



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

## **Διπλωματική Εργασία**

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΗΡΙΟΥ ΜΕ**  
**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

**Βασίλειος Μαντέλος**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)**

**Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος**

**Αναπλ. Καθηγητής Γυφτάκης Κωνσταντίνος**

**Χανιά, Απρίλιος 2024**

# Πρόλογος

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έχει ως στόχο την έρευνα, την ανάλυση καθώς και την βελτιστοποίηση συστήματος το οποίο αποτελείται κατά βάση από πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον όπως είναι η ενέργεια που παράγεται από την ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακή ενέργεια) αλλά και το υδρογόνο. Πρωταρχικό μέλημα είναι η παρουσίαση ενός αξιόπιστου και αυτόνομου συστήματος που διαχειρίζεται βέλτιστα την ενέργεια που διαθέτει με στόχο την κάλυψη των φορτίων ενός κτηρίου, εστιάζοντας παράλληλα και στην ελαχιστοποίηση του κόστους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Ευτύχιο Κουτρούλη για την βοήθεια και την άριστη συνεργασία καθ'όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, αλλά και τους Καθηγητές κ. Κωνσταντίνο Γυφτάκη και κ. Φώτιο Κανέλλο για την συμβολή τους στην εξεταστική επιτροπή.

## Περίληψη

Ο βασικός στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας συστήματος που μπορεί να καλύψει τα ηλεκτρικά αλλά και θερμικά φορτία ενός κτηρίου. Το σύστημα αυτό, στην αρχική του μορφή, αποτελείται από συστοιχία φωτοβολταϊκών (Φ/Β) σαν κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος, κυψέλη καυσίμου ως συμπληρωματική πηγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας του συστήματος και συστοιχία μπαταριών που λειτουργεί εξίσου συμπληρωματικά για την κάλυψη των φορτίων σε ώρες αιχμής. Στην εργασία αρχικά μελετώνται και αναλύονται τα υποσυστήματα που απαρτίζουν το βασικό σύστημα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται και αναλύονται τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και ο τρόπος λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων, των κυψελών καυσίμου, των μπαταριών αλλά και του συστήματος ηλεκτρόλυσης που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή υδρογόνου σε κάποιες περιπτώσεις. Στην συνέχεια, γίνεται μια σύντομη ανάλυση του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO) που χρησιμοποιείται στην βελτιστοποίηση της ενεργειακής διαχείρισης με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος αλλά και του αλγορίθμου Εξαντλητικής Αναζήτησης (Exhaustive Search), ο οποίος επαληθεύει και επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα της PSO. Έπειτα, παρουσιάζεται η προσομοίωση του συστήματος στην βασική του μορφή αλλά και σε διαφοροποιημένες μορφές, με στόχο την παρατήρηση της συμπεριφοράς του συστήματος και του κόστους σε κάποιες παραλλαγές. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στα αποτελέσματα μέσω γραφημάτων που προέκυψαν από την υλοποίηση του κώδικα στο πρόγραμμα Matlab. Τέλος, αναφέρονται συμπεράσματα και παρατηρήσεις σχετικά με την απόδοση λειτουργίας αλλά και το οικονομικό κόστος του συστήματος ανάλογα με την δομή του και τις διαφορετικές κρίσιμες συνθήκες που εξετάζονται.

## Abstract

The current thesis is formulated to enhance the energy management of a system capable of covering both the electrical and thermal loads of a building. Initially, the basic system form comprises a photovoltaic array as the primary energy source, fuel cells as a supplementary source of electrical and thermal energy, and a battery bank that operates equally supplementarily to cover loads during peak hours. In the thesis, the subsystems and components that constitute the core system are initially studied and analyzed. Specifically, the characteristics and operation of photovoltaic modules, fuel cells, batteries, and an electrolyzer, which is used for ‘green’ hydrogen production in certain cases, are presented. Subsequently, a brief analysis of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm used for optimizing the energy management and system cost is conducted, along with the Exhaustive Search algorithm, which verifies and confirms the results obtained by PSO. Next, the system’s simulation is examined and applied in its basic form but also in different variations, aiming to outcome some useful conclusions for the technical behavior and the financial results under various scenarios. The results are depicted through graphs generated from the implementation of the algorithm coded in Matlab. Finally, conclusions and observations regarding the performance and the cost of the system are discussed based on its structure and the different critical conditions considered.

## **Περιεχόμενα**

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Γενικά .....	7
1.2 Σύνοψη Κεφαλαίων .....	8
<b>2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>9</b>
2.1 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια .....	9
2.1.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .....	9
2.1.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία .....	10
2.1.3 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια .....	11
2.1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	12
2.1.4 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος Φωτοβολταϊκών Στοιχείων .....	15
2.1.5 Απόδοση Φ/Β Πλαισίου .....	15
2.2 Κυψέλες Καυσίμου.....	16
2.2.1 Αρχές Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου .....	16
2.2.2 Βασικά Είδη Κυψελών Καυσίμου.....	19
2.2.3 Κυψέλη Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC) .....	19
2.2.4 Κυψέλες καυσίμου PEM υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEM) .....	21
2.2.5 Κυψέλες καυσίμου PEM χαμηλής θερμοκρασίας (LT-PEM).....	21
2.3 Σύστημα Ηλεκτρόλυσης .....	22
2.3.1 PEM Electrolyzer .....	22
2.4 Μεταφορά και Αποθήκευση Υδρογόνου .....	24
2.4.1 Συμπίεση Υδρογόνου .....	24
2.5 Συστοιχία Μπαταριών.....	25
2.5.1 Αρχές Λειτουργίας Συστήματος Μπαταριών .....	25
2.6 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος .....	27
2.6.1 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-DC Converters).....	28
2.6.2 Αντιστροφέας (Inverter).....	30
<b>3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....</b>	<b>32</b>
3.1 Βελτιστοποίηση Σωματιδίων Σμήνους (Particle Swarm Optimization) .....	32
3.2 Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive Search).....	35
<b>4. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>36</b>
4.1 Γενική περιγραφή συστήματος.....	36
4.2 Προσομοίωση Συστήματος .....	38
4.3 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης .....	47
4.4 Συνάρτηση Κόστους .....	49
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....</b>	<b>62</b>

