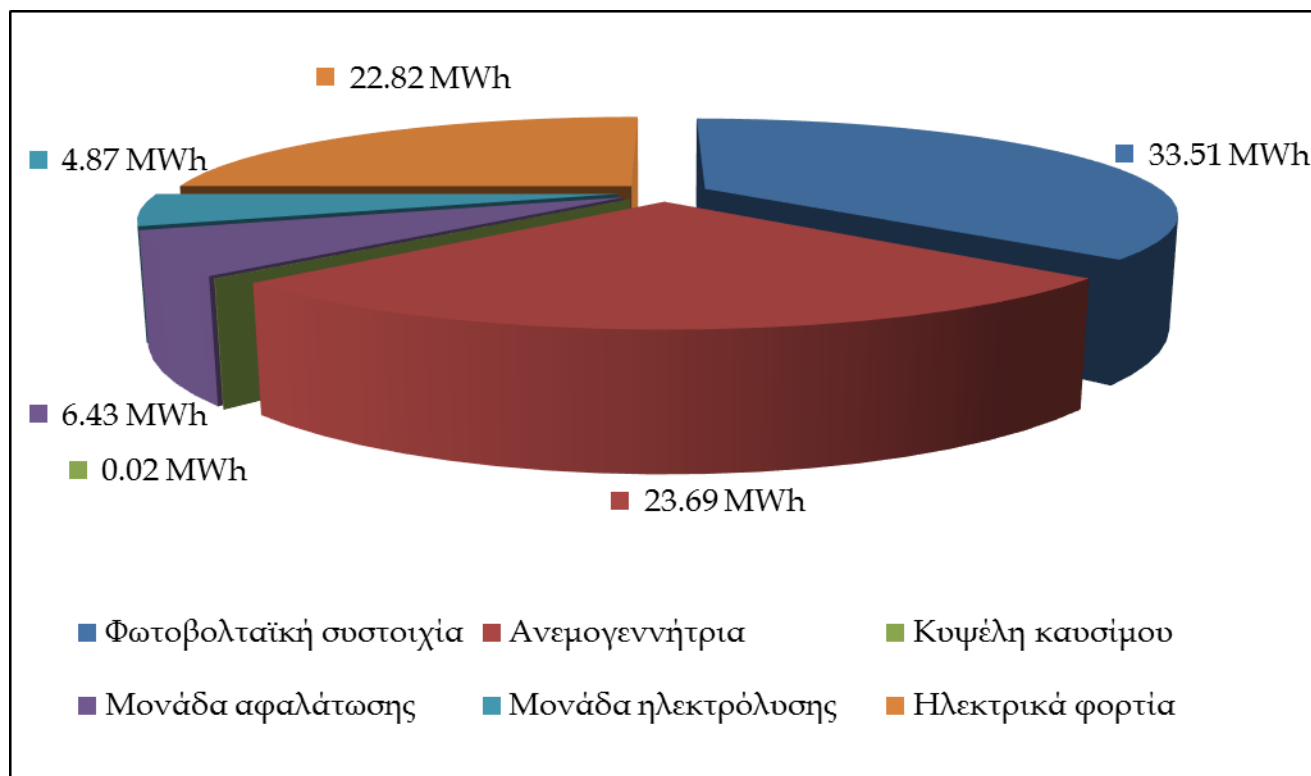


Διάγραμμα 5-1 Αποθηκευμένη ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια του έτους

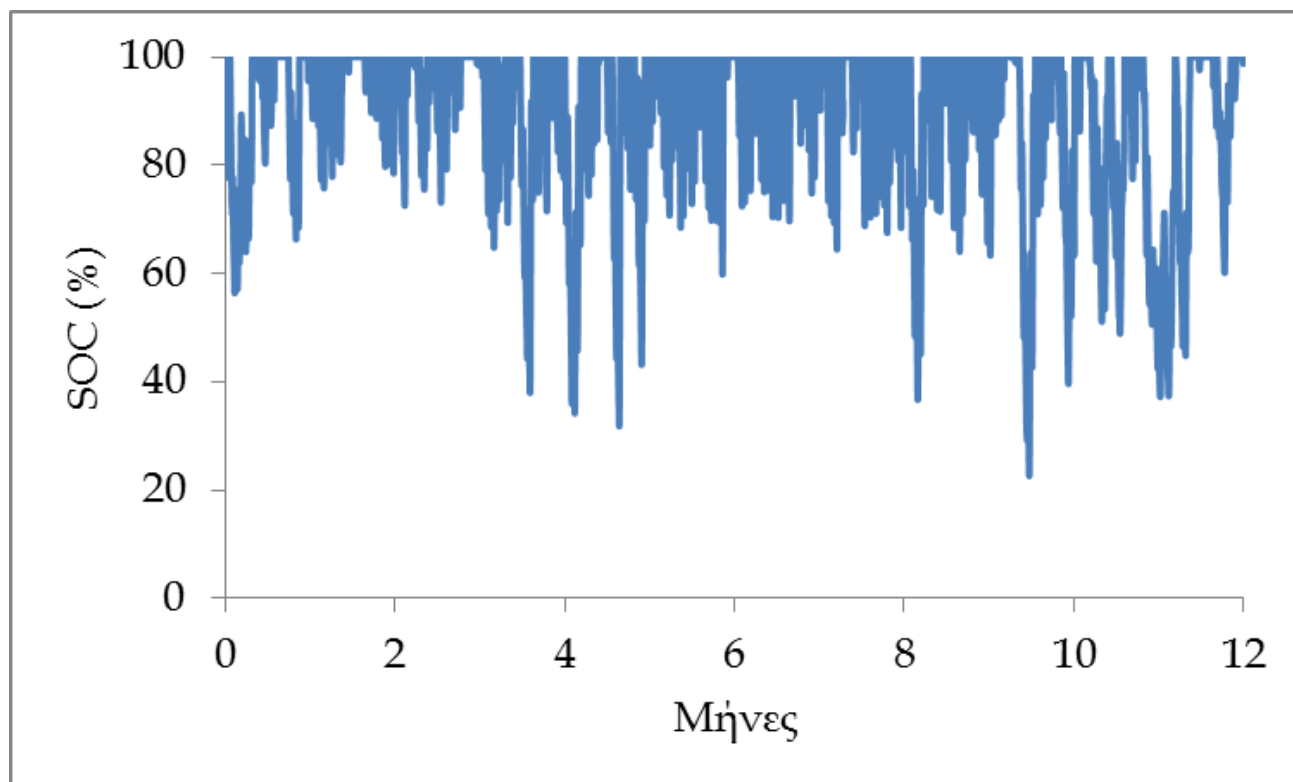


Διάγραμμα 5-2 Αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του έτους

Στην Εικόνα 5-8 παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, την ανεμογεννήτρια και τη μονάδα κυψέλης καυσίμου, καθώς και η ετήσια κατανάλωση ενέργειας από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, τη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης και τα διάφορα ηλεκτρικά φορτία. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια καθώς η μονάδα κυψέλης καυσίμου λειτουργεί μόνο για 60 ώρες. Είναι προφανές ότι η παραγόμενη ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου είναι λιγότερο σημαντική από τις άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας και η κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται ως εφεδρική πηγή ενέργειας. Στο Διάγραμμα 5-4 παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών και παρατηρείται ότι η κατάσταση φόρτισής τους δεν βρίσκεται ποτέ κάτω από το 20%. Η χαμηλότερη κατάσταση φόρτισης παρατηρήθηκε ίση με 22.59%.

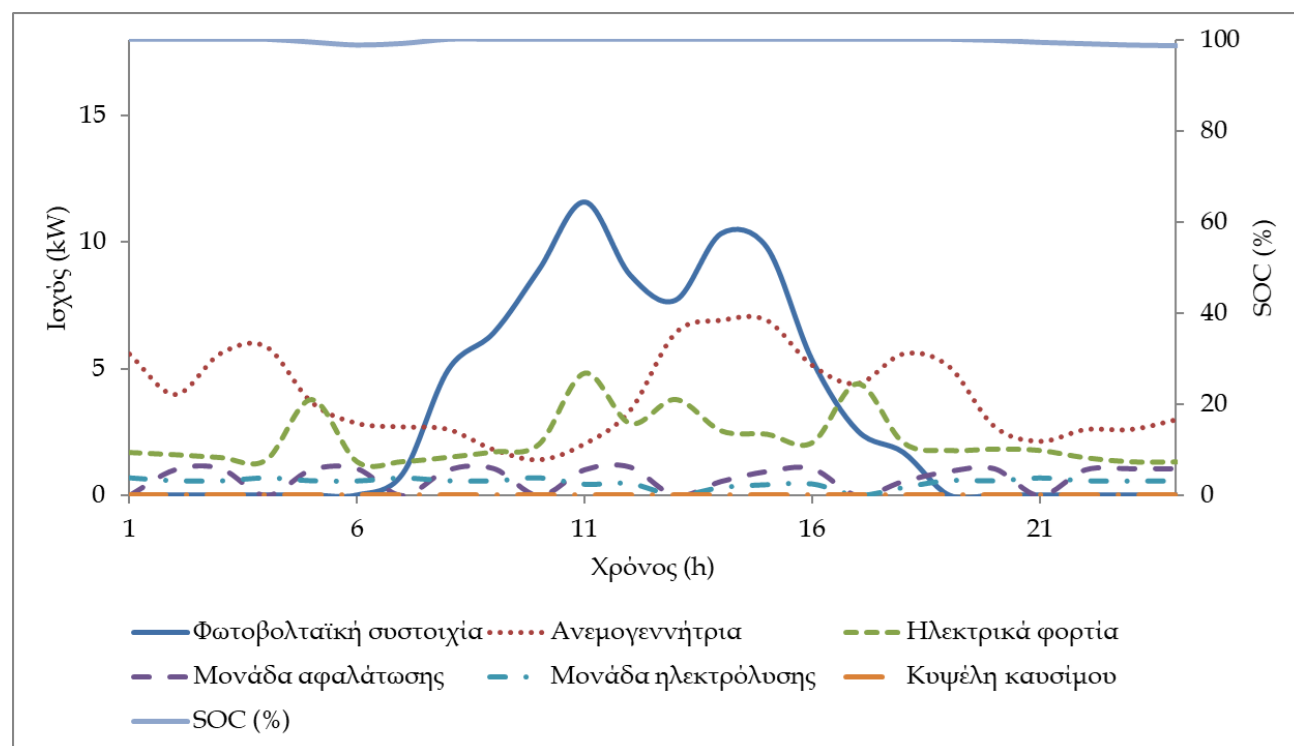


Εικόνα 5-8 Ετήσια παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας



Διάγραμμα 5-3 Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του έτους

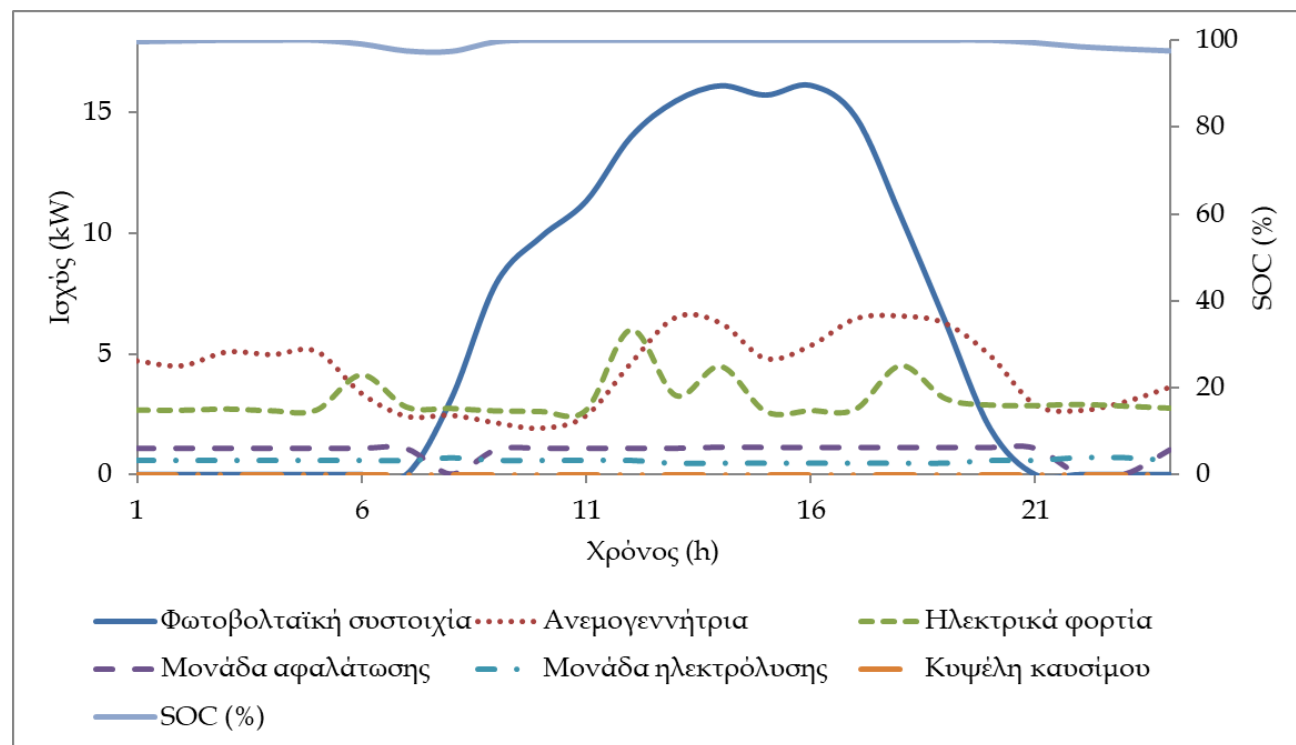
Με σκοπό την παρουσίαση της λειτουργίας του συστήματος ενέργειας και ελέγχου του μικροδικτύου, επιλέχθηκαν τρεις αντιπροσωπευτικές ημέρες. Η πρώτη ημέρα είναι η 1^η Απριλίου (Διάγραμμα 5-5). Στην αρχή της ημέρας, οι συσσωρευτές είναι σχεδόν πλήρως φορτισμένοι και παραμένουν σχεδόν πλήρως φορτισμένοι καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η αιτία είναι ότι η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια είναι υψηλή και μπορεί να καλύψει τα ηλεκτρικά φορτία. Η μονάδα κυψέλης καυσίμου δεν χρειάζεται να είναι σε λειτουργία και παραμένει απενεργοποιημένη. Επίσης, οι μονάδες αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης λειτουργούν σχεδόν συνεχώς καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Στο Διάγραμμα 5-5 παρουσιάζονται οι μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας.



Διάγραμμα 5-4 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας, (1^η Απριλίου)

Η δεύτερη ημέρα είναι η 1^η Αυγούστου, οποία είναι μια καλοκαιρινή μέρα και όπως αναμενόταν, η ηλιακή ακτινοβολία και το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό (Διάγραμμα 5-6). Οπότε, η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών παραμένει πάνω από 90% κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι μονάδες αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης λειτουργούν στην ονομαστική ισχύ σχεδόν όλη την ημέρα, εκτός από δύο ώρες κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου απενεργοποιείται

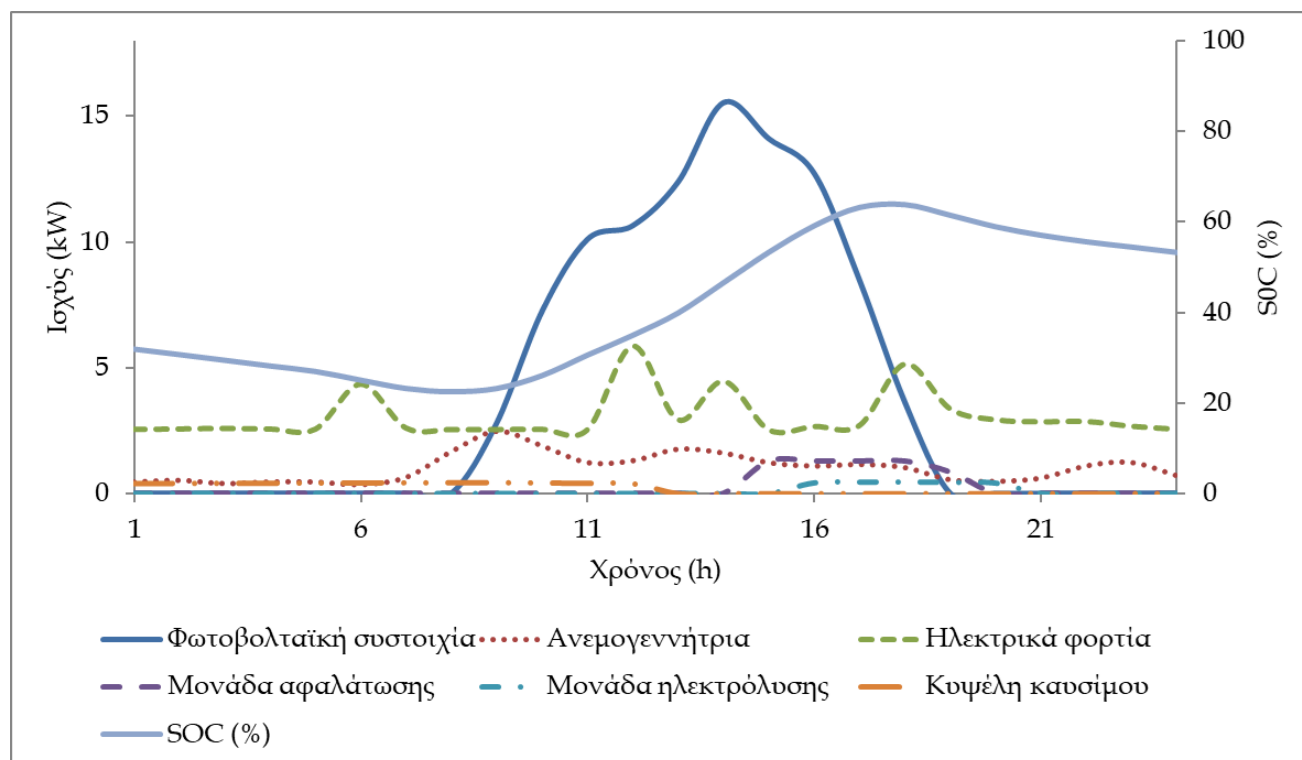
η μονάδα αφαλάτωσης. Στο Διάγραμμα 5-6 παρουσιάζονται οι μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας.



Διάγραμμα 5-5 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας, (1^η Αυγούστου)

Η τελευταία ημέρα είναι η 15^η Οκτωβρίου (Διάγραμμα 5-7). Είναι μια ημέρα φθινοπώρου και η ηλιακή ακτινοβολία και το αιολικό δυναμικό είναι πολύ χαμηλά το πρωί. Η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι χαμηλή από την προηγούμενη μέρα και παραμένει χαμηλή μέχρι να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών καθώς η αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών αποδίδεται για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων. Στις αρχές της ημέρας η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών ήταν κάτω από 32% και δεν υπήρχε αρκετή ενέργεια από τις άλλες πηγές για τη κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων. Οπότε, η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιήθηκε και το σημείο λειτουργίας της ρυθμίστηκε κατάλληλα από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας με σκοπό να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες και για να προστατεύσει τη συστοιχία των συσσωρευτών από μια βαθιά εκφόρτιση. Έπειτα, όταν η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την

ανεμογεννήτρια αυξήθηκε, ο fuel cell πράκτορας απενεργοποίησε την κυψέλη καυσίμου. Οι συσσωρευτές άρχισαν να φορτίζονται, η μονάδα αφαλάτωσης άρχισε να παράγει πόσιμο νερό και η μονάδα ηλεκτρόλυσης άρχισε να παράγει υδρογόνο. Στο Διάγραμμα 5-7 παρουσιάζονται οι μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας.

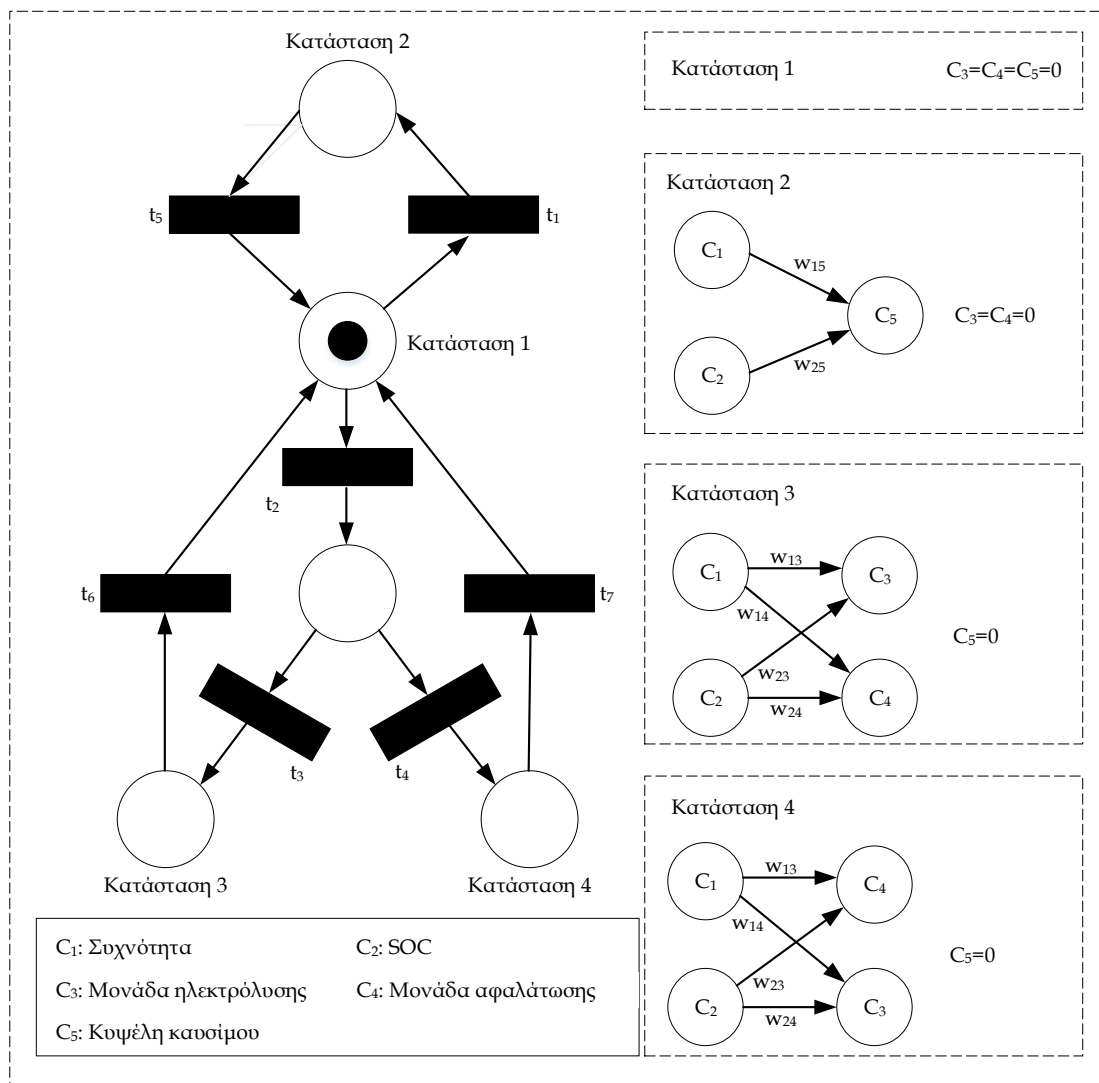


Διάγραμμα 5-6 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της τρίτης ημέρας, (15^η Οκτωβρίου)

5.6.1 Σύγκριση του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων με ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας

Μία σύγκριση μεταξύ του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων και ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας πραγματοποιήθηκε για την ίδια τοπολογία μικροδικτύου. Το κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας έχει παρουσιαστεί λεπτομερώς στο [112] και βασίζεται σε ένα συνδυαστικό σύστημα Δικτύων Petri Nets και Ασαφών Γνωστικών Χαρτών. Το δίκτυο Petri Net χρησιμοποιείται για να προτείνει την εποπτική στρατηγική για την διαχείριση της ενέργειας σε ένα αυτόνομο

μικροδίκτυο πολυπαραγωγής. Μια γραφική αναπαράσταση του CEMS παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-9.



Εικόνα 5-9 Αρχιτεκτονική του CEMS

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου χρησιμοποιεί ως εισόδους την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών, το διαθέσιμο νερό στη δεξαμενή νερού και τη συχνότητα του μικροδικτύου. Το δίκτυο Petri Net χρησιμοποιείται για να αποφασίσει τη κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου ενώ τρία FCMs χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου.

Η ίδια τοπολογία μικροδικτύου με τις ίδιες ανάγκες ηλεκτρικών φορτίων, νερού και καυσίμου χρησιμοποιήθηκε για το κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Επιπλέον, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού του μικροδικτύου με κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία βελτιστοποίησης μέσω της χρήσης της Εξίσωσης 5.3. Ο Πίνακας 5-9 παρουσιάζει τις βέλτιστες τιμές για κάθε μεταβλητή.

Πίνακας 5-8 Βελτιστοποίηση μεταβλητών του CEMS

Μεταβλητή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Βήμα	Βέλτιστη Τιμή
Στοιχεία Συστήματος				
Χωρητικότητα του κάθε συσσωρευτή (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 48 V DC (2 V κάθε συσσωρευτής)	800, 1000, 1200, 1500, 1600, 2000, 3000			1500
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ονομαστικής ισχύς 180 Wp το καθένα σε σειρά	90	125	1	114
Ονομαστική ισχύς της κυψέλης καυσίμου (W)	300	1200	100	400
Ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης (W)	600	1700	100	1100
Χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου (Nm ³ of H ₂)	20	40	1	27
Χωρητικότητα της δεξαμενής νερού (m ³)	18	35	1	35
Ονομαστική ισχύς της μονάδας αφαλάτωσης (W)	700	1700	100	1500
Μεταβλητές του συστήματος διαχείρισης ενέργειας				
W13_CEMS	-1	0	Συνεχές	-0.52
W14_CEMS	-1	0	Συνεχές	-0.42
W15_CEMS	0	1	Συνεχές	0.74
W23_CEMS	0	1	Συνεχές	0.77
W24_CEMS	0	1	Συνεχές	0.83
W25_CEMS	0	1	Συνεχές	0.57
SOCL	15	40	1	40
SOCM	80	100	1	87

Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης έδειξαν ότι το κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε σύγκριση με το αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφρών πρακτόρων παρουσιάζει υψηλότερο καθαρό παρόν κόστος περίπου 2% (το NPC του CEMS είναι 162.067 € και το NPC του MAS-DEMS είναι 158.856 €). Οπότε το αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά και επιπλέον να ξεπεράσει την προσέγγιση της κατανεμημένης λογικής διαχείρισης ενέργειας από οικονομική άποψη.

5.7 Συμπεράσματα

Το κύριο συμπέρασμα αποτελεί το γεγονός ότι η χρήση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου με τη χρήση ευφρών πρακτόρων μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στο σχεδιασμό και στον έλεγχο ενός μικροδικτύου. Στο αναπτυγμένο σύστημα ευφρών πρακτόρων, οι πράκτορες επικοινωνούσαν μεταξύ τους με υπολογιστική νοημοσύνη για να επιτύχουν τον βέλτιστο έλεγχο για τη λειτουργία του μικροδικτύου.

Επιπλέον, σε σύγκριση με την προσέγγιση ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας, το αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας κατάφερε να αξιοποιήσει καλύτερα τις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου και να ελέγξει καλύτερα της υπόλοιπες μονάδες του μικροδικτύου, γεγονός που με τη σειρά του οδήγησε σε χαμηλότερο καθαρό παρόν κόστος για μια λειτουργία του μικροδικτύου περιόδου 20 ετών.

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι ότι παρουσιάζεται μικρότερος κίνδυνος πλήρους κατάρρευσης του συστήματος, καθώς μια πιθανή αποτυχία ορισμένων πρακτόρων δεν μεταφράζεται σε ολική κατάρρευση του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας.

Κεφάλαιο 6:

Τεχνική και οικονομική διερεύνηση
συστήματος αφαλάτωσης
αντίστροφης όσμωσης
τροφοδοτούμενο από
φωτοβολταϊκά πλαίσια

6 Τεχνική και οικονομική διερεύνηση συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης τροφοδοτούμενο από φωτοβολταϊκά πλαίσια

6.1 Εισαγωγή

Η αύξηση του πληθυσμού και η κλιματική αλλαγή έχουν οδηγήσει το νερό και την ενέργεια να αναγνωρίζονται ως δύο από τα σημαντικότερα θέματα του παγκόσμιου περιβαλλοντικού και αναπτυξιακού προγράμματος [157]. Αυτές οι βασικές πηγές αποτελούν βασικά αγαθά όχι μόνο για την ευημερία του σύγχρονου κόσμου (συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανικής ανάπτυξης, της οικονομικής ανάπτυξης και της κοινωνικής προόδου), αλλά και για τη διατήρηση της ζωής στη Γη και την ανθρώπινη επιβίωση. Παρά το γεγονός ότι ο πλανήτης μας είναι γεμάτος με νερό, μόνο το 2.5% του νερού στη Γη είναι γλυκό νερό και πάνω από το 97% αυτού του νερού είναι αλμυρό νερό που εναποτίθεται κυρίως στους ωκεανούς, στα υφάλμυρα ύδατα που εναποτίθενται σε φυσική επιφάνεια ή υπόγεια ύδατα (π.χ. λίμνες, υπόγειοι γεωλογικοί σχηματισμοί κοντά σε παράκτιες περιοχές ή σε ιδιαίτερες περιοχές της ηπειρωτικής Ευρώπης, κτλ). Ωστόσο, μόνο το 3% του συνόλου του γλυκού νερού στον πλανήτη μας είναι άμεσα διαθέσιμο στον παγκόσμιο ανθρώπινο πληθυσμό. Υπάρχουν πολλές περιοχές στον κόσμο, όπως τα νησιά και οι παράκτιες περιοχές (π.χ. μεσογειακή λεκάνη, Εγγύς Ανατολή, Νότια Ασία, Βόρεια Κίνα, Αυστραλία, Δυτικές ΗΠΑ, Μεξικό, Νότια Αφρική, Βορειοανατολική Βραζιλία και δυτική ακτές της Νότιας Αμερικής) που παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις στην παροχή πόσιμου νερού, ακόμη και σε ενδιαιτήματα που βρίσκονται σε λεκάνες απορροής ποταμών. Αυτή η κατάσταση μεταφράζεται στο γεγονός ότι σχεδόν δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο δεν έχουν επαρκή πρόσβαση σε γλυκό νερό [158].

Η παγκόσμια έλλειψη νερού έχει εμπνεύσει μια ποικιλία στρατηγικών για την παροχή καθαρού νερού σε περιοχές που έχουν ανάγκη. Σήμερα, το καθεστώς ισορροπίας μεταξύ της προσφοράς γλυκού νερού και της πραγματικής ζήτησης ύδατος εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα γλυκού νερού στους υπόγειους ή στους επιφανειακούς υδάτινους πόρους [159]. Μια λύση αποτελεί η μεταφορά του γλυκού νερού [160] από περιοχές με άφθονο γλυκό νερό σε περιοχές με ανεπάρκεια γλυκού νερού [161]. Έχουν εφαρμοστεί αρκετά παγκόσμια σχέδια

μεταφοράς υγρών νερών όπως στη Γερμανία [162] και στις Ηνωμένες Πολιτείες [163]. Παρόλα αυτά, οι θαλάσσιες μεταφορές νερού δημιουργούν οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως η μείωση των υδάτινων πόρων και η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η ανάπτυξη νέων πηγών γλυκού νερού μπορεί να συμβάλει στην κάλυψη των αναγκών του πληθυσμού σε περιοχές που δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση. Σημαντικός αριθμός ανθρώπων που αντιμετωπίζει ελλείψεις νερού, ζει σε παράκτιες ή νησιωτικές περιοχές με πρόσβαση στο θαλασσινό νερό και συνήθως οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν υψηλή ηλιακή ενέργεια. Ως εκ τούτου, μια εναλλακτική λύση για την παροχή καθαρού νερού στις κοινότητες που αντιμετωπίζουν λειψυδρία είναι η αφαλάτωση θαλασσινού νερού [164].

Υπάρχουν δύο κύριες διεργασίες αφαλάτωσης, οι θερμικές διεργασίες και οι διεργασίες μέσω μεμβρανών [165]. Στις θερμικές διεργασίες, η λειτουργία των θερμικών σταθμών είναι σχετικά απλή και το λειτουργικό τους κόστος είναι χαμηλό [166]. Ωστόσο, έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις [167]. Οι διεργασίες μέσω μεμβρανών, όπως η ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED) και κυρίως η αντίστροφη όσμωση (Reverse Osmosis - RO), έχουν σήμερα μεγαλύτερη παγκόσμια αποδοχή από τις θερμικές διεργασίες και έχουν εφαρμοστεί όχι μόνο στην αφαλάτωση αλλά και στην επεξεργασία του νερού γενικότερα [168]. Η RO είναι μια διαδικασία όπου το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται σε ημιπερατή μεμβράνη υπό πίεση, μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση, και η μεμβράνη διαχωρίζει το γλυκό νερό από το διάλυμα συμπυκνώματος [169].

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 97% του νερού της γης προέρχεται από τους ωκεανούς, η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με RO (Sea Water Reverse Osmosis - SWRO) αποτελεί ελκυστική λύση για τη λειψυδρία [170]. Η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με RO είναι μια διαδικασία που απαιτεί σημαντική ενέργεια, λόγω της υψηλής πίεσης που απαιτείται. Έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις ανάκτησης ενέργειας προκειμένου να μειωθεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης SWRO έως και 60%.

Η συνεχής διακόμευση των τιμών των ορυκτών καυσίμων και ο αντίκτυπός τους στο περιβάλλον σε σύγκριση με τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθιστά τη συνδυασμένη παραγωγή ΑΠΕ με μονάδες αφαλάτωσης μια οικονομικά βιώσιμη λύση [171] και

παράλληλα προσφέρουν μια εναλλακτική λύση, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι ανάγκες σε ενέργεια, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν υλοποιηθεί διάφορες μονάδες αφαλάτωσης που λειτουργούν με ΑΠΕ, όπως μονάδες αφαλάτωσης RO που χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια [172], αιολική ενέργεια [173], θερμική ενέργεια [174] ή συνδυασμός αρκετών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιπλέον, οι μονάδες αφαλάτωσης με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οδηγούν σε περιβαλλοντικά οφέλη και στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη απομακρυσμένων περιοχών με σοβαρή λειψυδρία [175].

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μεταβλητή λόγω των καιρικών μεταβολών. Ως εκ τούτου, ο στόχος για την επίτευξη αξιόπιστης και αποτελεσματικής απόδοσης ενός συστήματος αφαλάτωσης SWRO που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γίνεται ένα πολύπλοκο έργο [176].

Οπότε, η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους όλων των εξαρτημάτων ενός συστήματος αφαλάτωσης με ΑΠΕ αποτελεί απαραίτητη ανάγκη ώστε να διατηρείται η αξιοπιστία του συστήματος με το ελάχιστο δυνατό κόστος [177]. Κανονικά, οι μονάδες αφαλάτωσης SWRO λειτουργούν σε ονομαστικό σημείο λειτουργίας, ωστόσο, έχουν επιτευχθεί εξαιρετικά αποτελέσματα όταν η μονάδα αφαλάτωσης SWRO λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο (δηλ. μεταβλητή πίεση τροφοδοσίας και μεταβλητή παροχή) [151, 156]. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητού φορτίου είναι ότι η μονάδα αφαλάτωσης SWRO παρουσιάζει χαμηλότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας έναντι της λειτουργίας στο ονομαστικό φορτίο. Οπότε, μια προσέγγιση για το σχεδιασμό ενός συστήματος αφαλάτωσης SWRO με ΑΠΕ, μπορεί να είναι η απευθείας τροφοδότηση της μονάδας από τις πηγές ενέργειας. Στα συστήματα αυτά, η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο ανάλογα με την παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή να βρίσκεται σε λειτουργία πλήρους φορτίου μέσω ενός απλού συστήματος ενεργειακής διαχείρισης ON/OFF, χωρίς τη χρήση συμβατικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Όταν το σύστημα αφαλάτωσης ενσωματώνει μονάδες αποθήκευσης ενέργειας όπως συσσωρευτές, τότε το σύστημα γίνεται περίπλοκο και ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι απαραίτητο για να αποφασίζεται πότε πρέπει να ενεργοποιηθεί και πότε να απενεργοποιηθεί η τροφοδοσία της μονάδας

αφαλάτωσης. Μια κοινή προσέγγιση που χρησιμοποιείται για έναν τέτοιο έλεγχο είναι η χρήση της λογικής ελέγχου υστέρησης [178, 179]. Επιπλέον, συστήματα διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούν υπολογιστική νοημοσύνη έχουν αναπτυχθεί για τη βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ [180, 181].

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια στοχευμένη πειραματική έρευνα μιας μονάδας αφαλάτωσης SWRO μικρής κλίμακας εξοπλισμένη με μια συσκευή ανάκτησης ενέργειας (αντλία Clark). Η μονάδα αφαλάτωσης SWRO μελετήθηκε σε λειτουργία μεταβλητού φορτίου. Ο στόχος ήταν να μελετηθεί η απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης γύρω από το εύρος πιέσεων του νερού τροφοδοσίας στη μονάδα μεταβάλλοντας την ισχύ τροφοδοσίας, ενώ παράλληλα παραγόταν καθαρό νερό με επαρκή ποιότητα (ηλεκτρική αγωγιμότητα κάτω από 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [182]). Δεδομένου ότι η διακύμανση της εισροής ισχύος ήταν έντονη, μια κρίσιμη μέτρηση κάτω από τέτοιες συνθήκες δοκιμής ήταν ο λόγος της κατανάλωσης ενέργειας προς την παραγωγή καθαρού νερού, δηλαδή η ειδική κατανάλωση ενέργειας (Specific Energy Consumption – SEC).

Επιπλέον, έχοντας μελετήσει τη μονάδα αφαλάτωσης, εξετάστηκε η βέλτιστη, τεχνικά και οικονομικά διαμόρφωση, των στοιχείων ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης SWRO που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά (PV – SWRO). Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο μελετήθηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης PV-SWRO δεν περιλαμβάνει καμία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, αλλά ενσωματώνει δεξαμενή αποθήκευσης νερού και η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί με ονομαστικό φορτίο (σταθερή παροχή και πίεση) με τη χρήση ενός συστήματος ON/OFF. Η μονάδα αφαλάτωσης αρχίζει να λειτουργεί όταν η φωτοβολταϊκή ισχύς είναι επαρκής για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης στο ονομαστικό φορτίο (σταθερή παροχή και πίεση). Στο δεύτερο σενάριο, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης PV-SWRO λειτουργεί με μεταβλητή παροχή ισχύος και μεταβαλλόμενες συνθήκες (μεταβλητή παροχή και πίεση). Η μονάδα αφαλάτωσης αρχίζει να λειτουργεί όταν η φωτοβολταϊκή ενέργεια φτάσει σε ένα συγκεκριμένο όριο και σταματά όταν η φωτοβολταϊκή ενέργεια δεν επαρκεί για να λειτουργήσει η μονάδα αφαλάτωσης. Στο τρίτο σενάριο, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης SWRO ενσωματώνει συστοιχία συσσωρευτών και δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Σε αυτό το σύστημα εξετάζεται ένα σύστημα EMS με βάση τη λογική ελέγχου υστέρησης. Η υστέρηση χρησιμοποιείται για να

ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει τη μονάδα αφαλάτωσης με βάση την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών. Στο τέταρτο και το πέμπτο σενάριο τα στοιχεία του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης SWRO είναι τα ίδια με αυτά του τρίτου σεναρίου. Η διαφορά είναι ότι η μονάδα αφαλάτωσης επιτρέπεται να λειτουργεί με μεταβλητό φορτίο (μεταβλητή παροχή ροής και πίεση). Στο τέταρτο σενάριο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασίζεται στην Ασαφή Λογική, ενώ στο πέμπτο σενάριο το σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασίζεται στους Ασαφείς Γνωστικούς Χάρτες.

Τέλος, τα πέντε διαφορετικά σενάρια συγκρίθηκαν τεχνικά και οικονομικά με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού του συστήματος αφαλάτωσης. Η οικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις τιμές αγοράς και η οικονομική διάρκεια ζωής του συστήματος θεωρήθηκε στα 20 χρόνια. Ο σχεδιασμός και η βέλτιστη διαστασιολόγηση του συστήματος σε κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της βελτιστοποίησης PSO.

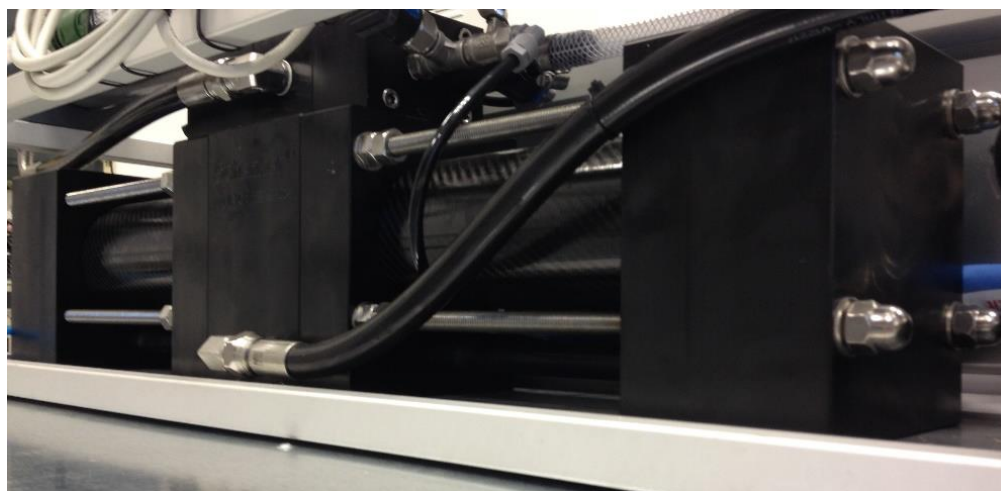
6.2 Μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης

6.2.1 Περιγραφή λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης

Η μέθοδος αφαλάτωσης που επιλέχθηκε είναι η αντίστροφη όσμωση, η οποία βασίζεται, κυρίως, στην τεχνολογία ειδικών μεμβρανών, με εφαρμογή υψηλής πίεσης νερού, και χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και ηλεκτρική ενέργεια. Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-1. Η μονάδα αφαλάτωσης περιλαμβάνει μια περιστροφική αντλία θετικής μετατόπισης, η οποία αποτελεί την αντλία τροφοδοσίας, μια αντλία υψηλής πίεσης και ανάκτησης ενέργειας (αντλία Clark), μία μεμβρανοθήκη και έναν ηλεκτρικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Η αντλία Clark είναι μια υδραυλική αντλία θετικής μετατόπισης που ανακτά μεγάλο μέρος της απορριπτόμενης ενέργειας της άλμης, προσθέτοντας την στο διερχόμενο νερό τροφοδοσίας [183] και παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-2.



Εικόνα 6-1 Μονάδα αφαλάτωσης



Εικόνα 6-2 Ανακτητής υδραυλικής ενέργειας

Στη πειραματική διερεύνηση, το θαλασσινό νερό είναι τεχνητό και η δημιουργία του πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο διαλύοντας 25 kg NaCl σε 1 m³ νερό του δικτύου, το οποίο πρώτα διήλθε από ένα φίλτρο κυτταρίνης άνθρακα με σκοπό την αφαίρεση της θολότητας, του χλωρίου και του οργανικού φορτίου. Η δεξαμενή τροφοδοσίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-3.



Εικόνα 6-3 Δεξαμενή τροφοδοσίας

Στο σύστημα αφαλάτωσης, η αντλία τροφοδοσίας αντλεί το νερό από τη δεξαμενή τροφοδοσίας υπό πίεση, το οδηγεί στην είσοδο της αντλίας Clark δια μέσου ενός φίλτρου κοτταρίνης 5 μm και το νερό καταλήγει στην μεμβράνη αντίστροφης όσμωσης. Η μεμβράνη είναι η καρδιά της μονάδας αφαλάτωσης και διαχωρίζει το εισερχόμενο νερό σε δύο ρεύματα, το αφαλατωμένο και το απορριπτόμενο νερό (άλμη). Χρησιμοποιήθηκε μια μεμβράνη σπειροειδούς περιέλιξης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στο Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά της μεμβράνης

Παράμετρος	Τιμή
Μεμβρανοθήκη	Code line
Τύπος μεμβράνης	Filmtec SW 30-4040
Μέγιστη πίεση	69 bar
Μέγιστη θερμοκρασία νερού	45 °C
Μέγιστη παροχή τροφοδοσίας	3.6 m ³ /h
Παροχή παραγόμενου νερού	300 L/h
Ικανότητα απόρριψης αλάτων	99.4%
Ανάκτηση ενός στοιχείου	8%

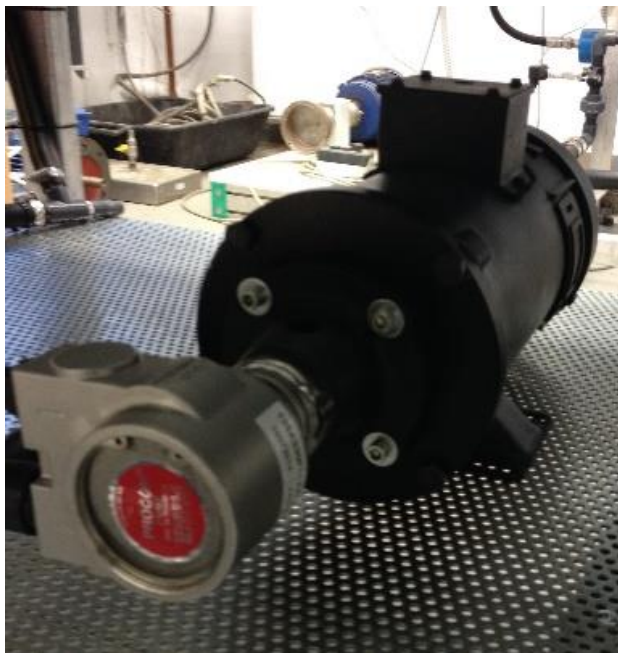
Η παροχή ισχύος στην αντλία τροφοδοσίας γίνεται με τη χρήση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας τροφοδοσίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-2, ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα τροφοδοσίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-3. Στην Εικόνα 6-4 απεικονίζεται η αντλία και ο κινητήρας τροφοδοσίας.

Πίνακας 6-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας τροφοδοσίας

Αντλία τροφοδοσίας	
Τύπο αντλίας	Θετικής μετατόπισης
Μοντέλο	Procon
Μέγιστη πίεση	16 bar

Πίνακας 6-3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα τροφοδοσίας

Κινητήρας τροφοδοσίας	
Τύπος κινητήρα	Lesson
Ονομαστική ισχύς	0.75 kW
Τάση κινητήρα	48 VDC



Εικόνα 6-4 Αντλία και κινητήρας τροφοδοσίας

Η μεμβράνη αφαιρώνει ένα μέρος του νερού τροφοδοσίας ενώ το υπόλοιπο παραμένει σε υψηλή πίεση με υψηλή αλατότητα. Η αντλία Clark αποτελείται από δύο κυλίνδρους. Ο ένας από τους δύο κυλίνδρους δέχεται το νερό τροφοδοσίας και ο δεύτερος ανακτά την υδραυλική ενέργεια από τη μεμβράνη (άλμη υψηλής πίεσης) και επιστρέφει αυτή την πίεση απευθείας στο νερό τροφοδοσίας. Ως αποτέλεσμα, η πίεση του νερού τροφοδοσίας είναι μεγαλύτερη από την ωσμωτική πίεση που είναι η κατάλληλη για τη λειτουργία της μεμβράνης. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας Clark παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-4.

Πίνακας 6-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας Clark

Μοντέλο	Schenker 150M
Ονομαστική παροχή τροφοδοσίας	1080 L/h
Ονομαστική παραγωγή νερού	150 L/h \pm 15%
Ονομαστική πίεση λειτουργίας	55 bar
Ονομαστική πίεση τροφοδοσίας	11 bar

6.2.2 Πειραματική διερεύνηση της μονάδας αφαλάτωσης

Ένας στόχος της πειραματικής έρευνας που διεξήχθη ήταν η διερεύνηση της λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης σε μεταβλητό φορτίο και η εξέταση της επίδρασης της θερμοκρασίας του ύδατος τροφοδοσίας στην απόδοσή της. Σε αυτή τη μελέτη, η συγκέντρωση άλατος του νερού δοκιμής διατηρήθηκε σταθερή στα 32000 ppm. Οι μεταβλητές που είναι απαραίτητες προς διερεύνηση προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης, είναι η ειδική ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας αφαλάτωσης, η πίεση στην είσοδο της μεμβράνης, ο λόγος ανάκτησης ύδατος και η ποιότητα του καθαρού νερού.

Με σκοπό τη μέτρηση των απαραίτητων μεταβλητών, εγκαταστάθηκαν διάφοροι αισθητήρες για τη μέτρηση: (i) της ισχύος εισόδου στον κινητήρα (W), (ii) της πίεσης της αντλίας ύδατος τροφοδοσίας (bar), (iii) της πίεση εισόδου στη μεμβράνη, (iv) της πίεσης μετά τη μεμβράνη, (v) του ρυθμού ροής του παραγόμενου νερού, (vi) του ρυθμού ροής της άλμης, (vii) της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του παραγόμενου νερού ($\mu\text{S}/\text{cm}$) και (viii) της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της άλμης ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Τα κατάλληλα όργανα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-5. Όλοι οι αισθητήρες συνδέθηκαν με ένα σύστημα λήψης δεδομένων το οποίο διαθέτει ενσωματωμένο ελεγκτή πραγματικού χρόνου. Το σύστημα απόκτησης δεδομένων είναι το NI cRio-9074 της Texas Instruments, το οποίο συνδυάζει επεξεργαστή πραγματικού χρόνου 400 MHz και FPGA Gate 2M.

Πίνακας 6-5 Αισθητήρες της μονάδας αφαλάτωσης

Αισθητήρια	Θέση στο σύστημα	Εύρος μέτρησης
Αισθητήρας πίεσης	Στην έξοδο της αντλίας τροφοδοσίας	0 – 25 bar
Αισθητήρας πίεσης	Στην είσοδο της μεμβράνης	0 – 100 bar
Αισθητήρας ροής	Στη γραμμή του παραγόμενου νερού	0.25 – 5 L/min
Αισθητήρας ροής	Στη γραμμή της άλμης	0 – 40 L/min
Ηλεκτρικής αγωγιμότητας	Στη γραμμή του παραγόμενου νερού	0 – 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Αισθητήρας ισχύος	Κινητήρας αντλίας τροφοδοσίας	0 – 1500 W
Θερμοκρασίας	Δεξαμενή νερού	0 – 60 °C

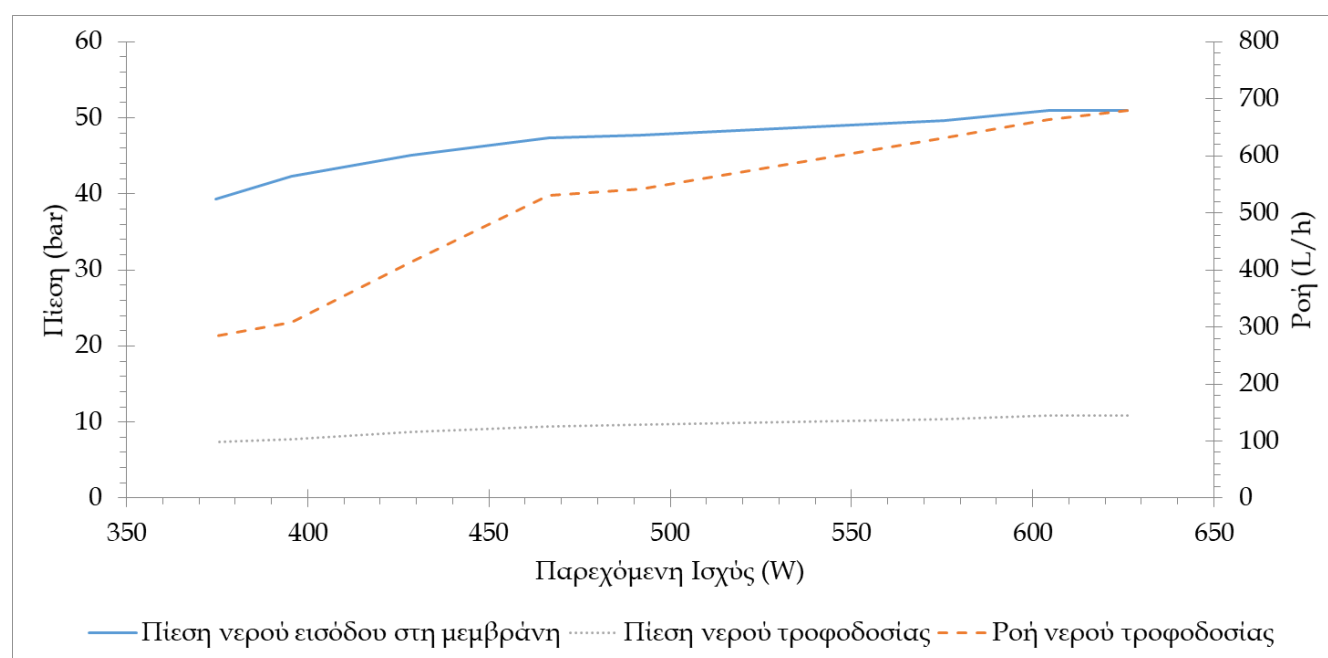
6.2.3 Εργαστηριακά αποτελέσματα

Στις εργαστηριακές πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, εξετάστηκε η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης σε μεταβλητό φορτίο. Η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης σε μεταβλητό φορτίο επιτεύχθηκε μεταβάλλοντας την ταχύτητα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος της αντλίας τροφοδοσίας νερού. Η τάση του κινητήρα ήταν σταθερή στα 48 VDC και σύμφωνα με τον κατασκευαστή το μέγιστο σημείο λειτουργίας είναι στα 16 A (μέγιστο ρεύμα). Επιπλέον, η μείωση της εισροής ισχύος, είχε σαν αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης της αντλίας Clark και της μεμβράνης και την αύξηση της αγωγιμότητας του παραγόμενου καθαρού νερού. Ως αποτέλεσμα, το ελάχιστο σημείο λειτουργίας επιτυγχάνεται όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού είναι μικρότερη από ένα μέγιστο όριο, που είναι 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, για να θεωρείται πόσιμο. Αν η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη τιμή τότε το παραγόμενο νερό οδηγείται στη γραμμή της άλμης. Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ήταν στους 15 °C και η αλατότητά του ήταν ίση με 32000 ppm, η οποία αποτελεί τυπική αλατότητα για θαλασσινό νερό της Μεσογείου.

Ξεκινώντας από το σημείο όπου η μονάδα αφαλάτωσης καταναλώνει τη μέγιστη ισχύ (48 VDC, 16 A), η τροφοδοσία της μονάδας μειώνεται μέχρι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού να είναι χαμηλότερη από το όριο (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Συνεπώς επηρεάζεται το λεγόμενο παράθυρο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, η κατανάλωση ενέργειας και η ειδική κατανάλωση ενέργειας και μεταβάλλονται οι υδραυλικές παράμετροι (η πίεση τροφοδοσίας (bar), η ροή τροφοδοσίας (L/h), η ροή παραγόμενου νερού (L/h) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού ($\mu\text{S}/\text{cm}$)).

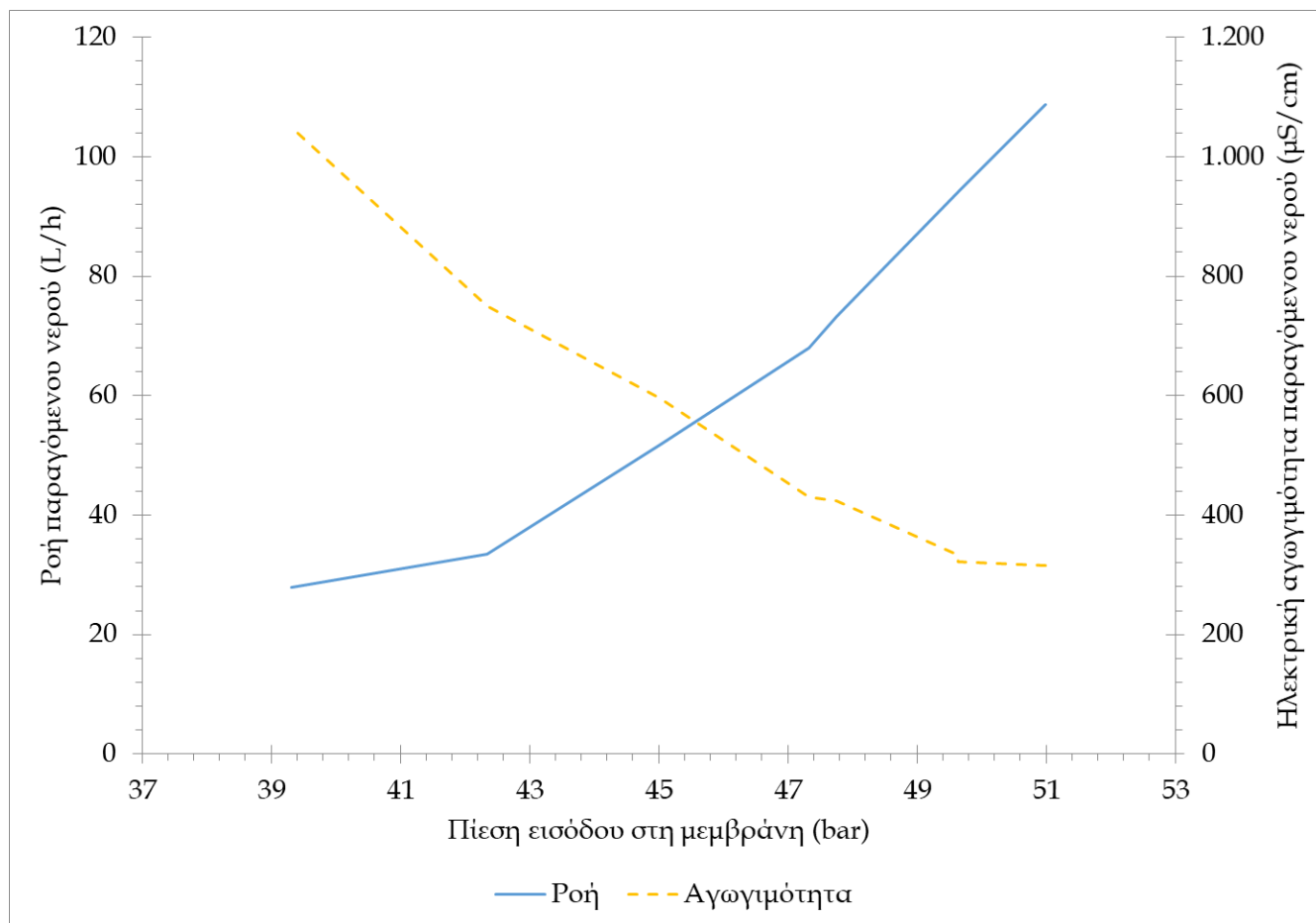
Στο Διάγραμμα 6-1 απεικονίζεται η πίεση εισόδου του νερού στη μεμβράνη, η πίεση τροφοδοσίας και η ροή τροφοδοσίας σε συνάρτηση με τη παρεχόμενη ισχύ. Παρατηρείται ότι η περιοχή της πίεσης εισόδου της μεμβράνης είναι μεταξύ 39 και 51 bar. Όταν η πίεση εισόδου της μεμβράνης είναι 51 bar, η πίεση τροφοδοσίας της αντλίας Clark είναι περίπου 11 bar, ενώ η ισχύς του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας είναι 640 W. Αντίστοιχα, όταν η πίεση εισόδου της μεμβράνης είναι 39 bar (ελάχιστη πίεση που αντιστοιχεί στο καθορισμένο όριο παραγωγής γλυκού νερού 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), η πίεση τροφοδοσίας της αντλίας Clark είναι 7 bar και η ηλεκτρική

κατανάλωση του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας είναι περίπου 375 W. Η διαφορά που παρατηρείται στη πίεση (51 bar αντί 55 bar) και στη καταναλισκόμενη ισχύ (640 W αντί 750 W) σε σύγκριση με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ήταν στους 15 °C. Η ίδια διαφορά παρατηρείται στη ροή τροφοδοσίας (670 L/h αντί 1080 L/h). Οι διαφορές ήταν αναμενόμενες καθώς η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ήταν πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στις συνθήκες δοκιμής από το κατασκευαστή (23 °C) [184, 185].



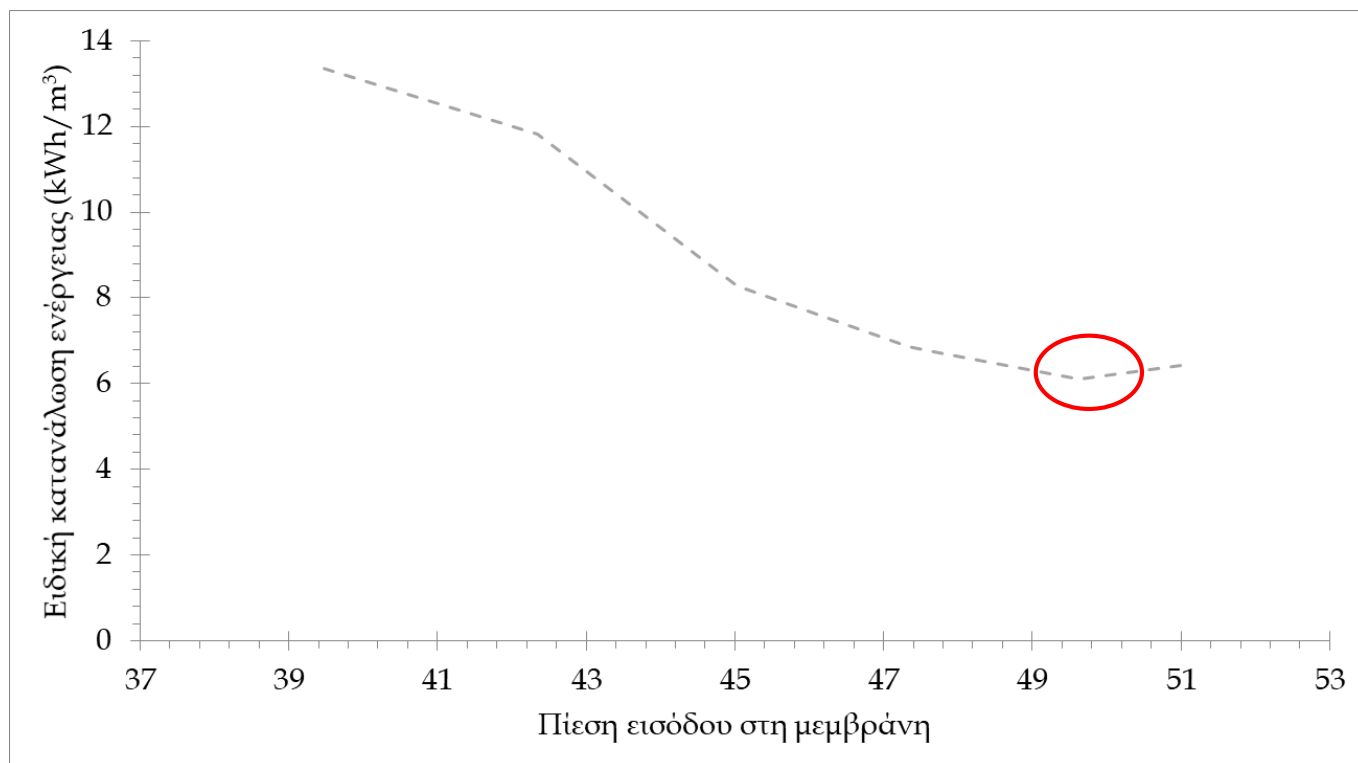
Διάγραμμα 6-1 Πίεση νερού εισόδου στη μεμβράνη, πίεση νερού τροφοδοσίας και ροή νερού τροφοδοσίας ως προς την παρεχόμενη ισχύ

Η ροή του παραγόμενου νερού και η ηλεκτρική αγωγιμότητά του σε συνάρτηση της πίεσης εισόδου στη μεμβράνη παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6-2. Παρατηρείται ότι η πίεση εισόδου της μεμβράνης επηρεάζει σημαντικά τόσο τη ροή του παραγόμενου νερού όσο και την ηλεκτρική αγωγιμότητά του, όπως αναμενόταν. Η ροή του παραγόμενου νερού αυξάνεται σε άμεση σχέση με την αύξηση της πίεσης εισόδου στη μεμβράνη. Επιπλέον, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού είναι αντιστρόφως ανάλογη με την πίεση εισόδου στη μεμβράνη.



Διάγραμμα 6-2 Ροή παραγόμενου νερού και ηλεκτρική αγωγιμότητα ως προς την πίεση εισόδου στη μεμβράνη

Στο Διάγραμμα 6-3 παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης ως συνάρτηση της πίεσης εισόδου στη μεμβράνη. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται ως ο λόγος της κατανάλωσης ενέργειας (kWh) του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας ως προς την παραγωγή νερού (m^3). Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 6-3, η ειδική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται καθώς η πίεση του νερού τροφοδοσίας αυξάνεται. Η υψηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλές πιέσεις οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας ήταν χαμηλή ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$) και επηρεάζει την παραγωγικότητα της μεμβράνης και την απαιτούμενη πίεση τροφοδοσίας [186]. Επιπλέον, η χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας σε υψηλές πιέσεις οφείλεται στο γεγονός ότι η παραγωγή νερού αυξάνεται με υψηλότερο ρυθμό από την κατανάλωση ισχύος του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας.



Διάγραμμα 6-3 Ειδική κατανάλωση ενέργειας ως προς την πίεση εισόδου στη μεμβράνη

6.3 Αυτόνομη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης τροφοδοτούμενη από φωτοβολταϊκά πλαίσια

6.3.1 Εισαγωγή

Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την κάλυψη των αναγκών σε νερό κατοίκων, όταν οι ενεργειακές ανάγκες της ικανοποιούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όταν μια μονάδα αφαλάτωσης συνδυάζεται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τότε ο βέλτιστος τεχνο-οικονομικός σχεδιασμός αποτελεί ένα πολύπλοκο έργο. Προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος αφαλάτωσης με ΑΠΕ, μελετήθηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια διαμόρφωσης ενός αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια και παρουσιάζονται στο Πίνακα 6-6. Σε όλα τα σενάρια, καρδιά του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης αποτελεί η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού (που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην Ενότητα 6.2.3), η οποία τροφοδοτείται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά. Επιπλέον, ένας μετατροπέας DC-to-DC χρησιμοποιείται με σκοπό την εύρεση του μεγίστου σημείου ισχύος

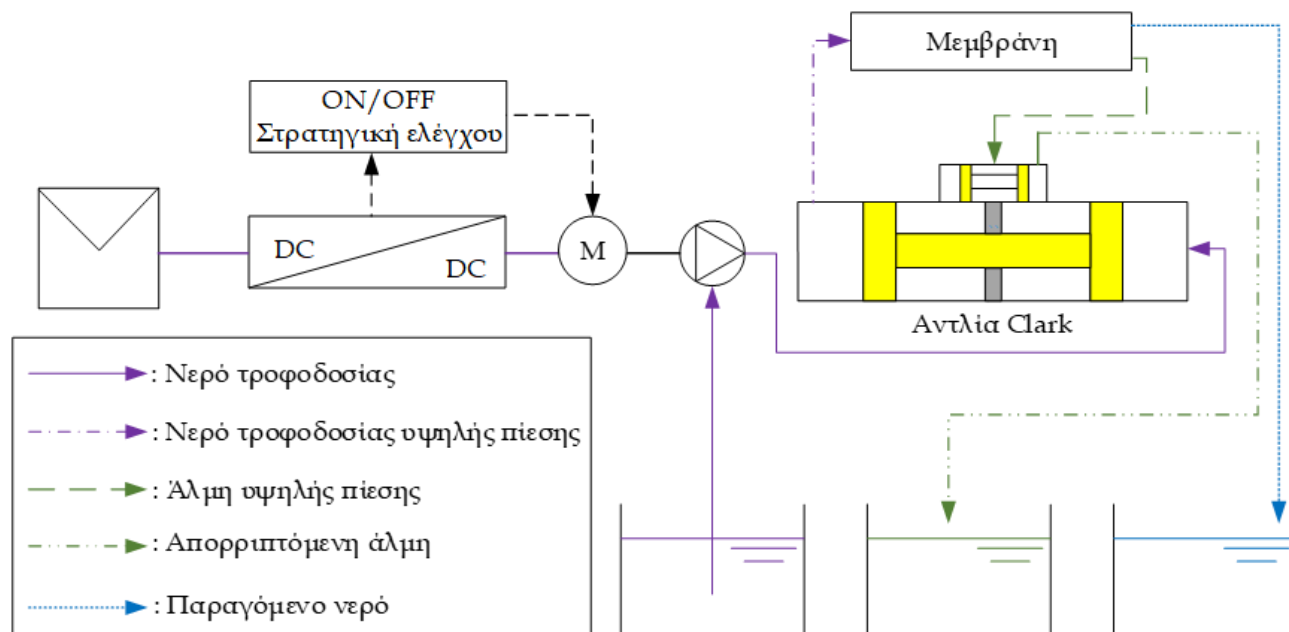
(MPP) της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών.

Πίνακας 6-6 Τα πέντε διαφορετικά σενάρια

Σενάρια	Κύρια στοιχεία	Αποθήκευση Ενέργειας	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας	Λειτουργία μονάδας αφαλάτωσης	της
Σενάριο 1	Φωτοβολταϊκή συστοιχία και δεξαμενή νερού	Καμία	ON/OFF	Ονομαστικό φορτίο	
Σενάριο 2	Φωτοβολταϊκή συστοιχία και δεξαμενή νερού	Καμία	Κανένα	Μεταβλητό φορτίο	
Σενάριο 3	Φωτοβολταϊκή συστοιχία και δεξαμενή νερού	Συσσωρευτές	Λογική ελέγχου υστέρησης	Ονομαστικό φορτίο	
Σενάριο 4	Φωτοβολταϊκή συστοιχία και δεξαμενή νερού	Συσσωρευτές	Ασαφής λογική	Μεταβλητό φορτίο	
Σενάριο 5	Φωτοβολταϊκή συστοιχία και δεξαμενή νερού	Συσσωρευτές	Ασαφείς Γνωστικούς Χάρτες	Μεταβλητό φορτίο	

6.3.2 Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με απευθείας σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με χρήση ON/OFF συστήματος διαχείρισης ενέργειας (Σενάριο 1)

Η διαμόρφωση του συστήματος αφαλάτωσης τροφοδοτούμενο με ηλιακή ενέργεια παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-5. Το σύστημα δεν ενσωματώνει καμία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, αλλά χρησιμοποιεί την δεξαμενή αποθήκευσης νερού και λειτουργεί υπό μεταβλητή τροφοδοσία ισχύος και διαλείπουσες συνθήκες. Ένας ελεγκτής ισχύος ON/OFF χρησιμοποιείται με σκοπό τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης στο ονομαστικό φορτίο, όταν η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι επαρκής ή να σταματάει τη μονάδα αφαλάτωσης όταν η ηλιακή ενέργεια δεν είναι αρκετή για να λειτουργήσει ο κινητήρας αφαλάτωσης στο ονομαστικό φορτίο αντίστοιχα.

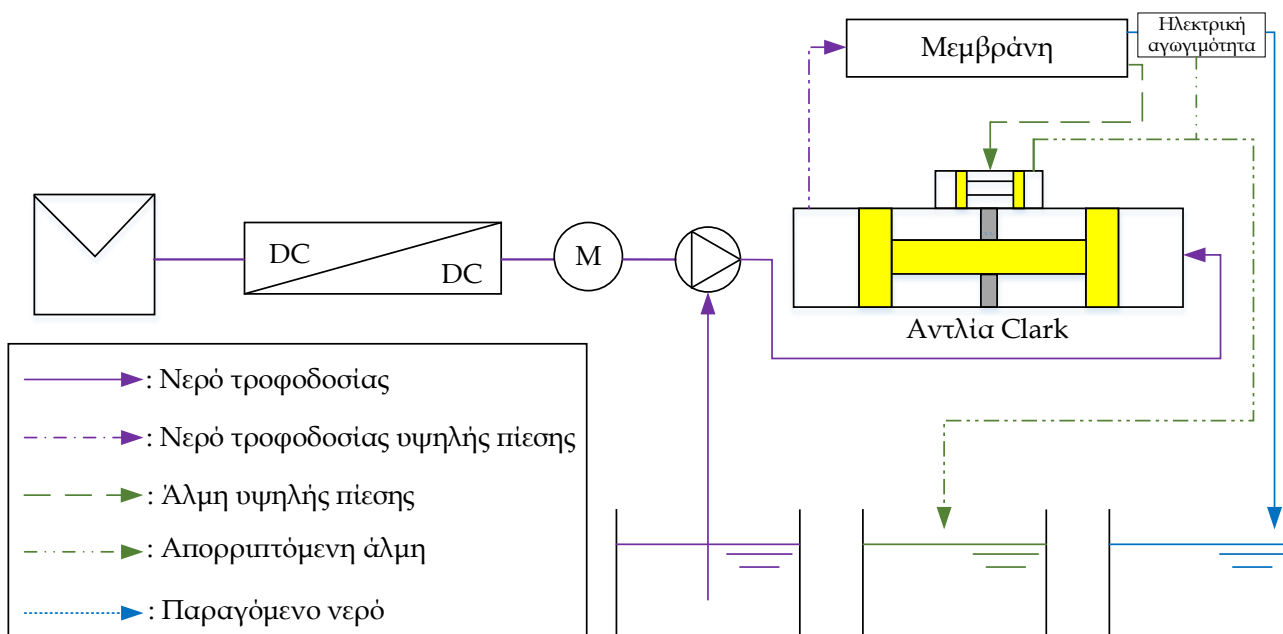


Εικόνα 6-5 Απεικόνιση του συστήματος μονάδας αφαλάτωσης του Σεναρίου 1

6.3.3 Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με απευθείας σύνδεση με τη Φ/Β συστοιχία (Σενάριο 2)

Το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης του Σεναρίου 2 είναι το ίδιο όπως στο Σενάριο 1 με τη διαφορά ότι η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο, ακολουθώντας την παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και δεν υπάρχει σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Αυτή τη συνδεσμολογία επηρεάζει τη προκύπτουσα ηλεκτρική αγωγιμότητα και την παροχή του παραγόμενου νερού.

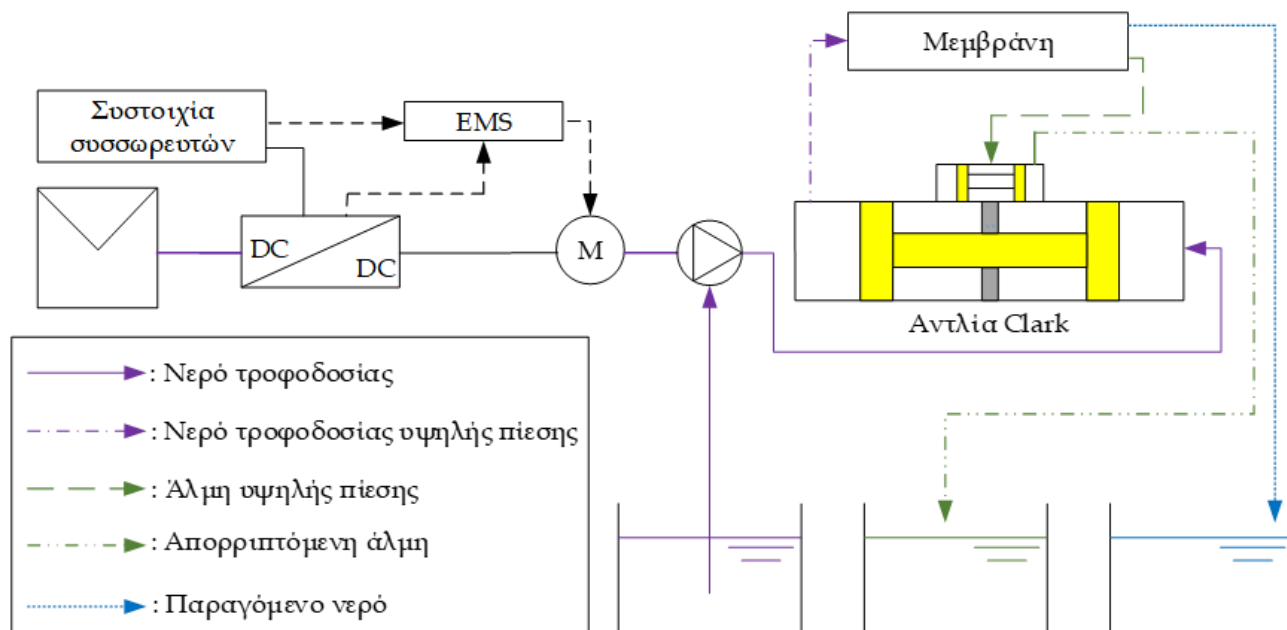
Η μείωση της εισροής ισχύος έχει σαν αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης της αντλίας Clark και της μεμβράνης και την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του παραγόμενου νερού. Ως αποτέλεσμα, επιλέχθηκε ένα παράθυρο λειτουργίας της ονομαστικής ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης (Ενότητα 6.2.3), στο οποίο το παραγόμενο νερό παρουσιάζει αποδεκτή αλατότητα, σύμφωνα με τις οδηγίες της WHO (ηλεκτρική αγωγιμότητα κάτω από 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Επομένως όταν η μονάδα αφαλάτωσης παράγει νερό με ηλεκτρική αγωγιμότητα πάνω από 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, τότε το παραγόμενο νερό οδηγείται στη ροή της άλμης. Όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα βρίσκεται στα αποδεκτά όρια τότε το παραγόμενο νερό οδηγείται στη δεξαμενή πόσιμου νερού. Η διαμόρφωση του συστήματος αφαλάτωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-6.



Εικόνα 6-6 Απεικόνιση του συστήματος μονάδας αφαλάτωσης του Σεναρίου 2

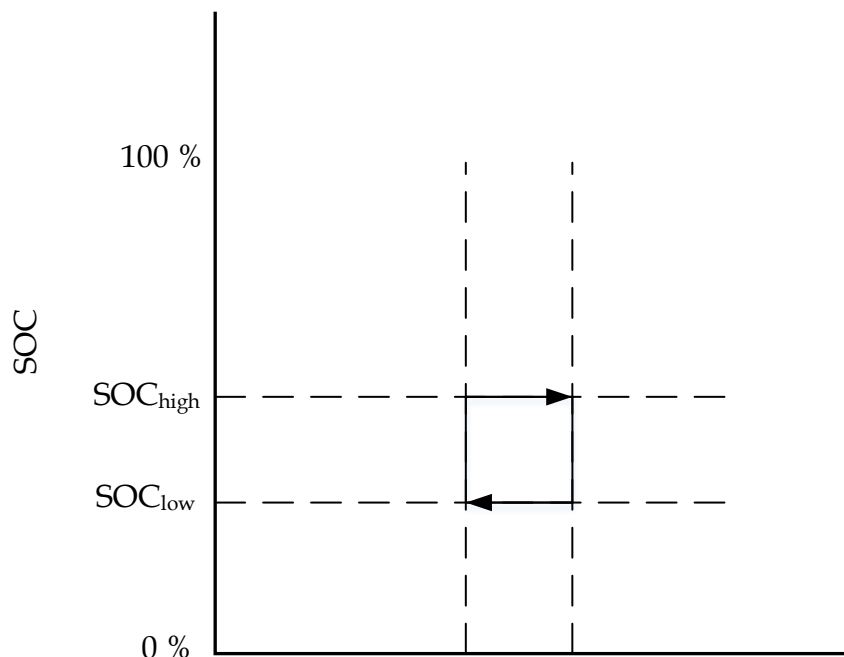
6.3.4 Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία και σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε λογική ελέγχου υστέρησης (Σενάριο 3)

Στο Σενάριο 3, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης ενσωματώνει συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές) και δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS) βασισμένο στη λογική ελέγχου υστέρησης χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει την μονάδα αφαλάτωσης με βάση την κατάσταση φόρτισης (SOC) της συστοιχίας των συσσωρευτών. Η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργεί στο ονομαστικό φορτίο. Η απεικόνιση του συστήματος αφαλάτωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-7.



Εικόνα 6-7 Απεικόνιση του συστήματος μονάδας αφαλάτωσης του Σεναρίου 3

Η χρήση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας βασισμένο στη λογική ελέγχου υστέρησης μπορεί να αποτρέψει τη συνεχή ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της μονάδας αφαλάτωσης σε οριακές συνθήκες (Διάγραμμα 6-4). Ο ελεγκτής βασίζεται στην κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών. Η μονάδα αφαλάτωσης ενεργοποιείται όταν η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι πάνω από ένα καθορισμένο επίπεδο (SOC_{high}). Η λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης συνεχίζεται στο ονομαστικό φορτίο μέχρι η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών να βρεθεί κάτω από ένα άλλο προκαθορισμένο επίπεδο (SOC_{low}). Αν η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών βρίσκεται κάτω από το SOC_{low} τότε η μονάδα αφαλάτωσης απενεργοποιείται μέχρι οι συσσωρευτές φορτιστούν και η κατάσταση φόρτισής τους αυξηθεί πάνω από το SOC_{high} . Οι βέλτιστες τιμές για το SOC_{low} και για το SOC_{high} επιλέγονται μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

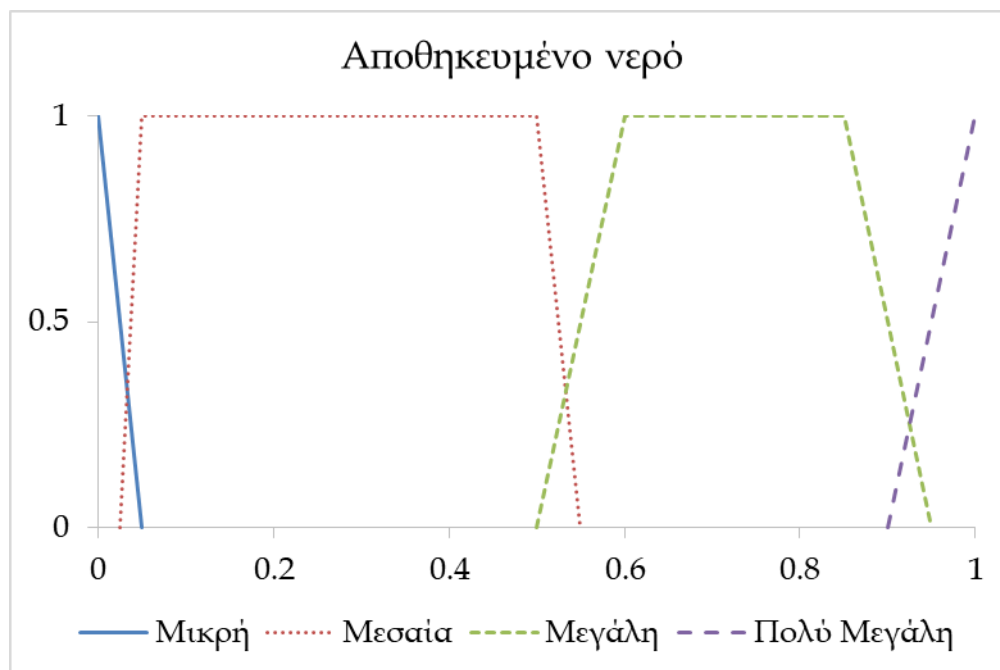


Διάγραμμα 6-4 Λογική ελέγχου υστέρησης

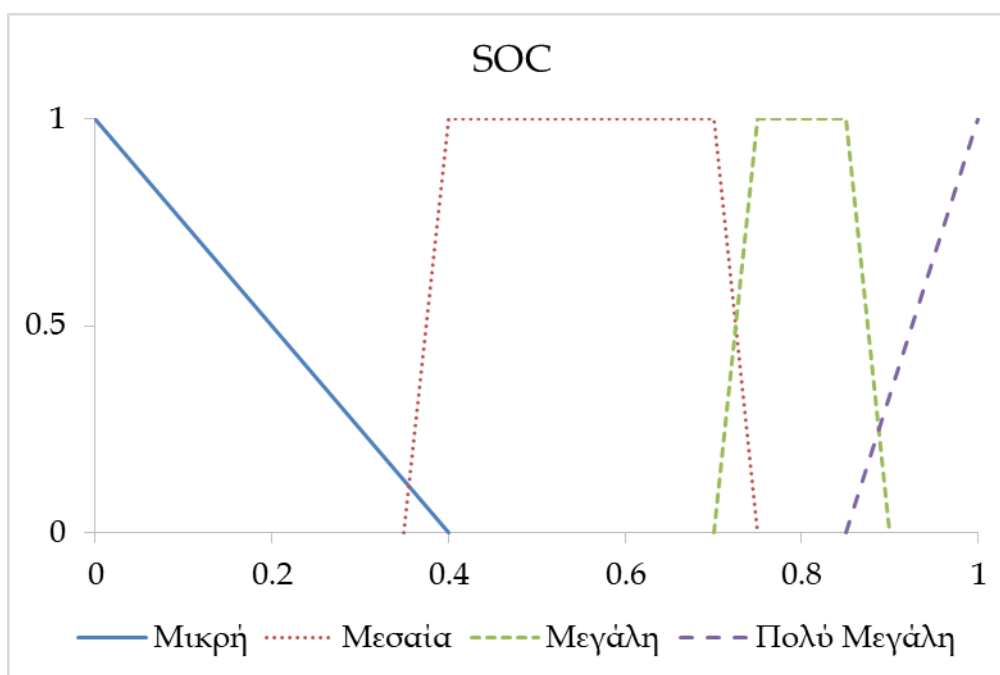
6.3.5 Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία και σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ασαφή λογική (Σενάριο 4)

Στο Σενάριο 4, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης είναι το ίδιο όπως στο Σενάριο 3 αλλά με διαφορετικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο και το σύστημα διαχείρισης ενέργειας καθορίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας λαμβάνει αποφάσεις χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ασαφούς λογικής.

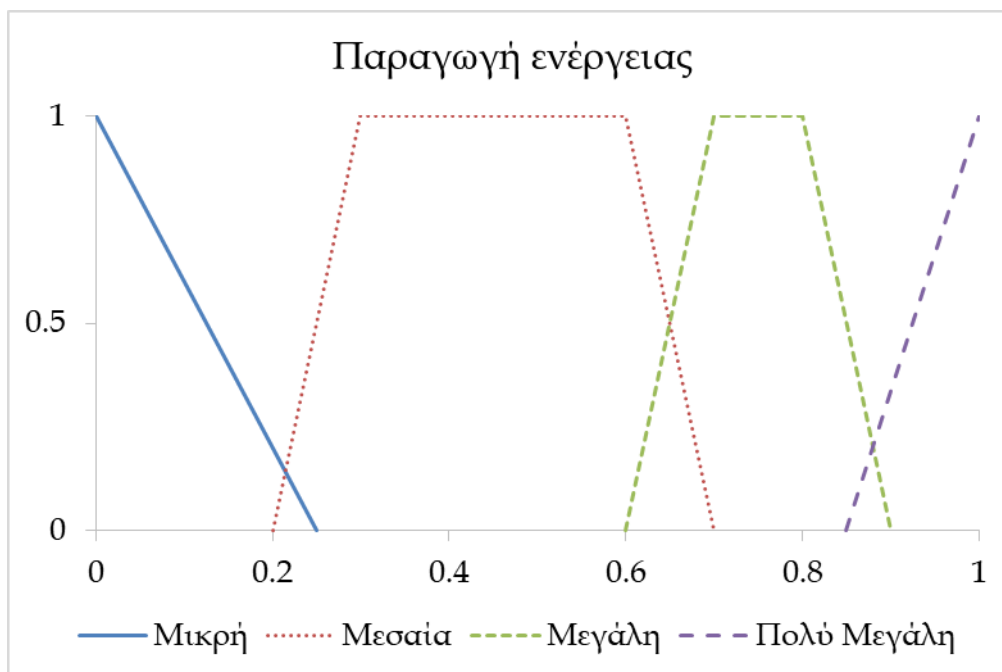
Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του συστήματος αφαλάτωσης χρησιμοποιεί τρεις εισόδους: (i) το αποθηκευμένο πόσιμο νερό στη δεξαμενή νερού, (ii) τη κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών και (iii) τη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οι διαφορετικές τιμές των εισόδων αντιστοιχίζονται σε αριθμούς που κυμαίνονται από μηδέν έως ένα. Μια συνάρτηση συμμετοχής για κάθε είσοδο αναπτύχθηκε και η κάθε καμπύλη των συναρτήσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-8. Οι γλωσσικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι Μικρή, Μεσαία, Μεγάλη και Πολύ Μεγάλη.



(α)



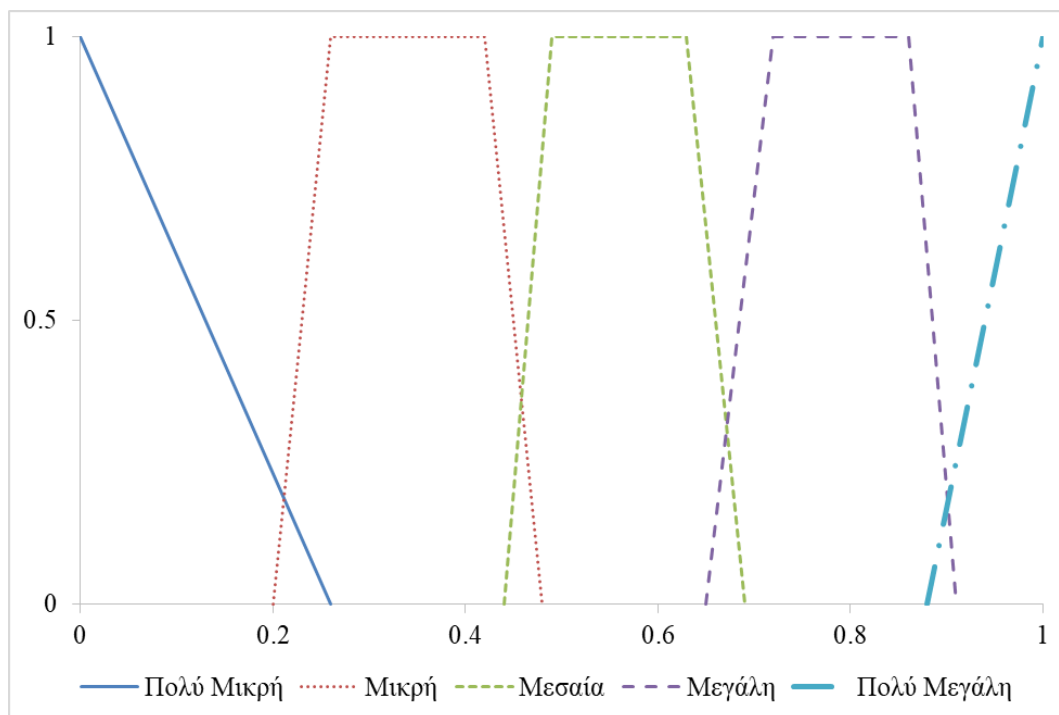
(β)



(γ)

Εικόνα 6-8 Συνάρτηση συμμετοχής για κάθε είσοδο: (α) Αποθηκευμένη ποσότητα νερού, (β) Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών και (γ) Παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ

Η έξοδος του συστήματος ασαφούς λογικής αποτελεί το ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Η έξοδος είναι μια αριθμητική τιμή που αντιστοιχεί σε ένα ασαφές σύνολο και κυμαίνεται από μηδέν (απενεργοποίηση της μονάδας αφαλάτωσης) έως ένα (λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης στην ονομαστική της ισχύ). Η συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-9. Ένας τεχνικός περιορισμός του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών δεν μπορεί να είναι κάτω από 20%.

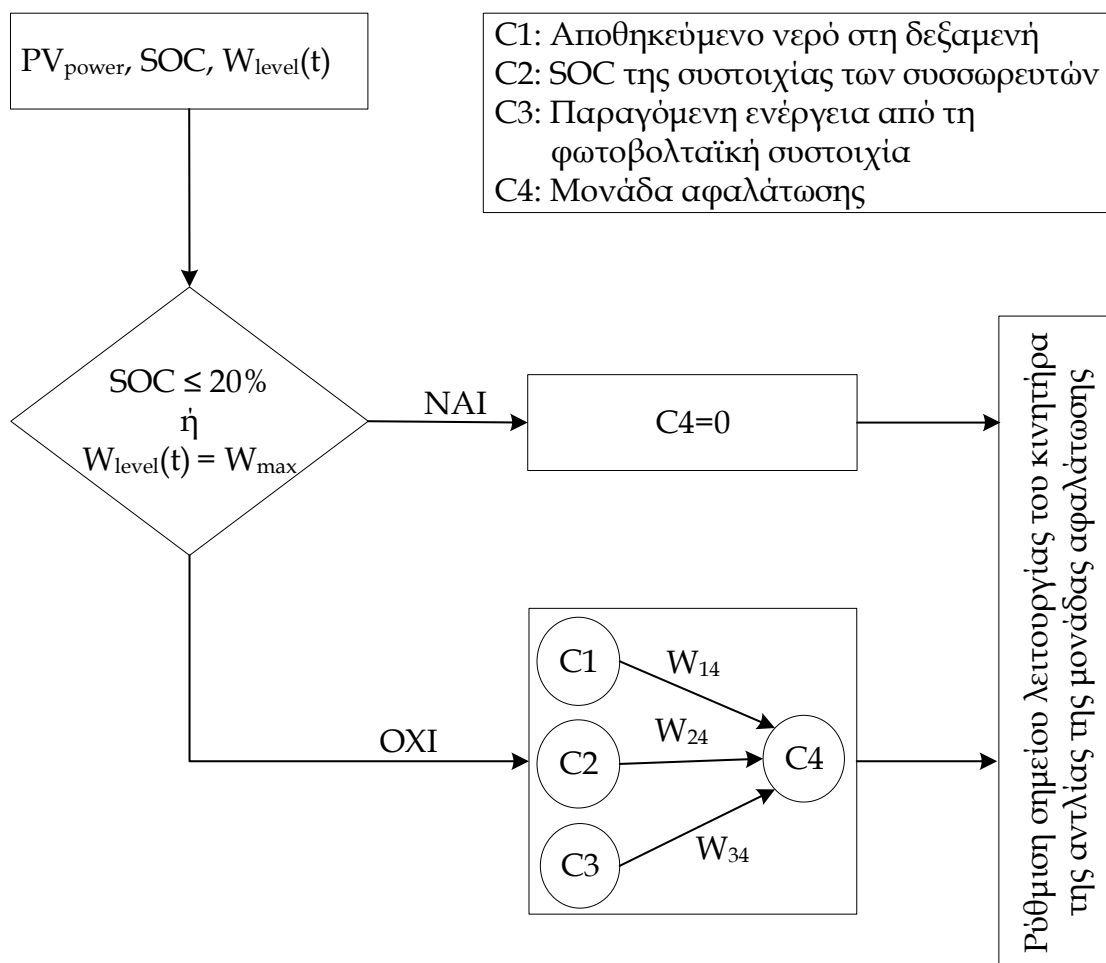


Εικόνα 6-9 Συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου

6.3.6 Λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με συσσωρευτές και Φ/Β συστοιχία και σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες (Σενάριο 5)

Στο Σενάριο 5, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης είναι το ίδιο όπως στο Σενάριο 3 και στο Σενάριο 4 αλλά με διαφορετικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Οι εισοδοί του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι η στάθμη της δεξαμενής νερού ($W_{level}(t)$), η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών (SOC) και η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV_{power}). Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τη μεταβλητή λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης και να καθορίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης βασισμένο σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες. Το λογικό διάγραμμα του συστήματος διαχείρισης ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-10. Παρατηρείται ότι εάν η στάθμη της δεξαμενής νερού είναι ίση με τη μέγιστη τιμή (W_{max}) ή η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι μικρότερη ή ίση με 20% (ελάχιστη επιτρεπόμενη για τη λειτουργία των συσσωρευτών) τότε το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (C4) τίθεται στο μηδέν. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιεί ένα ασαφή γνωστικό χάρτη (FCM) για να

αποφασίζει σχετικά με το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Οι έννοιες αυτού του FCM είναι το αποθηκευμένο πόσιμο νερό στη δεξαμενή νερού (C1), η κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών (C2), η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (C3) και το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (C4). Όλες οι έννοιες είναι ασαφείς στο χώρο $[0, 1]$. Με τη χρήση της μεθόδου αποασαφοποίησης (defuzzification centroid), η έννοια που δίνει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης (C4), παίρνει μια αριθμητική τιμή. Αυτή η τιμή αποτελεί ένα ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης. Τα βάρη W_{ij} εκφράζουν τη σχέση μεταξύ των εννοιών και των τιμών τους στο διάστημα $[0,1]$.



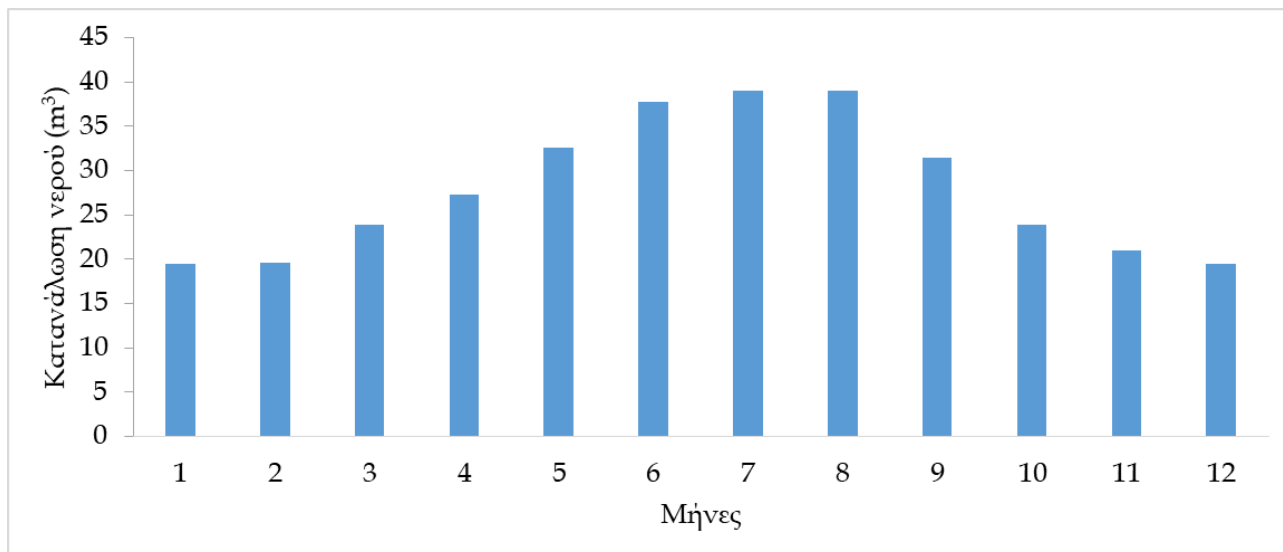
Εικόνα 6-10 Λογικό διάγραμμα ελέγχου του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του Σεναρίου

6.4 Μελέτη Περίπτωσης

Οι μεσογειακές χώρες ανήκουν στις περιοχές με έλλειψη καθαρού νερού [187]. Η πληθυσμιακή ανάπτυξη και το βιοτικό επίπεδο αυξάνουν το πρόβλημα της ύδρευσης στη λεκάνη της Μεσογείου [188]. Συγκεκριμένα, πολλές περιοχές της Ελλάδας, όπως τα νησιά του Αιγαίου (κυρίως τα νησιά των Δωδεκανήσων και των Κυκλάδων) χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαθεσιμότητα πόσιμου νερού [189]. Το πρόβλημα της έλλειψης νερού είναι πιο σημαντικό σε αυτά τα νησιά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, λόγω του τουρισμού και της άρδευσης τοπικών καλλιεργειών [190]. Έχουν εγκατασταθεί μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά [191], αλλά χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό δίκτυο που εξαρτάται κυρίως από τα ορυκτά καύσιμα [192]. Ως αποτέλεσμα, οι μονάδες αφαλάτωσης αυξάνουν τα προβλήματα στη σταθερότητα της συχνότητας του δικτύου, ένα πρόβλημα το οποίο τα ενεργειακά συστήματα των νησιών αντιμετωπίζουν ήδη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού [193]. Δεδομένου ότι τα νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται από υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό [194], ο συνδυασμός ΑΠΕ με μονάδες αφαλάτωσης SWRO θα μπορούσε να είναι ο καταλληλότερος τρόπος αντιμετώπισης της έλλειψης νερού σε αυτά τα νησιά.