5.1	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων.....	62
5.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	102
5.2.1	Σύγκριση Κόστους .....	103
5.2.2	Σύγκριση Αξιοπιστίας και Αυτονομίας Συστημάτων.....	104
5.3	Παραλλαγές Συστήματος .....	106
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>109</b>
<b>7.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>111</b>

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Γενικά

Η σύγχρονη κοινωνία βρίσκεται αντιμέτωπη με μία από τις κυριότερες προκλήσεις του 21<sup>ου</sup> αιώνα, την αλλαγή του κλίματος. Μια αλλαγή που οφείλεται κυρίως στην υπερβολική χρήση και παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, με συνέπεια την αύξηση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα. Οι επιπτώσεις αυτών των εκπομπών έχουν ήδη αρχίσει να γίνονται ορατές μέσα από την αύξηση της θερμοκρασίας και τις ακραίες καιρικές συνθήκες.

Αντίθετα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μειώνοντας έτσι το ανθρώπινο αποτύπωμα στο περιβάλλον. Επιπλέον, η αξιοποίηση αυτών των πηγών συμβάλλει στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος, μειώνοντας τον κίνδυνο από ξαφνικές διακυμάνσεις των τιμών των παραδοσιακών καυσίμων.

Ειδικότερα, το υδρογόνο, ως καθαρότερο καύσιμο με μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά τη χρήση, αναδεικνύεται ως ένα κεντρικό στοιχείο στο φάσμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η δυνατότητα παραγωγής του μέσω πράσινης ηλεκτρόλυσης, αλλά και η τεχνολογική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου το καθιστούν μια υποσχόμενη εναλλακτική επιλογή για τον ενεργειακό τομέα. Ταυτόχρονα, τα συστήματα Φ/Β πλαίσιων αποτελούν μια πολλή αποδοτική ενεργειακή λύση η οποία αξιοποιεί ικανοποιητικά την ηλιακή ακτινοβολία ώστε να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Με τη συνεχή μείωση του κόστους παραγωγής τους και την αυξανόμενη αποδοτικότητα, τα Φ/Β πλαίσια αποτελούν μια ώθηση για την ανάπτυξη βιώσιμων και αποτελεσματικών ενεργειακών λύσεων.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει ένα σύστημα αποτελούμενο από Φ/Β πλαίσια, κυψέλες καυσίμου και συστοιχία μπαταριών εστιάζοντας στην αξιοπιστία που παρέχει στον χρήστη, στο χαμηλό κόστος λειτουργίας αλλά και στην την όσο το δυνατόν χαμηλότερη επιβάρυνση προς το περιβάλλον. Τα παραπάνω διασφαλίζονται με την βελτιστοποίηση των παραμέτρων που καθορίζουν την ενεργειακή διαχείριση του συστήματος.

## 1.2 Σύνοψη Κεφαλαίων

- Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων, των κυψελών καυσίμου, των μπαταριών, του electrolyzer και των μετατροπέων/αντιστροφών τάσης εξηγώντας έτσι τον λόγο που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες μονάδες σε αυτή την διπλωματική εργασία.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική, που όπως προαναφέρθηκε είναι οι PSO και Εξαντλητική Αναζήτηση.
- Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται εκτενώς τόσο οι συναρτήσεις κόστους των υποσυστημάτων όσο και του ολικού συστήματος. Παράλληλα, απεικονίζονται οι προσομοιώσεις του βασικού συστήματος, αλλά και των παραλλαγών αυτού, μαζί με τα διαγράμματα ροής των αλγορίθμων που εκτελούνται σε κάθε περίπτωση συστήματος.
- Στο Κεφάλαιο 5 απεικονίζονται γραφικά οι τιμές ορισμένων μεταβλητών που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαχείριση ενέργειας του συστήματος και οι τιμές των οποίων βελτιστοποιούνται από τους παραπάνω αλγορίθμους βελτιστοποίησης, ενώ παρατίθενται και οι τιμές του κόστους κάθε συστήματος μέσω γραφικών παραστάσεων κατά την διάρκεια μίας ημέρας. Παράλληλα, μελετώνται και αναλύονται δύο συστήματα με διαφοροποιημένες μεταβλητές εισόδου για την παρατήρηση της μεταβολής της συνάρτησης κόστους σε κάθε περίπτωση.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα αναφορικά με την απόδοση του κάθε συστήματος ξεχωριστά στις διαφορετικές συνθήκες καιρού και φορτίων που εξετάζονται, κάνοντας, ταυτόχρονα, και μια σύγκριση μεταξύ τους με γνώμονα το κόστος, την αυτονομία και αξιοπιστία του κάθε συστήματος.
- Στο Κεφάλαιο 7 αναφέρονται οι πηγές και η βιβλιογραφία της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



# 2.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

---

### 2.1 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα για τον σχηματισμό ενός Φ/Β συστήματος. Αυτά τα πλαίσια, γνωστά και ως Φ/Β συλλέκτες, αποτελούνται από Φ/Β στοιχεία που τοποθετούνται επάνω σε μια βάση. Στόχος των Φ/Β συστημάτων είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο, απορροφώντας και αξιοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία.

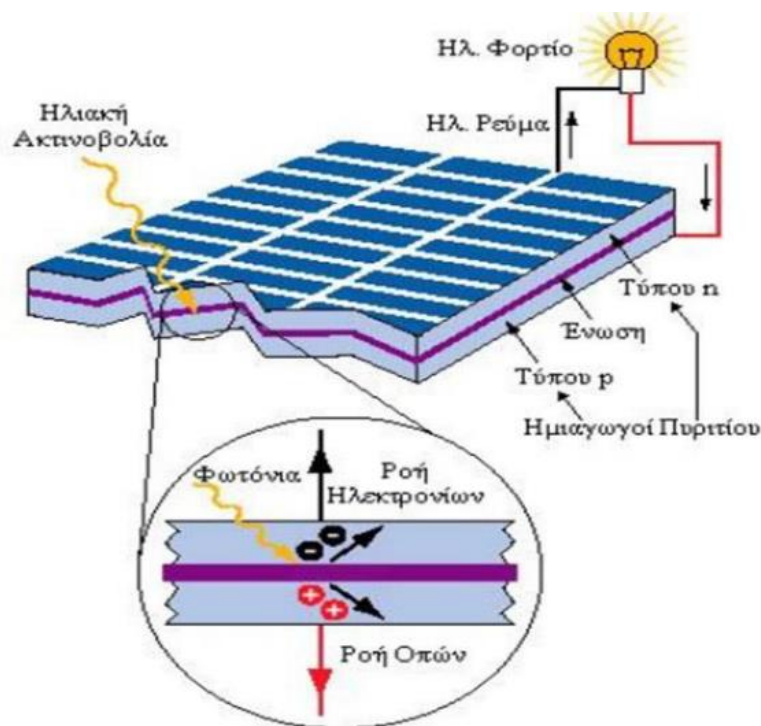
#### 2.1.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Η αρχή λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων είναι βασισμένη στο Φ/Β φαινόμενο. Κατά το φαινόμενο αυτό, δημιουργείται ηλεκτρικό δυναμικό στην συνένωση δύο ανόμοιων ημιαγωγικών υλικών όταν προσπέσει επάνω της ηλιακή ακτινοβολία. Το κύριο στοιχείο από το οποίο κατασκευάζονται αυτά τα υλικά είναι το πυρίτιο το οποίο περιέχει ποικίλων ποσοστών προσμίξεις. Τα υλικά αυτά είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε το ένα να έχει έλλειμμα ενός ηλεκτρονίου σθένους (υλικό τύπου p) και το άλλο να έχει πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου σθένους (υλικό τύπου n), με αποτέλεσμα την παραγωγή φορτισμένων φορέων στο σημείο της ένωσης, μιας και τα απορροφημένα φωτόνια της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρονται στο σημείο αυτό και δημιουργούν δυναμικό. Έτσι, ξεκινάει η ροή του ρεύματος σε εξωτερικό κύκλωμα, επιταχύνοντας παράλληλα την κίνηση των φορτισμένων φορέων [1].

Η απόδοση της μετατροπής που περιγράφεται κυμαίνεται από 5 έως 16%, με την περίσσεια ενέργειας να γίνεται θερμική ενέργεια. Το υλικό κατασκευής διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην διακύμανση του ποσοστού αυτού καθώς επίσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που το διέπουν.

### 2.1.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

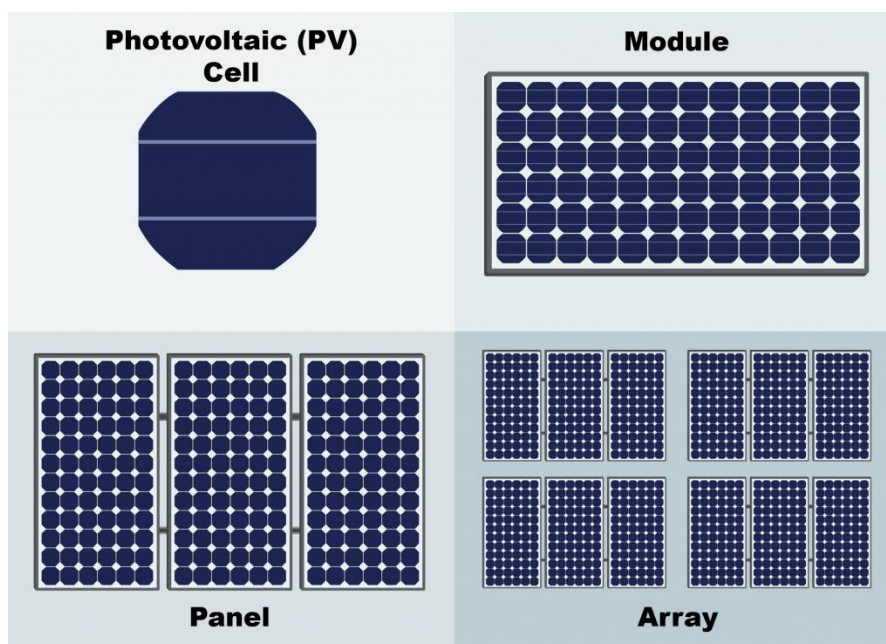
Ο πυρήνας ενός Φ/Β συστήματος είναι το Φ/Β στοιχείο το οποίο διαθέτει και στις δύο όψεις του μεταλλικές επαφές με στόχο την έλευση του ρεύματος που παράγεται από την πρόσκρουση των φωτονίων στην άνω επιφάνειά του. Η τάση εξόδου ενός Φ/Β στοιχείου είναι περίπου 0.6-0.7V και εκδηλώνεται μεταξύ μπροστινής και πίσω όψης του στοιχείου. Όπως είναι κατανοητό, μια διαφορά δυναμικού αυτής της τάξης είναι αδύνατο να καλύψει την πλειοψηφία των αναγκών. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι η ισχύς εξόδου του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ενεργειακό διάκενο κάθε υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο κάθε Φ/Β στοιχείο. Συγκεκριμένα, το ενεργειακό διάκενο εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο του Φ/Β στοιχείου προς την ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια [1]. Στο Σχήμα 2-1 απεικονίζονται τα δομικά μέρη ενός Φ/Β στοιχείου και η διαδικασία του Φ/Β φαινομένου.



Σχήμα 2-1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο [1].