Τα πέντε σενάρια της Ενότητας 6.3 συγκρίθηκαν μεταξύ τους με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου συστήματος για τη μονάδα αφαλάτωσης. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη περίπτωσης όπου τα πέντε σενάρια συγκρίθηκαν στο πλαίσιο εύρεσης σχετικά με ποιο σενάριο μπορεί να καλύψει πλήρως όλες τις ανάγκες παρουσιάζοντας ταυτόχρονα το μικρότερο κόστος.

Η μελέτη περίπτωσης περιλαμβάνει έναν πολύ μικρό οικισμό και η μονάδα αφαλάτωσης του κάθε σεναρίου πρόκειται να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων σε καθαρό νερό. Ο οικισμός βρίσκεται σε ένα νησί των Κυκλάδων. Οπότε, χρησιμοποιήθηκαν τυπικά μετεωρολογικά στοιχεία των Κυκλάδων. Το προφίλ της απαιτούμενης κατανάλωσης νερού (πόση, προσωπική καθαριότητα, πλύσιμο ρούχων και μαγείρεμα) προς κάλυψη σε μηνιαία βάση παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-11.



Εικόνα 6-11 Κατανάλωση νερού ανά μήνα

6.4.1 Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης

Ο βέλτιστος σχεδιασμός κάθε σεναρίου είναι αυτός με το χαμηλότερο παρόν κόστος για 20ετή λειτουργία, ο οποίος πρέπει να καλύπτει παράλληλα όλους τους τεχνικούς περιορισμούς για τη διασφάλιση σταθερής και ασφαλούς λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Οι τεχνικοί περιορισμοί είναι:

- Οι ανάγκες νερού πρέπει να καλύπτονται στο 100% καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
- Η δεξαμενή νερού δεν πρέπει ποτέ να αδειάσει τελείως.
- Το αποθηκευμένο νερό στο τέλος του έτους πρέπει να είναι ίσο ή υψηλότερο με την αποθηκευμένη ποσότητα νερού στην αρχή του έτους.
- Δεν επιτρέπεται η βαθιά εκφόρτιση των συσσωρευτών (Σενάρια 3, 4 και 5). Η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών δεν πρέπει να βρεθεί ποτέ κάτω από 20 %.

Με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου τεχνικά και οικονομικά συστήματος για κάθε σενάριο δημιουργήθηκε μία συνάρτηση κόστους. Η συνάρτηση κόστους (Cost Function - CF) που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση του βέλτιστου συστήματος κάθε σεναρίου παρουσιάζεται στην Εξίσωση 6.1.

$$CF = \sum_{i=1}^{20} (C_{inv} \times R) + (C_{ins_PV} + C_m) \times (1+j)^{i-1} + (C_{chem} + C_{cons}) \times P_i \times (1+j)^{i-1} + \sum_{i=1}^{20} \sum_{k=1}^{8760} P_w(t) + \sum_{i=1}^{20} \sum_{k=1}^{8760} P_b(t) + P_{wt} \quad (6.1)$$

Όπου, C_{inv} είναι το επενδυτικό κόστος (€), R είναι ο συντελεστής απόσβεσης, C_{ins_PV} είναι το κόστος ασφάλισης των PVs (€), C_m είναι το κόστος συντήρησης (€), C_{chem} είναι το κόστος χημικών (€/m³), C_{cons} το κόστος των αναλωσίμων (€/m³), j είναι η ετήσια αύξηση των τιμών στο 1%, P_i είναι η ετήσια παραγωγή γλυκού νερού (m³), P_b είναι το πέναλτι από τη συστοιχία των συσσωρευτών εάν η κατάσταση φόρτισής τους είναι χαμηλότερη από 20%, P_w είναι η ποινή από τη δεξαμενή νερού εάν αδειάσει και P_{wt} είναι η ποινή από τη δεξαμενή νερού που προστίθεται εάν το αποθηκευμένο νερό στο τέλος του έτους είναι μικρότερο απ' ότι στην αρχή του έτους.

Η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης κόστους αποτελεί το καλύτερο σύστημα για μια επενδυτική περίοδο 20 ετών. Ως εκ τούτου, η αποτίμηση της κεφαλαιακής επένδυσης κατά την ίδια περίοδο πραγματοποιήθηκε με επιτόκιο 5%. Ο συντελεστής απόδοσης της απόσβεσης ήταν ίσος με 8% και υπολογίστηκε σύμφωνα με την Εξίσωση 6.2 [195]. Η θετική αξία του συντελεστή απόσβεσης σημαίνει ότι η επένδυση είναι οικονομικά εφικτή.

$$R = \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \quad (6.2)$$

Όπου, R είναι ο συντελεστής απόσβεσης, i είναι το επιτόκιο και n είναι η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης (έτη).

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς είναι σε ακολουθία με τις τιμές της αγοράς. Πρόσθετα έξοδα αποτελούν τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης (Operation and Maintenance - O&M):

(α) Κόστος αντικατάστασης μεμβρανών: Σύμφωνα με το κατασκευαστή, η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή πόσιμου νερού για περισσότερο από πέντε χρόνια. Ωστόσο, ο μεταβλητός ρυθμός ροής στις μεμβράνες μειώνει τη διάρκεια ζωής των μεμβρανών. Σύμφωνα με το [196], επιλέχθηκε μια διάρκεια ζωής

τεσσάρων ετών των μεμβρανών, οι οποίες στη συνέχεια αντικαθιστούνται με κόστος 425 €/μεμβράνη.

(β) Συντήρηση της δεξαμενής αποθήκευσης νερού: Το κόστος συντήρησης ανέρχεται στο 2 % του κόστους της δεξαμενής νερού.

(γ) Κόστος χημικών ουσιών: Το κόστος των χημικών ουσιών ποικίλλει και εξαρτάται από την παραγωγή νερού. Για το σκοπό της πραγματοποιηθείσας ανάλυσης, το κόστος επιλέχθηκε σε 0.0065 €/m³ [190].

(δ) Κόστη αναλωσίμων: Διάφορα αναλώσιμα υλικά πρέπει να χρησιμοποιηθούν όπως φίλτρα, σωλήνες κτλ. Το κόστος των αναλωσίμων επιλέχθηκε στα 0.04 €/m³ [197].

(ε) Η συστοιχία των συσσωρευτών (Σενάριο 3, 4 και 5) πρέπει να αλλάζει κάθε 7 χρόνια.

Επιπλέον, οι τεχνικοί περιορισμοί εξασφαλίζονται ως κυρώσεις-πέναλτι που προστίθενται στη συνάρτηση κόστους όταν δεν πληρούνται ένας ή περισσότεροι από αυτούς. Οι κυρώσεις είναι ίσες με το μηδέν όταν πληρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί. Διαφορετικά, προστίθεται ένα τεράστιο ποσό στη συνάρτηση κόστους (κάθε ποινή ισούται με 1 εκατομμύριο ευρώ). Η ανάλυση του συνολικού κόστους παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-7.

Πίνακας 6-7 Ανάλυση κόστους

Κόστος επένδυσης και εγκατάστασης		
Παράμετρος	Τιμή	Διάρκεια ζωής (χρόνια)
Φωτοβολταϊκό σύστημα	180 €/πλαίσιο	25
Ηλεκτρονικά ισχύος	800 €	20
Μονάδα αφαλάτωσης	8610 €	20
Μεμβράνη	425 €/μεμβράνη	4
Δεξαμενή νερού	65.25 €/m ³	30
Συστοίχια συσσωρευτών	130 €/kWh	6
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης		
Παράμετρος	Τιμή	
Συντήρηση δεξαμενής νερού	2% του συνολικού κόστους της δεξαμενής νερού	
Συντήρηση φωτοβολταϊκού συστήματος	4% του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος	
Χημικά	0.065 €/m ³	
Αναλώσιμα	0.04 €/m ³	

Η προσομοίωση κάθε Σεναρίου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS, για τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab ενώ οι βελτιστοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό πακέτο GenOpt και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PSO. Οι ρυθμίσεις PSO που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Τα στοιχεία βελτιστοποίησης κάθε σεναρίου αποτελούν ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων, το μέγεθος της δεξαμενής νερού, καθώς και η χωρητικότητα της συστοίχιας των συσσωρευτών για τα Σενάρια 3, 4 και 5. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης μαζί με τις βέλτιστες τιμές για κάθε σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-8. Επιπλέον, βελτιστοποιήθηκαν οι μεταβλητές SOC_{high} και SOC_{low} για το Σενάριο 3, ενώ για το Σενάριο 4 βελτιστοποιήθηκαν τα βάρη του FCM. Για κάθε σύστημα του αντίστοιχου σεναρίου χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 180 W το καθένα, τύπου Solar world Sunmodule SW 180, τοποθετημένα σε ηλιοστάτη ενός άξονα (σταθερή κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος και ρύθμιση αζιμούθιου).

Πίνακας 6-8 Βελτιστοποίηση των μεταβλητών

Μεταβλητή	Χαμηλότερη Τιμή	Υψηλότερη Τιμή	Βήμα	Βέλτιστη Τιμή
Σενάριο 1 - Στοιχεία συστήματος				
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 180 Wp το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά	4	20	1	17
Δεξαμενή πόσιμου νερού (m ³)	5	35	5	30
Σενάριο 2 - Στοιχεία συστήματος				
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 180 Wp το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά	4	20	1	15
Δεξαμενή πόσιμου νερού (m ³)	5	35	5	15
Σενάριο 3 - Στοιχεία συστήματος				
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 180 Wp το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά	4	20	1	15
Δεξαμενή πόσιμου νερού (m ³)	5	35	5	5
Χωρητικότητα συστοιχίας συσσωρευτών (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 16 V DC, 2 V ο κάθε συσσωρευτής	50	150	60	100
SOC _{high}	60	90	1	81
SOC _{low}	20	60	1	50
Σενάριο 4 - Στοιχεία συστήματος				
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 180 Wp το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά	4	20	1	10
Δεξαμενή πόσιμου νερού (m ³)	5	35	5	10
Χωρητικότητα συστοιχίας συσσωρευτών (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 16 V DC, 2 V ο κάθε συσσωρευτής	50	150	60	80
Σενάριο 5 - Στοιχεία συστήματος				
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 180 Wp το καθένα, συνδεδεμένα σε σειρά	4	20	1	8
Δεξαμενή πόσιμου νερού (m ³)	5	35	5	10

Χωρητικότητα συστοιχίας συσσωρευτών (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 16 V DC, 2 V ο κάθε συσσωρευτής	50	150	60	60
W ₁₄	0	1	Συνεχής	0.31
W ₂₄	0	1	Συνεχής	0.22
W ₃₄	0	1	Συνεχής	0.10

6.4.2 Σύγκριση των διαφορετικών σεναρίων

Τα βασικά αποτελέσματα από τη σύγκριση κάθε σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-9. Παρατηρείται ότι η μεταβλητή λειτουργία του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης (Σενάριο 2 σε σύγκριση με το Σενάριο 1), μειώνει το μέγεθος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας περίπου κατά 11.7% και το μέγεθος της δεξαμενής νερού περίπου κατά 50%. Επιπλέον, η προσθήκη συσσωρευτών μικρής χωρητικότητας (Σενάρια 3, 4 και 5), μειώνει το μέγεθος της δεξαμενής νερού τουλάχιστον κατά 67%. Επίσης, παρατηρείται ότι η χρήση συστημάτων διαχείρισης ενέργειας βασισμένα σε εργαλεία υπολογιστικής νοημοσύνης (Σενάριο 4 και 5 σε σύγκριση με το Σενάριο 3), δεν μειώνει το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος και της δεξαμενής νερού, αλλά η μειώνει αρκετά τη χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών, περίπου κατά 40%. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν σαφώς ότι το Σενάριο 5 σε σύγκριση με το Σενάριο 1 απαιτεί μικρότερο φωτοβολταϊκό σύστημα (μείωση κατά 53%) και μικρότερη δεξαμενή νερού (η δεξαμενή νερού μειώνεται στο 1/3).

Πίνακας 6-9 Αποτελέσματα σύγκρισης των σεναρίων

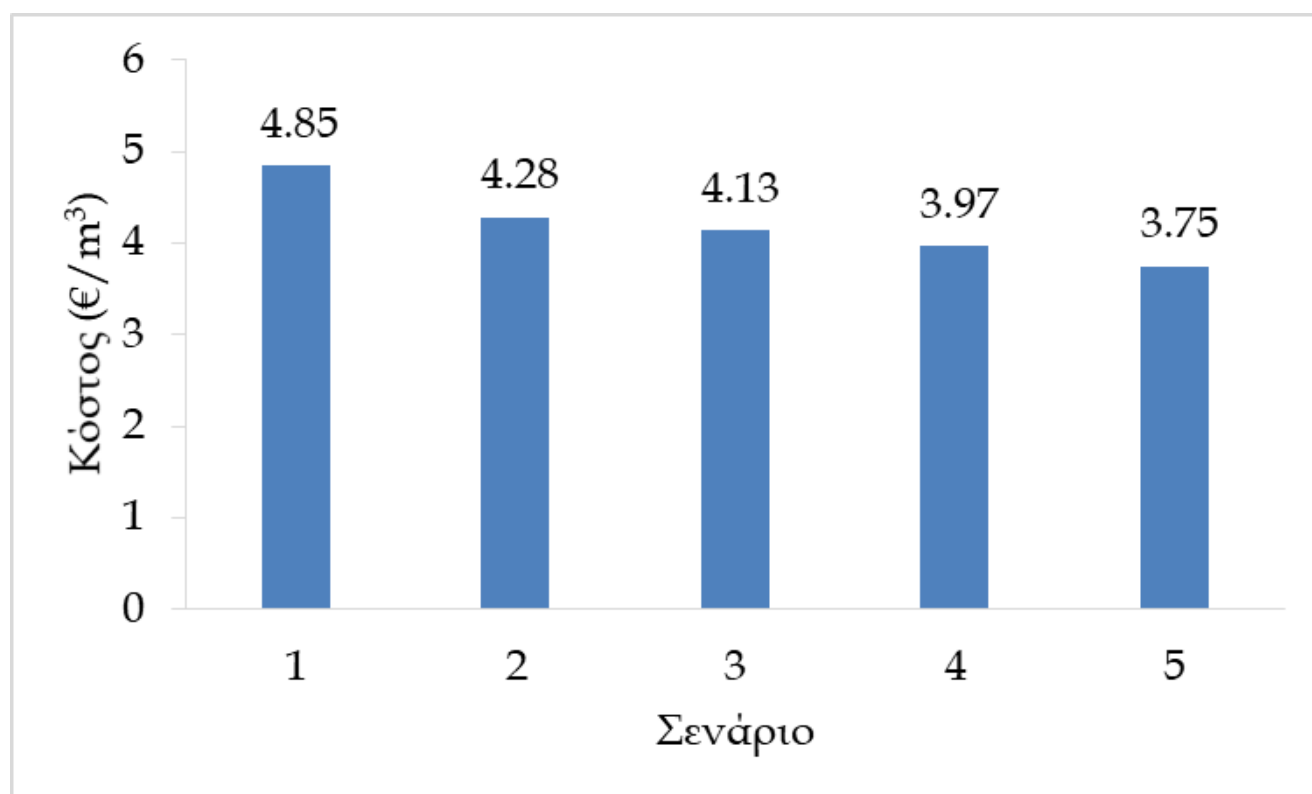
Σύγκριση σεναρίων	Βήμα	Αποτέλεσμα
Σενάριο 1 και Σενάριο 2	Ονομαστική λειτουργία σε μεταβλητή	Μείωση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων και μείωση του μεγέθους της δεξαμενής νερού.
Σενάριο 3, 4 και 5	Προσθήκη συσσωρευτών	Το μέγεθος της δεξαμενής νερού μειώνεται σημαντικά.
Σενάριο 5	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε FCM	Η χωρητικότητα της συστοιχίας των συσσωρευτών μειώνεται σημαντικά.

Έχοντας θέσει όλες τις παραμέτρους στην ίδια βάση, πραγματοποιήθηκε μια οικονομική ανάλυση προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο σύστημα αφαλάτωσης μετά από 20ετή λειτουργία για κάθε σενάριο. Στην Εικόνα 6-12, παρατηρείται ότι το βέλτιστο σύστημα είναι το σύστημα του Σεναρίου 5, δεδομένου ότι το σύστημα παρουσιάζει το χαμηλότερο κόστος για τη παραγωγή ενός κυβικού νερού, ίσο με 3.75 €/m³, καλύπτοντας παράλληλα όλους τους τεχνικούς περιορισμούς. Το κόστος του νερού που παράγεται στο Σενάριο 2 είναι περίπου 11.7% χαμηλότερο από το κόστος του Σεναρίου 1. Το κόστος του νερού που παράγεται στο Σενάριο 3 είναι περίπου 3.4% χαμηλότερο από το κόστος του Σεναρίου 2. Το κόστος του νερού που παράγεται στο Σενάριο 4 είναι περίπου 4.1% χαμηλότερο από το κόστος του Σεναρίου 3 και το κόστος του νερού που παράγεται στο Σενάριο 5 είναι περίπου 5.6% χαμηλότερο από το κόστος του Σεναρίου 4. Οπότε, διαπιστώνεται ότι το σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο και περιέχει μια μικρής χωρητικότητας συστοιχία συσσωρευτών και ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε νερό με το χαμηλότερο κόστος.

Χρησιμοποιώντας το Σενάριο 1 ως βάση, ο Πίνακας 6-10 παρουσιάζει τη σωρευτική ποσοστιαία μείωση του κόστους που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης (α) με τη χρήση της λειτουργίας μεταβλητού φορτίου, (β) την προσθήκη μιας συστοιχίας συσσωρευτών και (γ) τη χρήση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Με βάση τον Πίνακα 6-10, μπορούν να επισημανθούν τα ακόλουθα σημεία:

- Σε περίπτωση που το σύστημα αφαλάτωσης λειτουργεί παθητικά με το φωτοβολταϊκό σύστημα (λειτουργία μεταβλητού φορτίου) και χωρίς να συμπεριλαμβάνονται συσσωρευτές (Σενάριο 2), εμφανίζει χαμηλότερο κόστος παραγόμενου νερού κατά περίπου 11,72% από το σύστημα που λειτουργεί σε ονομαστικό φορτίο.
- Το κόστος του παραγόμενου νερού μειώνεται κατά περίπου 14.76% με την προσθήκη συστοιχίας συσσωρευτών (Σενάριο 3).
- Το σύστημα που εμπεριέχει μια μικρής χωρητικότητας συστοιχίας συσσωρευτών και επιτρέπει τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης σε μερικό φορτίο μέσω ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιεί υπολογιστική νοημοσύνη (Σενάριο 5) επιτυγχάνει χαμηλότερο κόστος παραγωγής νερού κατά 22.68 % σε σχέση με την

απευθείας σύνδεση της μονάδας αφαλάτωσης με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και χωρίς συσσωρευτές (Σενάριο 1).



Εικόνα 6-12 Κόστος νερού (€/m³)

Πίνακας 6-10 Ποσοστιαία μείωση του κόστους

Σύγκριση σεναρίων	Ποσοστιαία μείωση του κόστους
Σενάριο 2 σε σύγκριση με Σενάριο 1	11.72 %
Σενάριο 3 σε σύγκριση με Σενάριο 1	14.76 %
Σενάριο 4 σε σύγκριση με Σενάριο 1	18.21 %
Σενάριο 5 σε σύγκριση με Σενάριο 1	22.78 %

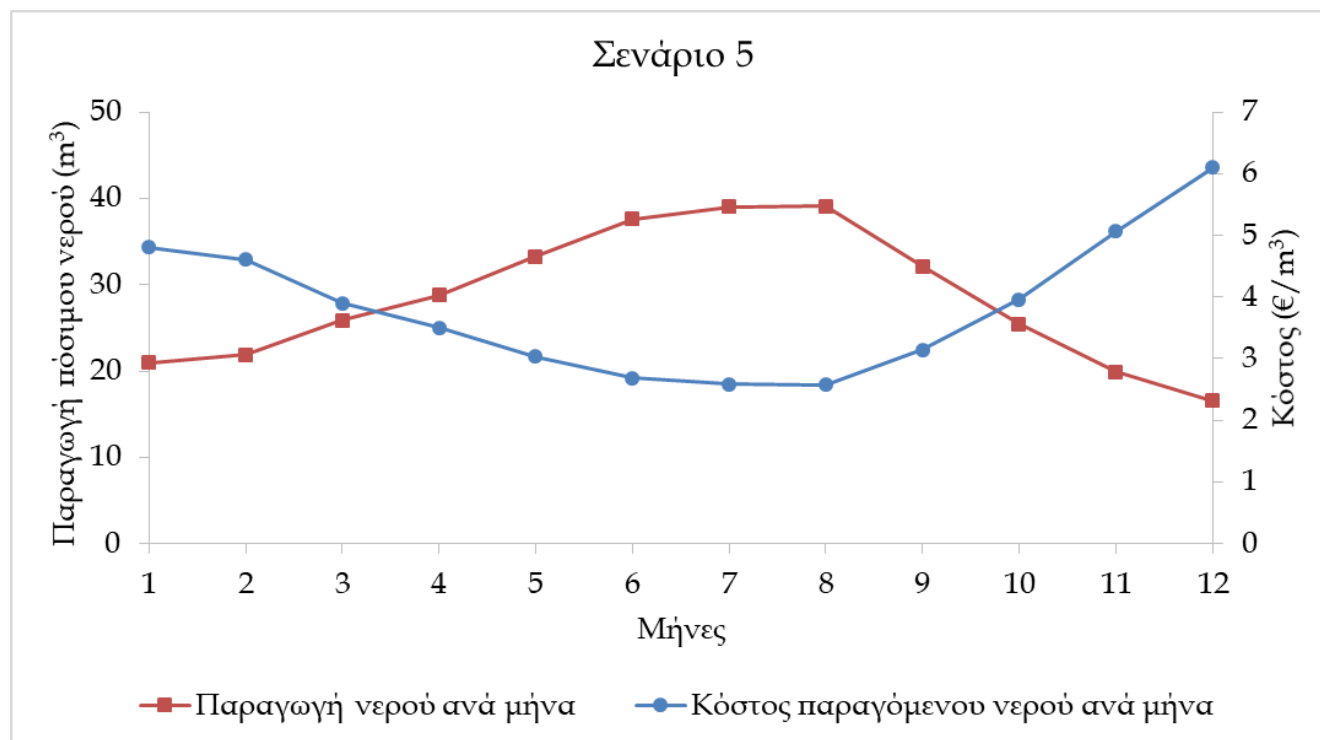
Ο Πίνακας 6-11 παρουσιάζει τη συμμετοχή κάθε παράγοντα στη διαμόρφωση του συνολικού κόστους για κάθε σενάριο. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η συμβολή της ενέργειας και της μονάδας αφαλάτωσης στο συνολικό κόστος είναι διαφορετική. Είναι σαφές ότι σε όλα τα σενάρια το κόστος του συστήματος αφαλάτωσης αποτελεί το υψηλότερο κόστος.

Πίνακας 6-11 Ποσοστιαία συμμετοχή (%) κάθε παράγοντα στο συνολικό κόστος

Κόστος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
Παραγωγής ενέργειας	22.12	22.28	22.97	18.10	16.20
Μονάδας αφαλάτωσης	64.34	65.25	62.85	69.77	72.97
Λειτουργίας και συντήρησης	11.35	9.99	9.24	7.36	6.40
Χημικά	2.18	2.48	2.5	2.67	2.79
Συστοιχίας συσσωρευτών	-	-	2.45	2.10	1.65

Το κόστος του νερού που παράγεται ανά μήνα σε συσχετισμό με την παραγωγή νερού για το σενάριο με το χαμηλότερο κόστος (Σενάριο 5) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6-5. Είναι προφανές ότι αυτές οι δύο καμπύλες είναι αντιστρόφως ανάλογες; όταν η παραγωγή νερού αυξάνεται τότε το κόστος του παραγόμενου νερού μειώνεται και το αντίστροφο.

Η παραγωγή νερού είναι πάνω από 10 m³ ανά μήνα από το Μάιο μέχρι το Σεπτέμβριο και το κόστος είναι μικρότερο από 3.5 €/m³ ενώ σε σχεδόν τέλειες καιρικές συνθήκες με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία όπως αυτές που παρατηρήθηκαν τον Αύγουστο, το κόστος αυτό είναι μόλις 2.6 €/m³.

**Διάγραμμα 6-5** Παραγωγή νερού και κόστος παραγόμενου νερού ανά μήνα

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των συστημάτων αφαλάτωσης κάθε σεναρίου με βάση τις αποδόσεις τους. Η απόδοση κάθε συστήματος αξιολογήθηκε με βάση τις απώλειες ισχύος. Στο Σενάριο 3, 4 και 5, η συστοιχία συσσωρευτών δεν συμπεριλήφθηκε καθώς χρησιμοποιήθηκε ως εφεδρική πηγή ενέργειας [187].

Η Εξίσωση 6.3 χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των απωλειών ισχύος του συστήματος [154]:

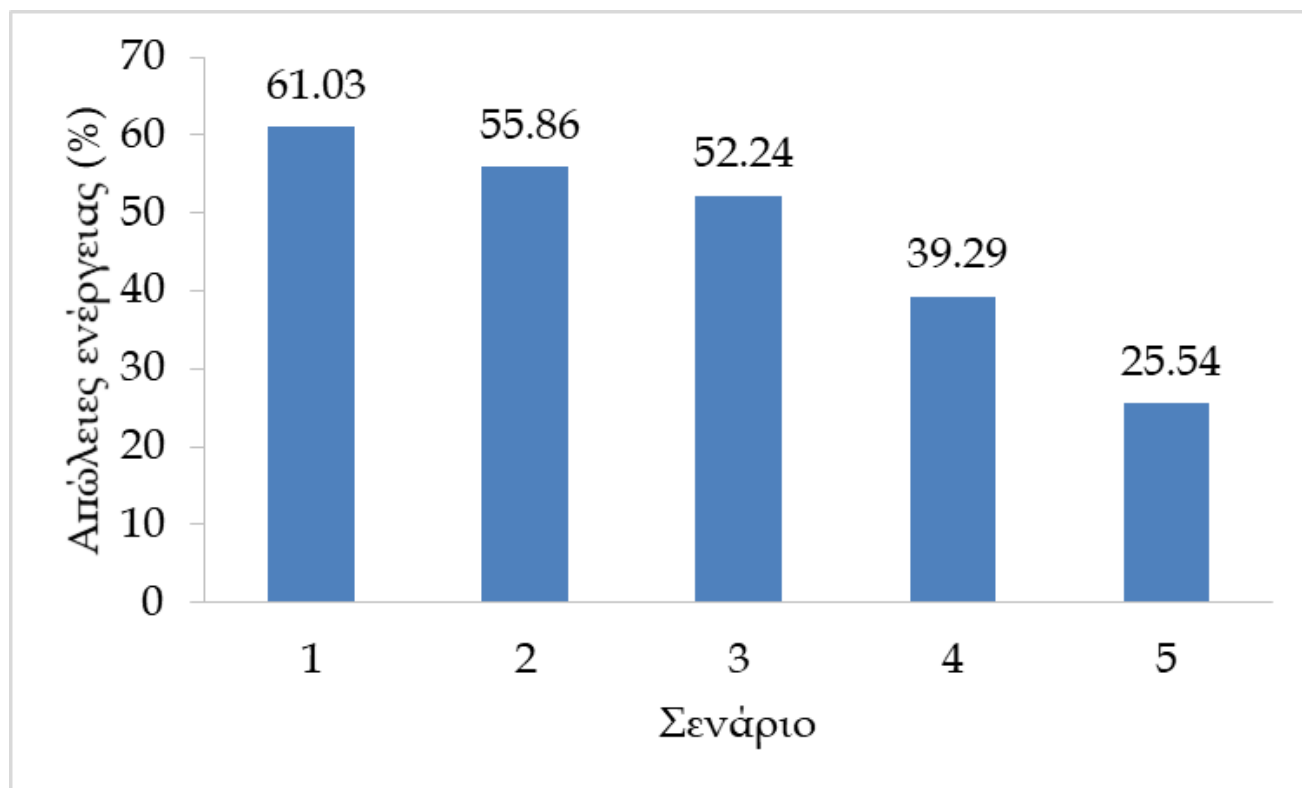
$$P_{\text{loss}}(\%) = \frac{P_{\text{prod}} - P_{\text{cons}}}{P_{\text{prod}}} \times 100 \quad (6.3)$$

όπου P_{cons} είναι η κατανάλωση ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης και P_{prod} είναι η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Στην Εικόνα 6-13, παρουσιάζεται το ποσοστό απώλειας ενέργειας κάθε σεναρίου. Παρατηρείται ότι το σύστημα του Σεναρίου 5 παρουσιάζει τις λιγότερες απώλειες ισχύος. Το ποσοστό απώλειας ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης με σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ασαφής γνωστικούς χάρτες υπολογίστηκε σε 25.6%.

Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι το Σενάριο 5 ως προς το Σενάριο 1 παρουσιάζει λιγότερες απώλειες ισχύος κατά 58.15%. Το σύστημα του Σεναρίου 5, εκμεταλλεύεται αποδοτικότερα την ενέργεια που αποδίδουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σχέση με τα υπόλοιπα Σενάρια.

Ως εκ τούτου, είναι σαφές ότι το προτεινόμενο σύστημα αφαλάτωσης έχει υψηλότερη απόδοση και λιγότερες απώλειες ισχύος σε σχέση με τα άλλα σενάρια, δείχνοντας ότι θα μπορούσε να επιτελέσει μία ικανοποιητική τεχνική λύση από οικονομική άποψη.



Εικόνα 6-13 Απώλειες ενέργειας για κάθε σενάριο

6.4.3 Σύγκριση με λύση μεταφοράς νερού

Η κύρια λύση που εφαρμόζεται μέχρι σήμερα, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η έλλειψη νερού στην πλειονότητα των νησιών του συγκροτήματος των Κυκλάδων είναι η μεταφορά ύδατος, η οποία επιδοτείται από την ελληνική κυβέρνηση. Η μεταφορά νερού είναι μια δαπανηρή λύση που έχει μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των πλοίων που μεταφέρουν το νερό. Το κόστος μεταφοράς νερού στις Κυκλάδες για τα έτη 2017 και 2018, ανέρχεται σε 12.77 €/m³ (συμπεριλαμβάνεται ο ΦΠΑ).

Το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης του Σεναρίου 5, ύστερα από 20 χρόνια λειτουργίας θα έχει παράξει 6934 m³ νερού με κόστος του νερού σε 3.75 €/m³, που προφανώς αποτελεί μία πολύ οικονομικότερη λύση. Επομένως, οι επενδύσεις των μικρής κλίμακας συστημάτων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αντίστροφης όσμωσης στα νησιά είναι πλήρως δικαιολογημένες και αποτελούν μία οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλιμη λύση. Προφανώς μεγαλύτερα σε μέγεθος συστήματα αφαλάτωσης είναι περισσότερο επιθυμητά καθώς αναμένεται να δείξουν καλύτερες οικονομικές επιδόσεις λόγω οικονομίας κλίμακας.

6.5 Συμπεράσματα

Μια μικρής κλίμακας μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για θαλασσινό νερό, εξοπλισμένη με μία συσκευή ανάκτησης ενέργειας, διερευνήθηκε πειραματικά σε σχέση με τη λειτουργία της σε συνθήκες μεταβλητού φορτίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν σαφώς ότι η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε μεταβλητό φορτίο και μπορεί να παράγει πόσιμο νερό σε ένα ευρύ φάσμα εισροών ενέργειας. Η περιοχή λειτουργίας της μεμβράνης προσδιορίστηκε μεταξύ 35 ÷ 50 bar ανάλογα με την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας και τη θερμοκρασία.

Τέλος, διερευνήθηκε το βέλτιστο σενάριο για την αυτόνομη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης με τροφοδοσία από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για τη μελέτη περίπτωσης, η μονάδα αφαλάτωσης θεωρήθηκε ότι θα εγκατασταθεί σε ένα τυπικό νησί των Κυκλάδων, προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη τεχνική και οικονομική διαμόρφωση του συστήματος για αυτόνομη λειτουργία.

Επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια μελέτης προκειμένου να καθοριστεί το βέλτιστο σύστημα. Στα δύο πρώτα σενάρια, η μονάδα αφαλάτωσης δεν ενσωματώνει καμία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας. Στο πρώτο σενάριο, η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργούσε σε ονομαστικό φορτίο και στο δεύτερο σενάριο η μονάδα αφαλάτωσης λειτουργούσε σε μεταβλητό φορτίο ακολουθώντας την παραγόμενη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στα επόμενα τρία σενάρια, συμπεριλήφθηκε μια συστοιχία συσσωρευτών. Ως εκ τούτου, καθώς το σύστημα έγινε πιο περίπλοκο, ενσωματώθηκε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας προκειμένου να αποφασιστεί το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης, δίνοντας τη δυνατότητα στην μονάδα αφαλάτωσης να λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο. Στο τρίτο σενάριο, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασίστηκε στη λογική ελέγχου υστέρησης. Στο τέταρτο και πέμπτο σενάριο, το αντίστοιχο σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασίστηκε σε τεχνικές υπολογιστικής νοημοσύνης. Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βασίζεται στην ασαφή λογική και ένα βασισμένο σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες διερευνήθηκαν στο τέταρτο και πέμπτο σενάριο, αντίστοιχα.

Τα πέντε διαφορετικά σενάρια στη συνέχεια συγκρίθηκαν τεχνικά και οικονομικά προκειμένου να καθορισθεί το βέλτιστο σύστημα. Συνήθης άποψη αποτελεί ότι το οικονομικότερο σύστημα για μια μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενη από φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελεί το σύστημα χωρίς τη χρήση συσσωρευτών. Τα αποτελέσματα όμως έδειξαν ότι η χρήση μιας μικρής χωρητικότητας συστοιχίας συσσωρευτών και ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας που ενσωματώνει τεχνητή νοημοσύνη, το οποίο διασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης σε μεταβλητό φορτίο, αποδίδει χαμηλότερο κόστος παραγωγής νερού κατά περίπου 23% και καλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά 58% σε σχέση με το σύστημα που δεν εμπεριέχει συσσωρευτές και σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Σενάριο 1). Ως εκ τούτου, το βέλτιστο σύστημα ήταν το σύστημα του πέμπτου σεναρίου, καθώς το σύστημα παρουσίαζε το χαμηλότερο κόστος και τις χαμηλότερες απώλειες ενέργειας.

Στη συνέχεια, το βέλτιστο σύστημα συγκρίθηκε με την κοινή λύση για την έλλειψη νερού στις Κυκλάδες που είναι η μεταφορά νερού. Σε σύγκριση με την προσέγγιση μεταφοράς νερού, το αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης οδήγησε σε χαμηλότερο κόστος για μια περίοδο λειτουργίας 20 ετών. Συγκεκριμένα, το κόστος του παραγόμενου νερού ανά m^3 είναι μικρότερο από το κόστος του μεταφερόμενου νερού κατά 64.4%. Οπότε, το σύστημα αφαλάτωσης με τη χρήση ενός συμβατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ασαφείς γνωστικούς χάρτες, αναμφίβολα μπορεί να εξασφαλίσει μια τεχνικά και οικονομικά βιώσιμη λύση στη λειψυδρία των νησιών, παράγοντας πόσιμο νερό αποδεκτής ποιότητας σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του.

Κεφάλαιο 7:

Πειραματική διερεύνηση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων για τον έλεγχο αυτόνομου μικροδικτύου

7 Πειραματική διερεύνηση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφυών πρακτόρων για τον έλεγχο αυτόνομου μικροδικτύου

7.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ευφείς πράκτορες που ενσωματώνουν τεχνική νοημοσύνη για ένα τυπικό μικροδίκτυο πολυπαραγωγής με σκοπό να συγκριθεί η χρήση ενός MAS-DEMS σε σχέση με ένα CEMS. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάστηκαν τα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνικών υπολογιστικής νοημοσύνης για ένα αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα αποτελέσματα οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι σε ένα σύστημα PV-SWRO, απαιτείται μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με επαρκή χωρητικότητα, προκειμένου να τροφοδοτεί το σύστημα για μικρές χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου δεν υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επίσης να απορροφά τις μεταβολές της παραγωγής. Οπότε, η ενσωμάτωση συστημάτων διαχείρισης ενέργειας είναι αναπόφευκτη.

Υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε ποικίλες εφαρμογές ενεργειακών συστημάτων. Η παραδοσιακή προσέγγιση της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η χρήση συμβατικών συσσωρευτών, όπως οι συσσωρευτές μολύβδου οξέος που μπορούν να παρουσιάζουν απόδοση άνω του 80%. Η χρήση τους όμως παρουσιάζει και μειονεκτήματα, όπως περιβαλλοντικοί κίνδυνοι λόγω των περιεχόμενων βαρέων μετάλλων, υψηλό κόστος και περιορισμένη διάρκεια ζωής [198]. Οι υβριδικοί πυκνωτές και τα πιεστικά δοχεία προσφέρουν τη δυνατότητα παροχής ενέργειας ως υποκατάστατο των συσσωρευτών. Οι δύο αυτοί τύποι αποθήκευσης ενέργειας λειτουργούν ως συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής και υδραυλικής ενέργειας, αντίστοιχα. Οι υβριδικοί πυκνωτές χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ειδική ισχύ σε σχέση με τους συμβατικούς συσσωρευτές μολύβδου οξέος, προσφέροντας υψηλότερες αποδόσεις [199]. Επίσης, αποδίδουν πάνω από 10000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης σε

σύγκριση με τους λίγους κύκλους των συσσωρευτών μολύβδου οξέος (περίπου 1800 κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης σε 50% βάθος εκφόρτισης) [200]. Παρόλο που το τρέχον κόστος των υβριδικών πυκνωτών δεν είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με τους συσσωρευτές μολύβδου οξέος, υπάρχει μεγάλη δυνατότητα μελλοντικής μείωσης τόσο λόγω της τεχνολογικής προόδου (π.χ. αύξηση της τάσης λειτουργίας από 2.7 V σε 3.2 V) όσο και λόγω της αύξησης της ζήτησης αγοράς τους. Επιπλέον, τα πιεστικά δοχεία είναι υψηλής ενεργειακής δυναμικότητας [201] και μια οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία [202] που συνδέεται με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους [203].

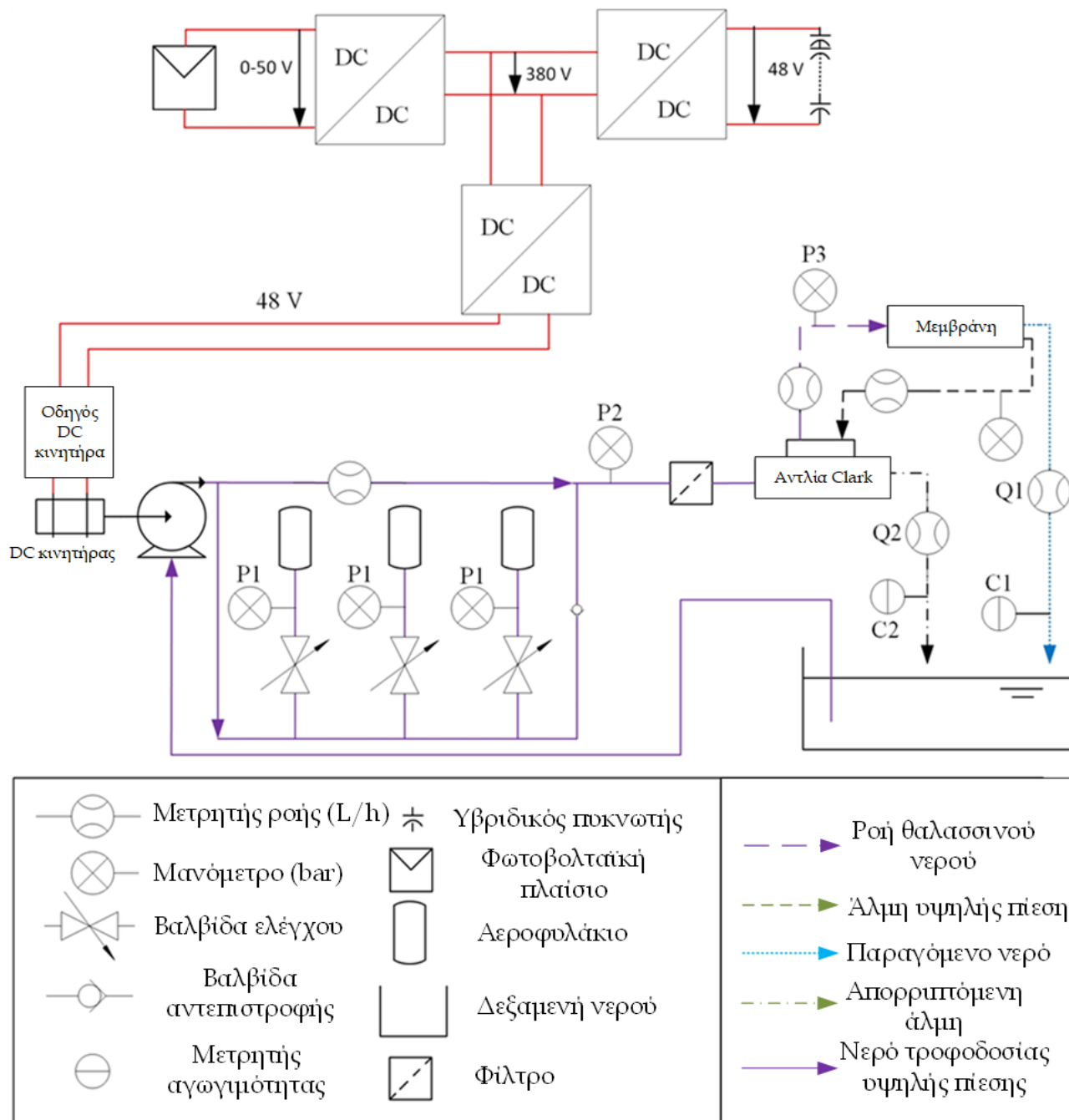
Στο Κεφάλαιο 7, παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση ενός αυτόνομου μικροδικτύου για την τροφοδοσία μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από μία μονάδα παραγωγής ενέργειας, μία μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης και δύο βραχυπρόθεσμες εναλλακτικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, μια ηλεκτρική που περιλαμβάνει υβριδικούς πυκνωτές και μια υδραυλική αποτελούμενη από πιεστικά δοχεία (αεροθυλάκια) θαλασσινού νερού. Οι δύο μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να τροφοδοτούν το σύστημα με την απαιτούμενη ενέργεια (ηλεκτρικά ή υδραυλικά) για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, για μικρά χρονικά διαστήματα. Επίσης, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου με τη χρήση ευφυών πρακτόρων. Στο προτεινόμενο σύστημα, κάθε μονάδα του μικροδικτύου ελέγχεται από έναν ευφυή πράκτορα. Κάθε πράκτορας επικοινωνεί και συνεργάζεται με τους άλλους πράκτορες, με σκοπό την επίτευξη των στόχων τους. Κάθε πράκτορας λαμβάνει πληροφορίες από αισθητήρες ή από άλλους πράκτορες, προκειμένου να λάβει αποφάσεις σχετικά με την παραγωγή ενέργειας, την αποθήκευση ενέργειας (ηλεκτρική και υδραυλική) και την παραγωγή καθαρού νερού. Ο ευφυής πράκτορας που καθορίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης χρησιμοποιεί υπολογιστική νοημοσύνη βασισμένη στη θεωρία των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών (Fuzzy Cognitive Maps). Το αυτόνομο μικροδίκτυο σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και διερευνήθηκε πειραματικά στο Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

7.2 Διαμόρφωση μικροδικτύου

Η σχηματική απεικόνιση του πλήρους λειτουργικού πρωτότυπου συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-1. Το μικροδίκτυο αποτελείται από τις παρακάτω μονάδες:

1. Μονάδες παραγωγής ενέργειας: Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία από τυπικά μονοκρυσταλλικά πλαίσια, συνολικής ισχύος 1.69 kWp.
2. Ηλεκτρικές καταναλώσεις: Μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που περιλαμβάνει υδραυλική διάταξη ανάκτησης ενέργειας με αντλία τύπου Clark.
3. Μονάδες αποθήκευσης ενέργειας: Δύο εναλλακτικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Η πρώτη αφορά αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή υβριδικών πυκνωτών που είναι ικανοί να τροφοδοτήσουν το σύστημα για μικρά χρονικά διαστήματα και η δεύτερη αποτελεί μια αποθήκη υδραυλικής ενέργειας στη μορφή πιεστικών δοχείων, που έχουν την δυνατότητα επιπλέον παραγωγής νερού από την μονάδα αφαλάτωσης.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση του μικροδικτύου είναι η χρήση ενός συστήματος το οποίο θα συνδέει μεταξύ τους όλα τα επιμέρους μέρη, δηλαδή την πηγή ενέργειας (φωτοβολταϊκή συστοιχία), το φορτίο (μονάδα αφαλάτωσης) και τη συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών. Για τη δημιουργία του μικροδικτύου χρησιμοποιήθηκαν οι μετατροπείς συνεχούς σε συνεχές ρεύμα (DC-to-DC Converter) της εταιρίας FLEXIVA (Εικόνα 7-2). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1.



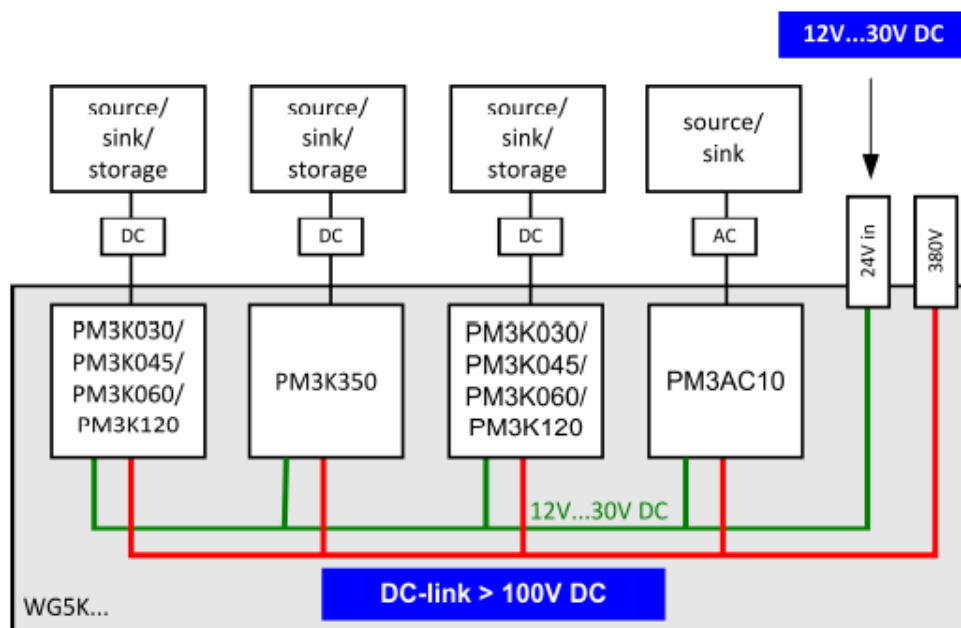
Εικόνα 7-1 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

Πίνακας 7-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα DC-to-DC

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος	DC-to-DC
Μοντέλο	PM3K060
Ισχύς	2.5 kW
Τάση	0 - 60 VDC
Ρεύμα	-25 - 25 A

Οι μετατροπείς τοποθετούνται σε ένα ενιαίο σασί (Zemis kit), λειτουργούν σε διάφορες τάσεις (0...350 VDC) και έχουν την δυνατότητα αμφίδρομης ροής ενέργειας. Παράλληλα μέσω της σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή δίνεται η δυνατότητα της παρακολούθησης και του ελέγχου των μετατροπέων. Το σασί ονομάζεται WG5K (Εικόνα 7.2) και παρέχει την δυνατότητα επικοινωνίας μέσω RS232 και USB. Επιπλέον για την λειτουργία του συστήματος απαιτείται εξωτερική τροφοδοσία 12 VDC - 30 VDC. Η βασική δομή λειτουργίας του συστήματος Flexiva παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-3.

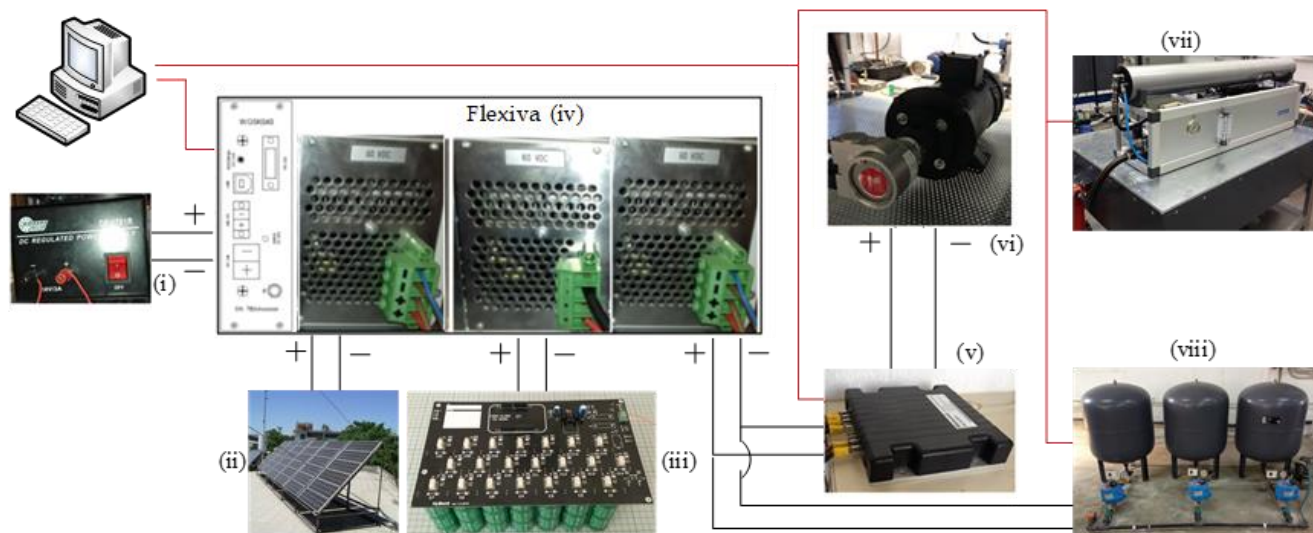
**Εικόνα 7-2** Σασί της Flexiva και ο αμφίδρομος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές ρεύμα



Εικόνα 7-3 Δομή λειτουργίας του συστήματος Flexiva (PM3: Μετατροπείς)

Το σύστημα μετατροπής που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή του μικροδικτύου DC αποτελείται από αμφίδρομα στοιχεία μετατροπής συνεχούς σε συνεχές ρεύμα δημιουργώντας ένα δίκτυο συνεχούς ρεύματος όπου η πηγή ενέργειας, η ηλεκτρική αποθήκη ενέργειας και ο κινητήρας της μονάδας αφαλάτωσης συνδέονται σε κάθε ένα μετατροπέα. Η σύζευξη μεταξύ τους επιτυγχάνεται με μετατροπή των διαφόρων τάσεων σε μια κοινή τάση στα 380 VDC, πραγματοποιώντας μια αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των στοιχείων. Η διάταξη του μικροδικτύου που εγκαταστάθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-4, όπου τρεις μετατροπείς συνδεθήκαν παράλληλα μεταξύ τους. Στον πρώτο μετατροπέα συνδέεται η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στο δεύτερο μετατροπέα συνδέεται η συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών. Η ροή ενέργειας στον συγκεκριμένο μετατροπέα είναι αμφίδρομη ώστε να είναι δυνατή η φόρτιση και η εκφόρτιση της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών. Ο τρίτος μετατροπέας συνδέεται με έναν οδηγό συνεχούς ρεύματος (DC Driver) που ρυθμίζει και ελέγχει τις στροφές του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης. Τα χαρακτηριστικά του οδηγού συνεχούς ρεύματος αναφέρονται στον

Πίνακας 7-2. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος με σταθερή τάση εξόδου 24 VDC και ρεύμα εξόδου 3 A για τη τροφοδοσία των μετατροπέων.



Εικόνα 7-4 Διάταξη DC μικροδικτύου: (i) DC τροφοδοτικό, (ii) Φωτοβολταϊκή συστοιχία, (iii) Συστοιχία υβριδικών πυκνωτών, (iv) Μετατροπείς, (v) DC driver, (vi) Αντλία και κινητήρας τροφοδοσίας, (vii) Μονάδα αφαλάτωσης, (viii) Αεροθυλάκια

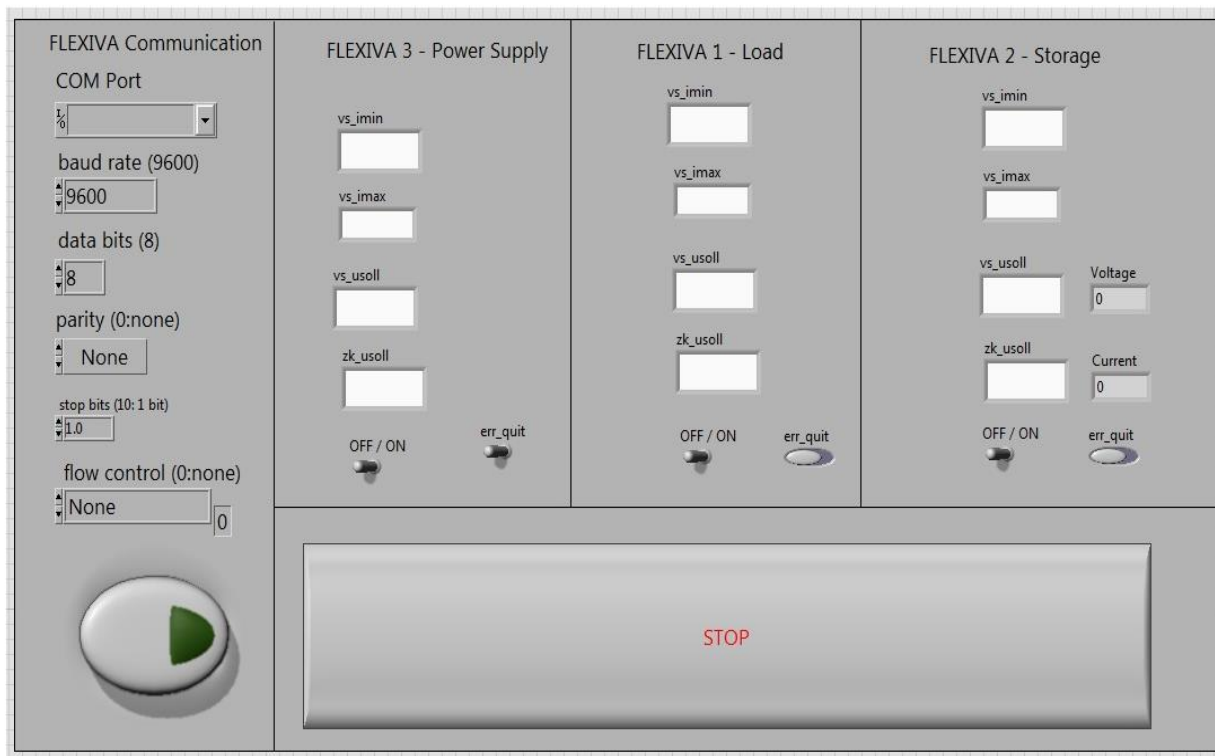
Πίνακας 7-2 Χαρακτηριστικά DC οδηγού

Κατασκευαστής	Roboteq
Μοντέλο	MDC 2260C
Τύπος	Brushed DC motor
Κανάλια	2
Μέγιστο ρεύμα	60 A
Μέγιστη τάση	60 V
Μέγιστο ρεύμα ανά κανάλι	50 A

Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι παρότι η εταιρεία FLEXIVA παρέχει λογισμικό πακέτο για την χρήση των μετατροπέων, προτιμήθηκε η ανάπτυξη εφαρμογής μέσω του LabVIEW για να υπάρχει δυνατότητα ευελιξίας και συνδεσιμότητας με άλλες συσκευές. Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε έχει τρεις εισόδους δεδομένων:

1. Την παραγόμενη ισχύ από το φωτοβολταϊκό σύστημα
2. Την καταναλισκόμενη ισχύ του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης
3. Την κατάσταση φόρτισης των υβριδικών πυκνωτών

Στην Εικόνα 7-5 παρουσιάζεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του LabVIEW.



Εικόνα 7-5 Γραφικό περιβάλλον LabVIEW της εφαρμογής ελέγχου των μετατροπέων

Σε κάθε συνδεδεμένο μετατροπέα ορίζονται μερικές παράμετροι όπως η επικοινωνία, η τάση (vs_usoll), τα ανώτερα/κατώτερα όρια ρεύματος (vs_imax/vs_imin) και η κοινή τάση δικτύου που δημιουργεί το σύστημα της FLEXIVA (zk_usoll).

7.2.1 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από 18 πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου, Arco-Solar (Εικόνα 7-6). Δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά για να επιτευχθεί η κατάλληλη τάση της συστοιχίας (24 VDC) και εννιά είναι συνδεδεμένα παράλληλα για να επιτευχθεί το κατάλληλο ρεύμα (27 A). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-3.



Εικόνα 7-6 Συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πίνακας 7-3 Χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	
Κατασκευαστής	Arco Solar
Ονομαστική ισχύς	47 Wp
Ισχύς στο μέγιστο σημείο ισχύος (P_{MPP})	47 W
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος (V_{MPP})	14.2 V
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος στο μέγιστο σημείο ισχύος (I_{MPP})	3.31 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{OC})	22 V
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC})	3.49 A

Ο μετατροπέας DC-to-DC στον οποίο είναι συνδεδεμένη η φωτοβολταϊκή συστοιχία, χρησιμοποιείται επίσης και σαν ελεγκτής μεγίστου σημείου των φωτοβολταϊκών, επιτρέποντας στη συστοιχία να παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ σε κάθε χρονική ισχύ (Ενότητα 7.3.2.1).

7.2.2 Μονάδα αφαλάτωσης

Η μονάδα αφαλάτωσης περιλαμβάνει μια περιστροφική αντλία θετικής μετατόπισης (αντλία νερού τροφοδοσίας), σε συνδυασμό με ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος, μια αντλία υψηλής πίεσης, μια υδραυλική διάταξη ανάκτησης ενέργειας με αντλία τύπου Clark, μια μεμβρανοθήκη, υδραυλικούς σωλήνες και όργανα μέτρησης. Η μονάδα αφαλάτωσης

περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Το νερό τροφοδοσίας οδηγείται μέσω φίλτρων από την αντλία τροφοδοσίας, υπό πίεση, στην είσοδο της αντλίας Clark και καταλήγει στη μεμβράνη αντίστροφης όσμωσης. Η μεμβράνη αφαιρώνει ένα μέρος του νερού τροφοδοσίας ενώ το υπόλοιπο παραμένει σε υψηλή πίεση με υψηλή αλατότητα. Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας είναι στους 15 °C και η αλατότητα έχει ρυθμιστεί στα 32000 ppm, η οποία είναι η τυπική αλατότητα του θαλασσινού νερού στη Μεσόγειο Θάλασσα.

7.2.3 Μονάδες αποθήκευσης ενέργειας

7.2.3.1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας στο προτεινόμενο μικροδίκτυο πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο εναλλακτικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας βραχείας διάρκειας. Η πρώτη περιλαμβάνει μια ηλεκτρική αποθήκευση ενέργειας με τη χρήση μιας συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών, ενώ η δεύτερη αποτελεί μία υδραυλική αποθήκευση ενέργειας με τη χρήση μιας συστοιχίας πιεστικών δοχείων. Αυτά τα δύο στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να τροφοδοτήσουν το σύστημα με την απαιτούμενη ενέργεια (ηλεκτρική ή υδραυλική), προκειμένου να λειτουργήσει η μονάδα αφαιρώσεως για μικρές χρονικές περιόδους (περίπου 10-20 λεπτά). Η χρήση των συγκεκριμένων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει την ομαλότερη λειτουργία της μονάδας αφαιρώσεως χωρίς τη συχνή εκκίνηση/τερματισμό της μονάδας και με μικρότερη διακύμανση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας.

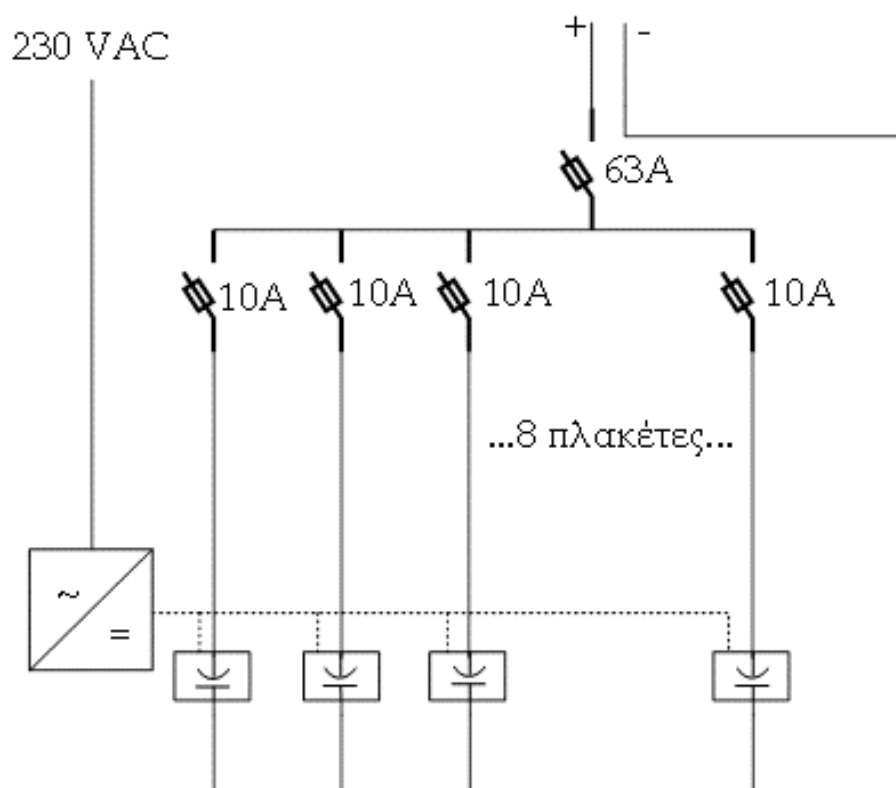
7.2.3.2 Ηλεκτρική αποθήκευση ενέργειας

Η εν λόγω μονάδα περιλαμβάνει μια συστοιχία υβριδικών πυκνωτών, η οποία σχεδιάστηκε και συναρμολογήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Μηχανολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο κάθε υβριδικός πυκνωτής έχει ονομαστική τάση 2.3 VDC. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-4. Η επιθυμητή τάση που πρέπει να παρέχει κάθε συστοιχία υβριδικών πυκνωτών είναι 48 VDC. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκαν 8 ηλεκτρονικές πλακέτες όπου κάθε πλακέτα φέρει 21 πυκνωτές συνδεδεμένους εν σειρά δίνοντας (ονομαστική) έξοδο 48.3 VDC και είναι εξοπλισμένη με έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της

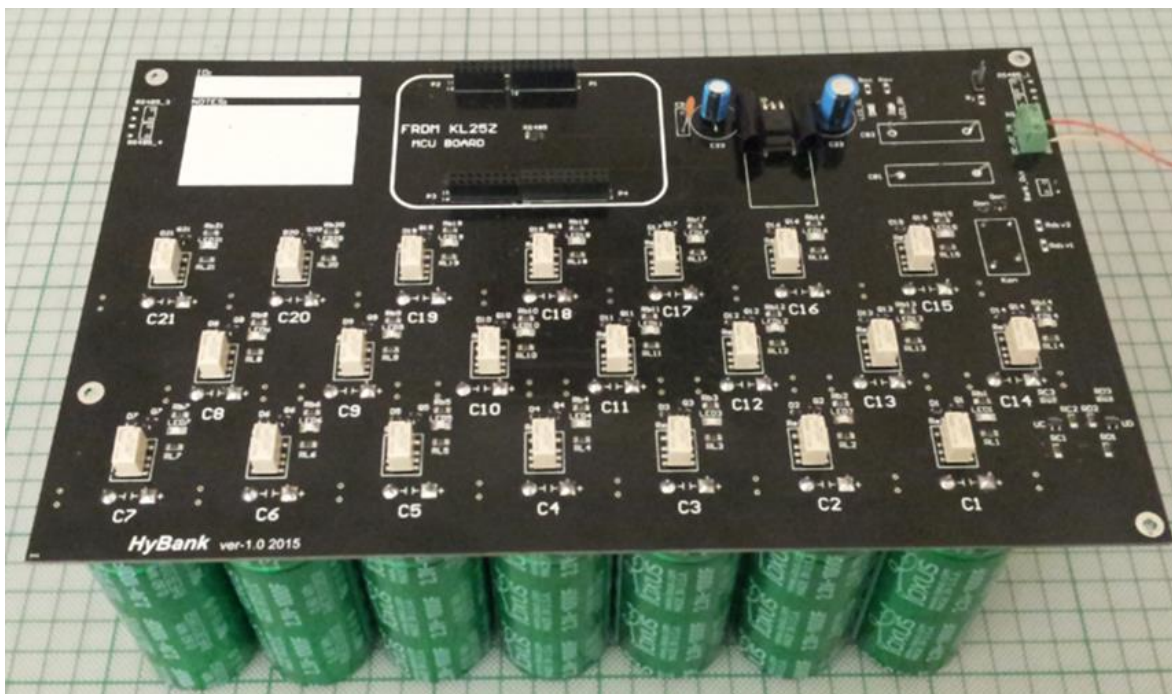
πλακέτας. Όλες οι πλακέτες είναι συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-7, και η συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών που δημιουργήθηκε απεικονίζεται στην Εικόνα 7-8.

Πίνακας 7-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά υβριδικών πυκνωτών

Παράμετρος	Τιμή
Κατασκευαστής	IOXUS
Μοντέλο	RHE2R3108SR
Χωρητικότητα	1000 F
Ονομαστική τάση	2.3 V
Μέγιστη ενέργεια αποθήκευσης	0.6 Wh
Μέγιστη ισχύς στην αποθήκευση	2.1 kW/kg

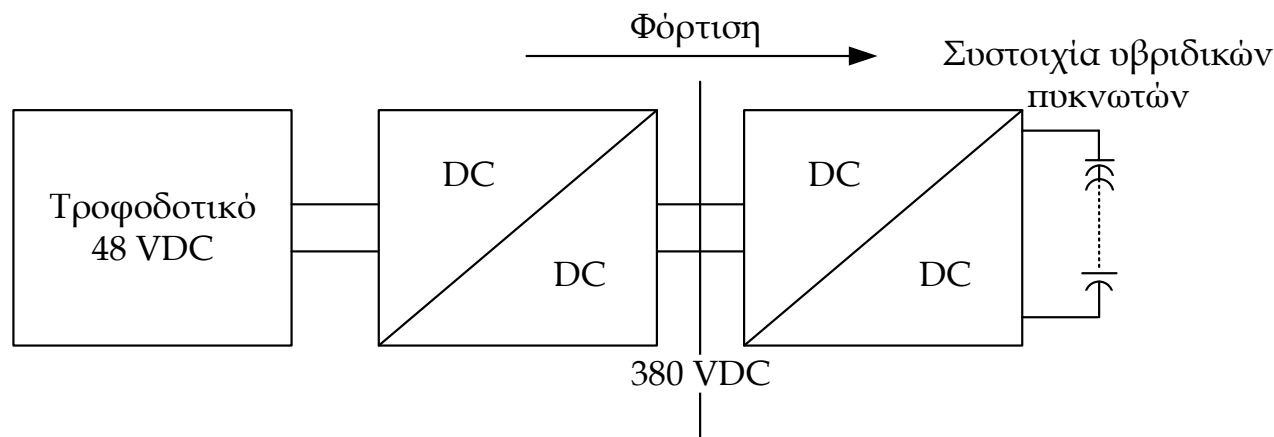


Εικόνα 7-7 Ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών



Εικόνα 7-8 Η πρωτότυπη μονάδα με 21 υβριδικούς πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά

Προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών κατά τη διάρκεια φόρτισής τους, διεξήχθησαν τρία διαφορετικά πειράματα. Η τροφοδοσία των πυκνωτών πραγματοποιήθηκε μέσω ψηφιακά προγραμματιζόμενου τροφοδοτικού, όπου η τάση τροφοδοσίας ήταν σταθερή στα 48 VDC και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης ρυθμίστηκε στα 8 A (1 A ανά πλακέτα), 12 A (1.5 A ανά πλακέτα) και 16 A (2 A ανά πλακέτα). Προκειμένου να αποφευχθεί η υπέρταση των υβριδικών πυκνωτών κατά τη φόρτισή τους χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας DC-to-DC, το ZEMIS Energy kit της Flexiva Automation & Robotic GmbH (Flexiva Automation and Robotik GmbH, 2016a). Η ηλεκτρική σύνδεση για τη φόρτιση της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-9.

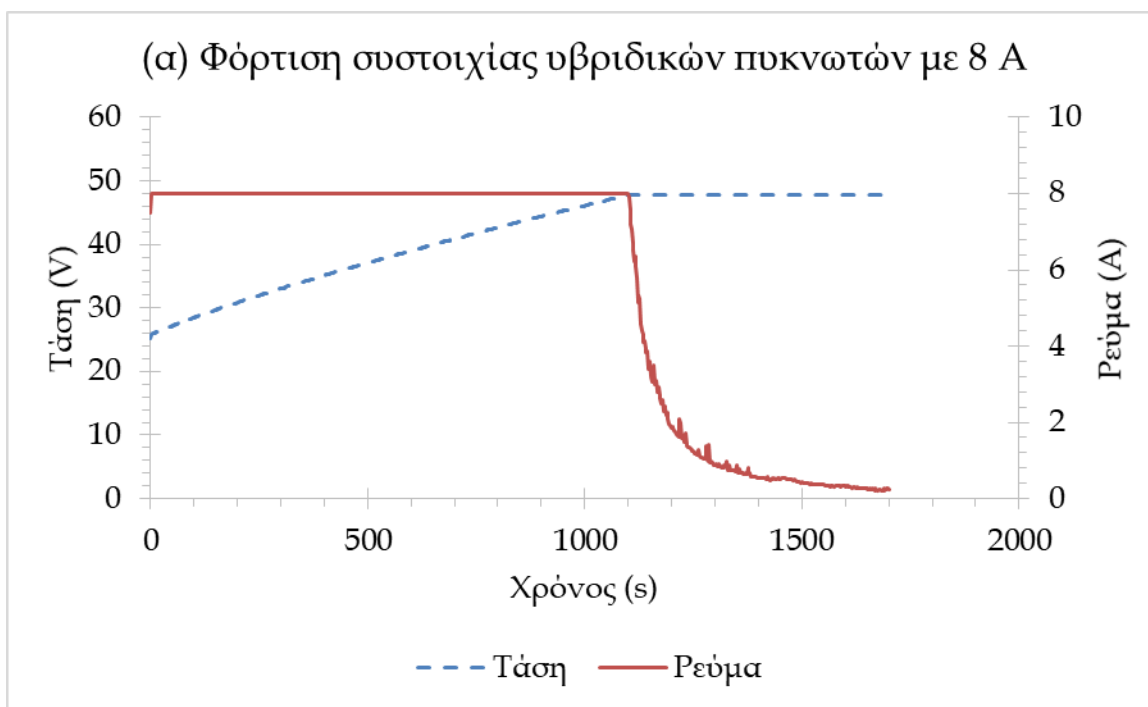


Εικόνα 7-9 Συνδεσμολογία φόρτισης των πυκνωτών

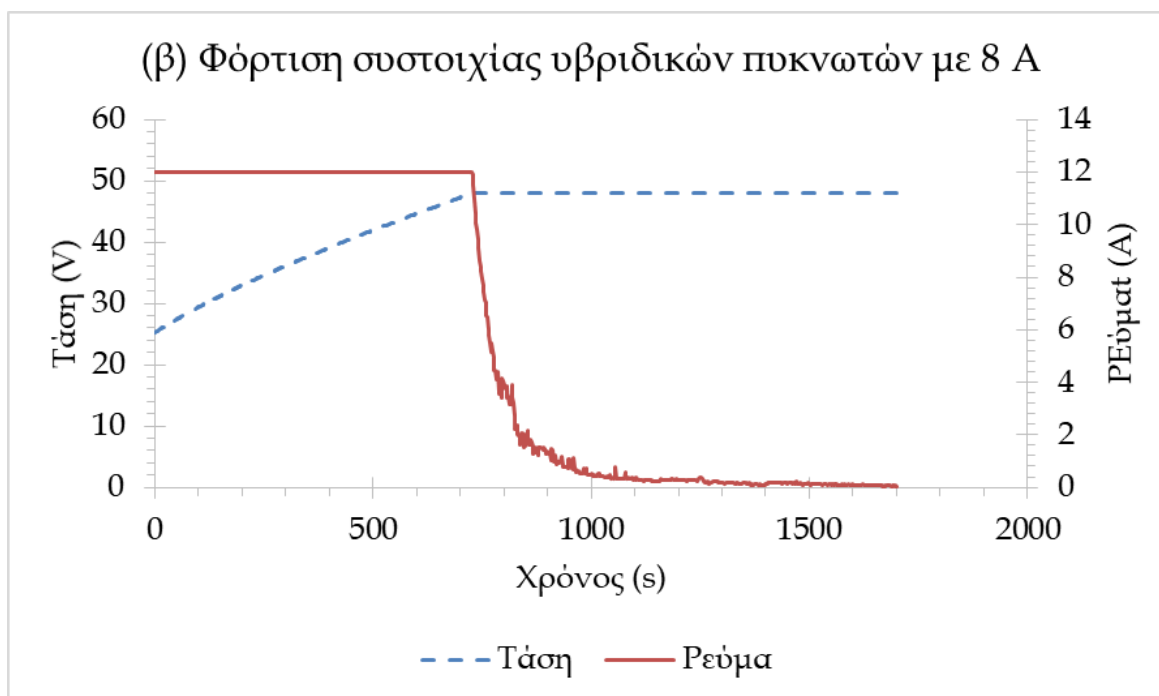
Κατά τη διάρκεια της φόρτισης σε διαφορετικές τιμές ρευμάτων, το ρεύμα φόρτισης ισούται με το μέγιστο ρεύμα φόρτισης μέχρι η τάση της τράπεζας υβριδικών πυκνωτών να φτάσει στην τάση κατωφλίου των 48 VDC (constant current mode). Στη συνέχεια, η τάση παραμένει σταθερή ενώ το ρεύμα φόρτισης μειώνεται εκθετικά (constant voltage mode). Τα αποτελέσματα των ανωτέρω αναφερθέντων πειραμάτων απεικονίζονται στο Διάγραμμα 7-1.

Το ρεύμα και η τάση (Διάγραμμα 7-1) μετρήθηκαν στην πλευρά της συστοιχίας των πυκνωτών. Παρατηρείται ότι η συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών δεν φορτίζεται πλήρως όταν η τάση φθάνει στα 48 VDC και η φόρτιση συνεχίζεται μέχρις ότου το ρεύμα τείνει στο μηδέν. Η χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας της συστοιχίας για κάθε δοκιμή μετράται για τον ίδιο χρόνο φόρτισης και παρουσιάζεται στον Πίνακα 7-5 Πίνακας 7-5. Παρατηρείται στον Πίνακα 7-5 ότι η συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών έχει απορροφήσει περισσότερη ενέργεια σε υψηλότερα ρεύματα. Όπως και στις χημικές διεργασίες ιόντων λιθίου, τα υψηλότερα ρεύματα φορτίου φέρνουν μικρότερους χρόνους φόρτισης [204]. Αν οι χρόνοι ήταν μεγαλύτεροι για όλα τα σενάρια φόρτισης, η ενέργεια που θα απορροφούσε η συστοιχία θα ήταν η ίδια με τη διατήρηση της τάσης στα 48 VDC από τον μετατροπέα DC-to-DC (προστασία από υπέρταση). Όταν το μέγιστο ρεύμα φόρτισης ρυθμίστηκε στα 8 A, η συστοιχία υβριδικών πυκνωτών έφτασε την ονομαστική ενεργειακή ισχύ που ορίστηκε από τον κατασκευαστή ($21 \text{ υβριδικοί πυκνωτές} \times 8 \text{ μονάδες} \times 0.6 \text{ Wh ανά πυκνωτή} = 100.8 \text{ Wh}$) μετά από 1472 s και το ρεύμα μειώθηκε σε 0.5 A. Κατά συνέπεια, όταν το μέγιστο ρεύμα φόρτισης ορίστηκε σε 12 A, η συστοιχία έφτασε την ονομαστική ενέργεια στα 910 δευτερόλεπτα και το

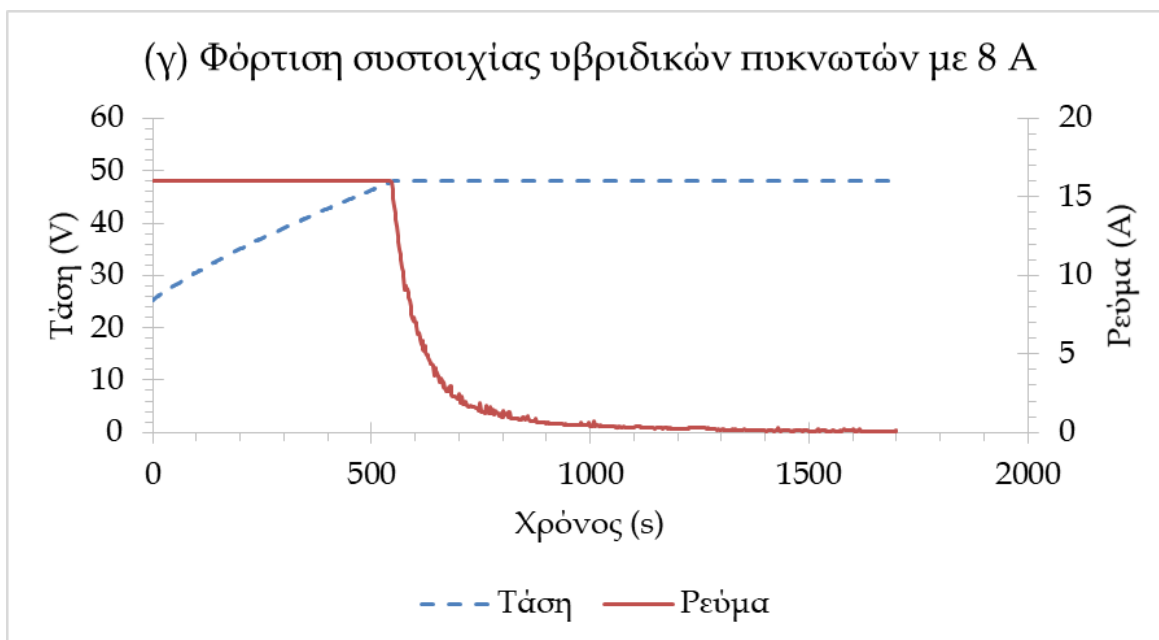
ρεύμα μειώθηκε σε 1.45 A. Όταν το μέγιστο ρεύμα φόρτισης ήταν 16 A, η συστοιχία έφτασε την ονομαστική ενέργεια σε 622 s και το ρεύμα μειώθηκε σε 5.52 A.



(α)



(β)



(γ)

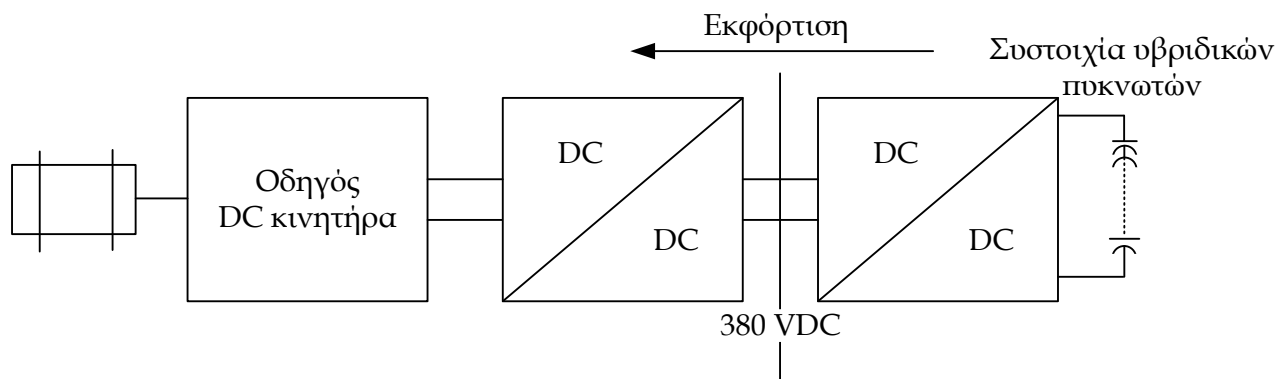
Διάγραμμα 7-1 Καμπόλες φόρτισης των υβριδικών πυκνωτών. (α) Φόρτιση συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών με 8 A, (β) Φόρτιση συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών με 12 A, (γ) Φόρτιση συστοιχίας υβριδικών πυκνωτών με 16 A

Πίνακας 7-5 Πειραματικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Χρόνος (s)	Ρεύμα (A)	Χωρητικότητα (Wh)
1700	8	101.8
	12	103.6
	18	110.0

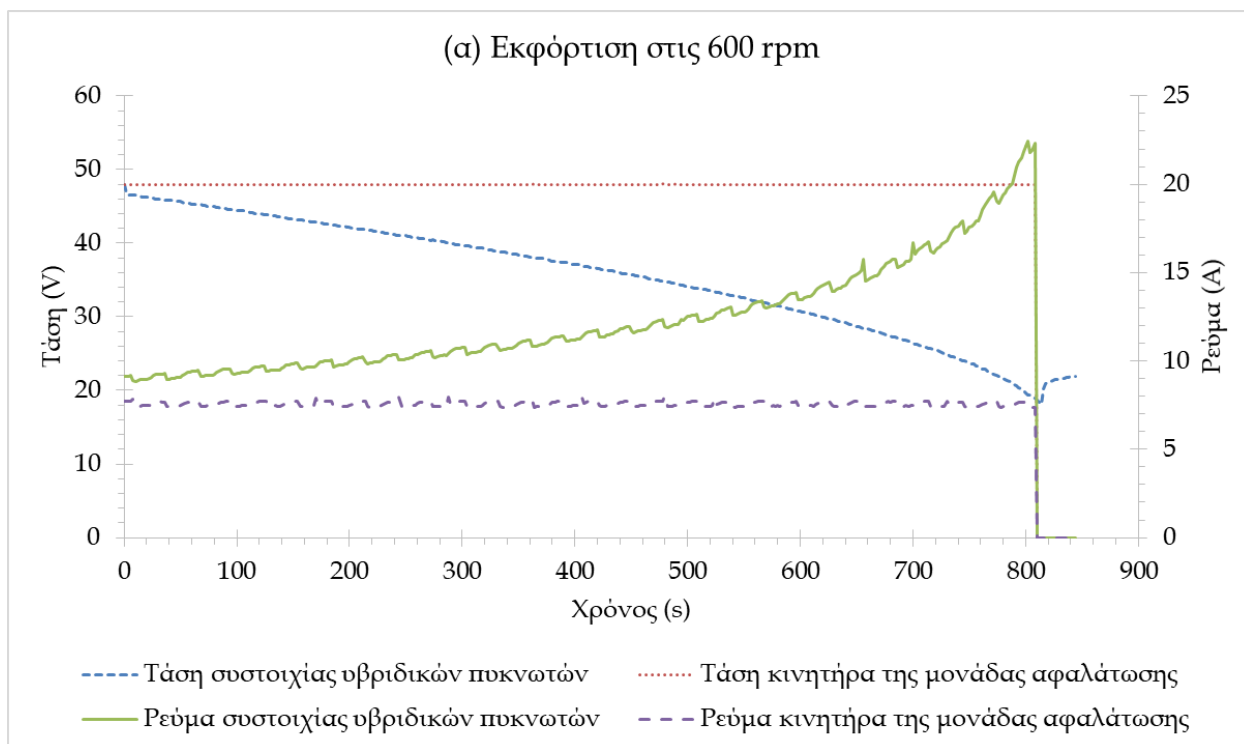
Επιπλέον, με σκοπό τον έλεγχο της συστοιχίας κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης επιλέχθηκε ως φορτίο κατανάλωσης ο κινητήρας της μονάδας αντιστροφής όσμωσης. Εκτελέστηκαν τρία πειράματα εκφόρτισης της συστοιχίας, επιλέγοντας κάθε φορά διαφορετική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης μέσω ενός ρυθμιστή στροφών (Roboteq: DC Motor Controllers). Οι επιλεγμένες στροφές ήταν στις 600 σ.α.λ. (ελάχιστο), 700 σ.α.λ. και 800 σ.α.λ. (μέγιστο). Οι τιμές αυτές των στροφών επιλέχθηκαν ώστε να βρίσκονται εντός του εύρους λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Ο μετατροπέας DC-to-DC χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή εισόδου σταθερής τάσης στον κινητήρα της τάξης των 48

VDC. Η ηλεκτρική συνδεσμολογία για την εκφόρτιση της συστοιχίας απεικονίζεται στην Εικόνα 7-10.

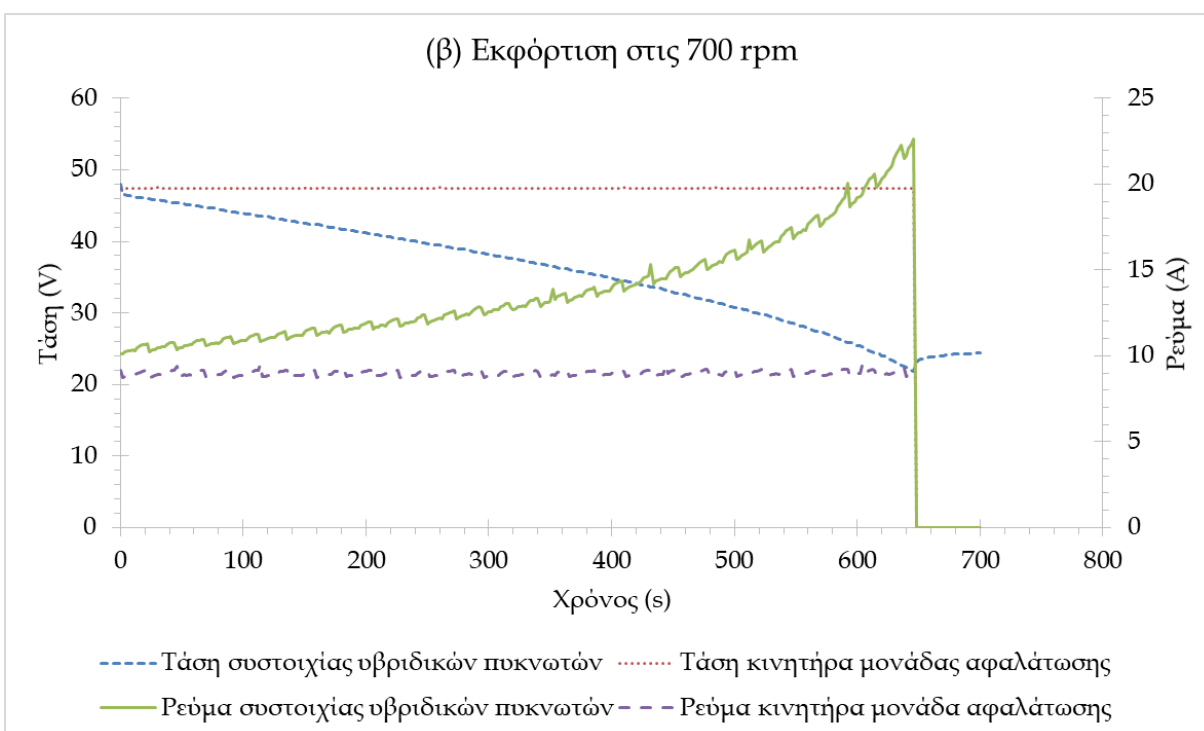


Εικόνα 7-10 Συνδεσμολογία εκφόρτισης των πυκνωτών

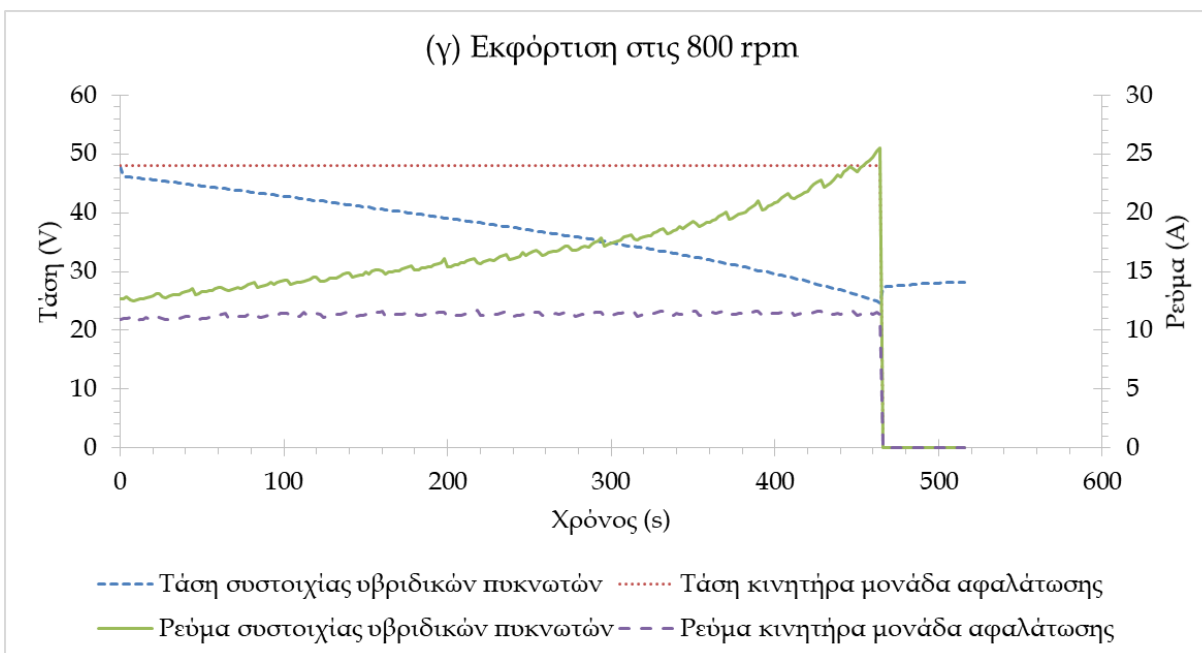
Στο Διάγραμμα 7-2 απεικονίζει η συμπεριφορά της συστοιχίας κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης στις επιλεγμένες ταχύτητες. Το ρεύμα και η τάση μετρήθηκαν στην πλευρά της συστοιχίας. Παρατηρείται ότι η τάση της συστοιχίας μειώνεται ενώ το ρεύμα εκφόρτισης αυξάνεται προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Οι μικρές διακυμάνσεις στο ρεύμα και στην τάση οφείλονται στην παλινδρομική λειτουργία της εμβολοφόρου αντλίας (Clark pump) της μονάδας αφαλάτωσης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, μετρήθηκε η ποσότητα του παραγόμενου πόσιμου νερού από τη μονάδα αφαλάτωσης στις διάφορες ταχύτητες του κινητήρα και υπολογίστηκε η ειδική κατανάλωση ενέργειας (Πίνακας 7-6). Παρατηρείται από τον Πίνακα 7-6 ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται η διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να αντληθεί από την συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν συγκρίσιμη συμπεριφορά [205].



(α)



(β)



(γ)

Διάγραμμα 7-2 Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος των πυκνωτών και του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης κατά την εκφόρτιση της συστοιχίας των πυκνωτών σε λειτουργία του κινητήρα της μονάδας σε 600 rpm, 700 rpm και 800 rpm

Πίνακας 7-6 Πειραματικά αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης

Στροφές (Rpm)	Χρόνος (s)	Παραγωγή νερού (L)	Κατανάλωση ενέργειας του κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης (kWh)	Ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m ³)	Πίεση νερού εισόδου στη μεμβράνη (bar)
600	808	13.9	81.5	5.9	45.0
700	646	14.3	76.7	5.4	46.0
800	464	12.0	69.8	5.8	50.0

7.2.3.3 Υδραυλική αποθήκευση ενέργειας

Στη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, η πίεση τροφοδοσίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την οσμωτική πίεση με σκοπό να παραχθεί πόσιμο νερό. Όταν η ηλεκτρική ενέργεια από τις μονάδες παραγωγής και τις συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει την αντλία της μονάδας αφαλάτωσης, τότε μπορεί να

χρησιμοποιηθούν κατάλληλες συσκευές αποθήκευσης υδραυλικής ενέργειας που θα τροφοδοτούν τη μονάδα αφαλάτωσης με θαλασσινό νερό υπό πίεση. Οπότε, χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό πιεστικά δοχεία και τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του καθενός παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-7.

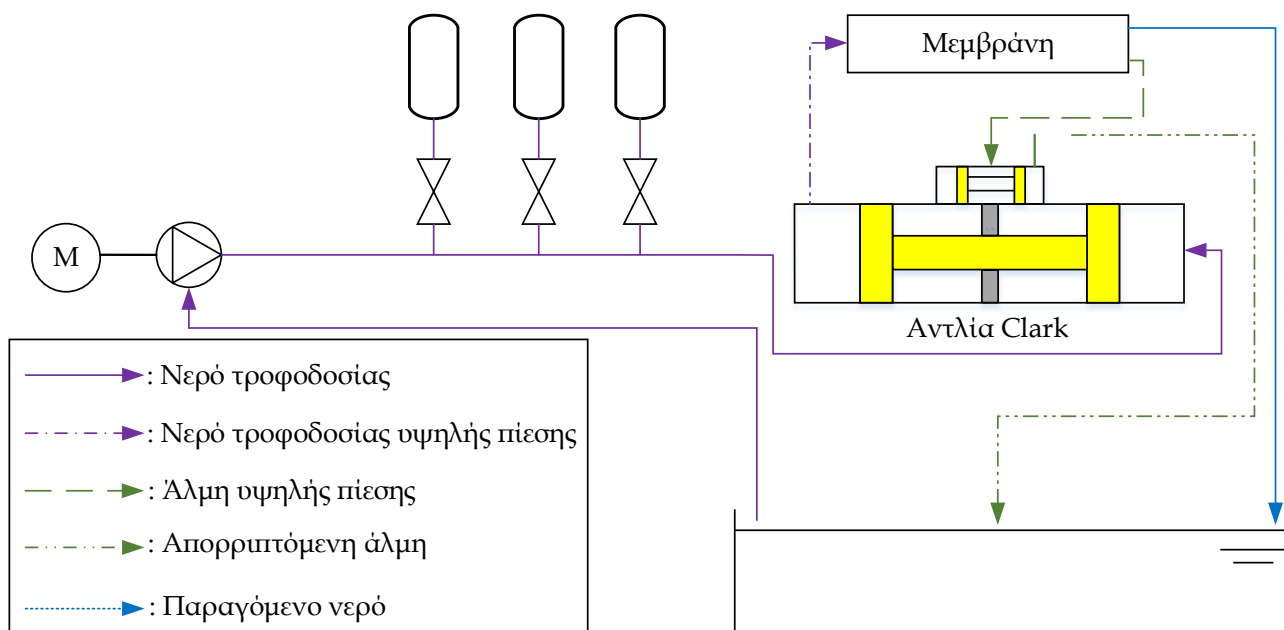
Πίνακας 7-7 Τεχνικά χαρακτηριστικά του πιεστικού δοχείου

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος	Bladder pressure Tank
Μοντέλο	GT-U-200 PN 16 G 1 ¼ V
Αριθμός δοχείων	3
Χωρητικότητα (Συνολική)	200 L (3 x 200 = 600 L)
Μέγιστη πίεση	16 bar
Πίεση προ-φόρτισης	4 bar
Υλικό κατασκευής	Κατάλληλο για θαλασσινό νερό

Στο προτεινόμενο σύστημα μελετήθηκε η χρήση τριών πιεστικών δοχείων (Εικόνα 7-11), συνδεδεμένα παράλληλα με τη μονάδα αφαλάτωσης (Εικόνα 7-12). Τα δοχεία είναι ικανά να τροφοδοτούν τη μονάδα αφαλάτωσης με θαλασσινό νερό υπό πίεση κοντά στην ονομαστική ροή τροφοδοσίας. Κάθε δοχείο είναι εξοπλισμένο με μια ηλεκτρική ρυθμιστική βαλβίδα, προκειμένου να είναι ελεγχόμενη η σύνδεση και η αποσύνδεσή τους από το σύστημα.