### 2.1.3 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

Όπως αναφέρθηκε, η χαμηλή τιμή της παραγόμενης τάσης από ένα Φ/Β στοιχείο δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων στις σύγχρονες εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζεται μία συνδεσμολογία σε σειρά Φ/Β στοιχείων και δημιουργείται μια ενιαία μονάδα (module) εμφανώς μεγαλύτερης και χρησιμότερης τάσης. Έτσι, μία Φ/Β γεννήτρια καταλήγει δομικά να απαρτίζεται από Φ/Β συλλέκτες μέσω των Φ/Β στοιχείων που συντελούν τα Φ/Β πλαίσια και αυτά με την σειρά τους συνδέονται και συνθέτουν τις Φ/Β συστοιχίες (arrays) [1]. Η παραπάνω δομή φαίνεται στο Σχήμα 2-2.

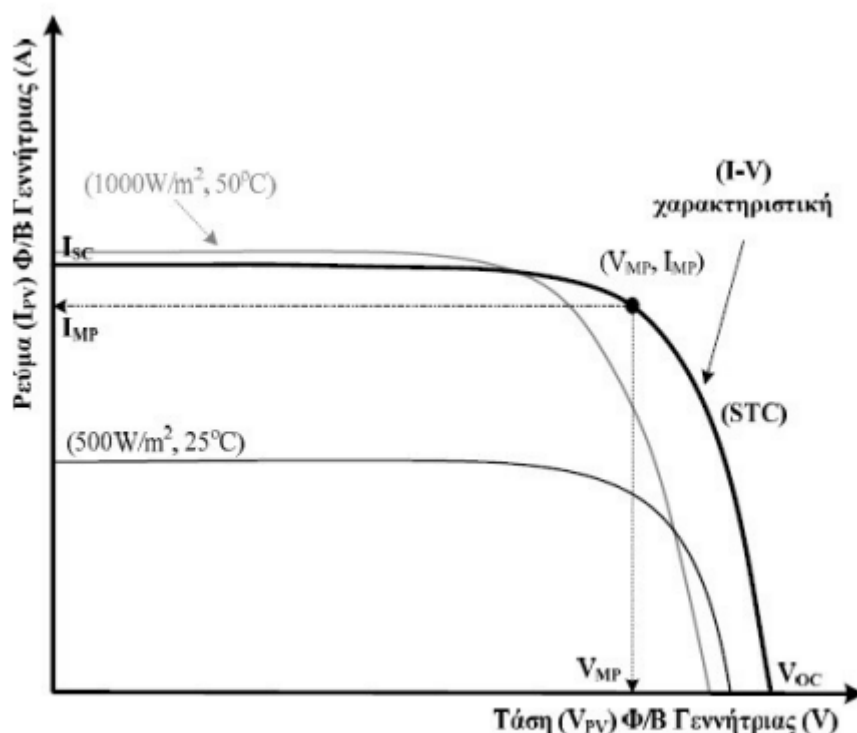


Σχήμα 2-2. Δομικά μέρη φωτοβολταϊκής γεννήτριας [1].

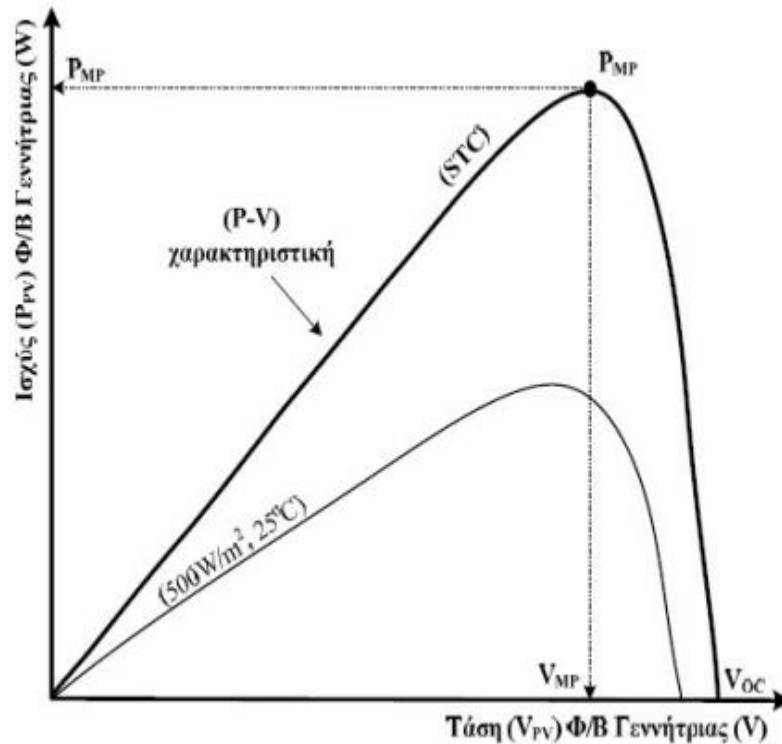
### 2.1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Δύο σημαντικά και καθοριστικά μεγέθη του Φ/Β συστήματος αφορούν το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$  και την τάση ανοιχτοκυκλώματος  $V_{OC}$ . Συγκεκριμένα, ο δεύτερος όρος αναφέρεται στην τάση εξόδου του Φ/Β πλαισίου όταν δεν είναι συνδεδεμένο σε εξωτερικό κύκλωμα, ενώ ο πρώτος όρος αναφέρεται στο μέγιστο ρεύμα που εμφανίζεται όταν εντοπίζεται βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες. Παράλληλα, κάθε Φ/Β πλαίσιο χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παρέχει στην έξοδο του  $Pmp$  (Power Maximum Point). Όταν η τιμή της ισχύος εξόδου γίνει ίση με την  $Pmp$ , η τιμή της τάσης γίνεται ίση με την μέγιστη τιμή της  $Vmp$  (Voltage Maximum Point) και η τιμή του ρεύματος γίνεται αντίστοιχα ίση με την δική της μέγιστη τιμή ίση με  $Imp$  (Current Maximum Point). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η τάση στην έξοδο του Φ/Β πλαισίου εξαρτάται από τον σε σειρά αριθμό Φ/Β στοιχείων, ενώ το ρεύμα εξαρτάται από τον αριθμό των Φ/Β στοιχείων που είναι συνδεδεμένα παράλληλα [1].

Στα Σχήματα 2-3 και 2-4 παρουσιάζονται μέσω καμπυλών οι σχέσεις ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης σε ένα Φ/Β πλαίσιο.



**Σχήμα 2-3.** Διάγραμμα ρεύματος-τάσης  $\Phi/B$  πλαισίου [1].



Σχήμα 2-4. Διάγραμμα ισχύος-τάσης Φ/B πλαισίου [1].

Παρατηρώντας προσεκτικά το Σχήμα 2-3 συμπεραίνεται ότι η μέγιστη ισχύς στην έξοδο του Φ/B πλαισίου εμφανίζεται στο σημείο 'γόνατο' της καμπύλης, που είναι και το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του Φ/B πλαισίου. Παράλληλα, στο σημείο αυτό οι τιμές της ισχύος και του ρεύματος εξόδου είναι οι μέγιστες δυνατές. Ωστόσο, πέραν αυτού του σημείου τόσο το ρεύμα όσο και η τάση μειώνονται σημαντικά και μη-αναλογικά με την αύξηση του ρεύματος και της τάσης, αντίστοιχα. Επομένως, η λειτουργία του Φ/B πλαισίου σε αυτό το σημείο είναι εξαιρετικά σημαντική για την απόδοση του συστήματος. Τέλος, στο Σχήμα 2-3 παρατηρείται ότι ο ρυθμός μεταβολής της έντασης του ρεύματος αριστερά από το γόνατο της καμπύλης είναι αισθητά μικρότερος από ότι στην δεξιά μεριά του γονάτου της καμπύλης στις διάφορες μεταβολές της τάσης.

Αναφορικά με την εξάρτηση της τάσης στην έξοδο του Φ/B πλαισίου με την θερμοκρασία, στο Σχήμα 2-4 παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της  $V_{OC}$  και μικρή αύξηση του  $I_{SC}$ , με αποτέλεσμα την μείωση της ισχύος εξόδου και κατά συνέπεια και του σημείου μέγιστης ισχύος. Αντίθετα σε σταθερή θερμοκρασία, η μεταβολή του  $I_{SC}$  και της ισχύος εξόδου είναι ανάλογη της έντασης που παράγεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ η  $V_{OC}$  μεταβάλλεται ελάχιστα [1].

Ο όρος STC (Standard Conditions Tests) που φαίνεται στα Σχήματα 2-3 και 2-4 εκφράζει τις συνθήκες αναφοράς υπό τις οποίες λαμβάνονται οι παραπάνω μετρήσεις όσον αφορά την ένταση της

ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, έχει οριστεί ότι οι STC για την θερμοκρασία είναι οι 25°C και για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας τα 1000W/m<sup>2</sup>.

Η εξίσωση (2.1) εκφράζει την μαθηματική σχέση του ρεύματος στην έξοδο ενός Φ/Β πλαισίου, που αποτελείται από  $N_s$  όμοια Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και  $N_p$  όμοιες αλυσίδες Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένες παραλλήλως, με ορισμένες άλλες καθοριστικές μεταβλητές και σταθερές [1]:

$$N_p I_{cell} = N_p I_{L,cell} - N_p I_{o,cell} \left( \exp \left( \left( \frac{N_s V_{cell} + N_p I_{cell} \left( \frac{N_s R_{s,cell}}{N_p} \right)}{N_s n_{cell} V_T} \right) - 1 \right) \right) - \frac{N_s V_{cell} + N_p I_{cell} \left( \frac{N_s R_{s,cell}}{N_p} \right)}{\frac{N_s R_{SH,cell}}{N_p}} \quad (2.1)$$

όπου:

$V_T$  : η θερμική τάση που προκύπτει από την εξίσωση  $V_T = \frac{kT}{q}$ , k η σταθερά Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  Joule/Kelvin), T η απόλυτη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου σε βαθμούς Kelvin και q το φορτίο ηλεκτρονίου ( $1.6022 \cdot 10^{-19}$  Coulomb). Για θερμοκρασία δωματίου (27°C=300Kelvin),  $V_T \approx 25.85\text{mV}$  (V).

$n_{cell}$  : ο συντελεστής διόρθωσης, λόγω πιθανής μη ιδανικής διάχυσης, που ενδέχεται να συμβεί στην P-N επαφή. Παίρνει τιμές από 1 έως 2.

$I_{cell}$ : το ρεύμα εξόδου του Φ/Β στοιχείου (A).

$V_{cell}$  : η τάση εξόδου του Φ/Β στοιχείου (A).

$N_p I_{cell}$ : ρεύμα στην έξοδο του Φ/Β πλαισίου (A).

$N_s V_{cell}$  : τάση στην έξοδο του Φ/Β πλαισίου (V).

$I_{L,cell}$ : το ρεύμα που δημιουργείται κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β στοιχείο (A).

$N_p I_{L,cell}$ : το συνολικό ισodύναμο ρεύμα του Φ/Β πλαισίου (A).

$I_{o,cell}$ : ρεύμα κόρου της διόδου με τιμές μεταξύ  $10^{-4}$  και  $10^{-15}$  (A).