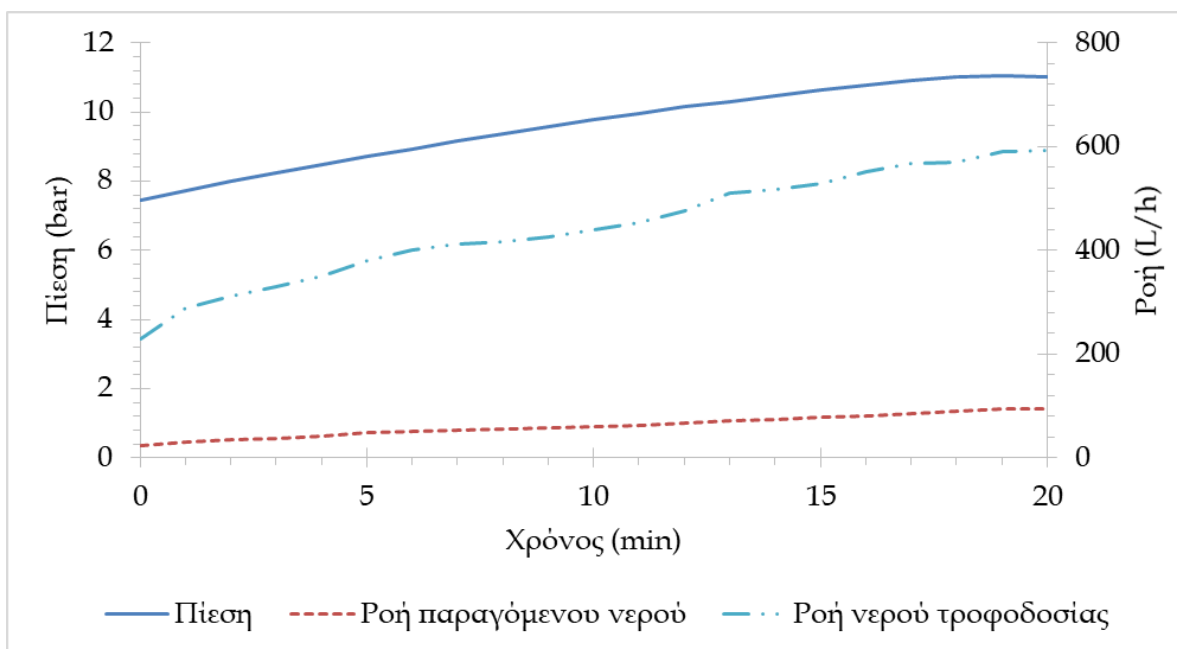
Εικόνα 7-11 Σύστοιχία πιεστικών δοχείων



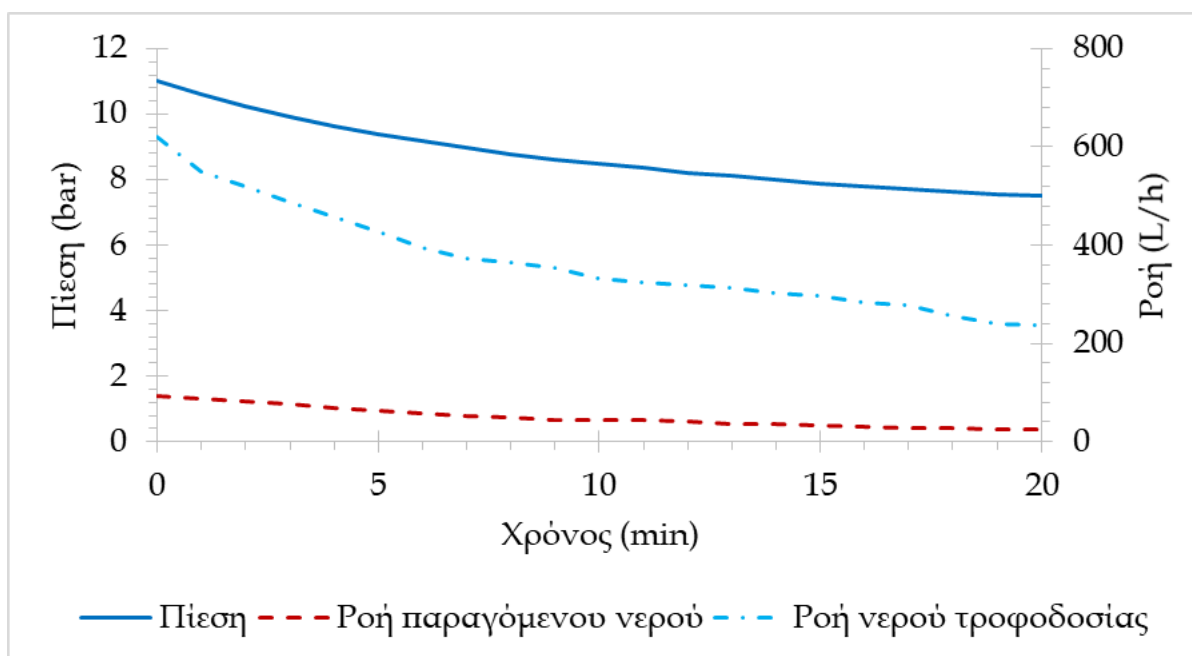
Εικόνα 7-12 Σχηματική απεικόνιση σύνδεσης της μονάδας αφαλάτωσης με τα πιεστικά δοχεία (αεροθυλάκια)

Η συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με τα πιεστικά δοχεία, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7-3 και στο Διάγραμμα 7-4 . Το ελάχιστο όριο της πίεσης ορίστηκε στα 7 bar και το μέγιστο στα 11 bar, καθώς αυτό είναι το εύρος της πίεσης εισόδου στην αντλία Clark της μονάδας αφαλάτωσης (Κεφάλαιο 5). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης των πιεστικών δοχείων, η αντλία της μονάδας αφαλάτωσης τροφοδοτεί με θαλασσινό νερό τόσο τα πιεστικά δοχεία όσο και τη μονάδα αφαλάτωσης (ηλεκτρικές βαλβίδες ανοιχτές). Παρατηρήθηκε ότι η αντλία κατανάλωσε 159 Wh και η μονάδα αφαλάτωσης παράγαγε 22 L. Το σημαντικό πλεονέκτημα της παράλληλης σύνδεσης των πιεστικών δοχείων με τη μονάδα αφαλάτωσης είναι ότι δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή της πίεσης λειτουργίας της μεμβράνης, καθώς η πίεση του νερού τροφοδοσίας στη μονάδα αφαλάτωσης και στα δοχεία είναι ίδια. Επιπλέον, όταν η πίεση στα δοχεία φθάσει τα 11 bar τότε οι βαλβίδες μπορούν να κλείσουν χωρίς να επηρεαστεί η πίεση και ο ρυθμός ροής του νερού τροφοδοσίας στη μονάδα αφαλάτωσης. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης παρατηρήθηκε ότι τα πιεστικά δοχεία είναι

ικανά να τροφοδοτούν τη μονάδα αφαλάτωσης με θαλασσινό νερό υπό πίεση για 20 λεπτά, όπου η μονάδα αφαλάτωσης παρήγαγε συνολικά 17 λίτρα πόσιμο νερό.



Διάγραμμα 7-3 Συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με τα πιεστικά δοχεία κατά τη διάρκεια της φόρτισης των δοχείων



Διάγραμμα 7-4 Συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, σε συνδυασμό με τα πιεστικά δοχεία κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης των δοχείων

7.2.4 Σύστημα καταγραφής δεδομένων

Στο μικροδίκτυο εγκαταστάθηκαν διάφορα αισθητήρια και ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων με σκοπό την παρακολούθηση και μέτρηση των κρίσιμων τιμών λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Τα αισθητήρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα αισθητήρια που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6 (Ενότητα 6.2.2, Πίνακας 6-5). Στον Πίνακα 7-8 παρουσιάζονται τα σύμβολα των αισθητηρίων που χρησιμοποιούνται στην Εικόνα 7-1. Το σύστημα για τη καταγραφή των δεδομένων που εγκαταστάθηκε είναι το NI cRIO-9074 της Texas Instruments.

Πίνακας 7-8 Τοποθέτηση των αισθητηρίων στο μικροδίκτυο (Εικόνα 7-1)

Αισθητήρια	Θέση στο σύστημα	Σύμβολο
Αισθητήρας πίεσης	Στην έξοδο της αντλίας τροφοδοσίας	P2
Αισθητήρας πίεσης	Στην είσοδο της μεμβράνης	P3
Αισθητήρας ροής	Στη γραμμή του παραγόμενου νερού	P1
Αισθητήρας ροής	Στη γραμμή της άλμης	Q1
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Στη γραμμή του παραγόμενου νερού	Q2
Αισθητήρας ισχύος	Κινητήρας αντλίας τροφοδοσίας	C1
Θερμοκρασίας	Δεξαμενή νερού	C2

7.3 Πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων για τον έλεγχο του μικροδικτύου

7.3.1 Πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων

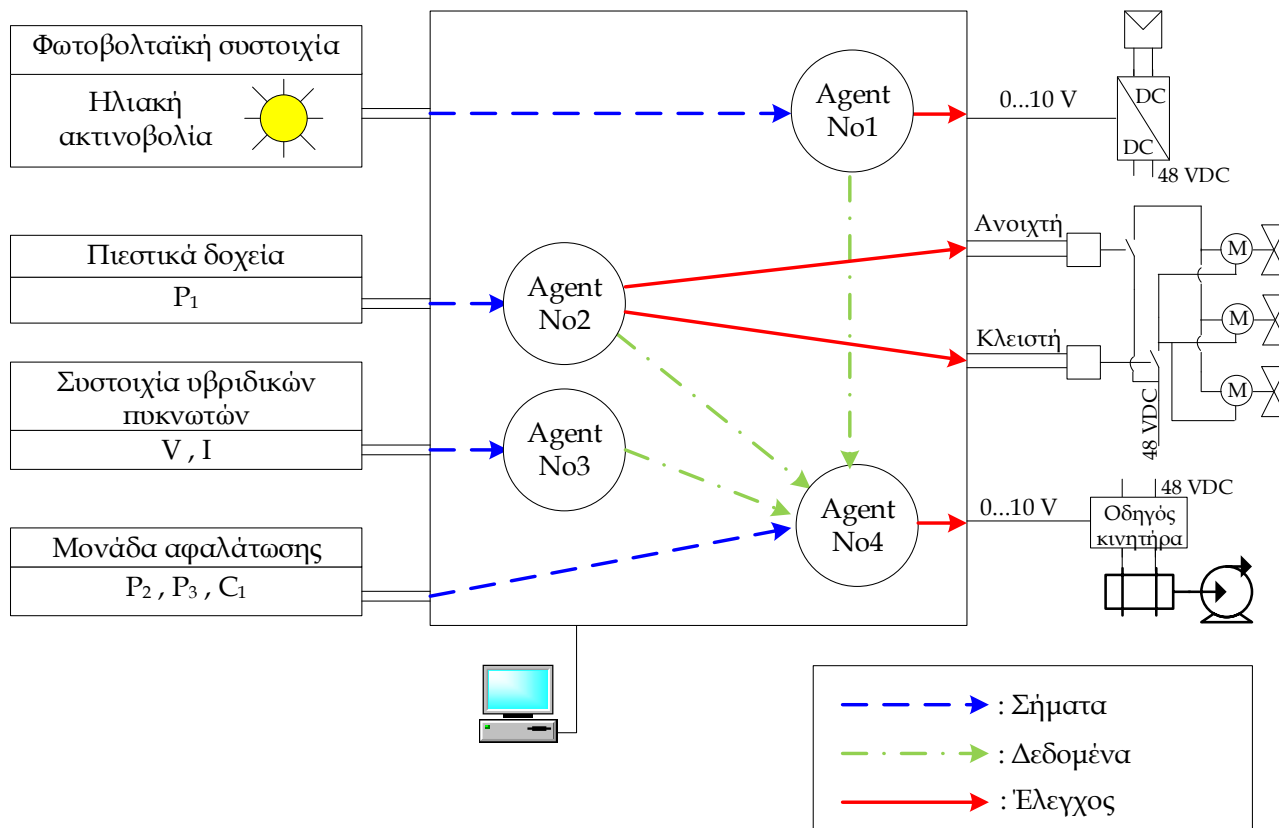
Με σκοπό τον ευφυή έλεγχο και τη διαχείριση της ενέργειας του μικροδικτύου, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφύων πρακτόρων. Το πολυπρακτορικό σύστημα ευφύων πρακτόρων του μικροδικτύου, που αποτελεί το αντικείμενο της έρευνας, αποτελείται από τέσσερις ευφυείς πράκτορες. Για να τη περιγραφή του MAS ορίστηκαν οι αντιλήψεις, οι δράσεις, οι στόχοι και το περιβάλλον (PAGE) όπου ενεργούν οι πράκτορες. Στον Πίνακα 7-9 παρουσιάζεται το PAGE του MAS.

Πίνακας 7-9 PAGE του MAS

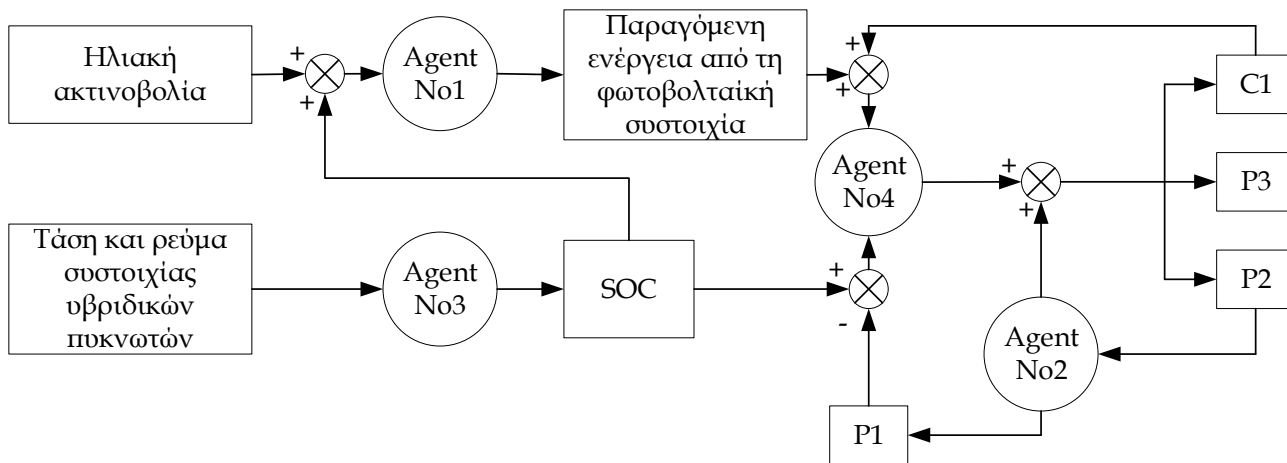
Αντλήψεις	Η παραγόμενη ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η καταναλισκόμενη ενέργεια από τη μονάδα αφαλάτωσης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού και η κατάσταση φόρτισης (SOC) της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών.
Δράσεις	Προσδιορισμός του σημείου λειτουργίας του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης και της κατάστασης των βαλβίδων των πιεστικών δοχείων (ON/OFF).
Στόχοι	Η υψηλότερη δυνατή παραγωγή πόσιμου νερού, αξιοποιώντας αποτελεσματικά την παραγόμενη ενέργεια.
Περιβάλλον	Όλες οι μονάδες του αυτόνομου μικροδικτύου

Οι πράκτορες που σχεδιάστηκαν είναι ο πράκτορας RES agent (πράκτορας No1), ο πράκτορας Pressure Vessel agent (πράκτορας No2), ο πράκτορας Hybrid capacitor agent (πράκτορας No3) και ο Desalination Agent (πράκτορας No4). Ο κάθε ένας από τους τέσσερις πράκτορες του MAS ελέγχει ένα ξεχωριστό στοιχείο του μικροδικτύου. Ο πράκτορας No1 ελέγχει τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, ο πράκτορας No2 ελέγχει τα πιεστικά δοχεία, ο πράκτορας No3 ελέγχει τη συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών και ο πράκτορας No4 ελέγχει τη μονάδα αφαλάτωσης.

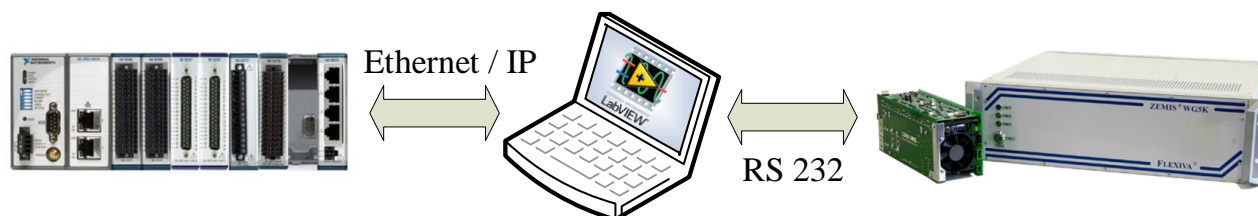
Η τοπολογία του MAS παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-13 και το διάγραμμα ροής του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας (DEMS) με τη χρήση του MAS απεικονίζεται στην Εικόνα 7-14. Όλοι οι πράκτορες επικοινωνούν μεταξύ τους και κάθε πράκτορας λαμβάνει πληροφορίες από το σύστημα συλλογής δεδομένων ή μέσω του kit ZEMIS Energy της Flexiva, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή διαχείριση ενέργειας του συστήματος. Οι εμπλεκόμενοι πράκτορες υλοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού LabVIEW. Το σύστημα NI cRIO-9074 και το ZEMIS είναι απευθείας συνδεδεμένα με έναν υπολογιστή μέσω Ethernet / IP [206] και μια σειριακή θύρα (RS 232) [207] αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-15. Το χρονικό βήμα των εισόδων είναι κάθε πέντε δευτερόλεπτα και οι εντολές από τους πράκτορες στα αντίστοιχα στοιχεία δίνονται ανά ένα λεπτό.



Εικόνα 7-13 Τοπολογία του MAS



Εικόνα 7-14 Αρχιτεκτονική του MAS - DEMS

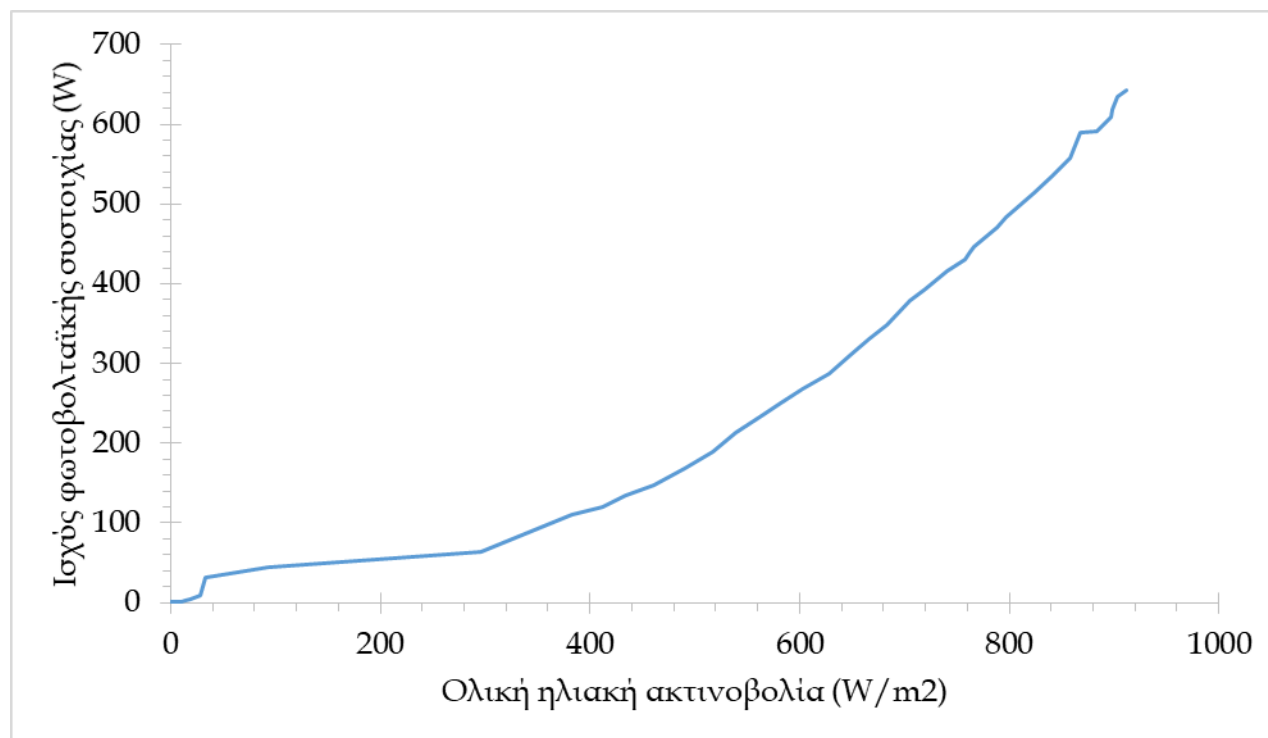


Εικόνα 7-15 Επικοινωνία μεταξύ των συσκευών

7.3.2 Επισκόπηση πρακτόρων

7.3.2.1 RES agent

Ο RES agent είναι ένας απλός αντανακλαστικός πράκτορας (simple reflex agent). Συνδέεται με τους αισθητήρες ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ρυθμίζει το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας στο μέγιστο σημείο ισχύος, ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία και το SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών. Για το προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στη μέγιστη ισχύ, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη συσκευή εύρεσης της μέγιστης ισχύος και δημιουργίας καμπυλών I-V φωτοβολταϊκών πλαισίων, το PVPM1040C της εταιρείας PVE Photovoltaic Engineering [208]. Η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε σχέση με την ένταση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7-5. Ο αλγόριθμος του RES agent παρουσιάζεται στον Πίνακα 7-10.



Διάγραμμα 7-5 Μέγιστη παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας ως προς την ηλιακή ακτινοβολία

Πίνακας 7-10 Αλγόριθμος του RES agent

Αλγόριθμος του RES agent

Συνάρτηση	RES agent - απλός αντανακλαστικός πράκτορας
Δεδομένα:	Ηλιακή ακτινοβολία, SOC
Αρχικοποίηση	
Έναρξη	
Κανόνες:	
Ενέργειες:	<ul style="list-style-type: none"> - Υπολογισμός του μεγίστου σημείου παραγωγής ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σύμφωνα με το Διάγραμμα 7-5, και ρύθμιση των απαιτούμενων παραμέτρων (τάση και ρεύμα) στο μετατροπέα DC-to-DC. - Αποστολή σήματος στον πράκτορα Desalination agent σχετικά με τη παραγόμενη ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία.
Επιστροφή στις ενέργειες	
Τέλος	

7.3.2.2 Pressure Vessel agent

Ο πράκτορας Pressure Vessel agent είναι ένας απλός αντανακλαστικός πράκτορας (simple reflex agent). Ο πράκτορας λαμβάνει ως είσοδο την αποθηκευμένη πίεση στα πιεστικά δοχεία και καθορίζει το σημείο λειτουργίας των ηλεκτροβαλβίδων (ON ή OFF), θέτοντας ως στόχο την υψηλότερη αποθήκευση υδραυλικής ενέργειας. Η μέγιστη πίεση των δοχείων σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι 16 bar, αλλά σε αυτό το σύστημα τα δοχεία συνδέονται δυναμικά με τη μονάδα αφαλάτωσης (στη ροή νερού τροφοδοσίας), οπότε όταν η αποθηκευμένη πίεση είναι ίση με τη μέγιστη πίεση εισόδου στην αντλία Clark (11 bar), τότε ο πράκτορας κλείνει τις βαλβίδες. Ο αλγόριθμος του πράκτορας του δοχείου πίεσης παρουσιάζεται στο Πίνακα 7-11.

Πίνακας 7-11 Αλγόριθμος του Pressure Vessel agent

Αλγόριθμος του Pressure Vessel agent	
Συνάρτηση	Pressure Vessel agent - απλός αντανακλαστικός πράκτορας
Δεδομένα:	Πίεση στα πιεστικά δοχεία
Αρχικοποίηση	
Έναρξη	
Κανόνες:	Μέγιστη πίεση των δοχείων ίση με 11 bar
Ενέργειες:	Εάν η πίεση του νερού στα δοχεία είναι > 11 bar τότε Κλείσε βαλβίδες αλλιώς Άνοιξε βαλβίδες
	Τέλος - Αποστολή σήματος στο Desalination agent σχετικά με τη πίεση του αποθηκευμένου νερού στα δοχεία
	Επιστροφή στις ενέργειες
	Τέλος

7.3.2.3 Hybrid Capacitor agent

Ο πράκτορας Hybrid capacitor agent είναι ένας απλός αντανακλαστικός πράκτορας (simple reflex agent). Ο πράκτορας υπολογίζει το SOC (%) της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή σύμφωνα με την Εξίσωση 7.1 και την Εξίσωση 7.2.

$$\text{SOC} (\%) = \text{SOC}_o (\%) - \left[\left(\frac{\int_0^t IV dt}{\int_0^t I_{\max} V_{\max} dt} \right) \times 100\% \right] \quad (7.1)$$

$$\text{SOC}_o (\%) = \left(\frac{E}{E_{\max}} \right) \times 100 = \left(\frac{V^2}{V_{\max}^2} \right) \times 100 \quad (7.2)$$

$$\text{RC} = \left(\frac{\text{SOC}}{100} \right) \times (\text{Rated Energy Capacity}) \quad (7.3)$$

Επιπλέον, ο πράκτορας υπολογίζει στην πραγματικότητα την υπολειπόμενη ενέργεια (RC) (Wh) στη συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών (Εξίσωση 7.3). Η υπολειπόμενη ενέργεια (RC) υπολογίζεται με την Εξίσωση 7.3 και οι πληροφορίες αυτές αποστέλλονται στους λοιπούς πράκτορες του συστήματος MAS. Η ονομαστική χωρητικότητα (Rated energy capacity) ορίζεται από τον κατασκευαστή. Η ελάχιστη ενέργεια για να διατηρηθεί σταθερή η τάση στον κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης στα 48 VDC είναι ~20 Wh, που αντιστοιχεί σε SOC ίσο με 20%. Ο αλγόριθμος του πράκτορα του υβριδικού πυκνωτή παρουσιάζεται στον Πίνακας 7-12.

Πίνακας 7-12 Αλγόριθμος του Hybrid capacitor agent

Αλγόριθμος του Hybrid capacitor agent

Συνάρτηση Hybrid capacitor agent - απλός αντανακλαστικός πράκτορας

Δεδομένα:

Αρχικοποίηση

Έναρξη

Κανόνες:

Ενέργειες:

SOC > 20%

- Υπολογισμός του SOC και του RC χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 7.1, την Εξίσωση 7.2 και την Εξίσωση 7.3.

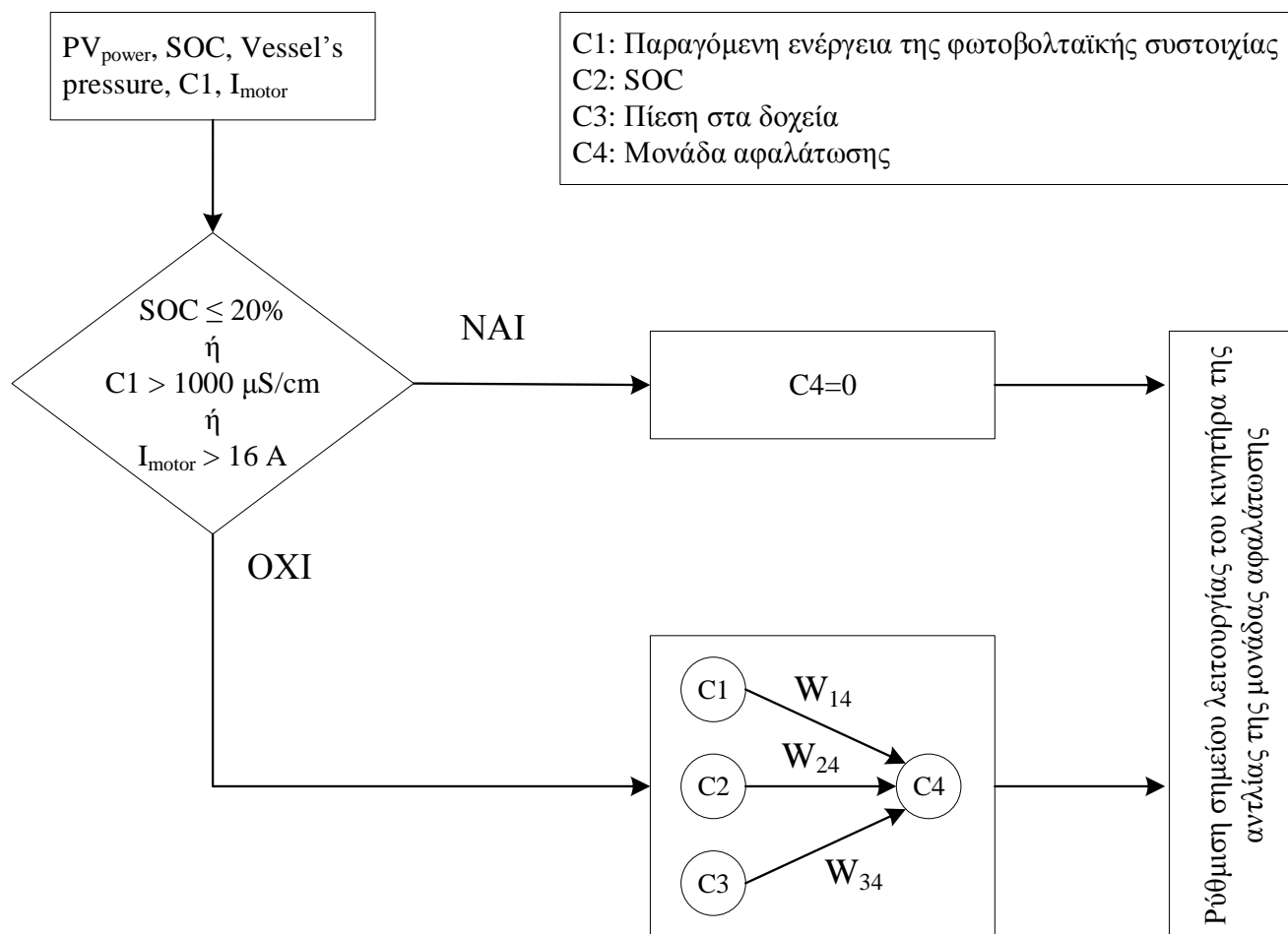
- Αποστολή σήματος στον πράκτορα Desalination agent σχετικά με το SOC.

Επιστροφή στις ενέργειες

Τέλος

7.3.2.4 *Desalination agent*

Ο πράκτορας Desalination agent είναι ένας πράκτορας στόχου (Goal based agent). Ο πράκτορας λαμβάνει ως εισόδους την παραγόμενη ενέργεια από την φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV_{power}), το SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών, την αποθηκευμένη πίεση στα πιεστικά δοχεία (Vessel's pressure), την ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού ($C1$) και το ρεύμα εισόδου στο κινητήρα της μονάδας αφαλάτωσης (I_{motor}). Ο στόχος του πράκτορα είναι να παράγει την υψηλότερη δυνατή ποσότητα πόσιμου νερού. Η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο και το μέγιστο ρεύμα που είναι σε θέση να δέχεται ο κινητήρας σε τάση 48 VDC είναι 16 A σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Εάν δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ή τη συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών, η μονάδα αφαλάτωσης χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια. Ο πράκτορας λαμβάνει τις εισόδους και τις χρησιμοποιεί ως έννοιες, προκειμένου να προσδιορίσει το σημείο λειτουργίας του κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης με τη βοήθεια ενός FCM. Το FCM του πράκτορα περιγράφεται στην Εικόνα 7-16. Όλες οι έννοιες είναι ασαφείς στον διάστημα $[0,1]$. Η γνώση των ειδικών χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των βαρών (W_{ij}). Αυτά τα βάρη εκφράζουν τη σχέση μεταξύ των εννοιών και των αξιών που έχουν οριστεί στο διάστημα $[0,1]$. Οι απόψεις των εμπειρογνομώνων παρουσιάζονται στο Πίνακα 7-13. Η συνάρτηση συμμετοχής παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-17 και χρησιμοποιήθηκαν οι γλωσσικές μεταβλητές πολύ χαμηλή, χαμηλή, μεσαία, μεγάλη και πολύ μεγάλη. Με τη χρήση της μεθόδου αποασαφοποίησης, η έννοια που χαρακτηρίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης ($C4$), παίρνει μια αριθμητική τιμή. Αυτή η τιμή είναι ένα ποσοστό της ονομαστικής ισχύος. Ο αλγόριθμος του πράκτορα αφαλάτωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 7-14.

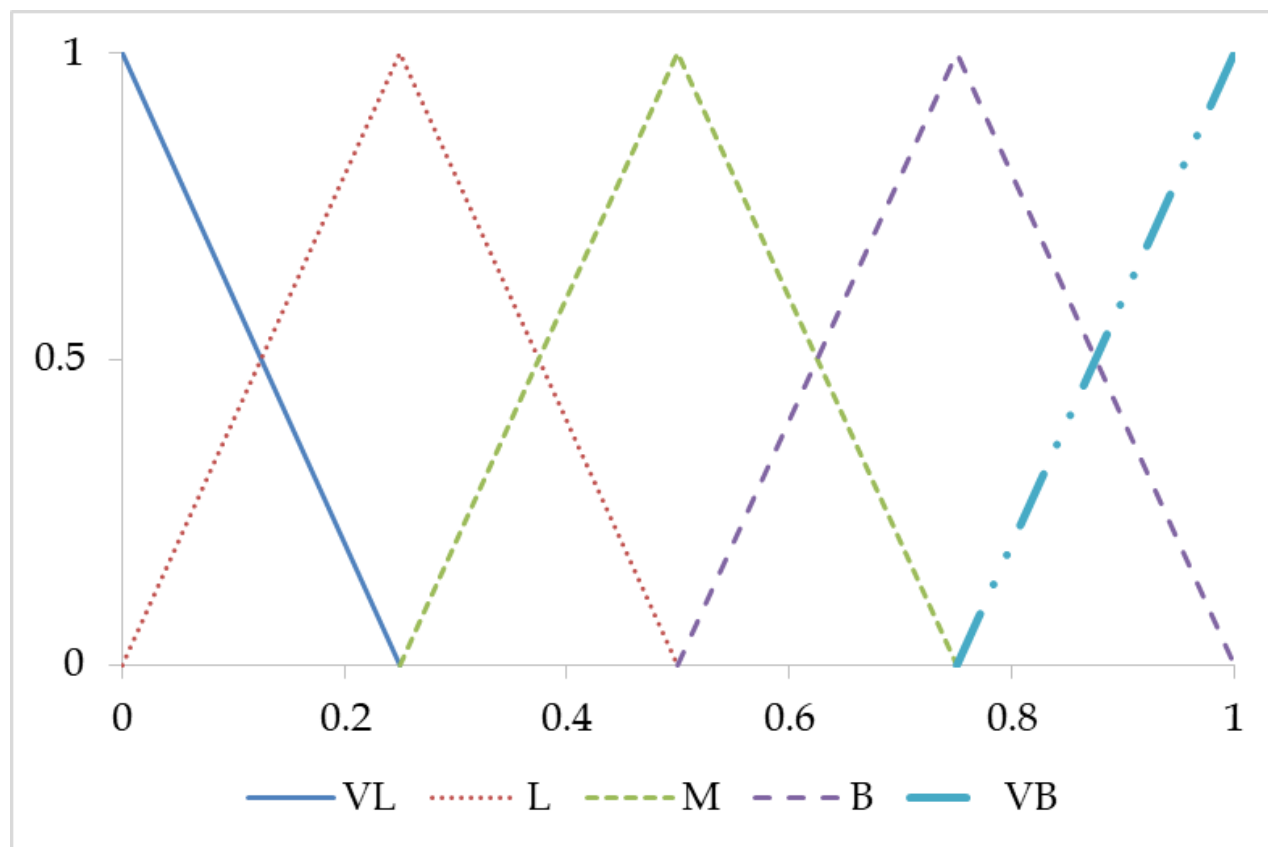


Εικόνα 7-16 Το FCM του Desalination agent

Πίνακας 7-13 Βάρη του FCM

Μεταβλητή	Εμπ. 1	Εμπ. 2	Εμπ. 3	Εμπ. 4	Εμπ. 5
W14	VB	VB	VB	VB	B
W24	B	B	VB	B	VB
W34	L	M	L	M	VL

*Εμπ.: Εμπειρογνώμονας



Εικόνα 7-17 Συνάρτηση συμμετοχής για τις γνώμες των ειδικών

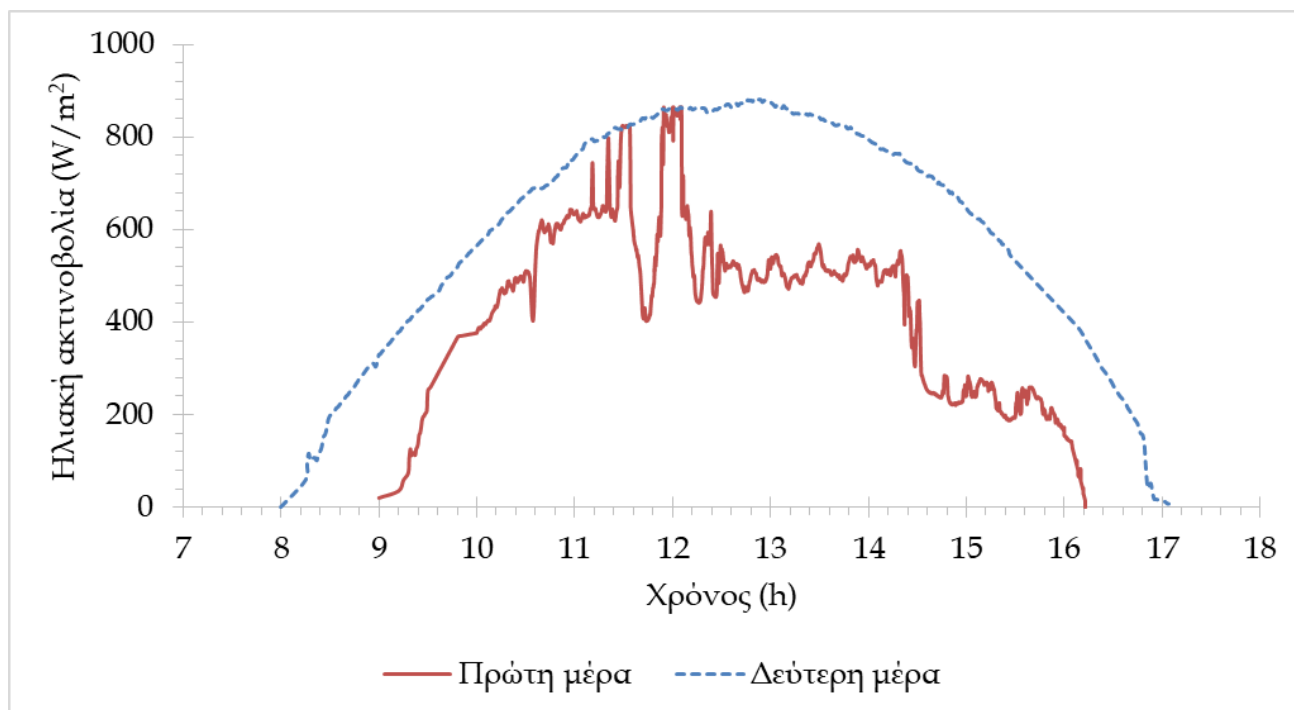
Πίνακας 7-14 Αλγόριθμος του Desalination agent

Αλγόριθμος του Desalination agent

Συνάρτηση	Desalination - πράκτορας στόχου
Δεδομένα:	SOC, PV_{power} , Vessel's pressure, C1, I_{motor}
Αρχικοποίηση	
Έναρξη	
Κανόνες:	Τάση εισόδου κινητήρα ίση με 48 VDC Μέγιστο ρεύμα εισόδου κινητήρα ίση με 16 A Μέγιστη πίεση εισόδου νερού τροφοδοσίας στη μεμβράνη ίση με 60 bar
Ενέργειες:	- Ρύθμιση σημείου λειτουργίας του κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης
Επιστροφή στις ενέργειες	
Τέλος	

7.4 Πειραματικά αποτελέσματα του μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο που περιλαμβάνει μία μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, μια συστοιχία υβριδικών πυκνωτών και ένα DEMS βασισμένο σε MAS, δοκιμάστηκε πειραματικά. Με σκοπό τη παρουσίαση της λειτουργίας του μικροδικτύου και του MAS - DEMS, μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν δύο τυπικές μέρες και παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7-6.

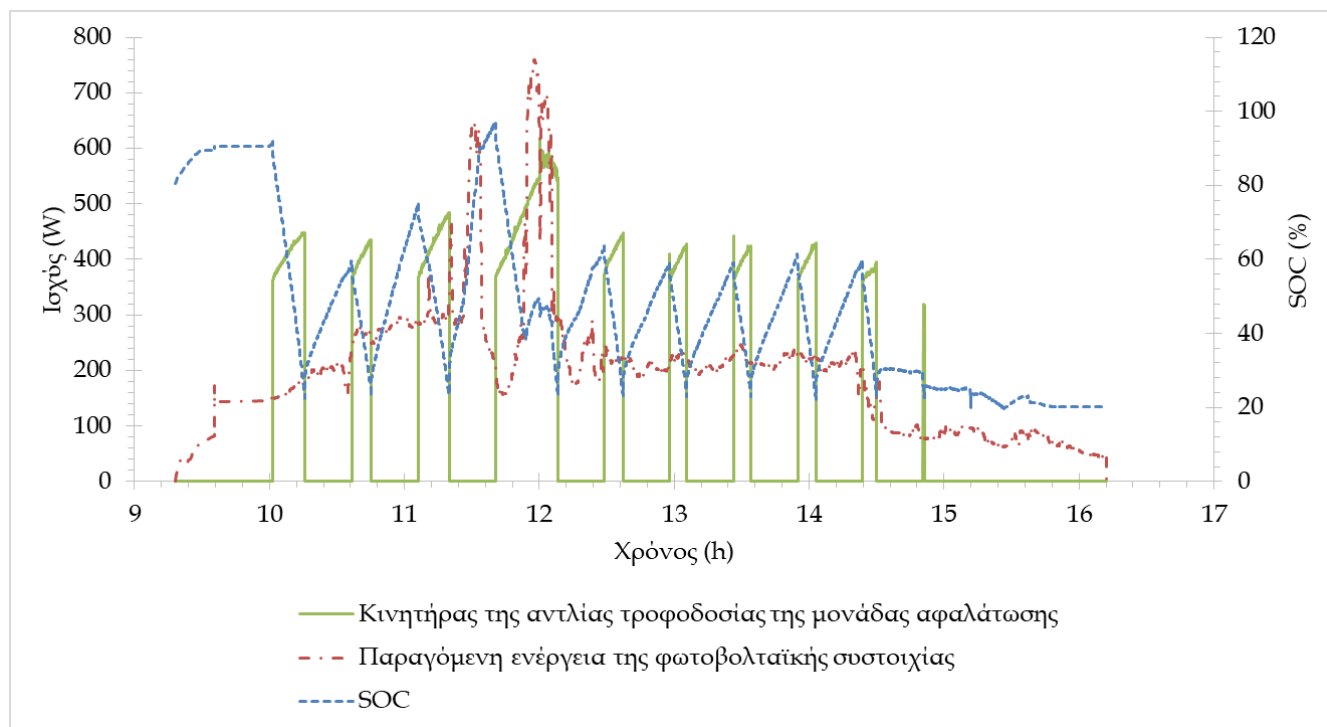


Διάγραμμα 7-6 Ηλιακή ακτινοβολία των δύο ημερών

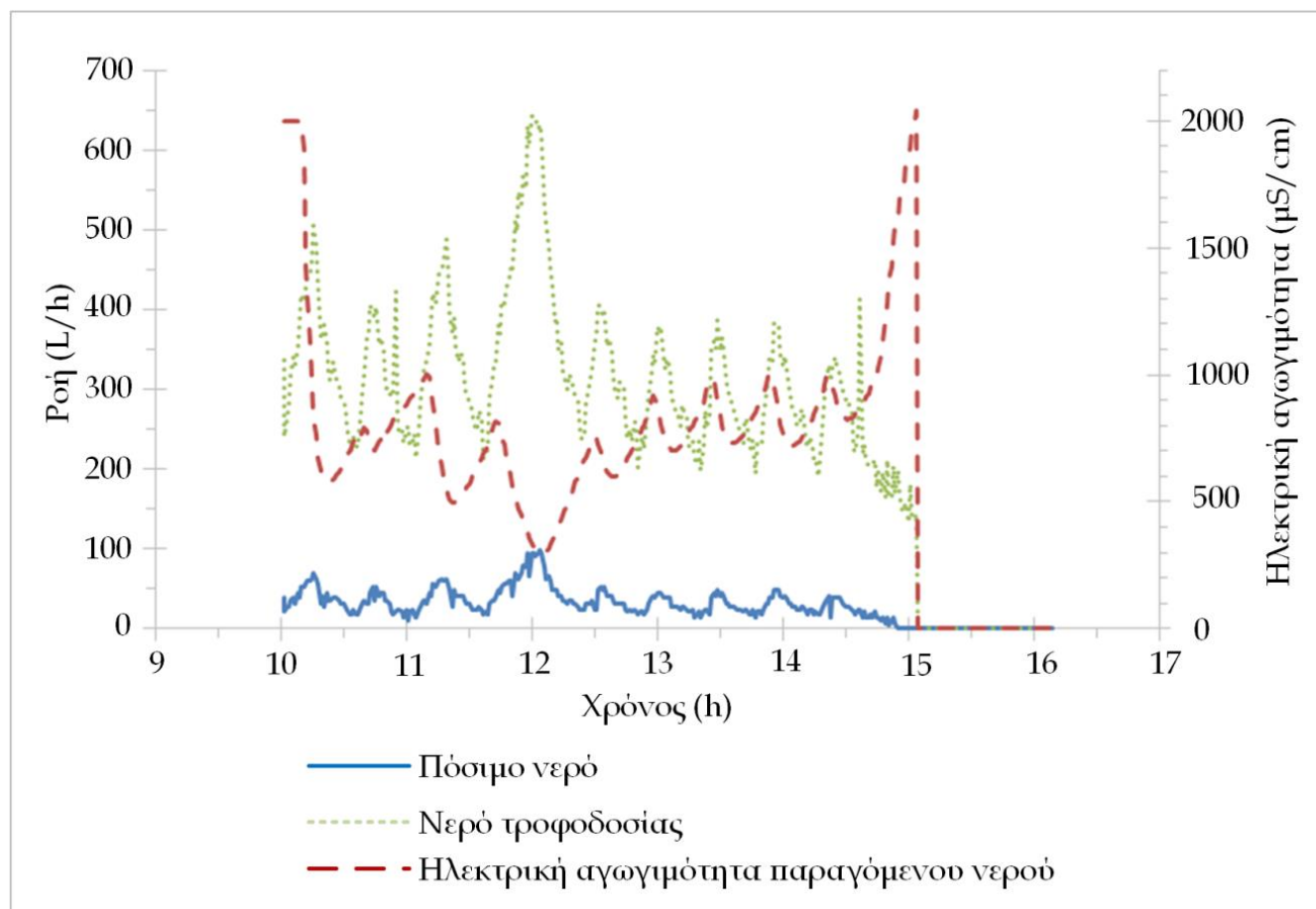
Η πρώτη ημέρα που επιλέχθηκε για την εκτέλεση πειραμάτων χαρακτηρίζεται από χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και μεταβλητή συννεφιά. Στο Διάγραμμα 7-7 παρουσιάζεται η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η κατανάλωση ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης και το SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αρχικά, το SOC ήταν 80% και τα δοχεία πίεσης ήταν κενά. Όταν η παραγόμενη ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία και η αποθηκευμένη ενέργεια στην συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών ήταν αρκετή ώστε να μπορεί να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας αφαλάτωσης, τότε ο Desalination agent καθόριζε τη ταχύτητα του κινητήρα. Το ελάχιστο SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών δεν ήταν ποτέ κάτω από

20%, που είναι το ελάχιστο απαραίτητο SOC για να αποφευχθεί η κατάρρευση του μικροδικτύου. Παρατηρείται ότι όταν το SOC μειώθηκε στο 20%, ο πράκτορας Desalination agent απενεργοποίησε (σταμάτησε) τον κινητήρα της αντλίας τροφοδοσίας και η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποθηκευόταν στη συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών. Στο Διάγραμμα 7-8 παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, η παραγωγή πόσιμου νερού δεν σταμάτησε, καθώς η μονάδα αφαλάτωσης συνέχιζε να λειτουργεί χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια των πιεστικών δοχείων. Ο χρόνος λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης μέσω των πιεστικών δοχείων ήταν για διάρκεια 20 λεπτών. Στο Διάγραμμα 7-9, παρουσιάζεται η πίεση εισόδου του νερού τροφοδοσίας στη μεμβράνη και η πίεση του νερού εισόδου στα πιεστικά δοχεία. Παρατηρείται ότι ο Pressure Vessel agent δεν έκλεισε τις ηλεκτρικές βαλβίδες σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Υπάρχει μόνο μια χρονική περίοδος - περίπου στις 12:00 h- στην οποία ο πράκτορας αφαλάτωσης καθορίζει τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης στην ονομαστική ισχύ της και ο πράκτορας Pressure Vessel agent κλείνει τις ηλεκτρικές βαλβίδες επειδή η πίεση στα δοχεία έφθασε στο όριο των 11 bar. Οπότε, η αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια χρησιμοποιείται όταν η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών και η παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών ήταν ανεπαρκής για τη λειτουργία του κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης.

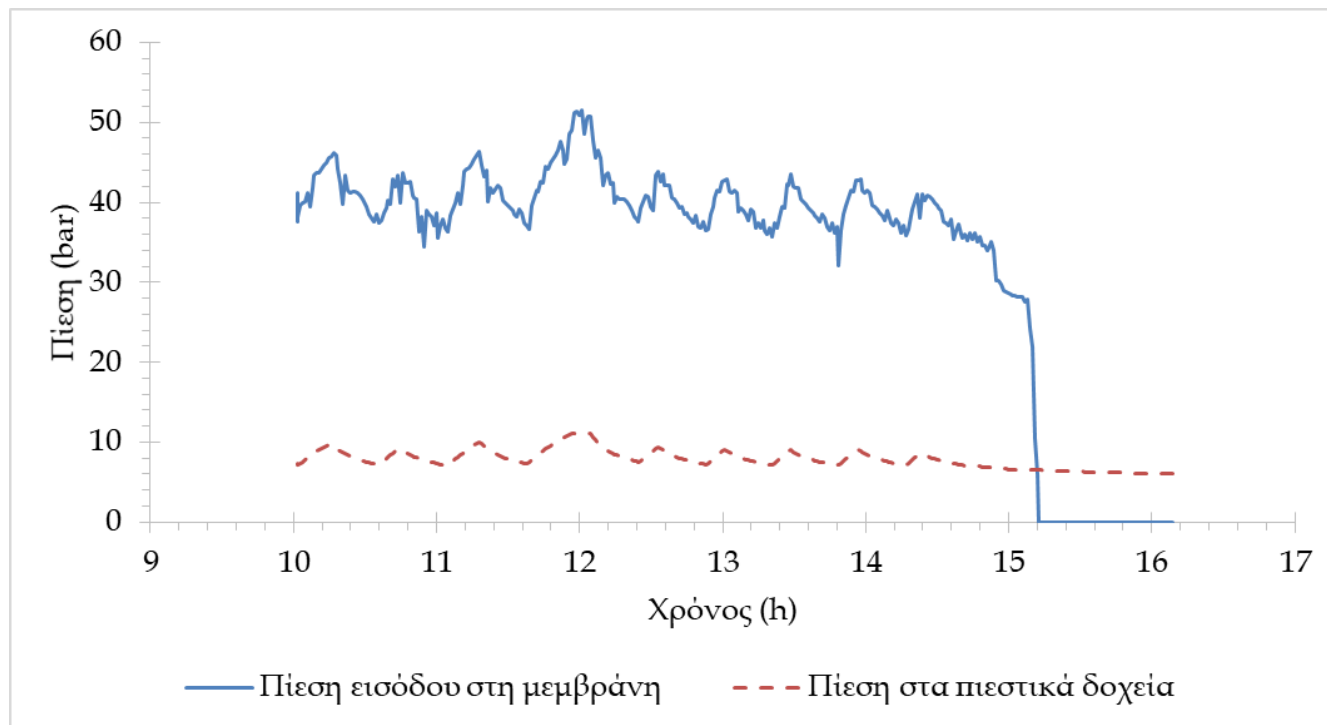
Η συνολική παραγόμενη ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ήταν 1274 Wh, η συνολική παραγωγή νερού κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν 173 L και η ειδική κατανάλωση ενέργειας ήταν 7.35 kWh/m³.



Διάγραμμα 7-7 Παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκή συστοιχία, καταναλισκόμενη ενέργεια του κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης και SOC της συστοιχίας των υβριδικών ποκνωτών

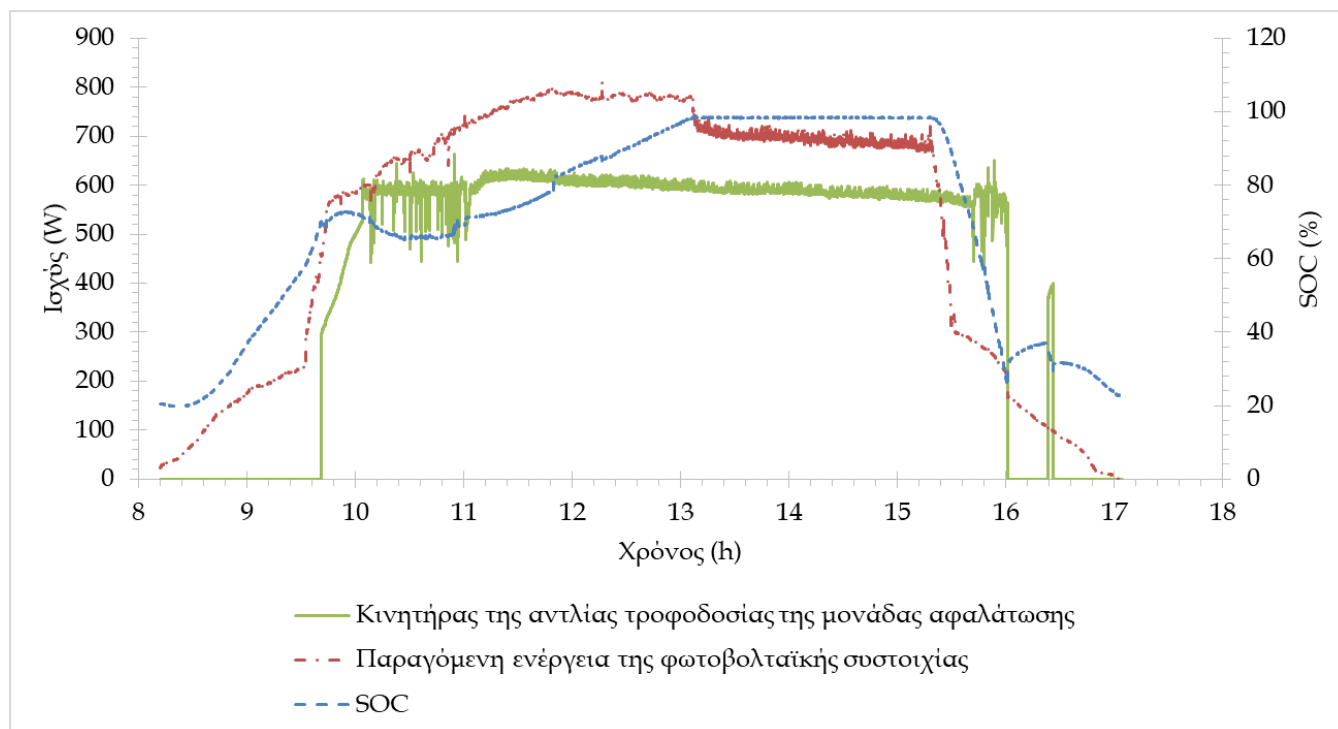


Διάγραμμα 7-8 Ροή πόσιμου νερού, ροή νερού τροφοδοσίας και ηλεκτρική αγωγιμότητα πόσιμου νερού



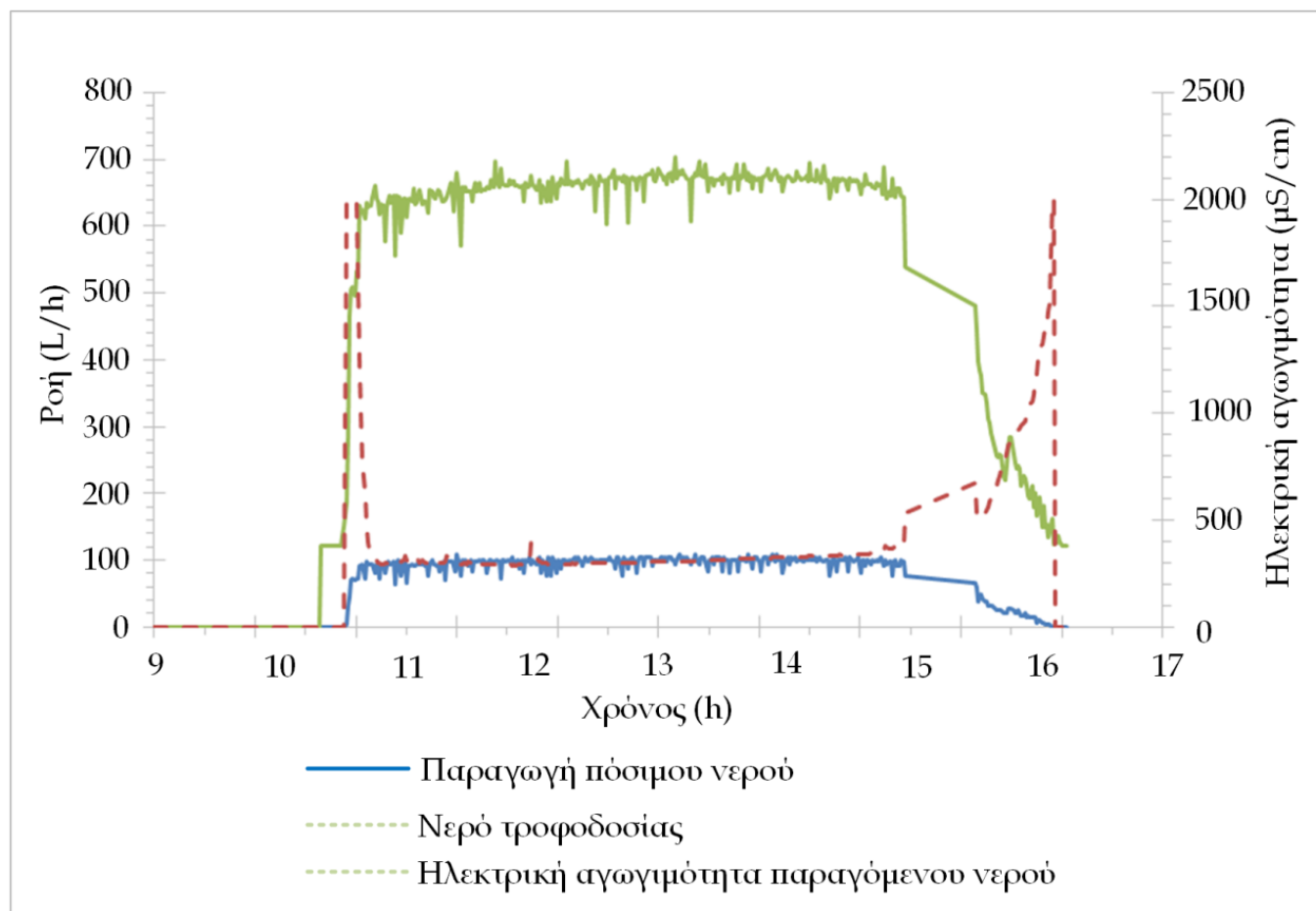
Διάγραμμα 7-9 Πίεση του νερού εισόδου στη μεμβράνη και πίεση του αποθηκευμένου νερού στα πιεστικά δοχεία

Η δεύτερη ημέρα των πειραμάτων ήταν μια καθαρή μέρα (χωρίς σύννεφα) με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η κατανάλωση ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης και το SOC της συστοιχίας των υβριδικών πυκνωτών παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7-10 Στην αρχή της ημέρας, το MAS επέλεξε τη φόρτιση των υβριδικών πυκνωτών μέχρι η αποθηκευμένη ενέργεια κατέστη να είναι επαρκής για τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης. Παρατηρείται ότι ο πράκτορας Desalination agent αφαλάτωσης ρυθμίζει τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης στην ονομαστική ισχύ σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, καταναλώνοντας ενέργεια μόνο από τη φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και δεν καταναλώνεται από τη μονάδα αφαλάτωσης αποθηκεύεται στη συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών.



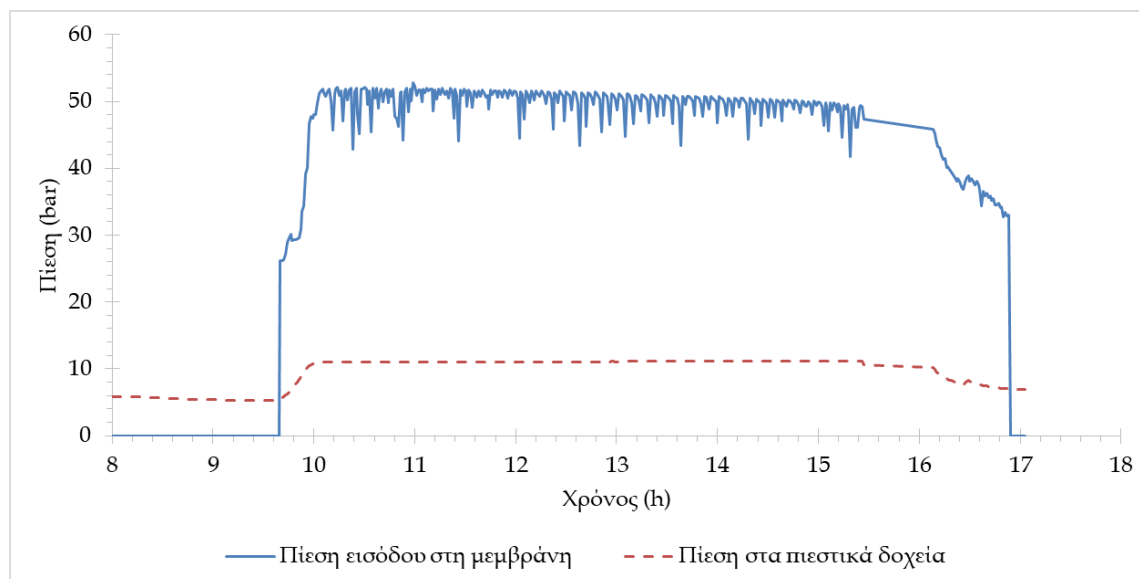
Διάγραμμα 7-10 Παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκή συστοιχίας, καταναλισκόμενη ενέργεια του κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης και SOC της συστοιχίας των υβριδικών ποκνωτών

Στο Διάγραμμα 7-10 παρατηρείται ότι όταν το SOC της συστοιχίας των υβριδικών ποκνωτών ήταν στο 100%, περίπου στις 13:00 ώρα, ο πράκτορας RES agent άλλαξε το σημείο ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και παρατηρείται μια πτώση της παραγωγής των φωτοβολταϊκών, η οποία είναι ικανή να λειτουργεί τη μονάδα αφαλάτωσης στο ονομαστικό φορτίο. Στο Διάγραμμα 7-11, είναι εμφανές ότι η παραγωγή νερού παραμένει περίπου σταθερή (~ 100 L/h) καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η διακύμανση της ροής του παραγόμενου νερού οφείλεται στις ταλαντώσεις της εμβολοφόρου αντλίας Clark [60].



Διάγραμμα 7-11 Ροή πόσιμου νερού, ροή νερού τροφοδοσίας και ηλεκτρική αγωγιμότητα πόσιμου νερού

Επιπλέον, παρατηρείται στο Διάγραμμα 7-12 ότι τα δοχεία πίεσης λειτουργούν παράλληλα με τη μονάδα αφαλάτωσης και μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε υδραυλική. Οι ηλεκτρικές βαλβίδες έκλεισαν όταν η πίεση στα πιεστικά δοχεία έφθασε στην τιμή των 11 bar. Στο τέλος της ημέρας, όταν η ηλιακή ακτινοβολία μειώθηκε, η μονάδα αφαλάτωσης συνέχισε να λειτουργεί, καταναλώνοντας την αποθηκευμένη ενέργεια από την συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών. Όταν το SOC μειώθηκε στο 20%, ο πράκτορας Desalination agent σταμάτησε τον κινητήρα της αντλίας της μονάδας αφαλάτωσης αλλά η μονάδα αφαλάτωσης συνέχισε να λειτουργεί για ακόμη 20 λεπτά χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια των πιεστικών δοχείων.



Διάγραμμα 7-12 Πίεση του νερού εισόδου στη μεμβράνη και πίεση του αποθηκευμένου νερού στα πιεστικά δοχεία

Η συνολική ενέργεια που παράχθηκε από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας ήταν 4.2 kWh και η συνολική παραγωγή πόσιμου νερού ήταν 553 L. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας ήταν 7.6 kWh/m³, άμεσα συγκρίσιμη με την αντίστοιχη τιμή της ημέρας με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία (7.35 kWh/m³).

7.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο δοκιμάστηκε πειραματικά ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ευφυείς πράκτορες για ένα μικροδίκτυο. Η δημιουργία του μικροδικτύου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μετατροπέων συνεχούς σε συνεχές ρεύμα (DC-to-DC Converters), δημιουργώντας ένα DC μικροδίκτυο. Το μικροδίκτυο αποτελείται από μια μικρής κλίμακας μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης, η οποία χρησιμοποιεί υδραυλική ανάκτηση ενέργειας, μια βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση υβριδικών πυκνωτών και μια βραχυπρόθεσμη αποθήκευση υδραυλικής ενέργειας με τη χρήση πιστικών δοχείων.

Οι δύο βραχυπρόθεσμες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας ελέγχθηκαν πειραματικά και αποδείχθηκε ότι μπορούν να διατηρήσουν τη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης για μικρό χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αντίστοιχα

μικροδίκτυα όπου οι ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας είναι για μικρά χρονικά διαστήματα αντικαθιστώντας τις συμβατικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές). Η συστοιχία των υβριδικών πυκνωτών για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να λειτουργεί το σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για μία χρονική περίοδο των 10 λεπτών. Αντίστοιχα χρησιμοποιώντας μια συστοιχία πιεστικών δοχείων, μπορεί να τροφοδοτείται με θαλασσινό νερό υπό πίεση για μια χρονική περίοδο των 20 λεπτών.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρθηκαν και αποδείχθηκαν μέσω προσομοίωσης τα πλεονεκτήματα της χρήση DEMS βασισμένο σε MAS σε μικροδίκτυα αντί CEMS. Σε αυτό το κεφάλαιο, η καινοτομία είναι ο σχεδιασμός και η εφαρμογή ενός DEMS με τη χρήση MAS σε ένα μικροδίκτυο που σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε πειραματικά στο εργαστήριο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το DEMS σχεδιάστηκε με σκοπό την αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής νερού του μικροδικτύου. Το αναπτυγμένο MAS αποτελείται από τέσσερις ευφείς πράκτορες που συνεργάζονται μεταξύ τους, διαθέτοντας κατανομημένη τεχνητή νοημοσύνη, προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση του αυτόνομου μικροδικτύου.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από το ελεγχόμενο αυτόνομο DC μικροδίκτυο με τη χρήση DEMS βασισμένο σε MAS, δείχνουν ότι είναι εφικτό να λειτουργήσει αποτελεσματικά ο συνδυασμός ενός συστήματος αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκή στοιχεία και με βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ηλεκτρικής και υδραυλικής ενέργειας. Η συνεχής λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης είναι εγγυημένη καθώς η μονάδα αφαλάτωσης δεν σταματά ποτέ να παράγει πόσιμο νερό κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ το σύστημα παρουσιάζει μια "ομαλή" λειτουργία, καθώς οι μεταβολές της πίεσης τροφοδοσίας σε απότομες μεταβολές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας μειώνονται λόγω των ενσωματωμένων μονάδων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, το MAS - DEMS δίνει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τη μονάδα αφαλάτωσης ανεξάρτητα μεταξύ τους, διατηρώντας σταθερή την ηλεκτρική ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των μονάδων παραγωγής και των μονάδων κατανάλωσης ενέργειας. Η αποτελεσματική λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της θεωρίας Fuzzy Cognitive Maps.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν σαφώς ότι ένας συνδυασμός δύο μονάδων αποθήκευσης ενέργειας μαζί με ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι εφικτός και εγγυάται καλά αποτελέσματα όσον αφορά την λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης τροφοδοτούμενες από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Κεφάλαιο 8:

Χρήση ανταγωνιστικών πρακτόρων
σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα
διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύων

8 Χρήση ανταγωνιστικών πρακτόρων σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας μικροδικτύων

8.1 Εισαγωγή

Τα πλεονεκτήματα ενός MAS-DEMS για τον έλεγχο και την ενεργειακή διαχείριση σύνθετων ηλεκτρικών συστημάτων με πολλές συσκευές, όπως ένα μικροδίκτυο πολυπαραγωγής (ενσωματώνοντας μονάδα αφαλάτωσης και υδρογόνου), παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 μέσω προσομοίωσης. Το Στο Κεφάλαιο 7, διερευνήθηκε πειραματικά ένα MAS-DEMS για ένα αυτόνομο μικροδίκτυο. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εφαρμογή της θεωρίας πολλαπλών πρακτόρων συμβάλλει στην επίλυση του προβλήματος της ενεργειακής διαχείρισης στα συστήματα κατανεμημένης ενέργειας, αξιοποιώντας ένα θεωρητικό πλαίσιο που στηρίζεται στη συνεργασία μεταξύ των πρακτόρων [155, 156].

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η συνεργασία μεταξύ των πρακτόρων δεν είναι δεδομένη καθώς οι πράκτορες έχουν ανταγωνιστικούς στόχους ή διαφορετικές στρατηγικές που επηρεάζονται από τις ενέργειες των υπολοίπων πρακτόρων. Ένα μη συνεργατικό μοντέλο παιγνίου υιοθετείται ευρέως στην περίπτωση που ουσιαστικά εμπλέκονται ανταγωνιστικοί πράκτορες ή πράκτορες με διαδραστικές λειτουργίες. Η Θεωρία των Παιγνίων παρέχει ένα σύνολο μαθηματικών εργαλείων που επιτρέπουν τη μελέτη περίπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ παιχτών/πρακτόρων, ακόμη και στην περίπτωση μη συνεργασίας. Η Θεωρία Παιγνίων έχει προταθεί και χρησιμοποιηθεί ως ισχυρό εργαλείο για την εκπροσώπηση των αλληλεπιδράσεων των πρακτόρων και την επίτευξη των βέλτιστων στρατηγικών σε μη συνεργατικά παίγνια. Η ιδέα της χρήσης της ισορροπίας Nash είναι η πιο ευνοϊκή λύση για τα μη συνεργατικά παίγνια, όπου οι παίχτες μπορούν να επιτύχουν τους βέλτιστους στόχους τους [209].

Στο Κεφάλαιο 8, παρουσιάζεται η διερεύνηση μέσω προσομοίωσης μιας στρατηγικής ελέγχου με τη χρήση MAS και Θεωρίας Παιγνίων για ένα DEMS ενός αυτόνομου μικροδικτύου πολυπαραγωγής. Χρησιμοποιήθηκε το αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής του Κεφαλαίου 5. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου διατυπώθηκε σε δύο παίγνια ελέγχου, δηλαδή ένα μη συνεργατικό παίγνιο και ένα συνεργατικό παίγνιο μεταξύ των πρακτόρων, ανάλογα

με την παραγωγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αποθηκευμένη ενέργεια στη συστοιχία των συσσωρευτών.

Όταν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας, δηλαδή η παραγωγή ενέργειας και η αποθηκευμένη ενέργεια μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση φορτίου, τότε η μονάδα αφαλάτωσης και η μονάδα ηλεκτρόλυσης ενεργοποιούνται από τους πράκτορες τους. Οι δύο πράκτορες/παίχτες ανταγωνίζονται μεταξύ τους και πρέπει να αποφασίζουν για τις στρατηγικές τους, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους. Οπότε, δημιουργείται ένα μη συνεργατικό παίγνιο μεταξύ των δύο ανταγωνιστικών διαδραστικών παιχτών/πρακτόρων. Ο κύριος στόχος του πράκτορα της μονάδας αφαλάτωσης και αντίστοιχα της μονάδας ηλεκτρόλυσης είναι να παράγουν όσο το δυνατόν περισσότερο πόσιμο νερό και υδρογόνο, αντίστοιχα. Επομένως, η λύση του παιγνίου θα δώσει τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας των δύο μονάδων.

Σε άλλη περίπτωση, όταν δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τη ζήτηση φορτίου τότε η κυψέλη καυσίμου πρέπει να ενεργοποιηθεί καθώς χρησιμοποιείται ως εφεδρική πηγή ενέργειας. Οπότε, δημιουργείται ένα συνεργατικό παίγνιο, όπου οι πράκτορες που αντιπροσωπεύουν τη συστοιχία των συσσωρευτών και την κυψέλη καυσίμου συνεργάζονται μεταξύ τους, με κύριο κοινό στόχο να καλύψουν τη ζήτηση φορτίου. Ως εκ τούτου, προσδιορίζεται το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της μονάδας κυψέλης καυσίμου, με στόχο την όσο δυνατόν λιγότερη κατανάλωση υδρογόνου.

Επομένως, το MAS-DEMS χρησιμοποιεί την Θεωρία Παιγνίων σε κάθε χρονικό βήμα, προκειμένου να διευθετήσει την βέλτιστη κατανομή φορτίου. Η ισορροπία Nash χρησιμοποιείται για να υποστηρίξει τις διαφορετικές προτιμήσεις των πρακτόρων, μεγιστοποιώντας τα κέρδη τους καθώς όλοι οι πράκτορες αντιμετωπίζονται εξίσου το ίδιο. Τέλος, το προτεινόμενο MAS-DEMS που χρησιμοποιεί Θεωρία Παιγνίων συγκρίθηκε οικονομικά και τεχνικά με το MAS-DEMS του Κεφαλαίου 5 για την ίδια τοπολογία μικροδικτύου.

8.2 Διαμόρφωση μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο έχει αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 5. Μία σχηματική αναπαράσταση της διαμόρφωσης του μικροδικτύου απεικονίζεται στην Εικόνα 8-1. Το μικροδίκτυο αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Κατανεμημένες πηγές ενέργειας:

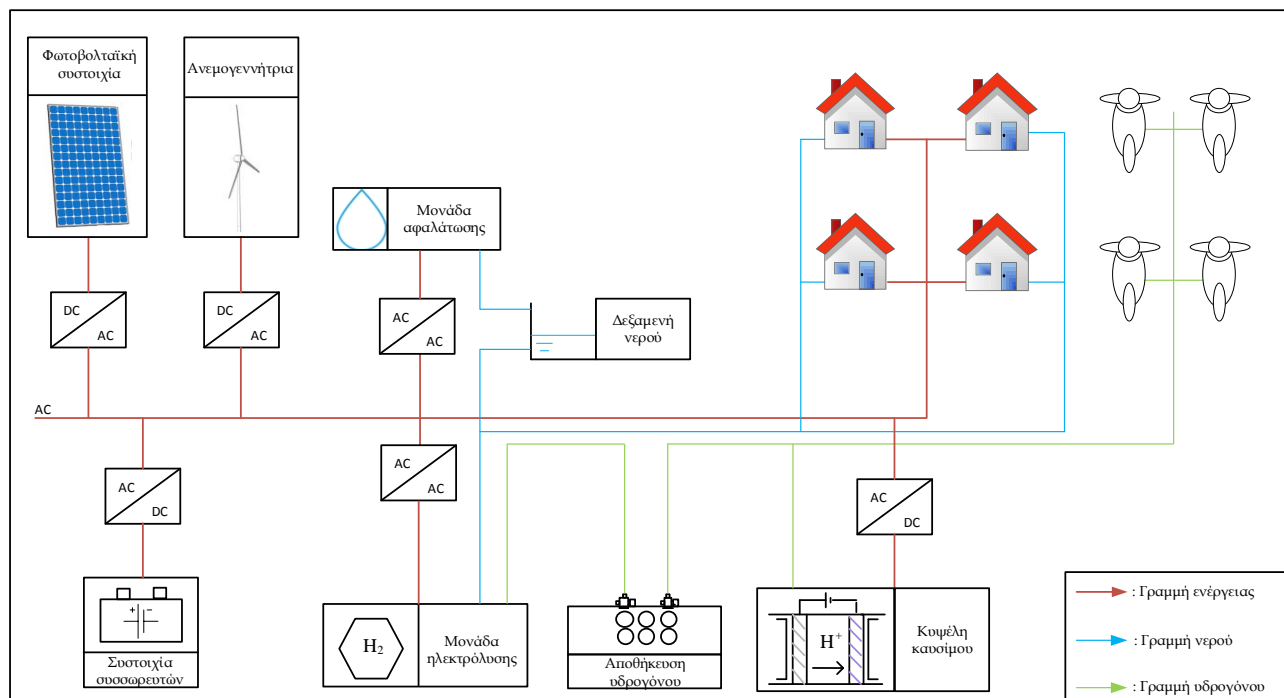
Εξετάστηκε μια τυπική φωτοβολταϊκή συστοιχία μονοκρυσταλλικού πυριτίου, εγκατεστημένη σε κατακόρυφο ιχνηλάτη, μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

- Συσκευές αποθήκευσης:

Ελήφθησαν υπόψη μια συστοιχία συσσωρευτών, μια δεξαμενή νερού και μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου.

- Μονάδες κατανάλωσης ενέργειας:

Ως μονάδες κατανάλωσης ενέργειας προσομοιώθηκαν οικιακές ηλεκτρικές καταναλώσεις (π.χ. φωτισμός, ψύξη, συσκευές μαγειρέματος κλπ.), μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης και μια μονάδα ηλεκτρόλυσης για παραγωγή υδρογόνου.



Εικόνα 8-1 Σχηματική αναπαράσταση του μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο αναπτύχθηκε, προσομοιώθηκε και δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο TRNSYS, ενώ το πακέτο λογισμικού Matlab χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση και τη προσομοίωση του MAS-DEMS.

8.3 MAS - DEMS του μικροδικτύου

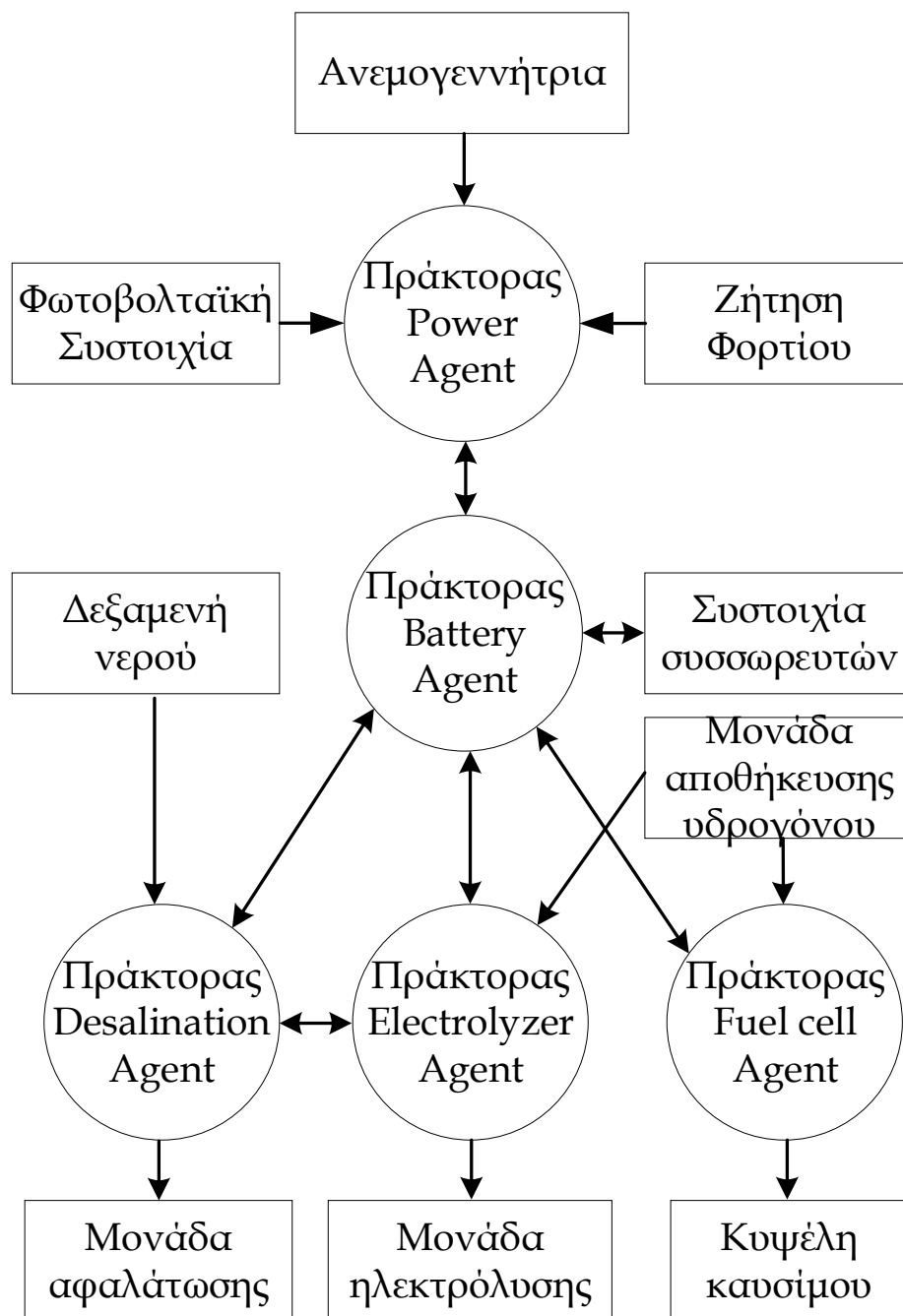
8.3.1 Επισκόπηση του MAS - DEMS

Το MAS που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε αντιπροσωπεύει τα διαφορετικά στοιχεία του μικροδικτύου και την αλληλεπίδρασή τους με αυτό. Το MAS του μικροδικτύου αποτελείται από πέντε ευφείς πράκτορες. Για τη περιγραφή του πολυπρακτορικού συστήματος ευφών πρακτόρων είναι απαραίτητο να οριστεί το PAGE όπου ενεργεί ο κάθε πράκτορας. Το PAGE του συστήματος ευφών πρακτόρων παρουσιάζεται στον Πίνακα 8-1.

Πίνακας 8-1 PAGE του MAS

Αντιλήψεις	Παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, την ανεμογεννήτρια και τη κυψέλη καυσίμου, κατάσταση φόρτισης (SOC) της συστοιχίας των συσσωρευτών, διαθέσιμη ποσότητα πόσιμου νερού στη δεξαμενή νερού και διαθέσιμη ποσότητα υδρογόνου στο μεταλλικό υβρίδιο
Δράσεις	Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της μονάδας αφαλάτωσης, της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου και προσδιορισμός των σημείων λειτουργίας τους
Στόχοι	Πλήρης κάλυψη της ζήτησης φορτίου, των αναγκών σε νερό και καύσιμο και εκμετάλλευση της υψηλότερης δυνατής παραγωγής πόσιμου νερού και υδρογόνου με βέλτιστο οικονομικό και ενεργειακό τρόπο.
Περιβάλλον	Όλες οι μονάδες του αυτόνομου μικροδικτύου πολυπαραγωγής

Τα πέντε κύρια στοιχεία του μικροδικτύου είναι οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, η συστοιχία των συσσωρευτών, η μονάδα αφαλάτωσης, η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η κυψέλη καυσίμου. Οπότε, οι πέντε πράκτορες του μικροδικτύου για τον έλεγχο των αντίστοιχων στοιχείων είναι ο Power agent, ο Battery agent, ο Desalination agent, ο Electrolyzer agent και ο Fuel cell agent. Κάθε πράκτορας έχει διαφορετικούς στόχους και ο στόχος του MAS-DEMS είναι η αποτελεσματική λειτουργία του μικροδικτύου μέσω της βέλτιστης χρήσης των κατανεμημένων πηγών παραγωγής ενέργειας και μονάδων αποθήκευσης. Η τοπολογία του MAS παρουσιάζεται στην Εικόνα 8-1. Στην Εικόνα 8-3 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική MAS-DEMS.



Εικόνα 8-2 Τοπολογία του MAS

και της ανεμογεννήτριας και υπολογίζει το ενεργειακό ισοζύγιο του μικροδικτύου χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 8.1. Η προτίμηση του πράκτορα είναι να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας των ανανεώσιμων γεννητριών.

$$\Delta P = P_{pv} + P_{wind} - P_{load} \quad (8.1)$$

Όπου P_{pv} είναι η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, P_{wind} είναι η παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια και P_{load} είναι η ζήτηση ενέργειας.

8.3.2.2 Πράκτορας Battery agent

Ο πράκτορας Battery agent είναι ένας απλός αντανακλαστικός πράκτορας που αντιπροσωπεύει την συστοιχία των συσσωρευτών. Ο πράκτορας δέχεται ως είσοδο την κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών και ελέγχει τη φόρτιση και την εκφόρτισή τους. Ο στόχος του πράκτορα είναι να καλύπτεται η ζήτηση του φορτίου όταν οι πηγές ενέργειας δεν παράγουν αρκετή ενέργεια και παράλληλα να προστατεύσει τους συσσωρευτές από βαθιά εκφόρτιση. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί το SOC, το οποίο θα πρέπει να διατηρείται μεταξύ ελάχιστου και μέγιστου ορίου (Εξίσωση 8.2). Σε αυτή τη μελέτη, το ελάχιστο βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge - DOD) της τράπεζας συσσωρευτών καθορίστηκε στο 20% (Εξίσωση 8.3) [210].

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (2) \quad (8.2)$$

Όπου,

$$SOC_{min} = (1 - DOD) \times SOC_{max} \quad (3) \quad (8.3)$$

Ο Battery agent χρησιμοποιεί μια συνάρτηση χρησιμότητας για τη συστοιχία των συσσωρευτών που σχετίζεται με την μεταβολή της ενεργειακής χωρητικότητας των συσσωρευτών. Η συνάρτηση χρησιμότητας παρουσιάζεται στην Εξίσωση 8.4 [211].

$$u_{\text{BAT}} = 1 - \frac{(P_{\text{BAT,max}} - P_{\text{BAT}})^2}{P_{\text{BAT,max}}^2} \quad (8.4)$$

Όπου $P_{\text{BAT,max}}$ είναι η ονομαστική ενεργειακή χωρητικότητα των συσσωρευτών όπως ορίζεται από το κατασκευαστή και P_{BAT} είναι η τρέχουσα χωρητικότητα των συσσωρευτών.

8.3.2.3 Πράκτορας *Desalination agent*

Ο πράκτορας *Desalination agent* είναι ένας πράκτορας στόχου και αντιπροσωπεύει την μονάδα αφαλάτωσης. Οι στόχοι του πράκτορα είναι η κάλυψη της ζήτησης πόσιμου νερού και να μην αδειάσει ποτέ η δεξαμενή νερού. Όπως μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 6, η μονάδα αφαλάτωσης μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα φορτίου (λειτουργία μεταβλητού φορτίου), προσφέροντας ευελιξία και υψηλότερες αποδόσεις από μια συμβατική λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης (λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο) [4]. Ως εκ τούτου, η μονάδα αφαλάτωσης ελέγχεται από τον πράκτορα με σκοπό να λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ελάχιστη ισχύς της θα μπορούσε να είναι ίση με το 30% της ονομαστικής ισχύος. Ο πράκτορας ελέγχει τη δεξαμενή νερού και όταν η δεξαμενή νερού γεμίσει τότε ο πράκτορας απενεργοποιεί τη μονάδα αφαλάτωσης. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ο πράκτορας αποφασίζει για το σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία σχετίζεται με την μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας αφαλάτωσης, με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή πόσιμου νερού. Η συνάρτηση χρησιμότητας παρουσιάζεται στην Εξίσωση 8.5 [212].

$$u_{\text{DES}} = 1 - \frac{(P_{\text{DES,nom}} - P_{\text{DES}})^2}{P_{\text{DES,nom}}^2} \quad (8.5)$$

Όπου $P_{\text{DES,nom}}$ είναι η ονομαστική ισχύς της μονάδας αφαλάτωσης και P_{DES} είναι η τρέχουσα ισχύς της μονάδας (σημείο λειτουργίας σε μεταβλητό φορτίο).

8.3.2.4 Πράκτορας *Electrolyzer agent*

Ο πράκτορας *Electrolyzer agent* είναι ένας πράκτορας στόχου και αντιπροσωπεύει τη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Οι στόχοι του πράκτορα είναι η κάλυψη της ζήτησης υδρογόνου και να υπάρχει πάντα αποθηκευμένο υδρογόνο ($\text{StoredH}_2 > 0$). Η μονάδα ηλεκτρόλυσης μπορεί

να παράγει υδρογόνο είτε λειτουργώντας στην ονομαστική της ισχύ είτε σε μεταβλητό φορτίο. Ο πράκτορας ελέγχει την αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου και εάν η δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου είναι γεμάτη τότε ο πράκτορας απενεργοποιεί τη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, ο πράκτορας αποφασίζει το σημείο λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση χρησιμότητας η οποία σχετίζεται με την μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας ηλεκτρόλυσης, με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή υδρογόνου. Ένας τεχνικός περιορισμός για το σημείο λειτουργίας της μονάδας είναι ότι δεν επιτρέπεται η ισχύς κατανάλωσης της μονάδας να είναι κάτω από το 30% της ονομαστικής της ισχύος [19] (κάτω από αυτό το όριο η μονάδα δεν μπορεί να παράξει υδρογόνο). Η συνάρτηση χρησιμότητας παρουσιάζεται στην Εξίσωση 8.6.

$$u_{ELE} = 1 - \frac{(P_{ELE,nom} - P_{ELE})^2}{P_{ELE,nom}^2} \quad (8.6)$$

Όπου $P_{ELE,nom}$ είναι η ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης και P_{ELE} είναι η τρέχουσα ισχύς της μονάδας (σημείο λειτουργίας σε μεταβλητό φορτίο).

8.3.2.5 Fuel cell agent

Ο πράκτορας Fuel cell agent είναι ένας αντιδραστικός πράκτορας με εσωτερικό μοντέλο, ο οποίος αντιπροσωπεύει την κυψέλη καυσίμου. Ο σκοπός του πράκτορα είναι να καλύπτεται η ηλεκτρική ζήτηση όταν η ενέργεια από τις πηγές ενέργειας και η αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές δεν είναι επαρκής. Η κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργεί σε μεταβλητό φορτίο και η ελάχιστη ισχύς της μονάδας ($P_{FUEL,min}$) είναι ίση με το 30% της ονομαστικής ισχύος της. Ο πράκτορας της κυψέλης καυσίμου καθορίζει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της κυψέλης (P_{FUEL}), με σκοπό να μην καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες αποθηκευμένου υδρογόνου.

8.3.3 Θεωρία Παιγνίων για το MAS - DEMS

8.3.3.1 Παιγνία ελέγχου ενέργειας

Το σύστημα ευφών πρακτόρων έχει ως κύρια προτεραιότητα την κάλυψη της ζήτησης των οικιακών ηλεκτρικών καταναλώσεων. Οπότε, τα στοιχεία που επηρεάζουν τη διαχείριση

ενέργειας και τον έλεγχο του μικροδικτύου είναι η μονάδα ηλεκτρόλυσης, η μονάδα αφαλάτωσης, η συστοιχία των συσσωρευτών και η κυψέλη καυσίμου. Καθώς οι πράκτορες έχουν διαφορετικούς στόχους και σε αρκετές στιγμές ανταγωνιστικά συμφέροντα μεταξύ τους, η θεωρία παιγνίων αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο για την εύρεση τη βέλτιστου σημείου ισορροπίας.

Το προτεινόμενο EMS στηρίχθηκε στη θεωρία παιγνίων με σκοπό (α) το βέλτιστο χειρισμό της παραγωγής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και (β) τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών χρησιμότητας των πρακτόρων. Για το σκοπό αυτό, το πρόβλημα διαχείρισης της ενέργειας χωρίστηκε σε δύο μέρη, ανάλογα με την πλεονάζουσα ενέργεια (ΔP) και τη διαθέσιμη ενέργεια των συσσωρευτών. Όταν η παραγωγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές και η διαθέσιμη ενέργεια από τη συστοιχία των συσσωρευτών μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση των οικιακών καταναλώσεων ενέργειας, τότε ο Desalination agent και ο electrolyzer agent ενεργοποιούν τη μονάδα αφαλάτωσης και τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, αντίστοιχα. Σε αντίθετη περίπτωση, ενεργοποιείται μόνο η κυψέλη καυσίμου. Ως εκ τούτου, έχουν δημιουργηθεί δύο παίγνια ελέγχου ενέργειας για το EMS, όπου το πρώτο παίγνιο ενεργοποιείται όταν $\Delta P + P_{BAT} > 0$ και το δεύτερο παιχνίδι ενεργοποιείται όταν $\Delta P + P_{BAT} < 0$.

8.3.3.2 *Πρώτο παίγνιο*

Στο πρώτο παίγνιο, ο πράκτορας Desalination agent και ο πράκτορας Electrolyzer agent έχουν ως σκοπό τη μεγιστοποίηση της αντίστοιχης παραγωγής τους, σε πόσιμο νερό ο Desalination agent και σε υδρογόνο ο Electrolyzer agent. Οπότε οι δύο πράκτορες έχουν ως σκοπό να εκμεταλλευτούν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια, κάτι το οποίο δημιουργεί δύο μη συνεργατικούς πράκτορες. Ως εκ τούτου, δημιουργείται ένα ανταγωνιστικό παίγνιο ελέγχου ενέργειας, στο οποίο οι δύο παίχτες/πράκτορες πρέπει να διαπραγματευτούν και να καθορίσουν το σύνολο των στρατηγικών τους για να ικανοποιήσουν βέλτιστα τις λειτουργίες χρησιμότητάς τους. Το μη συνεργατικό παίγνιο μπορεί να οριστεί ως:

$$G = [2, \{P_{DES}, P_{ELE}\}, \{u_{DES,BAT}, u_{ELE,BAT}\}] \quad (8.7)$$

Σε αυτό το παίγνιο, η συστοιχία των συσσωρευτών λειτουργεί ως ρυθμιστής ενέργειας με σκοπό να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας αφαλάτωσης και της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Συνεπώς, οι λειτουργίες χρησιμότητας του πράκτορα Desalination agent και του πράκτορα Electrolyzer agent τροποποιούνται. Με την προσθήκη της συνάρτησης χρησιμότητας του πράκτορα Battery agent, οι δύο νέες λειτουργίες χρησιμότητας είναι:

$$u_{DES,BAT} = w_1 \times \left[1 - \frac{(P_{DES,nom} - P_{DES})^2}{P_{DES,nom}^2} \right] + w_2 \times \left[1 - \frac{(P_{BAT,max} - P_{BAT})^2}{P_{BAT,max}^2} \right] \quad (8.8)$$

Όπου w_1 και w_2 είναι οι συντελεστές βαρύτητας για τη μονάδα αφαλάτωσης και τη συστοιχία των συσσωρευτών.

Τα δύο βάρη δείχνουν κατά πόσο επηρεάζονται μεταξύ τους η μονάδα αφαλάτωσης και η συστοιχία των συσσωρευτών. Το άθροισμα των δύο βαρών ισούται με μονάδα ($w_1+w_2=1$). Παρομοίως η νέα συνάρτηση χρησιμότητας μεταξύ του πράκτορα Electrolyzer agent και Battery agent είναι

$$u_{ELE,BAT} = w_3 \times \left[1 - \frac{(P_{ELE,nom} - P_{ELE})^2}{P_{ELE,nom}^2} \right] + w_4 \times \left[1 - \frac{(P_{BAT,max} - P_{BAT})^2}{P_{BAT,max}^2} \right] \quad (8.9)$$

Όπου w_3 και w_4 είναι οι συντελεστές βαρύτητας για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και τη συστοιχία των συσσωρευτών.

Τα δύο βάρη δείχνουν κατά πόσο επηρεάζονται μεταξύ τους η μονάδα ηλεκτρόλυσης και η συστοιχία των συσσωρευτών. Το άθροισμα των δύο βαρών ισούται με μονάδα ($w_3+w_4=1$).

Σε αυτό το παίγνιο, η ισορροπία Nash επιτυγχάνει την εύρεση της βέλτιστης ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης και της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Η ισορροπία Nash είναι το σημείο διασταύρωσης των καλύτερων λειτουργιών απόκρισης για τη μονάδα αφαλάτωσης και τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και η εύρεσή του γίνεται μέσω της λύσης δύο διαφορικών εξισώσεων που ορίζονται ως

$$\frac{\partial u_{DES,BAT}}{\partial P_{DES}} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial u_{ELE,BAT}}{\partial P_{ELE}} = 0 \quad (8.10)$$

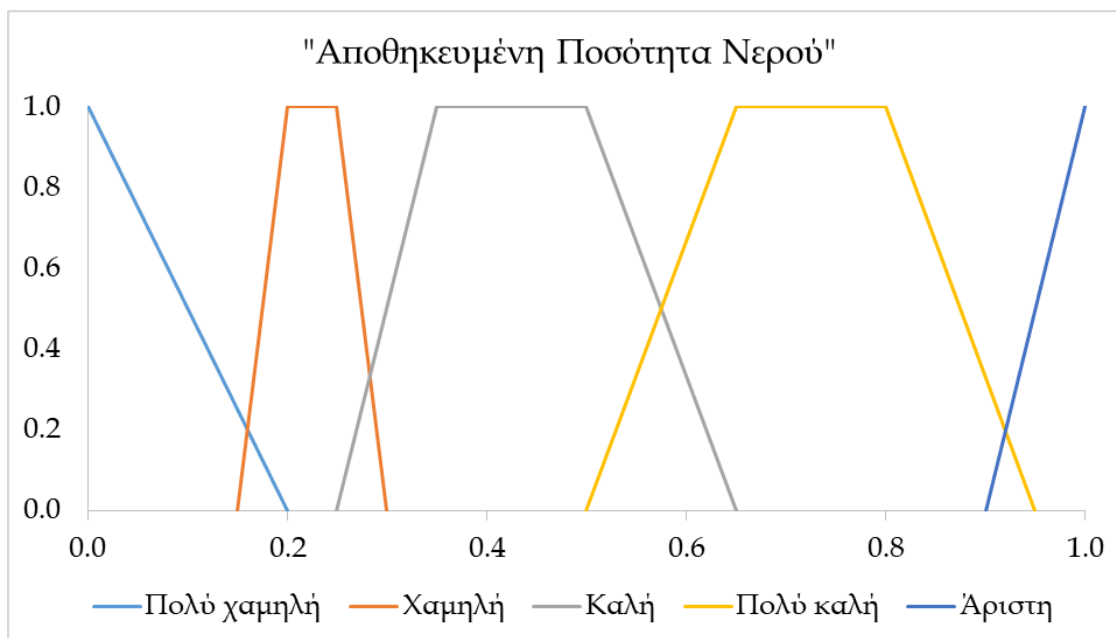
Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο διαφορικές εξισώσεις, τότε οι λύσεις των Εξισώσεων 8.8 και 8.9 δίνουν την ισχύ που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση χρησιμότητας ενός παίχτη / πράκτορα.