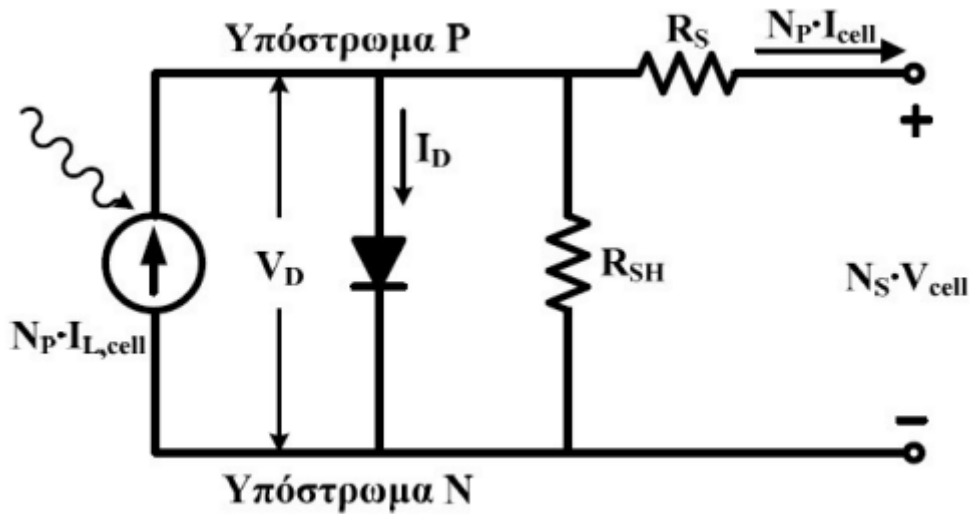
$N_p I_{o,cell}$ : το συνολικό ισodύναμο ρεύμα κόρου της διόδου (A).

$R_{s,cell}$ : ισodύναμη αντίσταση απωλειών του Φ/Β στοιχείου (Ω).

$R_{SH,cell}$  : εκφράζει τις διαρροές των φορέων που εμφανίζονται στην επαφή P-N (Ω).

$\left( \frac{N_s}{N_p} \right) R_{s,cell}$  και  $\left( \frac{N_s}{N_p} \right) R_{SH,cell}$ : η ισodύναμη σε σειρά και παράλληλη αντίσταση του ισodύναμου του Φ/Β πλαισίου (Ω).

Στο Σχήμα 2-5, απεικονίζεται το ισodύναμο κύκλωμα ενός Φ/Β πλαισίου.



Σχήμα 2-5. Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/B πλαισίου [1].

#### 2.1.4 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Όπως έχει αναφερθεί, όταν το Φ/B σύστημα λειτουργεί στο σημείο που η τιμή της ισχύος εξόδου παίρνει την μέγιστη τιμή της, το σύστημα λειτουργεί με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Επομένως, τόσο η ανίχνευση όσο και η λειτουργία του συστήματος σε αυτό το σημείο οδηγεί σε σημαντική αύξηση της απόδοσης του Φ/B συστήματος. Ωστόσο, η πρόβλεψη του σημείου μέγιστης ισχύος είναι αρκετά δύσκολο να προβλεφθεί εκ των προτέρων καθώς επηρεάζεται από παραμέτρους που είναι μη σταθεροί και μη προβλέψιμοι με ακρίβεια όπως η θερμοκρασία, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η μερική σκίαση του Φ/B πλαισίου [1].

Έτσι, έχει δημιουργηθεί μία δυναμική μέθοδος αυτοματισμού με δυνατότητα ανίχνευσης στον μέγιστο δυνατό βαθμό του σημείου μέγιστης λειτουργίας. Η μέθοδος αυτή είναι ενσωματωμένη στο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα ισχύος που συνδέεται στη Φ/B συστοιχία.

#### 2.1.5 Απόδοση Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Καθοριστικό χαρακτηριστικό για την λειτουργία ενός Φ/B συστήματος είναι ο συντελεστής απόδοσης του που εξαρτάται από τον λόγο της μέγιστης δυνατής ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο προς την ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνει σαν είσοδο το σύστημα, όπως φαίνεται και στην σχέση (2.2) [1]:

$$\eta_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{H \times S} \quad (2.2)$$

όπου:

$H$ : η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του ένα Φ/Β πλαίσιο ( $\frac{kW}{m^2}$ ).

$S$ : η επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου ( $m^2$ ).

$P_{\pi}$ : ηλεκτρική ισχύς εξόδου Φ/Β πλαισίου (kW).

Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή απόδοσης του Φ/Β συστήματος. Ένας εξ αυτών είναι η θερμοκρασία η οποία δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια με αποτέλεσμα η τιμή του συντελεστή απόδοσης που αναγράφει ο κατασκευαστής μετρημένη σε STC να είναι διαφορετική. Τέλος, ένας ακόμη παράγοντας που μειώνει τον συντελεστή απόδοσης του Φ/Β συστήματος είναι η σκόνη και οι ακαθαρσίες που προσπίπτουν στην επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων με αποτέλεσμα να μειώνεται η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό, αποτελεί επιτακτική ανάγκη η συντήρηση και ο καθαρισμός των πλαισίων σε τακτικά χρονικά διαστήματα για την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος, γεγονός που όπως είναι αναμενόμενο αυξάνει και το κόστος του συστήματος.

## 2.2 Κυψέλες Καυσίμου

Στην σημερινή εποχή, οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν τις βασικότερες και σημαντικότερες διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το υδρογόνο ή άλλα υδρογονούχα καύσιμα. Η αποθηκευμένη χημική ενέργεια στα άτομα του υδρογόνου μετατρέπεται μέσω της οξείδωσης του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα αξιοποιώντας την σε πολλές εφαρμογές της καθημερινότητάς μας.