Οπότε, οι συναρτήσεις μπορούν να γραφούν ως εξής:

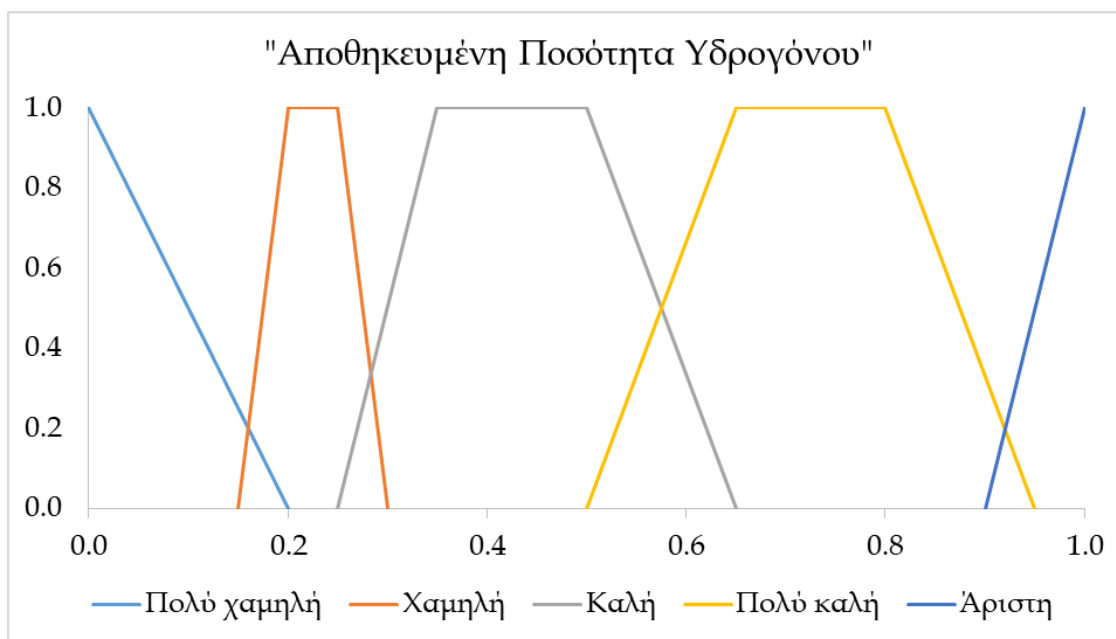
$$P_{DES} = \frac{w_1 P_{BAT,max}^2 P_{DESM,nom} + w_2 P_{DES,nom}^2 \Delta P + w_2 P_{DES,nom}^2 P_{BAT,max}}{w_1 P_{BAT,max}^2 + w_2 P_{DES,nom}^2} - \frac{w_2 P_{DES,nom}^2}{w_1 P_{BAT,max}^2 + w_2 P_{DES,nom}^2} P_{ELE} \quad (8.11)$$

$$P_{ELE} = \frac{w_3 P_{BAT,max}^2 P_{ELE,nom} + w_4 P_{ELE,nom}^2 \Delta P + w_4 P_{ELE,nom}^2 P_{BAT,max}}{w_3 P_{BAT,max}^2 + w_4 P_{ELE,nom}^2} - \frac{w_4 P_{ELE,nom}^2}{w_3 P_{BAT,max}^2 + w_4 P_{ELE,nom}^2} P_{DES} \quad (8.12)$$

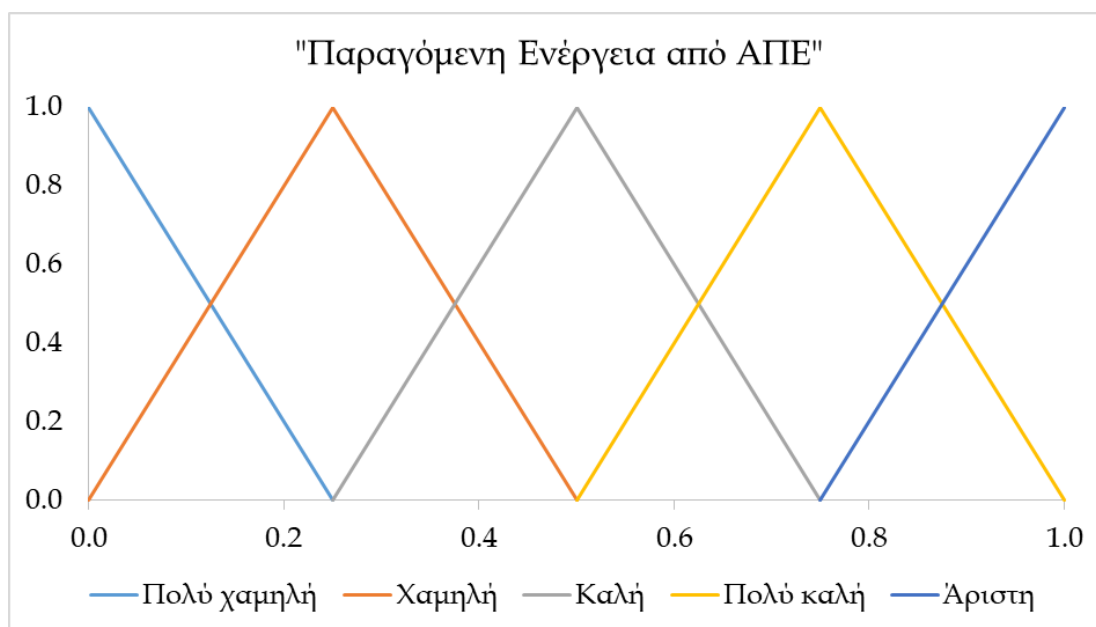
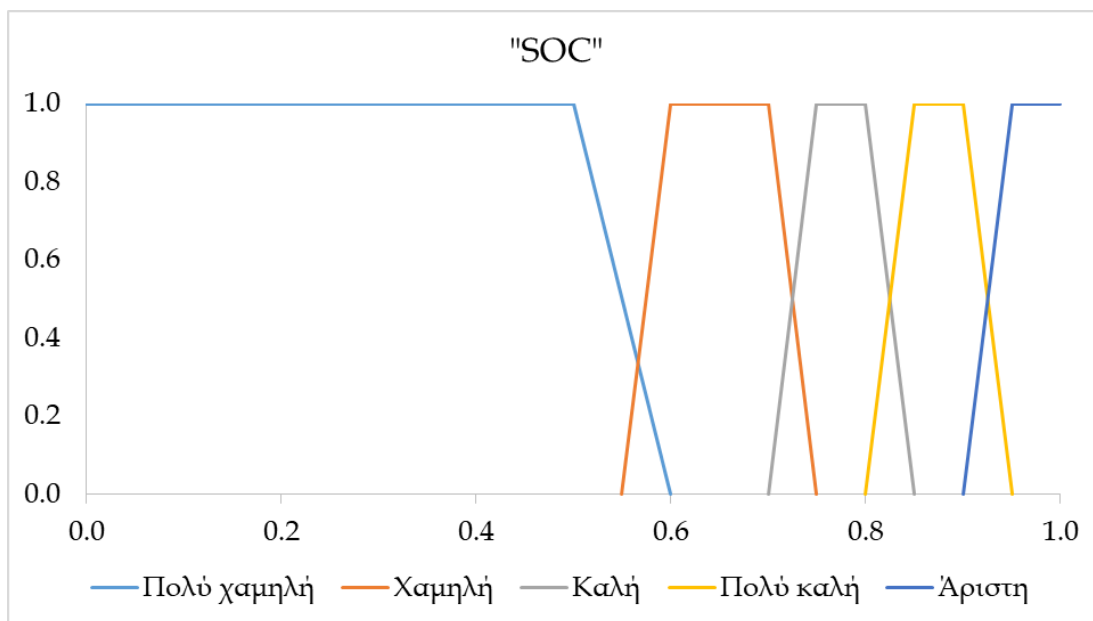
Πρέπει να σημειωθεί ότι η ισορροπία Nash υπάρχει πάντα για αυτό το παίγνιο [209]. Οι συντελεστές βαρύτητας (w_1 και w_3) προσδιορίζονται αυτόματα, χρησιμοποιώντας τη θεωρία Fuzzy Logic. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα σύστημα Fuzzy Logic το οποίο έχει τέσσερις εισόδους και δύο έξοδους. Οι εισοδοί είναι η ποσότητα του αποθηκευμένου πόσιμου νερού, η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου, η παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές και το SOC των συσσωρευτών. Οι διαφορετικές εισοδοί ασαφοποιήθηκαν σε αριθμούς που κυμαίνονται στο διάστημα $[0,1]$. Μια συνάρτηση συμμετοχής για κάθε είσοδο αναπτύχθηκε και η καμπύλη της κάθε συνάρτησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 8-4.



(α)

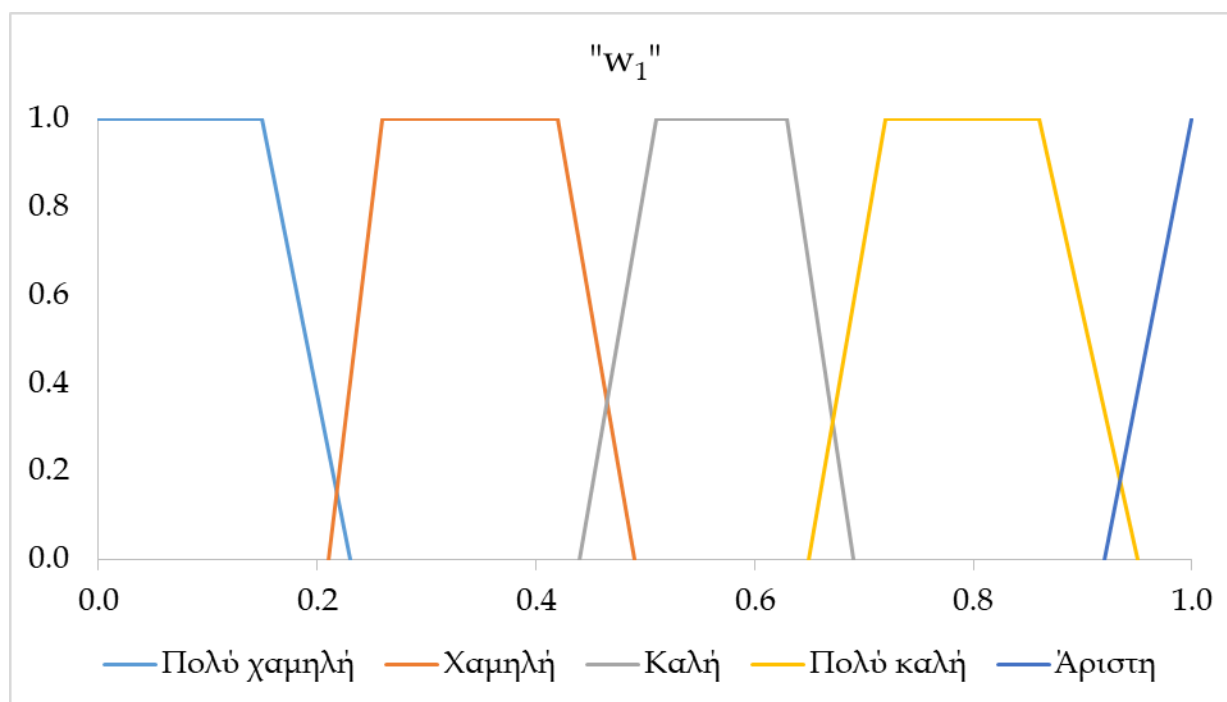


(β)

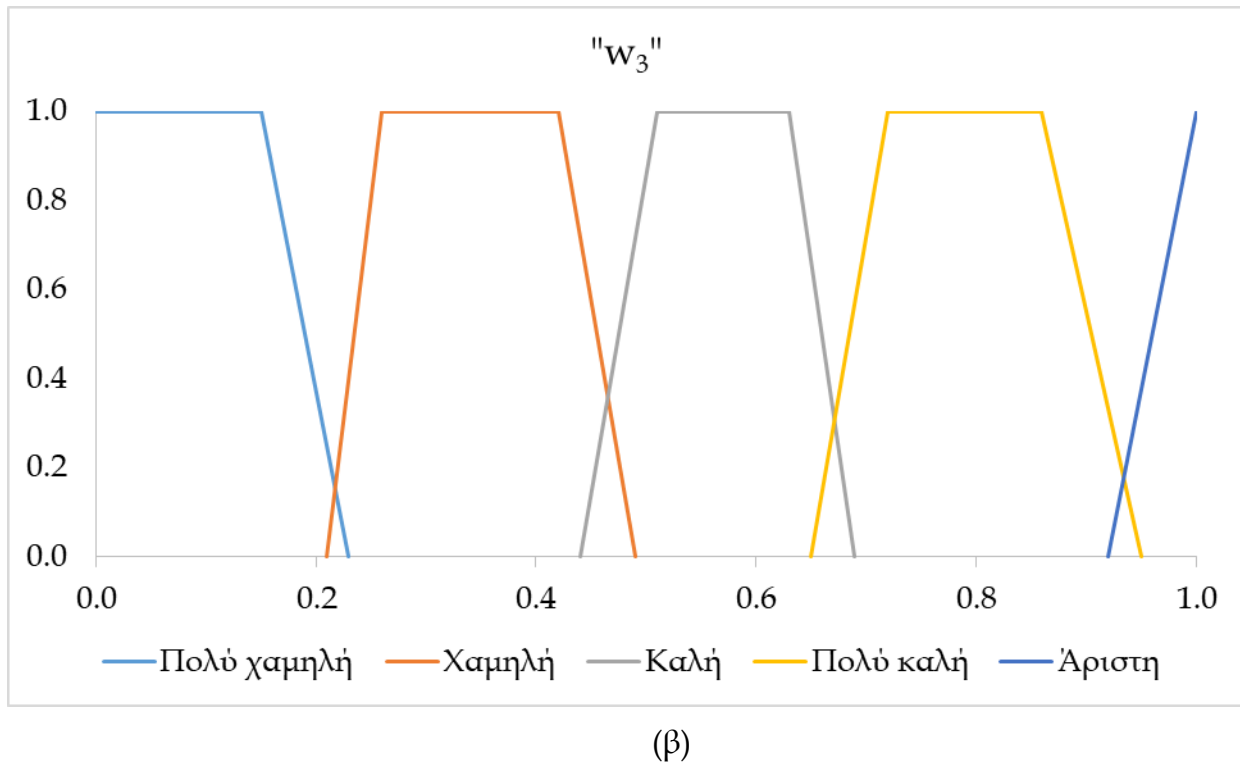


Εικόνα 8-4 Συνάρτηση συμμετοχής για κάθε εισοδο: (α) Αποθηκευμένη ποσότητα νερού, (β) Αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου, (γ) Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών και (δ) Παραγόμενη ενέργειας από ΑΠΕ

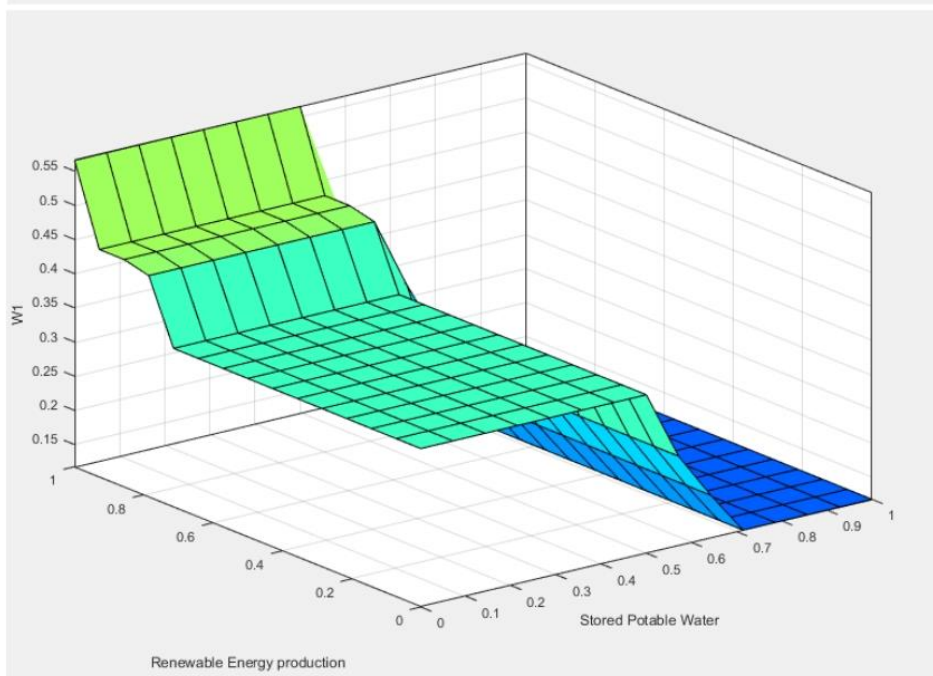
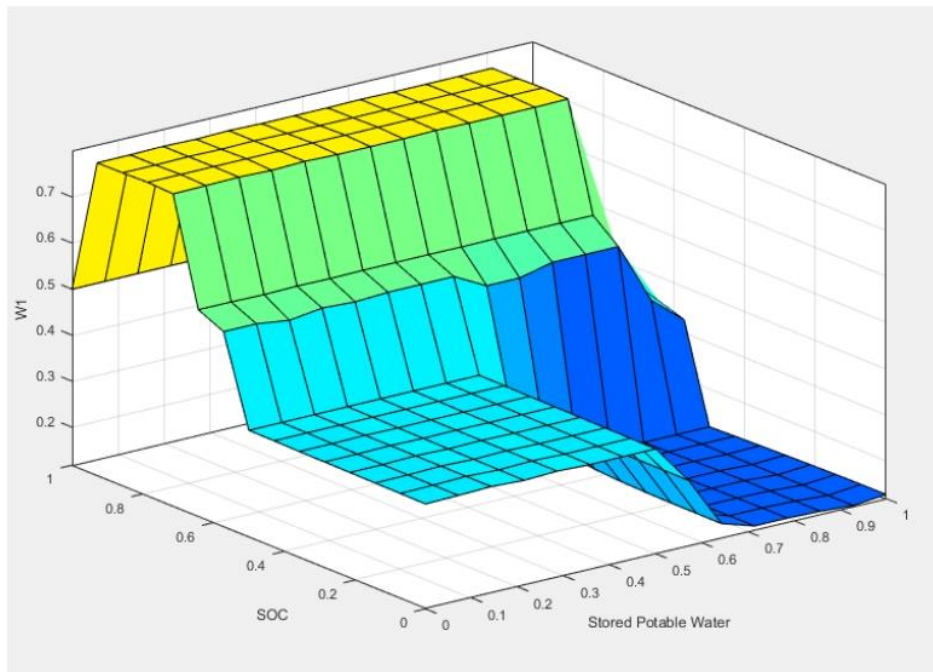
Δεδομένου ότι το σύστημα ασαφούς λογικής έχει αναπτυχθεί, τότε τα βάρη w_1 και w_3 μπορούν να υπολογιστούν. Πρόκειται για αριθμητικές τιμές που αντιστοιχούν σε ένα ασαφές σύνολο και κυμαίνονται από $[0,1]$. Οι συναρτήσεις συμμετοχής "Stored Potable Water", "SOC" και "Renewable energy production" χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του βάρους w_1 . Οι ίδιες συναρτήσεις συμμετοχής με μία εξαίρεση χρησιμοποιήθηκαν για το βάρος w_3 . Η εξαίρεση είναι ότι αντί του "Stored Potable Water", χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση συμμετοχής "Stored Hydrogen". Στην Εικόνα 8-5 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής κάθε εξόδου. Όλες οι συναρτήσεις χρησιμότητας των ρουτινών σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας τις επιφάνειες ελέγχου όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 8-6.

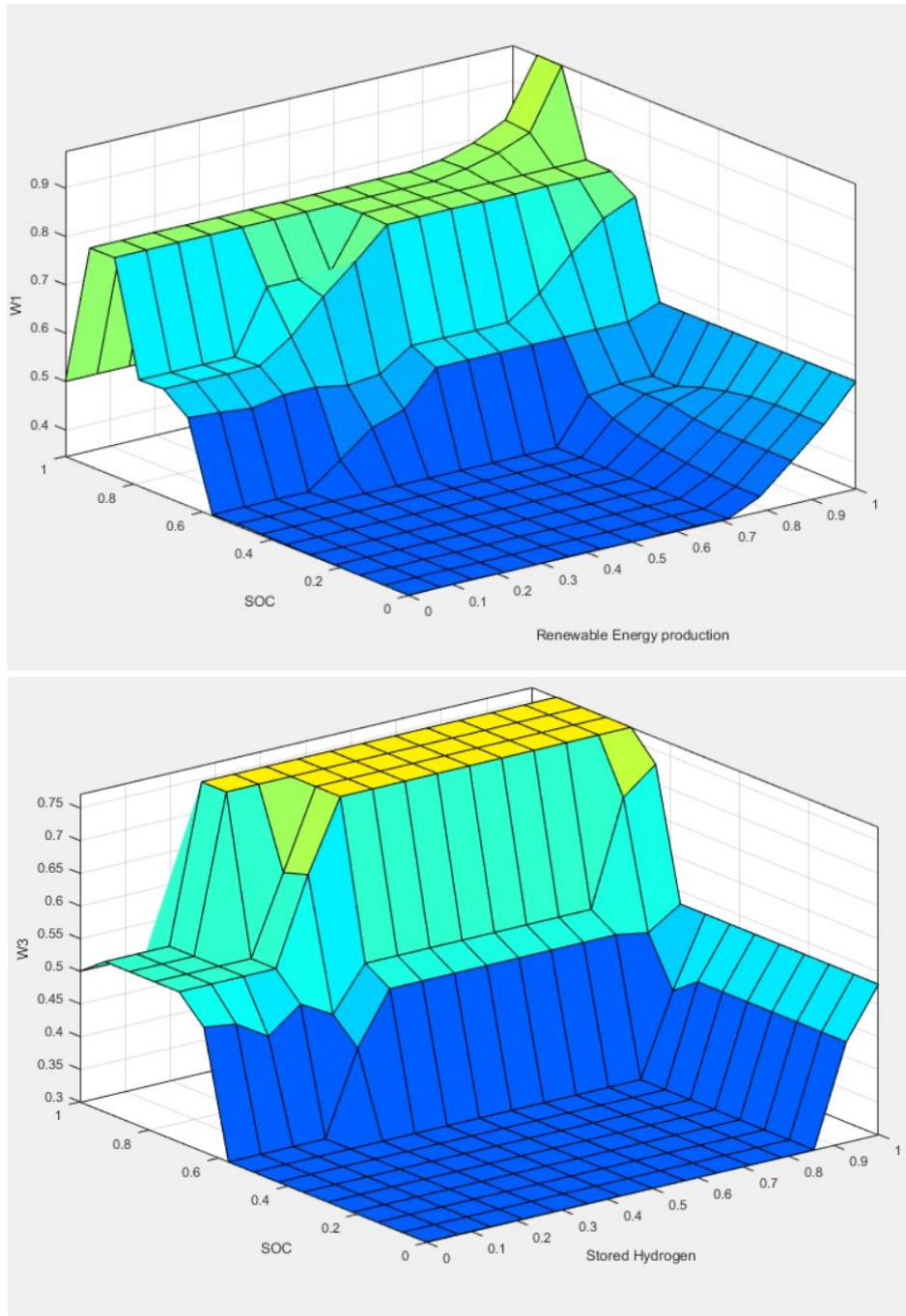


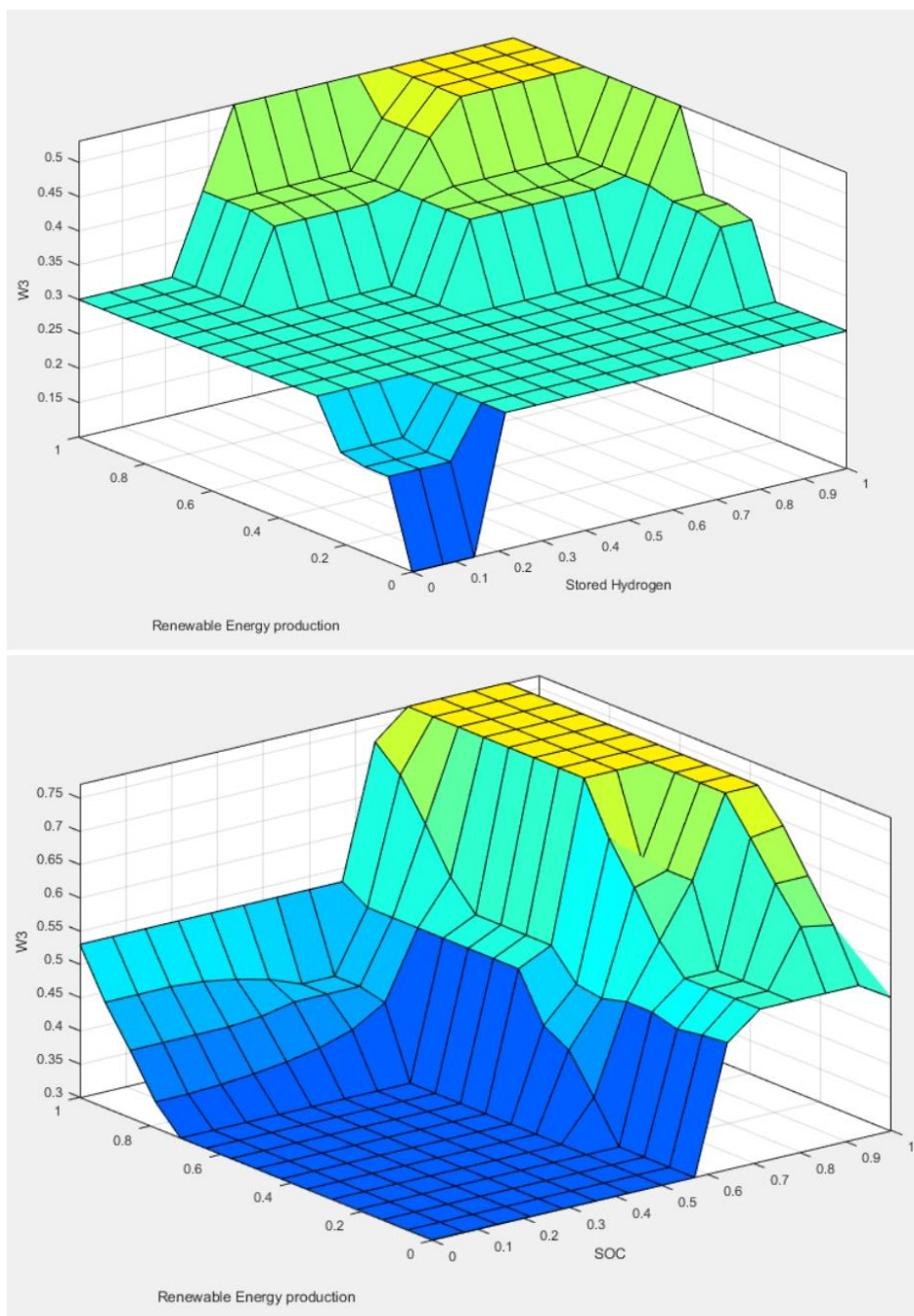
(α)



Εικόνα 8-5 Συνάρτηση συμμετοχής για κάθε έξοδο: (α) w_1 και (β) w_3







Εικόνα 8-6 Επιφάνειες ελέγχου του συστήματος ασαφούς λογικής

8.3.3.3 Δεύτερο παίγνιο

Το δεύτερο παιχνίδι είναι ένα συνεργατικό παίγνιο, καθώς ο πράκτορας Fuel cell agent καυσίμου και ο πράκτορας Battery agent επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους με σκοπό να καλύψουν τη ζήτηση φορτίου. Σε αυτό το παίγνιο, η παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών δεν επαρκεί για

να καλύψει τη ζήτηση φορτίου. Οπότε, η κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται ως εφεδρική πηγή ενέργειας εξασφαλίζοντας μηδενικό έλλειμμα ενέργειας.

Το πρόβλημα της διαχείρισης της ενέργειας μπορεί να διαμορφωθεί ως ένα συνεργατικό παίγνιο. Το παίγνιο αποσκοπεί στην εύρεση της ενέργειας που πρέπει να δοθεί από τους συσσωρευτές (Battery agent) και του σημείου λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου (Fuel cell agent), λαμβάνοντας υπόψη τους ακόλουθους περιορισμούς:

- $\{P_{\text{FUEL}} \in (P_{\text{FUEL,min}}, P_{\text{FUEL,nom}})\}$
- $\{P_{\text{BAT}} \in (P_{\text{BAT,min}}, P_{\text{BAT,max}})\}$
- $\text{SOC} \geq 20\%$
- $\text{StoredH}_2 > 0$
- $P_{\text{pv}} + P_{\text{wind}} + P_{\text{BAT}} + P_{\text{FUEL}} = P_{\text{load}}$

Οπότε, το πρόβλημα διαχείρισης της ενέργειας έχει μετατραπεί σε πρόβλημα βελτιστοποίησης και μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\max_{(P_{\text{FUEL}})} \{R_{\text{FUEL}}(P_{\text{FUEL}})\} \text{ and } \max_{(P_{\text{BAT}})} \{R_{\text{BAT}}(P_{\text{BAT}})\} \quad (8.13)$$

Αρχικά, ο πράκτορας Battery agent επιλέγει τη δράση του (η διαθέσιμη ενέργεια των συσσωρευτών τροφοδοτείται στο δίκτυο, έχοντας υπόψη ότι το SOC δεν μπορεί να πέσει κάτω από 20%) και στη συνέχεια ο πράκτορας Fuel cell agent καθορίζει το σημείο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου (η ζήτηση ισχύος καλύπτεται εξ' ολοκλήρου).

8.4 Σχεδιασμός μέσω βελτιστοποίησης

Ο βέλτιστος σχεδιασμός του μικροδικτύου σημαίνει ότι ο επενδυτής πρόκειται να κατασκευάσει ένα μικροδίκτυο με το χαμηλότερο Καθαρό Παρόν Κόστος (Net Present Cost), εκπληρώνοντας ταυτόχρονα όλους τους τεχνικούς περιορισμούς που απαιτούνται για τη διασφάλιση της σταθερής και ασφαλούς λειτουργίας του μικροδικτύου. Οι τεχνικοί περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Όλη η ζήτηση ενέργειας από τις ηλεκτρικές οικιακές συσκευές πρέπει να καλύπτεται στο 100% καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
- Η δεξαμενή πόσιμου νερού δεν πρέπει ποτέ να αδειάσει.
- Πρέπει πάντα να υπάρχει αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου.
- Το αποθηκευμένο πόσιμο νερό και υδρογόνο στο τέλος του έτους θα πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το αποθηκευμένο νερό και υδρογόνο στην αρχή του έτους.
- Δεν επιτρέπεται η βαθιά εκφόρτιση των συσσωρευτών. Το SOC των συσσωρευτών δεν πρέπει να πέσει ποτέ κάτω από το 20%.

Ως εκ τούτου, διαμορφώθηκε μια συνάρτηση κόστους προκειμένου να ληφθεί το σωστό μέγεθος των στοιχείων του μικροδικτύου. Το ελάχιστο κόστος αυτής της συνάρτησης κόστους ισούται με το καλύτερο σύστημα για μια επένδυση 20 ετών. Οι τιμές του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι σύμφωνες με τις τιμές της αγοράς. Οι τεχνικοί περιορισμοί διασφαλίζονται ως κυρώσεις που προστίθενται στην συνάρτηση κόστους όταν δεν πληρούνται. Οι κυρώσεις είναι ίσες με το μηδέν όταν πληρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί. Διαφορετικά, προστίθεται ένα τεράστιο ποσό στη συνάρτηση κόστους (στην παρούσα μελέτη, κάθε ποινή ισούται με 1 εκατομμύριο ευρώ).

Η συνάρτηση κόστους (CF) που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί παρουσιάζεται στην Εξίσωση 8.14.

$$CF = NPC + \sum_{i=1}^{8760} P_b(t) + \sum_{i=1}^{8760} P_{H_2}(t) + \sum_{i=1}^{8760} P_w(t) + P_{wt} + P_{H_2T} \quad (8.14)$$

όπου το NPC είναι το Καθαρό Παρόν Κόστος, P_b είναι η ποινή που προστίθεται εάν το SOC είναι χαμηλότερο από 20%, P_{H_2} είναι η ποινή εάν δεν υπάρχει αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου, $P_w(t)$ είναι η ποινή που προστίθεται εάν η δεξαμενή νερού είναι άδεια, P_w είναι η ποινή που προστίθεται εάν το αποθηκευμένο νερό στο τέλος του έτους είναι λιγότερο από ότι στην αρχή του έτους και P_{H_2T} είναι η ποινή που προστίθεται εάν το αποθηκευμένο υδρογόνο στο τέλος του έτους είναι λιγότερο από ότι στην αρχή του έτους.

8.5 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

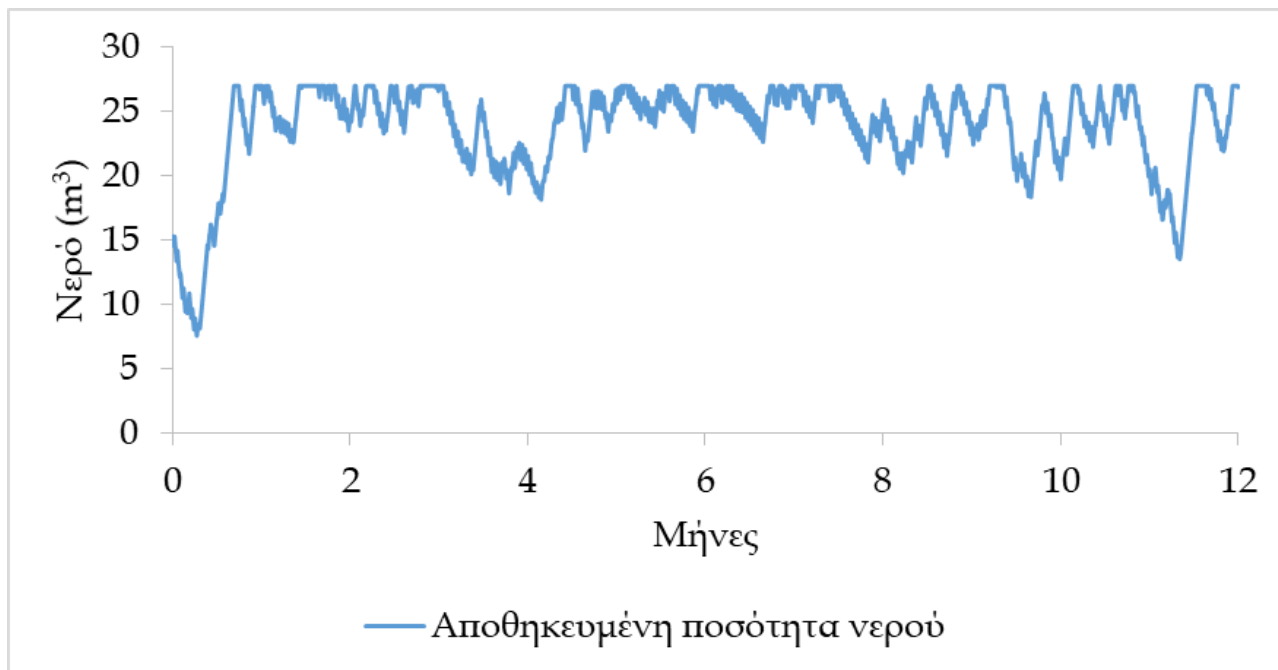
Το μικροδίκτυο θεωρήθηκε ότι πρόκειται να εγκατασταθεί σε ένα μικρό νησί των Κυκλάδων. Οπότε, τυπικά μετεωρολογικά δεδομένα του νησιού χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις, όπως στο Κεφάλαιο 5. Χρησιμοποιήθηκαν ίδιες ηλεκτρικές καταναλώσεις όπως στο Κεφάλαιο 5. Η μέση κατανάλωση ενέργειας ήταν 62.5 kWh την ημέρα και η ζήτηση αιχμής φορτίου ήταν 7.72 kW. Οι ανάγκες σε πόσιμο νερό (πόση, μαγείρεμα και πλύση) σε καθημερινή βάση είναι 2.88 m³. Επιπλέον, για τις ανάγκες μετακίνησης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα υβριδικά σκούτερ που μπορούν να καλύπτουν 50 χλμ. την ημέρα το καθένα και η ημερήσια κατανάλωση υδρογόνου ως καύσιμο υπολογίστηκε σε 2.4 Nm³H₂. Η προσομοίωση του μικροδικτύου πραγματοποιήθηκε για διάρκεια ενός χρόνου και το βήμα προσομοίωσης είναι ίσο με 1 ώρα.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, το αυτόνομο μικροδίκτυο πολυπαραγωγής με το MAS-DEMS που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 7.3 βελτιστοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PSO. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης μαζί με τις βέλτιστες τιμές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 8-2.

Πίνακας 8-2 Μεταβλητές βελτιστοποίησης

Μεταβλητή	Χαμηλότερη Τιμή	Υψηλότερη Τιμή	Βήμα	Βέλτιστη Τιμή
Στοιχεία Συστήματος				
Χωρητικότητα του κάθε συσσωρευτή (Wh). Συνολική τάση συστοιχίας 48 V DC (2 V κάθε συσσωρευτής).	800, 1000, 1200, 1500, 1600, 2000			1500
Αριθμός τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων ονομαστικής ισχύος 180 Wp το καθένα σε σειρά	90	125	1	120
Ονομαστική ισχύς της κυψέλης καυσίμου (W)	300	1200	100	600
Ονομαστική ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης (W)	400	1700	100	500
Χωρητικότητα της μονάδας αποθήκευσης υδρογόνου (Nm ³ of H ₂)	18	30	1	20
Χωρητικότητα της δεξαμενής νερού (m ³)	18	35	1	27
Ονομαστική ισχύς της μονάδας αφαλάτωσης (W)	700	1700	100	1400

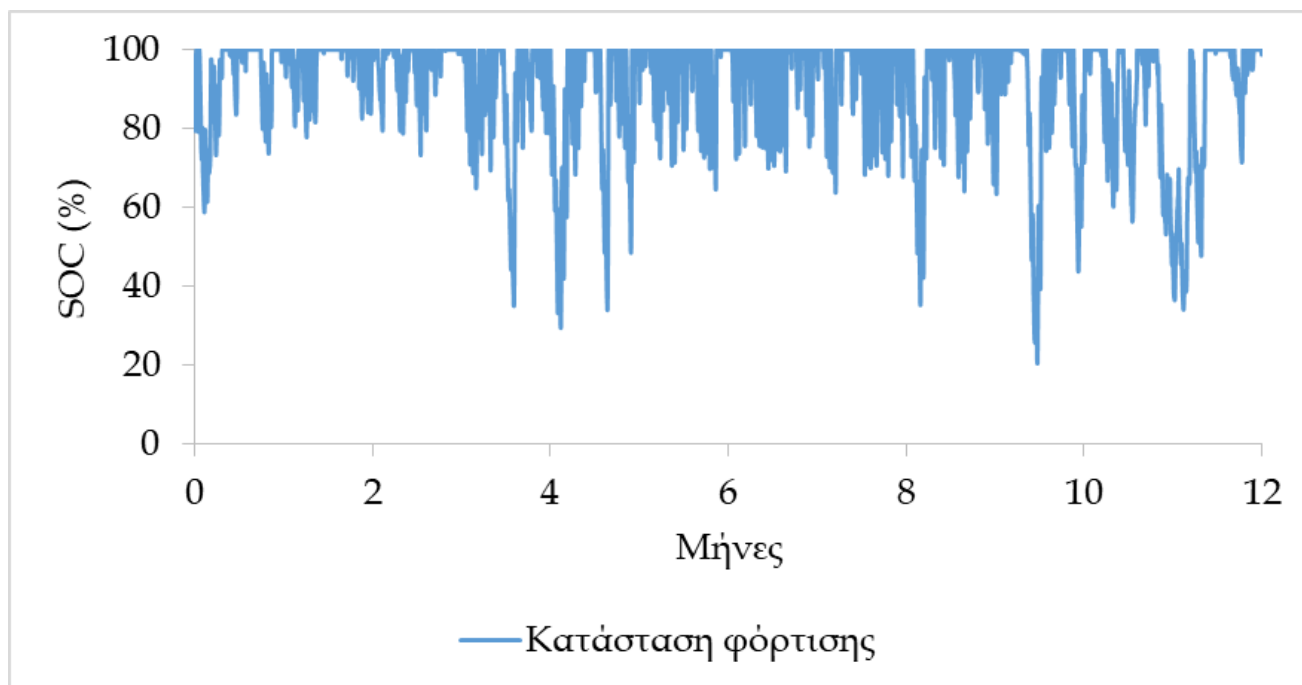
Η ετήσια διακύμανση του αποθηκευμένου πόσιμου νερού και υδρογόνου παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8-1 και στο Διάγραμμα 8-2, αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι πάντα υπάρχει διαθέσιμο νερό και το υδρογόνο. Το SOC των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του έτους παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8-3, από το οποίο καθίσταται σαφές ότι ποτέ δεν πέφτει κάτω από το 20%, καθώς το χαμηλότερο SOC που παρατηρήθηκε ήταν ίσο με 20.39%. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια ήταν πολύ υψηλότερη από την παραγωγή ισχύος της μονάδας κυψέλης καυσίμου, η οποία λειτούργησε μόνο για 67 ώρες για να στηρίξει το μικροδίκτυο.



Διάγραμμα 8-1 Αποθηκευμένη ποσότητα πόσιμου νερού κατά τη διάρκεια του χρόνου

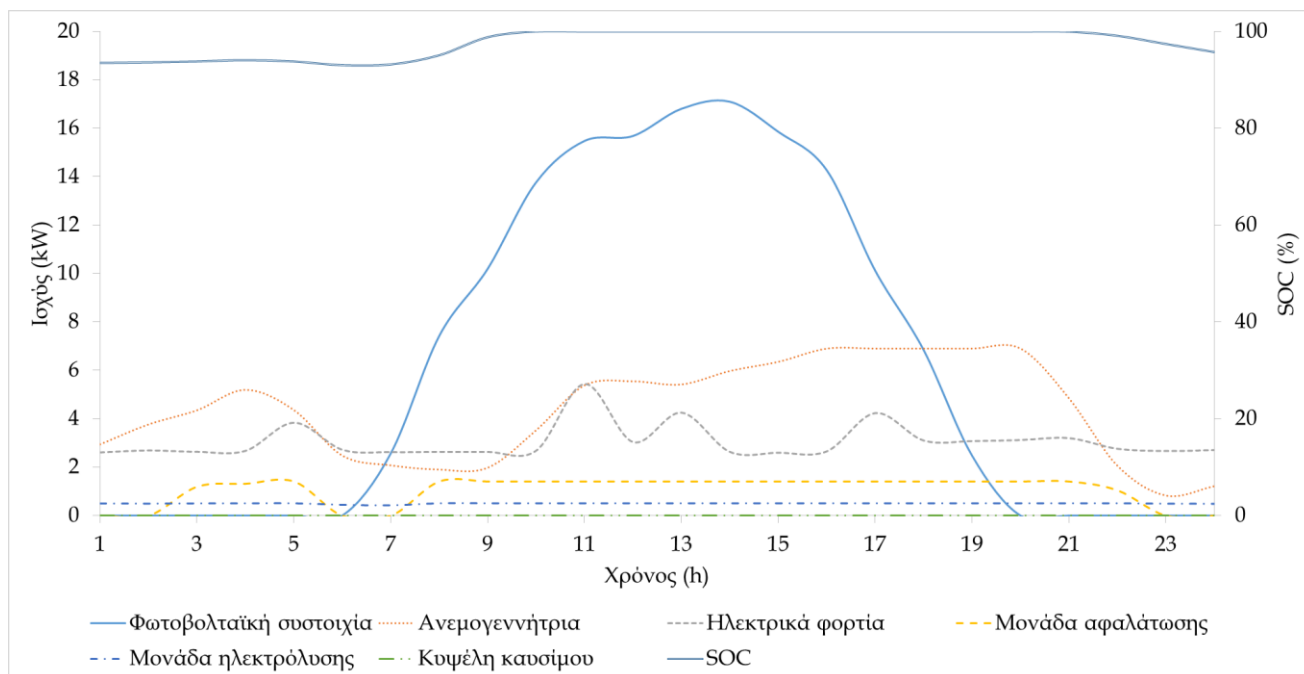


Διάγραμμα 8-2 Αποθηκευμένη ποσότητα υδρογόνου κατά τη διάρκεια του έτους



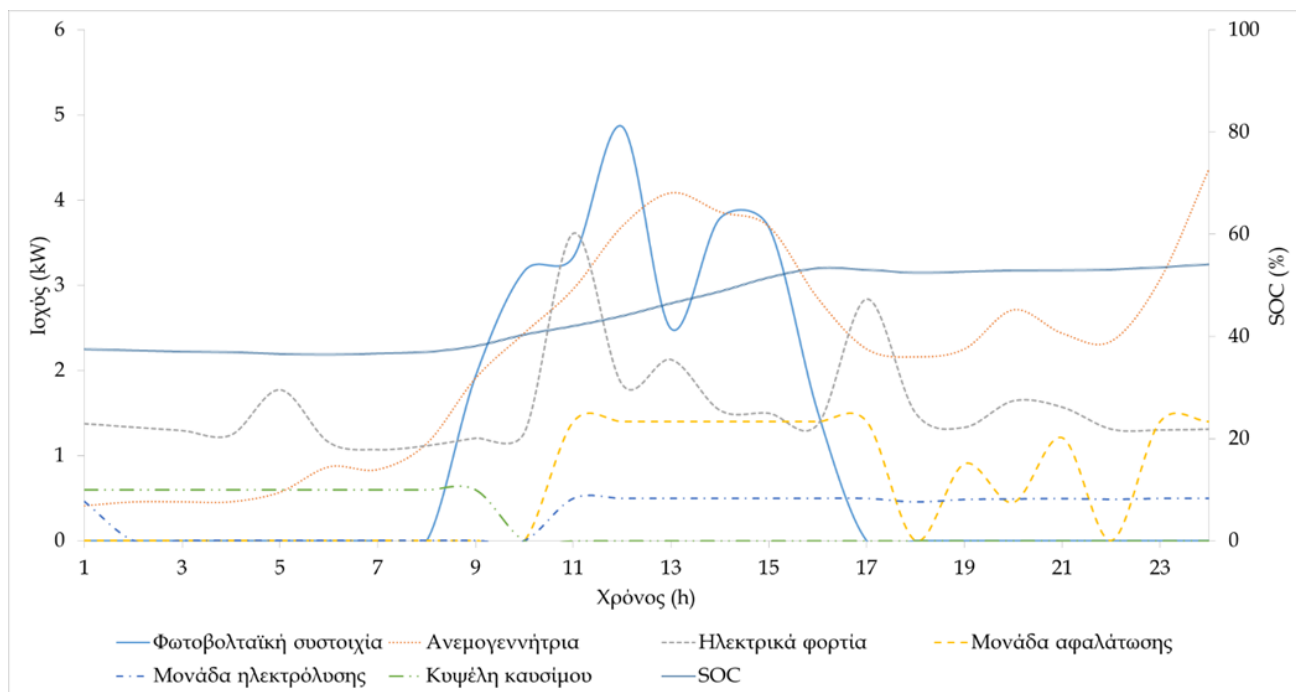
Διάγραμμα 8-3 Κατάσταση φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών

Προκειμένου, να παρουσιαστεί η συμπεριφορά του MAS-DEMS με βάση τη Θεωρία Παιγνίων, επιλέχθηκαν δύο τυπικές ημέρες. Η πρώτη τυπική ημέρα ήταν μια καλοκαιρινή μέρα όπου η παραγωγή ενέργειας ήταν υψηλή και παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 8-4. Ως εκ τούτου, η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια μπορεί να καλύψει τη ζήτηση φορτίου. Ο πράκτορας Desalination agent και ο πράκτορας Electrolyzer agent ανταγωνίζονταν μεταξύ τους και εκτιμήθηκε το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης και της μονάδας ηλεκτρόλυσης με τη βοήθεια της Εξίσωσης 8.11 και της Εξίσωσης 8.12. Ως αποτέλεσμα, η μονάδα αφαλάτωσης και η μονάδα ηλεκτρόλυσης λειτουργούσαν σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, είτε σε μερική είτε σε πλήρη λειτουργία. Επιπλέον, η κυψέλη καυσίμου δεν ήταν απαραίτητη και ο πράκτορας Fuel cell agent την κράτησε απενεργοποιημένη.



Διάγραμμα 8-4 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής ημέρας

Στο Διάγραμμα 8-5 παρουσιάζονται οι μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της δεύτερης ημέρας, η οποία ήταν μια ημέρα όπου η παραγωγή ενέργειας ήταν πολύ χαμηλή. Στην αρχή της ημέρας, το SOC ήταν χαμηλό και η αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών και η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια δεν επαρκούσαν να καλύψουν τη ζήτηση φορτίου. Ως αποτέλεσμα, ο πράκτορας Fuel cell agent ενεργοποίησε τη κυψέλη καυσίμου (η οποία λειτούργησε κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας) προκειμένου να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες και να προστατεύσει την συστοιχία των συσσωρευτών από βαθιά εκφόρτιση. Όταν η παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε και μπορούσε να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες, το SOC παρουσίασε σταθερή αύξηση και η κυψέλη καυσίμου απενεργοποιήθηκε. Επιπλέον, η μονάδα αφαλάτωσης και η μονάδα ηλεκτρόλυσης άρχισαν να παράγουν πόσιμο νερό και υδρογόνο, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 8-5 Μεταβολές ισχύος κατά τη διάρκεια της χειμωνιάτικης ημέρας

8.6 Αξιολόγηση του MAS-DEMS

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε ένα MAS-DEMS βασισμένο σε υπολογιστική νοημοσύνη (Fuzzy Cognitive Maps) για ένα μικροδίκτυο πολυπαραγωγής, παρουσιάζοντας τα σημαντικά πλεονεκτήματά του σε σχέση με ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου.

Οπότε, πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση μεταξύ του MAS - DEMS βασισμένο σε FCM και του MAS - DEMS βασισμένο σε Θεωρία Παιγνίων. Προκειμένου να γίνει μια δίκαιη σύγκριση μεταξύ των δύο συστημάτων, το μικροδίκτυο που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο (Κεφάλαιο 8) είναι ακριβώς το ίδιο με το μικροδίκτυο του Κεφαλαίου 5, δηλαδή χρησιμοποιήθηκε η ίδια τοπολογία με την ίδια ηλεκτρική ζήτηση και τις ίδιες ανάγκες σε νερό και καύσιμα.

Συγκρίνοντας τα δύο μικροδίκτυα παρατηρούμε ότι το παρόν, που χρησιμοποιεί το MAS-DEMS βασισμένο στη Θεωρία Παιγνίων, παρουσιάζει χαμηλότερο κόστος κατά 1.62%. Το συνολικό κόστος του μικροδικτύου που χρησιμοποιεί το MAS - DEMS με βάση τη Θεωρία των Παιχνιδιών είναι 156,287 € ενώ το συνολικό κόστος του μικροδικτύου που χρησιμοποιεί MAS-DEMS με βάση το FCM είναι 158,856 €.

Επιπλέον, τα δύο μικροδίκτυα συγκρίνονται με βάση τις επιδόσεις τους. Η απόδοση κάθε μικροδικτύου εκτιμάται με βάση τις απώλειες ισχύος [123]. Η Εξίσωση 8.15 χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των απωλειών ισχύος των μικροδικτύων.

$$P_{\text{loss}} (\%) = \frac{P_{\text{prod}} - P_{\text{cons}}}{P_{\text{prod}}} \times 100 \quad (8.15)$$

Όπου P_{cons} είναι η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια και P_{prod} είναι η συνολική ενέργεια παραγωγής.

Το ποσοστό απώλειας ισχύος του MAS-DEMS με βάση τη Θεωρία Παιγνίων υπολογίστηκε σε 3.44%, ενώ το MAS-DEMS με βάση το FCM παρουσίασε απώλειες της τάξης του 5.91%. Επιπλέον, οι ετήσιοι κύκλοι φόρτισης της συστοιχίας των συσσωρευτών στο μικροδίκτυο που ενσωματώνει το MAS-DEMS με βάση το FCM είναι 53 κύκλοι, ενώ οι κύκλοι της συστοιχίας των συσσωρευτών του μικροδικτύου που ενσωματώνει το MAS-DEMS με βάση τη Θεωρία Παιγνίων είναι 49 κύκλοι. Επομένως, το MAS-DEMS με βάση τη Θεωρία Παιγνίων μειώνει τους ετήσιους κύκλους φόρτισης κατά σχεδόν 7%, ενώ χρησιμοποιεί επίσης συσσωρευτές μικρότερης χωρητικότητας από ότι το MAS-DEMS με FCM. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι το μικροδίκτυο με MAS-DEMS που βασίζεται στη Θεωρία Παιγνίων έχει υψηλότερη απόδοση και λιγότερες απώλειες ισχύος, παρουσιάζοντας παράλληλα καλύτερα αποτελέσματα από οικονομική άποψη.

8.7 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε ο σχεδιασμός και η ανάλυση απόδοσης ενός συστήματος πολλαπλών πρακτόρων που εφαρμόστηκε με επιτυχία σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, που βασίζεται στη Θεωρία παιγνίων για αυτόνομα μικροδίκτυα πολυπαραγωγής.

Το αναπτυγμένο MAS αποτελείται από πέντε πράκτορες, μερικοί από τους οποίους είτε ανταγωνίζονται είτε συνεργάζονται μεταξύ τους, ανάλογα με το επίπεδο της ενέργειας που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την ενέργεια που αποθηκεύεται στην

συστοιχία των συσσωρευτών, προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη διαχείριση ενέργειας και ο έλεγχος του μικροδικτύου. Ο ανταγωνισμός ή η συνεργασία μεταξύ των πρακτόρων εκφράστηκε ως μη συνεργατικό ή συνεργατικό παίγνιο, αντίστοιχα. Οι βέλτιστες λύσεις των παιγνίων σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκαν μέσω της χρήσης της ισορροπίας Nash.

Το προτεινόμενο MAS - DEMS συγκρίθηκε με το MAS - DEMS του Κεφαλαίου 5 όπου χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης (Ασαφείς Γνωστικοί Χάρτες). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη σύγκριση έδειξαν ότι το παρόν σύστημα χρησιμοποιεί καλύτερα τις μονάδες του μικροδικτύου, γεγονός που με τη σειρά του οδήγησε σε υψηλότερη απόδοση με χαμηλότερες απώλειες ισχύος για το μικροδίκτυο και χαμηλότερο κόστος. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν σαφώς ότι η χρήση της Θεωρίας Παιγνίων για ένα MAS-DEMS είναι εφικτή και εγγυάται ικανοποιητικά αποτελέσματα από την άποψη της λειτουργίας αυτόνομων μικροδικτύων πολυπαραγωγής.

Κεφάλαιο 9:

Σύνοψη Αποτελεσμάτων – Γενικά
Συμπεράσματα Διατριβής –
Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

9 Σύνοψη Αποτελεσμάτων – Γενικά Συμπεράσματα Διατριβής – Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

9.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη διείσδυση της κατανεμημένης παραγωγής στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στην ανάπτυξη των μικροδικτύων. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μονάδες παραγωγής ενέργειας, μονάδες αποθήκευσης και ηλεκτρικά φορτία. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν είτε συνδεδεμένα με το κυρίως δίκτυο είτε αυτόνομα. Στην αυτόνομη λειτουργία, ο σκοπός ενός μικροδικτύου είναι η κάλυψη των αναγκών της περιοχής που εξυπηρετεί, δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια συμβάλει στην κάλυψη όλων των βασικών αναγκών μιας κοινότητας. Οι κύριες μονάδες παραγωγής ενός μικροδικτύου είναι ανανεώσιμες, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι εκπομπές ρύπων και η περιοχή να μπορεί να αναπτυχθεί βιώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον.

Η παρούσα διατριβή εστίασε την ενασχόλησή της στη βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας σε μικροδίκτυα και ενεργειακά συστήματα, καθώς και στον αυτόματο έλεγχο των μονάδων τους. Αρχικά, αναφέρθηκε η εφαρμογή αποκεντρωμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου μικροδικτύων με τη χρήση ευφύων πρακτόρων που ενσωματώνουν τεχνητή νοημοσύνη και παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματά του σε σχέση με τη χρήση συγκεντρωτικών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Στο σύστημα ευφύων πρακτόρων, οι πράκτορες συνεργάζονταν μεταξύ τους με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Στη συνέχεια, μελετήθηκε μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού της με φωτοβολταϊκά πλαίσια, ώστε να καλύπτει βέλτιστα οικονομικά τις ανάγκες σε πόσιμο νερό μιας απομακρυσμένης περιοχής. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με τη χρήση ευφύων πρακτόρων για ένα αυτόνομο μικροδίκτυο, επαληθεύτηκαν και πειραματικά σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο για την τροφοδοσία μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Επιπλέον, στο πειραματικό αυτόνομο μικροδίκτυο παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης εναλλακτικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες τροφοδοτούν το σύστημα με την απαιτούμενη ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα της

χρήσης μη συνεργατικών πρακτόρων σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου ενός αυτόνομου μικροδικτύου.

9.2 Γενικά Συμπεράσματα

Η χρήση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο βασισμένο σε ευφυείς πράκτορες που ενσωματώνουν τεχνητή νοημοσύνη και συνεργάζονται μεταξύ τους έδειξε ότι μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στον σχεδιασμό και έλεγχο ενός μικροδικτύου, παρουσιάζοντας μικρότερο κίνδυνο πλήρους κατάρρευσης του συστήματος, καθώς μια πιθανή αποτυχία ορισμένων πρακτόρων δεν μεταφράζεται σε ολική κατάρρευση του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Επιπλέον, σε σύγκριση με ένα συγκεντρωτικό σύστημα διαχείρισης ενέργειας τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αποκεντρωμένο σύστημα με τη χρήση ευφών πρακτόρων παρουσιάζει χαμηλότερο καθαρό παρόν κόστος περίπου κατά 2%. Οπότε, το αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας καταφέρνει να αξιοποιεί καλύτερα τις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου και να ελέγχει καλύτερα της υπόλοιπες μονάδες του, με χαμηλότερο καθαρό παρόν κόστος για μια περίοδο λειτουργίας του μικροδικτύου 20 ετών.

Η χρήση μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον λύση για μια περιοχή που αντιμετωπίζει προβλήματα διαθεσιμότητας πόσιμου νερού όταν τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός συστήματος αφαλάτωσης με φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελεί αξιοσημείωτο πεδίο έρευνας. Μελετήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί όπως απευθείας σύνδεση χωρίς συσσωρευτές ή με συσσωρευτές, ενσωματώνοντας ή μη συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα που συνδυάζει φωτοβολταϊκά πλαίσια και μικρής χωρητικότητας συσσωρευτές και ελέγχεται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που ενσωματώνει υπολογιστική τεχνητή νοημοσύνη (θεωρία Ασαφών Γνωστικών Χαρτών) αποτελεί τη βέλτιστη λύση για μια αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού. Η χρήση των εν λόγω μονάδων με ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας παρουσιάζει τις λιγότερες απώλειες ισχύος σε σχέση με άλλους σχεδιασμούς και το μικρότερο κόστος για τη παραγωγή του νερού, λιγότερο από 3.8 €/m³. Επιπλέον, σε σύγκριση με τη λύση

της μεταφοράς νερού σε αυτές τις περιοχές, η οποία αποτελεί μία από τις πιο σύνηθες λύσεις αντιμετώπισης λειψυδρίας, το προτεινόμενο αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης παρουσιάζει χαμηλότερο κόστος για μια περίοδο λειτουργίας 20 ετών. Συγκεκριμένα, το κόστος του παραγόμενου νερού ανά m^3 είναι μικρότερο από το κόστος του μεταφερόμενου νερού κατά 64.4%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν και ερευνήθηκαν πειραματικά σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο για τη τροφοδοσία μιας μονάδας αφαλάτωσης. Το μικροδίκτυο περιλαμβάνει δύο μικρής χωρητικότητας μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, μια ηλεκτρική με τη χρήση υβριδικών πυκνωτών και μία υδραυλική με τη χρήση πιεστικών δοχείων, παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα της υβριδοποίησης μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, ενσωματώθηκε και διερευνήθηκε μέσω πειραμάτων η χρήση ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας βασισμένο σε ευφυείς πράκτορες, οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους και ενσωματώνουν υπολογιστική τεχνητή νοημοσύνη. Το σύστημα ευφύων πρακτόρων αποσκοπεί στη βέλτιστη εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας, στην εύρυθμη διαχείριση ενέργειας από τις μονάδες αποθήκευσης και στο βέλτιστο έλεγχο της μονάδας αφαλάτωσης με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής πόσιμου νερού.

Τέλος, ερευνήθηκε η χρήση μη συνεργατικών ευφύων πρακτόρων δημιουργώντας ανταγωνιστικό παίγνιο μεταξύ τους, για ένα αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός αυτόνομου μικροδικτύου. Οι πράκτορες δεν έχουν πάντα κοινούς στόχους αλλά πολλές φορές ανταγωνιστικούς ή στρατηγικές που επηρεάζουν τους στόχους των άλλων. Η εφαρμογή της ισορροπίας Nash για την εύρεση του σημείου ισορροπίας σε παίγνια καταδεικνύεται ως ιδανική ώστε αντιμετωπίζοντας όλους τους πράκτορες με τα ίδια κριτήρια να μεγιστοποιεί σε κάθε περίπτωση τα κέρδη τους. Η χρήση της Θεωρίας Παιγνίων σε ευφυείς πράκτορες για τη βέλτιστη διαχείριση ενέργειας σε ένα αυτόνομο μικροδίκτυο παρουσίασε χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με το σύστημα ευφύων πρακτόρων που χρησιμοποιεί Ασαφείς Γνωστικούς Χάρτες. Επίσης, παρουσίασε λιγότερες απώλειες ισχύος και λιγότερους κύκλους φόρτισης στη συστοιχία των συσσωρευτών, χρησιμοποιώντας παράλληλα μικρότερης χωρητικότητας συσσωρευτές.

Οι προτεινόμενες προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως σε μικροδίκτυα και τα εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης που αναπτύχθηκαν, αποδείχθηκαν μεγάλης αξίας για το

σχεδιασμό ενός αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας με σκοπό το βέλτιστο τεχνικά και οικονομικά σχεδιασμό ενός αυτόνομου μικροδικτύου.

9.3 Προτάσεις Μελλοντικής Έρευνας

Τα ανωτέρω συμπεράσματα οδηγούν στην ανάγκη για περαιτέρω βήματα έρευνας που θα μπορέσουν να δώσουν εγγυήσεις καλής λειτουργίας μικροδικτύων που βρίσκονται είτε σε αυτόνομη λειτουργία είτε σε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Μελλοντική έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στον αποκεντρωμένο έλεγχο και στη διαχείριση της ενέργειας των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων, που θα βασίζεται σε τρία επίπεδα: τον πρωτεύοντα έλεγχο, τον δευτερεύοντα έλεγχο και τον τριτεύοντα έλεγχο. Ο πρωτεύων έλεγχος θα είναι υπεύθυνος για τον τοπικό συντονισμό και την παραγωγή της μέγιστης ισχύος καθώς και για τον τοπικό έλεγχο τάσης και ρεύματος, με σκοπό να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για την ορθή λειτουργία και τη σταθερότητα του συστήματος. Ταυτόχρονα, θα πρέπει να εφαρμοστούν μέθοδοι αποκεντρωμένης κατανομής φορτίου σε αυτό το επίπεδο για να επιτευχθεί η σωστή διαχείριση των πηγών και των καταναλωτών ενέργειας. Ο δευτερεύων έλεγχος θα επικεντρώνεται στον έλεγχο της συχνότητας, τη ρύθμιση τάσης, τη κατανομή ισχύος και σε θέματα ποιότητας ισχύος. Ο τριτογενής έλεγχος αναφέρεται στη βελτιστοποίηση και τη διαχείριση ενέργειας του ολικού συστήματος και διασφαλίζει την βελτιστοποίηση, με βάση το κόστος ενέργειας και τους κανονισμούς για την αγορά/πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο διανομής. Τα διαχειριστικά και προγραμματιστικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στο τριτογενή έλεγχο θα ενισχύουν την ανταλλαγή πληροφοριών ή δεδομένων με τους διαχειριστές του συστήματος διανομής, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία του μικροδικτύου. Ο τριτεύων έλεγχος στα αυτόνομα μικροδίκτυα αναλύθηκε με κάθε λεπτομέρεια στη συγκεκριμένη διατριβή, καθώς διαχειρίζεται βέλτιστα τις ροές ισχύος μεταξύ των μονάδων (πηγές ισχύος, μονάδες αποθήκευσης και ηλεκτρικά φορτία) και έχει ως σκοπό τη βελτιστοποίηση του κόστους του μικροδικτύου ως προς το μέγεθος των μονάδων παραγωγής ενέργειας και των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας (βέλτιστα μεγέθη των μονάδων με οικονομικά κριτήρια, καλύπτοντας πλήρως τα ηλεκτρικά φορτία). Στη λειτουργία με διασύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο,

ο τριτεύων έλεγχος διαχειρίζεται τη ροή ισχύος μεταξύ του κεντρικού δικτύου και του μικροδικτύου, ρυθμίζοντας το πλάτος του ρεύματος και της τάσεως των κατανεμημένων πηγών ενέργειας με σκοπό την σταθερότητα της συχνότητας του μικροδικτύου.

Επιπλέον, σημαντική έρευνα ενδείκνυται να πραγματοποιηθεί στον τομέα των εργαλείων υπολογιστικής τεχνητής νοημοσύνης με στόχο τη βελτιστοποίηση. Ο σχεδιασμός ενός μικροδικτύου είναι μια περίπλοκη διαδικασία λόγω των υφισταμένων εναλλακτικών λύσεων, των στόχων, των περιορισμών και των αβεβαιοτήτων που παρουσιάζονται. Ως εκ τούτου εμφανίζονται διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης κατά τη διαδικασία σχεδιασμού ενός μικροδικτύου. Στη βιβλιογραφία έχουν ληφθεί υπόψη αρκετοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για διάφορα προβλήματα σχεδιασμού μικροδικτύων. Μία σημαντική έρευνα θα αποτελούσε η σύγκριση των διαφόρων καινοτόμων αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου αλγορίθμου στο αντίστοιχο πρόβλημα σχεδιασμού.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης μολύβδου οξέος αποτελούν τους κύριους συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται σε ενεργειακά συστήματα. Οι συσσωρευτές μολύβδου οξέος αποτελούν μια από τις λιγότερο δαπανηρές επιλογές στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας, όμως παρουσιάζουν μικρή διάρκεια ζωής και μικρό βάθος εκφόρτισης. Πρόκειται για συσσωρευτές με μεγάλη αξιοπιστία, αλλά με μεγάλο βάρος και μικρή πυκνότητα ενέργειας. Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου αποτελούν τη περισσότερο αναπτυσσόμενη τεχνολογία στο χώρο των συσσωρευτών τα τελευταία χρόνια. Στα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών λιθίου περιλαμβάνονται το μικρό βάρος τους, η πολύ καλή απόδοσή τους, το γεγονός ότι η διαθέσιμη χωρητικότητά τους δε μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης και η ικανότητά τους για ταχεία φόρτιση. Μία εναλλακτική μονάδα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν οι υβριδικοί πυκνωτές που μελετήθηκαν εκτενώς και χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά σε ένα μικροδίκτυο, στη συγκεκριμένη διατριβή. Επομένως, μελλοντική έρευνα πρέπει να αποτελέσει η υβριδοποίηση των πηγών ενέργειας, όπου δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας θα πρέπει να συνδυάζονται με σκοπό τα πλεονεκτήματα της μίας μονάδας αποθήκευσης να αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα της άλλης.

Οι προτεινόμενες τοπολογίες και τα καινοτόμα συστήματα διαχείρισης και ελέγχου ενεργειακών συστημάτων πρέπει να εφαρμοστούν και να δοκιμαστούν σε διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα υπό πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος, βάσει ενός συνόλου κριτηρίων βελτιστοποίησης. Τα κριτήρια θα αποδίδουν προτεραιότητα στη μέγιστη παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ και στην παροχή υπηρεσιών υποστήριξης του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την τεχνικά και οικονομικά αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Επίσης, να εφαρμοστούν και σε άλλες εφαρμογές που αντιμετωπίζουν προβλήματα με το ηλεκτρικό δίκτυο ή βρίσκονται μακριά από αυτό όπως κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, θερμοκήπια, στάβλοι και φάρμες.

Βιβλιογραφία

- [1] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, "Distributed generation: a definition," *Electric Power System Research*, vol. 57, pp: 195-204," 2001.
- [2] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, "Distributed generation: definition, benefits and issues," *Energy policy*, vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [3] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 24, pp. 387-405, 2013.
- [4] K. Purchala, R. Belmans, L. Exarchakos, and A. Hawkes, "Distributed generation and the grid integration issues," *Imperial College London, UK, EUSUSTEL, Work Package*, vol. 3, 2006.
- [5] R. H. Lasseter, "Microgrids," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*, 2002, pp. 305-308.
- [6] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE power and energy magazine*, vol. 5, pp. 78-94, 2007.
- [7] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE Trans. Power Syst*, vol. 28, pp. 3380-3389, 2013.
- [8] N. Lidula and A. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 186-202, 2011.
- [9] N. Eghtedarpour and E. Farjah, "Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 5, pp. 1494-1505, 2014.
- [10] X. Liu, P. Wang, and P. C. Loh, "A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, pp. 278-286, 2011.
- [11] K. Kurohane, T. Senjyu, A. Yona, N. Urasaki, T. Goya, and T. Funabashi, "A hybrid smart AC/DC power system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, pp. 199-204, 2010.
- [12] B. Dunn, H. Kamath, and J.-M. Tarascon, "Electrical energy storage for the grid: a battery of choices," *Science*, vol. 334, pp. 928-935, 2011.
- [13] X. Hu, N. Murgovski, L. M. Johannesson, and B. Egardt, "Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management," *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, vol. 15, pp. 1193-1205, 2014.
- [14] M. Soshinskaya, W. H. Crijns-Graus, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Microgrids: Experiences, barriers and success factors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 659-672, 2014.
- [15] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems – characteristics and comparisons," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.

- [16] X. Tan, Q. Li, and H. Wang, "Advances and trends of energy storage technology in Microgrid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp. 179-191, 2013.
- [17] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499-514, 2014.
- [18] G. Delille, B. François, and G. Malarange, "Dynamic frequency control support: A virtual inertia provided by distributed energy storage to isolated power systems," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*, 2010, pp. 1-8.
- [19] A. J. Cavallo, "Energy storage technologies for utility scale intermittent renewable energy systems," *Journal of solar energy engineering*, vol. 123, pp. 387-389, 2001.
- [20] S. Koochi-Kamali, V. Tyagi, N. Rahim, N. Panwar, and H. Mokhlis, "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 135-165, 2013.
- [21] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, "Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 26, pp. 923-930, 2011.
- [22] N. Jayawarna, C. Jones, M. Barnes, and N. Jenkins, "Operating microgrid energy storage control during network faults," in *System of Systems Engineering, 2007. SoSE'07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 1-7.
- [23] K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, "Microgrid wireless energy management with energy storage system," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International*, 2012, pp. 1-6.
- [24] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, and A. Q. Huang, "Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, pp. 117-124, 2010.
- [25] J. Mitra and M. R. Vallem, "Determination of storage required to meet reliability guarantees on island-capable microgrids with intermittent sources," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 2360-2367, 2012.
- [26] H. Wei, W. Xin, G. Jiahuan, Z. Jianhua, and Y. Jingyan, "Discussion on application of super capacitor energy storage system in microgrid," in *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [27] J. P. Barton and D. G. Infield, "Energy storage and its use with intermittent renewable energy," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 19, pp. 441-448, 2004.
- [28] W. Li and G. Joós, "Performance comparison of aggregated and distributed energy storage systems in a wind farm for wind power fluctuation suppression," in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 2007, pp. 1-6.
- [29] N. Hatziargyriou, A. Anastasiadis, J. Vasiljevska, and A. Tsikalakis, "Quantification of economic, environmental and operational benefits of microgrids," in *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, 2009, pp. 1-8.

- [30] G. Y. Morris, C. Abbey, S. Wong, and G. Joos, "Evaluation of the costs and benefits of microgrids with consideration of services beyond energy supply," in *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-9.
- [31] G. Y. Morris, C. Abbey, G. Joos, and C. Marnay, "A Framework for the Evaluation of the Cost and Benefits of Microgrids," 2011.
- [32] A. Dimeas, A. Tsikalakis, G. Kariniotakis, and G. Korres, "Microgrids control issues," *Microgrids*, pp. 25-80, 2013.
- [33] N. Hatziargyriou, A. Dimeas, and A. Tsikalakis, "Centralized and decentralized control of microgrids," *International Journal of Distributed Energy Resources*, vol. 1, pp. 197-212, 2005.
- [34] H. Bossel, *Systems and models: complexity, dynamics, evolution, sustainability: BoD-Books on Demand*, 2007.
- [35] L. E. Jones, *Renewable energy integration: practical management of variability, uncertainty, and flexibility in power grids*: Academic Press, 2017.
- [36] M. Uzunoglu, O. Onar, and M. Alam, "Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications," *Renewable energy*, vol. 34, pp. 509-520, 2009.
- [37] R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustín, and J. Contreras, "Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage," *Renewable energy*, vol. 32, pp. 1102-1126, 2007.
- [38] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, pp. 158-172, 2011.
- [39] Q. Shafiee, T. Dragičević, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, pp. 922-933, 2014.
- [40] A. Milczarek, M. Malinowski, and J. M. Guerrero, "Reactive power management in islanded microgrid – Proportional power sharing in hierarchical droop control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1631-1638, 2015.
- [41] K. Rouzbehi, A. Miranian, A. Luna, and P. Rodriguez, "DC voltage control and power sharing in multiterminal DC grids based on optimal DC power flow and voltage-droop strategy," *IEEE Journal of Emerging and selected topics in power Electronics*, vol. 2, pp. 1171-1180, 2014.
- [42] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, S. Rozakis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Polygeneration microgrids: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4517-4526, 2011.
- [43] C. Corchero, M. Cruz-Zambrano, and F.-J. Heredia, "Optimal energy management for a residential microgrid including a vehicle-to-grid system," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 5, pp. 2163-2172, 2014.
- [44] D. Tenfen and E. C. Finardi, "A mixed integer linear programming model for the energy management problem of microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 19-28, 2015.

- [45] A. G. Tsikalakis and N. D. Hatziargyriou, "Centralized control for optimizing microgrids operation," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 2011, pp. 1-8.
- [46] A. Hawkes and M. Leach, "Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid," *Applied energy*, vol. 86, pp. 1253-1265, 2009.
- [47] R. Palma-Behnke, C. Benavides, F. Lanas, B. Severino, L. Reyes, J. Llanos, *et al.*, "A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 996-1006, 2013.
- [48] H. K. Nunna and S. Doolla, "Multiagent-based distributed-energy-resource management for intelligent microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1678-1687, 2013.
- [49] S. Conti, R. Nicolosi, S. Rizzo, and H. Zeineldin, "Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV islanded microgrids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1243-1251, 2012.
- [50] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, and G. Hu, "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *IET renewable power generation*, vol. 5, pp. 258-267, 2011.
- [51] Y. Zhang, N. Gatsis, and G. B. Giannakis, "Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, pp. 944-953, 2013.
- [52] C. M. Colson, M. H. Nehrir, R. K. Sharma, and B. Asghari, "Improving sustainability of hybrid energy systems part I: Incorporating battery round-trip efficiency and operational cost factors," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 37-45, 2014.
- [53] C. M. Colson, M. H. Nehrir, R. K. Sharma, and B. Asghari, "Improving sustainability of hybrid energy systems part II: Managing multiple objectives with a multiagent system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 46-54, 2014.
- [54] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, "Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters," 2008.
- [55] A. Colet-Subirachs, A. Ruiz-Alvarez, O. Gomis-Bellmunt, F. Alvarez-Cuevas-Figuerola, and A. Sudria-Andreu, "Centralized and distributed active and reactive power control of a utility connected microgrid using IEC61850," *IEEE Systems Journal*, vol. 6, pp. 58-67, 2012.
- [56] A. Borghetti, M. Bosetti, S. Grillo, S. Massucco, C. A. Nucci, M. Paolone, *et al.*, "Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources," *IEEE Systems Journal*, vol. 4, pp. 313-322, 2010.
- [57] A. Vaccaro, M. Popov, D. Villacci, and V. Terzija, "An integrated framework for smart microgrids modeling, monitoring, control, communication, and verification," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, pp. 119-132, 2011.
- [58] R. Zamora and A. K. Srivastava, "Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2009-2018, 2010.

- [59] N. Anglani, G. Oriti, and M. Colombini, "Optimized energy management system to reduce fuel consumption in remote military microgrids," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 5777-5785, 2017.
- [60] D. D. Siljak, *Decentralized control of complex systems*: Courier Corporation, 2011.
- [61] J. Kramer and J. Magee, "Self-managed systems: an architectural challenge," in *2007 Future of Software Engineering*, 2007, pp. 259-268.
- [62] B. Shi and J. Liu, "Decentralized control and fair load-shedding compensations to prevent cascading failures in a smart grid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 582-590, 2015.
- [63] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, "Advanced control architectures for intelligent microgrids-Part I: Decentralized and hierarchical control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1254-1262, 2013.
- [64] W. Shi, X. Xie, C.-C. P. Chu, and R. Gadh, "Distributed Optimal Energy Management in Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, pp. 1137-1146, 2015.
- [65] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, pp. 136-143, 1993.
- [66] E. Planas, A. Gil-de-Muro, J. Andreu, I. Kortabarria, and I. M. de Alegría, "General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 17, pp. 147-159, 2013.
- [67] R. Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, and F. Zare, "Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2768-2778, 2010.
- [68] V. Nasirian, S. Moayedi, A. Davoudi, and F. L. Lewis, "Distributed cooperative control of dc microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 2288-2303, 2015.
- [69] W. Liu, W. Gu, W. Sheng, X. Meng, Z. Wu, and W. Chen, "Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 446-456, 2014.
- [70] Y. Xu and W. Liu, "Novel multiagent based load restoration algorithm for microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 152-161, 2011.
- [71] J. Ferber and G. Weiss, *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence* vol. 1: Addison-Wesley Reading, 1999.
- [72] G. Weiss, *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*: MIT press, 1999.
- [73] D. Weyns, H. V. D. Parunak, F. Michel, T. Holvoet, and J. Ferber, "Environments for multiagent systems state-of-the-art and research challenges," in *International Workshop on Environments for Multi-Agent Systems*, 2004, pp. 1-47.
- [74] M. Wooldridge, *An introduction to multiagent systems*: John Wiley & Sons, 2009.
- [75] Y. Shoham and K. Leyton-Brown, *Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*: Cambridge University Press, 2008.
- [76] S. Russell, "Artificial Intelligence: A Modern Approach Author: Stuart Russell," *Peter Norvig, Publisher: Prentice Hall Pa*, 2009.

- [77] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial intelligence: a modern approach*: Malaysia; Pearson Education Limited, 2016.
- [78] M. Wooldridge, "Intelligent agents: The key concepts," in *ECCAI Advanced Course on Artificial Intelligence*, 2001, pp. 3-43.
- [79] C. M. Colson and M. H. Nehrir, "Comprehensive real-time microgrid power management and control with distributed agents," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 617-627, 2013.
- [80] M. Mao, P. Jin, N. D. Hatziargyriou, and L. Chang, "Multiagent-based hybrid energy management system for microgrids," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 938-946, 2014.
- [81] J. Jimeno, J. Anduaga, J. Oyarzabal, and A. G. de Muro, "Architecture of a microgrid energy management system," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, pp. 1142-1158, 2011.
- [82] A. L. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control," *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 20, pp. 1447-1455, 2005.
- [83] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, and H. N. Aung, "Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 3, pp. 925-933, 2012.
- [84] S. Ghorbani, R. Rahmani, and R. Unland, "Multi-agent autonomous decision making in smart micro-grids' energy management: a decentralized approach," in *German Conference on Multiagent System Technologies*, 2017, pp. 223-237.
- [85] T. Bogaraj and J. Kanakaraj, "Intelligent energy management control for independent microgrid," *Sādhanā*, vol. 41, pp. 755-769, 2016.
- [86] A. Anvari-Moghaddam, A. Rahimi-Kian, M. S. Mirian, and J. M. Guerrero, "A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system," *Applied Energy*, vol. 203, pp. 41-56, 2017.
- [87] H. K. Nunna and S. Doolla, "Energy management in microgrids using demand response and distributed storage – A multiagent approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, pp. 939-947, 2013.
- [88] C.-X. Dou and B. Liu, "Multi-agent based hierarchical hybrid control for smart microgrid," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 4, pp. 771-778, 2013.
- [89] Z. Wu and W. Gu, "Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology [J]," *Electric Power Automation Equipment*, vol. 11, pp. 57-61, 2009.
- [90] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman, "Securing critical loads in a PV-based microgrid with a multi-agent system," *Renewable Energy*, vol. 39, pp. 166-174, 2012.
- [91] C. Yuen, A. Oudalov, and A. Timbus, "The provision of frequency control reserves from multiple microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 173-183, 2011.
- [92] R. Velik and P. Nicolay, "A cognitive decision agent architecture for optimal energy management of microgrids," *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 831-847, 2014.

- [93] N. D. Hatziargyriou, A. Dimeas, A. G. Tsikalakis, J. P. Lopes, G. Karniotakis, and J. Oyarzabal, "Management of microgrids in market environment," in *Future Power Systems, 2005 International Conference on*, 2005, pp. 7 pp.-7.
- [94] G. Comodi, A. Giantomassi, M. Severini, S. Squartini, F. Ferracuti, A. Fonti, *et al.*, "Multi-apartment residential microgrid with electrical and thermal storage devices: Experimental analysis and simulation of energy management strategies," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 854-866, 2015.
- [95] J. Shen, C. Jiang, Y. Liu, and J. Qian, "A microgrid energy management system with demand response for providing grid peak shaving," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, pp. 843-852, 2016.
- [96] P. P. Vergara, J. C. López, L. C. da Silva, and M. J. Rider, "Security-constrained optimal energy management system for three-phase residential microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 146, pp. 371-382, 2017.
- [97] D. E. Olivares, C. A. Cañizares, and M. Kazerani, "A centralized energy management system for isolated microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, pp. 1864-1875, 2014.
- [98] S. Helal, R. Najee, M. Hanna, M. Shaaban, A. Osman, and M. Hassan, "An energy management system for hybrid microgrids in remote communities," in *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2017 IEEE 30th Canadian Conference on*, 2017, pp. 1-4.
- [99] A. C. Luna, L. Meng, N. L. Diaz, M. Graells, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Online energy management systems for microgrids: experimental validation and assessment framework," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, pp. 2201-2215, 2018.
- [100] M. Elsied, A. Oukaour, T. Youssef, H. Gualous, and O. Mohammed, "An advanced real time energy management system for microgrids," *Energy*, vol. 114, pp. 742-752, 2016.
- [101] S. Chalise, J. Sternhagen, T. M. Hansen, and R. Tonkoski, "Energy management of remote microgrids considering battery lifetime," *The Electricity Journal*, vol. 29, pp. 1-10, 2016.
- [102] S. Golshannavaz, S. Afsharnia, and P. Siano, "A comprehensive stochastic energy management system in reconfigurable microgrids," *International Journal of Energy Research*, vol. 40, pp. 1518-1531, 2016.
- [103] J. Radosavljević, M. Jevtić, and D. Klimenta, "Energy and operation management of a microgrid using particle swarm optimization," *Engineering Optimization*, vol. 48, pp. 811-830, 2016.
- [104] H. Li, A. T. Eseye, J. Zhang, and D. Zheng, "Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 2, p. 12, 2017.
- [105] S. A. Alavi, A. Ahmadian, and M. Aliakbar-Golkar, "Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based-on robust optimization and point estimate method," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 314-325, 2015.
- [106] M. Manbachi and M. Ordóñez, "Ami-based energy management for islanded ac/dc microgrids utilizing energy conservation and optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017.

- [107] V. Mohan, J. G. Singh, and W. Ongsakul, "An efficient two stage stochastic optimal energy and reserve management in a microgrid," *Applied energy*, vol. 160, pp. 28-38, 2015.
- [108] D. Arcos-Aviles, J. Pascual, F. Guinjoan, L. Marroyo, P. Sanchis, and M. P. Marietta, "Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting," *Applied energy*, vol. 205, pp. 69-84, 2017.
- [109] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 315-327, 2012.
- [110] A. Chaouachi, R. M. Kamel, R. Andoulsi, and K. Nagasaka, "Multiobjective intelligent energy management for a microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1688-1699, 2013.
- [111] J. Llanos, D. Sáez, R. Palma-Behnke, A. Núñez, and G. Jiménez-Estévez, "Load profile generator and load forecasting for a renewable based microgrid using self organizing maps and neural networks," in *Neural Networks (IJCNN), The 2012 International Joint Conference on*, 2012, pp. 1-8.
- [112] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "A fuzzy cognitive maps-petri nets energy management system for autonomous polygeneration microgrids," *Applied Soft Computing*, vol. 12, pp. 3785-3797, 2012.
- [113] D. Fudenberg and J. Tirole, "Game theory, 1991," *Cambridge, Massachusetts*, vol. 393, p. 80, 1991.
- [114] T. Basar and G. J. Olsder, *Dynamic noncooperative game theory* vol. 23: Siam, 1999.
- [115] C. F. Camerer, *Behavioral game theory: Experiments in strategic interaction*: Princeton University Press, 2011.
- [116] J. Nash, "Non-cooperative games," *Annals of mathematics*, pp. 286-295, 1951.
- [117] J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of games and economic behavior (commemorative edition)*: Princeton university press, 2007.
- [118] J. F. Nash, "Equilibrium points in n-person games," *Proceedings of the national academy of sciences*, vol. 36, pp. 48-49, 1950.
- [119] N. Liu, X. Yu, C. Wang, and J. Wang, "Energy sharing management for microgrids with PV prosumers: A Stackelberg game approach," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 13, pp. 1088-1098, 2017.
- [120] L. Ma, N. Liu, J. Zhang, W. Tushar, and C. Yuen, "Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: A game theoretic approach," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, pp. 1930-1942, 2016.
- [121] Y. Lan, X. Guan, and J. Wu, "Rollout strategies for real-time multi-energy scheduling in microgrid with storage system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 688-696, 2016.
- [122] Y. Wang, W. Saad, Z. Han, H. V. Poor, and T. Başar, "A game-theoretic approach to energy trading in the smart grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 1439-1450, 2014.

- [123] M. R. B. Khan, R. Jidin, and J. Pasupuleti, "Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 112, pp. 288-307, 2016.
- [124] T. Agarwal and S. Cui, "Noncooperative games for autonomous consumer load balancing over smart grid," in *International Conference on Game Theory for Networks*, 2012, pp. 163-175.
- [125] E. R. Stephens, D. B. Smith, and A. Mahanti, "Game theoretic model predictive control for distributed energy demand-side management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1394-1402, 2015.
- [126] H. Yin, C. Zhao, M. Li, C. Ma, and M.-Y. Chow, "A Game Theory Approach to Energy Management of An Engine-Generator/Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy System," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 4266-4277, 2016.
- [127] I. Atzeni, L. G. Ordóñez, G. Scutari, D. P. Palomar, and J. R. Fonollosa, "Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 866-876, 2013.
- [128] W. Saad, Z. Han, H. V. Poor, and T. Basar, "Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 29, pp. 86-105, 2012.
- [129] H. Asano and S. Bando, "Economic evaluation of microgrids," in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-6.
- [130] H. Asano and S. Bando, "Optimization of a microgrid investment and operation: Energy saving effects and feasibility of ancillary service provision," in *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009*, 2009, pp. 1-4.
- [131] H. Asano, S. Bando, and H. Watanabe, "Methodology to Design the Capacity of a Microgrid," in *System of Systems Engineering, 2007. SoSE'07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 1-6.
- [132] S. Petropoulos, C. S. Karavas, A. T. Balafoutis, I. Paraskevopoulos, S. Kallithraka, and Y. Kotseridis, "Fuzzy logic tool for wine quality classification," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 142, pp. 552-562, 2017.
- [133] D. Dubois and H. Prade, "Operations on fuzzy numbers," *International Journal of systems science*, vol. 9, pp. 613-626, 1978.
- [134] G. Bortolan and R. Degani, "A review of some methods for ranking fuzzy subsets," in *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, ed: Elsevier, 1993, pp. 149-158.
- [135] L. I. Kuncheva, "How good are fuzzy if-then classifiers?," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 30, pp. 501-509, 2000.
- [136] B. Kosko, "Fuzzy cognitive maps," *International journal of man-machine studies*, vol. 24, pp. 65-75, 1986.
- [137] B. Kosko, *Neural networks for signal processing*: Prentice-Hall, Inc., 1992.
- [138] C. E. Peláez and J. B. Bowles, "Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis," *Information Sciences*, vol. 88, pp. 177-199, 1996.
- [139] S. Bueno and J. L. Salmeron, "Benchmarking main activation functions in fuzzy cognitive maps," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 5221-5229, 2009.

- [140] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of machine learning*, ed: Springer, 2011, pp. 760-766.
- [141] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization," *Swarm intelligence*, vol. 1, pp. 33-57, 2007.
- [142] T.-J. Su, T.-H. Lin, and J.-W. Liu, "Particle Swarm Optimization for Gray-Scale Image Noise Cancellation," in *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2008. IHHMSP'08 International Conference on*, 2008, pp. 1459-1462.
- [143] M. J. Osborne and A. Rubinstein, *A course in game theory*: MIT press, 1994.
- [144] P. Aristidou, A. Dimeas, and N. Hatziargyriou, "Microgrid modelling and analysis using game theory methods," in *International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*, 2010, pp. 12-19.
- [145] B. U. Kansara and B. Parekh, "Modelling and simulation of distributed generation system using HOMER software," in *Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEeCE), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 328-332.
- [146] D. K. Lal, B. B. Dash, and A. Akella, "Optimization of PV/wind/micro-hydro/diesel hybrid power system in HOMER for the study area," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 3, p. 307, 2011.
- [147] M. K. Shahzad, A. Zahid, T. ur Rashid, M. A. Rehan, M. Ali, and M. Ahmad, "Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software," *Renewable energy*, vol. 106, pp. 264-273, 2017.
- [148] G. S. Rao, K. H. Reddy, and G. D. Vaddeswaram, "Design and Technical Analysis of Hybrid Renewable Energy System with Homer Software," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 116, pp. 79-84, 2017.
- [149] F. Barbir, "PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources," *Solar energy*, vol. 78, pp. 661-669, 2005.
- [150] A. Yilanci, I. Dincer, and H. Ozturk, "Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar-hydrogen system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 7538-7552, 2008.
- [151] E. Dimitriou, E. S. Mohamed, C. Karavas, and G. Papadakis, "Experimental comparison of the performance of two reverse osmosis desalination units equipped with different energy recovery devices," *Desalination and Water Treatment*, vol. 55, pp. 3019-3026, 2015.
- [152] M. A. Hannan, M. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, 2017.
- [153] X. Hu, F. Sun, and Y. Zou, "Comparison between two model-based algorithms for Li-ion battery SOC estimation in electric vehicles," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 34, pp. 1-11, 2013.
- [154] C.-S. Karavas, K. Arvanitis, and G. Papadakis, "A Game Theory Approach to Multi-Agent Decentralized Energy Management of Autonomous Polygeneration Microgrids," *Energies*, vol. 10, p. 1756, 2017.

- [155] C.-S. Karavas, K. G. Arvanitis, G. Kyriakarakos, D. D. Piromalis, and G. Papadakis, "A novel autonomous PV powered desalination system based on a DC microgrid concept incorporating short-term energy storage," *Solar Energy*, vol. 159, pp. 947-961, 2018.
- [156] C.-S. Karavas, G. Kyriakarakos, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "A multi-agent decentralized energy management system based on distributed intelligence for the design and control of autonomous polygeneration microgrids," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 166-179, 2015.
- [157] S. N. Gosling and N. W. Arnell, "A global assessment of the impact of climate change on water scarcity," *Climatic Change*, vol. 134, pp. 371-385, 2016.
- [158] M. Parry, M. L. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. Van der Linden, and C. Hanson, *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC* vol. 4: Cambridge University Press, 2007.
- [159] S. Postel, *The last oasis: facing water scarcity*: Routledge, 2014.
- [160] A. Gohari, S. Eslamian, A. Mirchi, J. Abedi-Koupaei, A. M. Bavani, and K. Madani, "Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire," *Journal of Hydrology*, vol. 491, pp. 23-39, 2013.
- [161] J. Gupta and P. van der Zaag, "Interbasin water transfers and integrated water resources management: Where engineering, science and politics interlock," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 33, pp. 28-40, 2008.
- [162] A. Bagheri and P. Hjorth, "A framework for process indicators to monitor for sustainable development: practice to an urban water system," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 9, pp. 143-161, 2007.
- [163] K. Madani and J. R. Lund, "California's Sacramento-San Joaquin delta conflict: from cooperation to chicken," *Journal of water resources planning and management*, vol. 138, pp. 90-99, 2011.
- [164] C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, and T. Melin, "State-of-the-art of reverse osmosis desalination," *Desalination*, vol. 216, pp. 1-76, 2007.
- [165] P. Gleick, "The World's Water Volume 7: The Biennial Report on Freshwater Resources, The World's Water," DOI 10.5822/978-1-61091-048-4 Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security 2012.
- [166] H. M. Qiblawey and F. Banat, "Solar thermal desalination technologies," *Desalination*, vol. 220, pp. 633-644, 2008.
- [167] G. P. Narayan, M. H. Sharqawy, E. K. Summers, J. H. Lienhard, S. M. Zubair, and M. Antar, "The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, pp. 1187-1201, 2010.
- [168] K. P. Lee, T. C. Arnot, and D. Mattia, "A review of reverse osmosis membrane materials for desalination – development to date and future potential," *Journal of Membrane Science*, vol. 370, pp. 1-22, 2011.
- [169] L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, and P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges," *Water research*, vol. 43, pp. 2317-2348, 2009.

- [170] E. S. Mohamed and G. Papadakis, "Advances of renewable energy powered desalination," *Handbook of Clean Energy Systems*, pp. 1-10, 2015.
- [171] N. Ghaffour, S. Lattemann, T. Missimer, K. C. Ng, S. Sinha, and G. Amy, "Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies," *Applied energy*, vol. 136, pp. 1155-1165, 2014.
- [172] D. Herold and A. Neskakis, "A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria," *Desalination*, vol. 137, pp. 285-292, 2001.
- [173] C. C. Liu, P. Jae-Woo, R. Migita, and Q. Gang, "Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system with feedback control," *Desalination*, vol. 150, pp. 277-287, 2002.
- [174] D. Manolakos, G. Kosmadakis, S. Kyritsis, and G. Papadakis, "On site experimental evaluation of a low-temperature solar organic Rankine cycle system for RO desalination," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 646-656, 2009.
- [175] M. Thomson and D. Infield, "A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries," *Desalination*, vol. 153, pp. 1-8, 2003.
- [176] C.-S. Karavas and G. Papadakis, "Renewable Energy Driven Small-Scale Sea Water Reverse Osmosis Desalination Systems: A Survey," *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, vol. 7, p. e115, 2017.
- [177] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vázquez, and G. Ríos-Moreno, "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1077-1088, 2012.
- [178] K. Zhou, J. Ferreira, and S. De Haan, "Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems," *International journal of hydrogen energy*, vol. 33, pp. 477-489, 2008.
- [179] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Design of a Fuzzy Cognitive Maps variable-load energy management system for autonomous PV-reverse osmosis desalination systems: A simulation survey," *Applied Energy*, vol. 187, pp. 575-584, 2017.
- [180] L. G. Palacin, F. Tadeo, C. De Prada, and J. Salazar, "Operation of desalination plants using renewable energies and hybrid control," *Desalination and Water Treatment*, vol. 25, pp. 119-126, 2011.
- [181] A. Ghobeity and A. Mitsos, "Optimal time-dependent operation of seawater reverse osmosis," *Desalination*, vol. 263, pp. 76-88, 2010.
- [182] W. H. Organization, W. U. J. W. Supply, and S. M. Programme, *Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment: World Health Organization*, 2015.
- [183] H. E. Pinkerton, "Fluid handling system," ed: Google Patents, 1979.
- [184] M. Francis and R. Pashley, "The effects of feed water temperature and dissolved gases on permeate flow rate and permeate conductivity in a pilot scale reverse osmosis desalination unit," *Desalination and Water Treatment*, vol. 36, pp. 363-373, 2011.
- [185] E. Ntavou, G. Kosmadakis, D. Manolakos, G. Papadakis, and D. Papantonis, "Experimental evaluation of a multi-skid reverse osmosis unit operating at fluctuating power input," *Desalination*, vol. 398, pp. 77-86, 2016.

- [186] I. S. Al-Mutaz and M. A. Al-Ghunaimi, "Performance of reverse osmosis units at high temperatures," in *The IDA world congress on desalination and water reuse, Bahrain, 2001*, pp. 26-31.
- [187] A. N. Bdour, M. R. Hamdi, and Z. Tarawneh, "Perspectives on sustainable wastewater treatment technologies and reuse options in the urban areas of the Mediterranean region," *Desalination*, vol. 237, pp. 162-174, 2009.
- [188] J. M. García-Ruiz, J. I. López-Moreno, S. M. Vicente-Serrano, T. Lasanta-Martínez, and S. Beguería, "Mediterranean water resources in a global change scenario," *Earth-Science Reviews*, vol. 105, pp. 121-139, 2011.
- [189] K. Zotalis, E. Dialynas, N. Mamassis, and A. Angelakis, "Desalination technologies: hellenic experience," *Water*, vol. 6, pp. 1134-1150, 2014.
- [190] A. Kartalidis, E. Tzen, E. Kampragkou, and D. Assimacopoulos, "Responding to water challenges in Greece through desalination: energy considerations," *International Journal of Water Resources Development*, vol. 32, pp. 428-441, 2016.
- [191] J. Kaldellis, K. Kavadias, and E. Kondili, "Renewable energy desalination plants for the Greek islands- technical and economic considerations," *Desalination*, vol. 170, pp. 187-203, 2004.
- [192] N. Duić and M. da Graça Carvalho, "Increasing renewable energy sources in island energy supply: case study Porto Santo," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 8, pp. 383-399, 2004.
- [193] J. Kaldellis, A. Gkikaki, E. Kaldelli, and M. Kapsali, "Investigating the energy autonomy of very small non-interconnected islands: A case study: Agathonisi, Greece," *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, pp. 476-485, 2012.
- [194] G. Xydis, "Comparison study between a renewable energy supply system and a supergrid for achieving 100% from renewable energy sources in Islands," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, pp. 198-210, 2013.
- [195] D. Teichmann, K. Stark, K. Müller, G. Zöttl, P. Wasserscheid, and W. Arlt, "Energy storage in residential and commercial buildings via Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)," *Energy & Environmental Science*, vol. 5, pp. 9044-9054, 2012.
- [196] E. S. Mohamed and G. Papadakis, "Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics," *Desalination*, vol. 164, pp. 87-97, 2004.
- [197] M. Wilf, "Fundamentals of RO-NF technology," in *International conference on desalination costing, Limassol, 2004*.
- [198] A. Jossen, J. Garche, and D. U. Sauer, "Operation conditions of batteries in PV applications," *Solar energy*, vol. 76, pp. 759-769, 2004.
- [199] G. Kyriakarakos, D. D. Piromalis, K. G. Arvanitis, A. I. Dounis, and G. Papadakis, "On battery-less autonomous polygeneration microgrids: Investigation of the combined hybrid capacitors/hydrogen alternative," *Energy Conversion and Management*, vol. 91, pp. 405-415, 2015.
- [200] E. Hittinger, T. Wiley, J. Kluza, and J. Whitacre, "Evaluating the value of batteries in microgrid electricity systems using an improved Energy Systems Model," *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 458-472, 2015.

- [201] J. Proczka, K. Muralidharan, D. Villela, J. Simmons, and G. Frantziskonis, "Guidelines for the pressure and efficient sizing of pressure vessels for compressed air energy storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 597-605, 2013.
- [202] E. Fertig and J. Apt, "Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 2330-2342, 2011.
- [203] P. Denholm and G. L. Kulcinski, "Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 2153-2172, 2004.
- [204] M. Chen and G. A. Rincón-Mora, "Accurate, compact, and power-efficient Li-ion battery charger circuit," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 53, pp. 1180-1184, 2006.
- [205] P. Rong and M. Pedram, "An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 14, pp. 441-451, 2006.
- [206] P. Brooks, "Ethernet/IP-industrial protocol," in *ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No.01TH8597)*, 2001, pp. 505-514 vol.2.
- [207] J. Machacek and J. Drapela, "Control of serial port (RS-232) communication in LabVIEW," in *Modern Technique and Technologies, 2008. MTT 2008. International Conference*, 2008, pp. 36-40.
- [208] N. Mutoh, M. Ohno, and T. Inoue, "A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, pp. 1055-1065, 2006.
- [209] S. Mei, Y. Wang, F. Liu, X. Zhang, and Z. Sun, "Game approaches for hybrid power system planning," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, pp. 506-517, 2012.
- [210] S. Anuphapparadorn, S. Sukchai, C. Sirisamphanwong, and N. Ketjoy, "Comparison the economic analysis of the battery between lithium-ion and lead-acid in PV stand-alone application," *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 352-358, 2014.
- [211] J. Shen, S. Dusmez, and A. Khaligh, "Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications," *IEEE Transactions on industrial informatics*, vol. 10, pp. 2112-2121, 2014.
- [212] H. Yin, C. Zhao, M. Li, and C. Ma, "Utility function-based real-time control of a battery ultracapacitor hybrid energy system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, pp. 220-231, 2015.