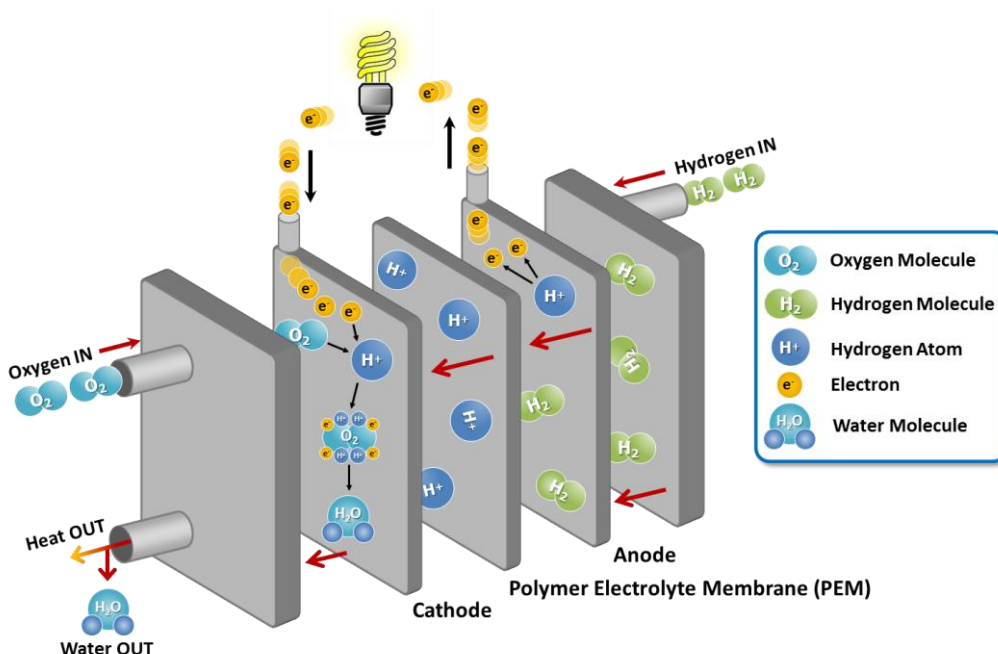
Η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου δεν αποτελεί εφεύρεση των τελευταίων χρόνων. Η κατασκευή της ξεκίνησε το 1989 από τον Sir William Grove αλλά χρησιμοποιήθηκε πρακτικά από την NASA στα διαστημικά οχήματα Gemini και Apollo 11 τα έτη 1966 και 1969 ως φθηνότερη λύση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έναντι της ηλιακής. Από τότε και έπειτα πραγματοποιήθηκε μία συνεχιζόμενη εξέλιξη των κυψελών καυσίμου οι οποίες αξιοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι άλλων διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [2].

### 2.2.1 Αρχές Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι διατάξεις οι οποίες μέσα από μια ηλεκτροχημική διαδικασία έχουν την δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και ένα ποσό θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αντίστροφη ηλεκτρόλυση. Κατά την ηλεκτρόλυση, τροφοδοτείται το νερό με συνεχές ρεύμα. Στο ηλεκτρόδιο της καθόδου τα ιόντα υδρογόνου μετασχηματίζονται με τη βοήθεια των ηλεκτρονίων σε υδρογόνο, ενώ στο ηλεκτρόδιο της ανόδου το νερό οξειδώνεται σε οξυγόνο και πρωτόνια. Στην διαδικασία της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης το υδρογόνο οξειδώνεται παράγοντας συνεχές ρεύμα και βρίσκεται σε μορφή που αντιδρά με το οξυγόνο και παράγεται νερό.



Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από την μεμβράνη, τους καταλύτες και δύο ηλεκτρόδια, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-6. Ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια παρεμβαίνουν η ηλεκτρολυτική μεμβράνη και οι καταλύτες χωρίζοντας έτσι την άνοδο από την κάθοδο. Πιο συγκεκριμένα, η μεμβράνη βρίσκεται ανάμεσα στους δύο καταλύτες και το συγκεκριμένο στρώμα που δημιουργείται διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια ή αλλιώς τις διπολικές πλάκες (bipolar plates). Η τροφοδοσία του υδρογόνου γίνεται μέσω ενός καναλιού του ηλεκτροδίου της ανόδου (αρνητικό ηλεκτρόδιο). Όταν το αέριο υδρογόνο προσκρούσει επάνω στον καταλύτη αποσπάται σε φορτισμένα ανιόντα και κατιόντα υδρογόνου. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα διαπερνούν την μεμβράνη-ηλεκτρολύτη φτάνοντας στον καταλύτη της καθόδου όπου γίνεται η συνάντηση με το οξυγόνο, το οποίο διοχετεύεται σε εκείνο το σημείο μέσω του καναλιού της καθόδου. Τα ηλεκτρόνια αδυνατούν να διαπεράσουν τα τοιχώματα της με αποτέλεσμα να μεταφέρονται μέσω εξωτερικού κυκλώματος σε μια διαδρομή που ξεκινάει από την άνοδο και καταλήγει στην κάθοδο δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα [2].



Σχήμα 2-6. Δομικά μέρη κυψέλης καυσίμου [2].

Η παραγωγή του νερού πραγματοποιείται στον καταλύτη της καθόδου όπου αντιδρούν το υδρογόνο με το οξυγόνο, καθώς και ηλεκτρόνια που διοχετεύθηκαν σε αυτό το σημείο μέσω της διαδρομής που ακολουθεί το εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στις δύο καταλυτικές επιφάνειες όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως [2].

Η χημική αντίδραση της οξείδωσης του υδρογόνου που πραγματοποιείται στην άνοδο περιγράφεται ως εξής:



Στην κάθοδο, το οξυγόνο διασπάται και προκύπτει ένωση τόσο με τα πρωτόνια της καθόδου όσο και με τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η συγκεκριμένη διαδικασία εκφράζεται με την εξής χημική αντίδραση:

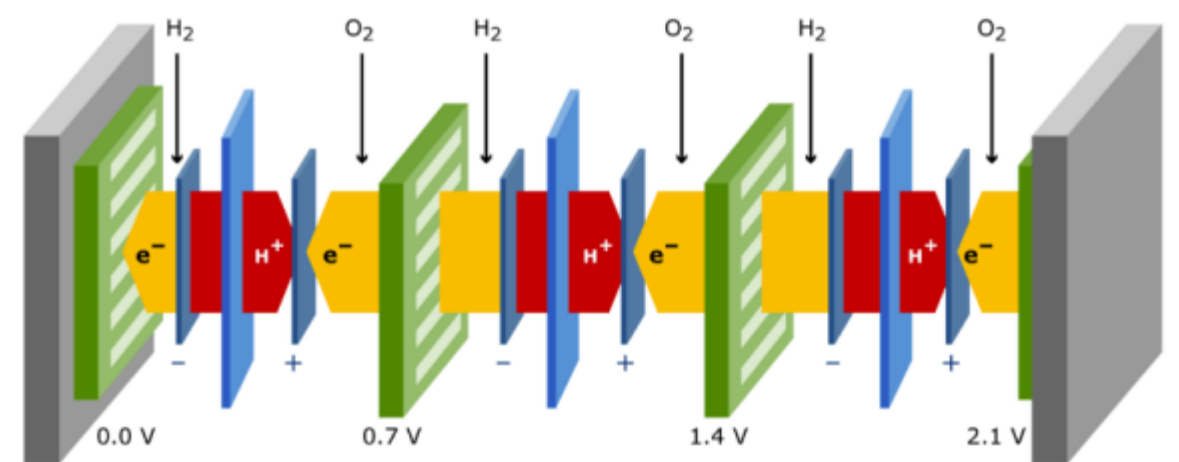


Η συνολική χημική αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο περιγράφεται ως εξής:



Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται ανάμεσα στην διπολική πλάκα ανόδου και την διπολική πλάκα καθόδου είναι στην ιδανική περίπτωση 1 Volt χωρίς αυτό να μπορεί να είναι απόλυτα εφικτό στην πράξη. Μια τυπική τιμή είναι τα 0.7 Volt αν και η συγκεκριμένη τιμή εξαρτάται και από το φορτίο που συνδέεται στις διπολικές πλάκες και από το είδος της κυψέλης καυσίμου.

Η συγκεκριμένη τάση δεν μπορεί να αξιοποιηθεί παρά μόνο σε πολύ μικρές εφαρμογές που μπορούν να λειτουργήσουν υπό αυτήν την τάση. Για τον λόγο αυτόν, πολλές κυψέλες ενώνονται σε σειρά μεταξύ τους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7, με στόχο την παροχή μεγαλύτερης τάσης και ισχύος ώστε να υπάρξει δυνατότητα αξιοποίησης τους σε μεγαλύτερες εφαρμογές. Η συγκεκριμένη διάταξη ονομάζεται στοίβα κυψέλης καυσίμου λόγω της διασύνδεσης πολλών κυψελών μεταξύ τους [2].



Σχήμα 2-7. Δομή στοίβας κυψέλης καυσίμου [2].

### 2.2.2 Βασικά Είδη Κυψελών Καυσίμου

Η κατηγοριοποίηση των κυψελών καυσίμου γίνεται με βάση το είδος του ηλεκτρολύτη που αποτελείται [2]. Συγκεκριμένα υπάρχουν οι εξής κατηγορίες:

1. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC): ο βασικός τύπος ηλεκτρολύτη που περιέχεται σε αυτό το είδος κυψελών καυσίμου είναι το διάλυμα υδροξειδίου του καλίου.
2. Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM): η μεμβράνη που διαθέτει αυτό το είδος κυψέλης καυσίμου είναι πολυμερής και έχει τη δυνατότητα να άγει μεγαλύτερες ποσότητες πρωτονίων. Παρασκευάζεται συνήθως από πλατίνα.
3. Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC): η παρασκευή του ηλεκτρολύτη στις συγκεκριμένες κυψέλες καυσίμου γίνεται με μίξη καλίου και λιθίου.
4. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC): οι μεμβράνες των κυψελών καυσίμου PAFC παρασκευάζονται συνήθως από μεγάλες συγκεντρώσεις φωσφορικού οξέος.
5. Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC): η βασική χημική ένωση που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ηλεκτρολύτη σε αυτή την περίπτωση κυψελών καυσίμου είναι το διοξείδιο του ζirkονίου.
6. Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC): κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τη μεθανόλη και όχι το υδρογόνο.

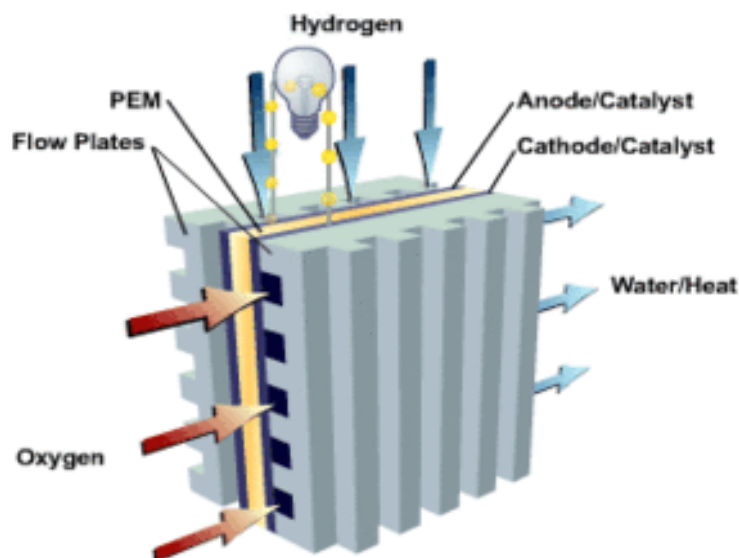
### 2.2.3 Κυψέλη Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη μια πολυμερή μεμβράνη, η οποία διαχωρίζει την άνοδο από την κάθοδο και άγει μόνο τα θετικά ιόντα υδρογόνου. Η πολυμερής μεμβράνη είναι κατασκευασμένη από Nafion και έχει πολύ μικρό πάχος που κυμαίνεται από 25.4 έως 254μm. Η παρουσία υγρασίας στην επιφάνεια της μεμβράνης δημιουργεί αγωγιμότητα μόνο για τα θετικά ιόντα του υδρογόνου.

Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου αποτελείται από πλάκες ροής αερίων. Οι πλάκες ροής αερίων κατασκευάζονται από μέταλλο ή από γραφίτη και η γεωμετρία τους αποτελείται από κανάλια, από τα οποία περνούν το οξυγόνο και το υδρογόνο, με στόχο την αντίδρασή τους και τη διοχέτευση νερού στα ηλεκτρόδια και την μεμβράνη. Παράλληλα, η γεωμετρία των καναλιών αποσκοπεί στην ποσοτικά ομοιόμορφη διάχυση των αερίων αλλά και την διατήρηση κατάλληλης ποσότητας υγρασίας στην μεμβράνη.

Η τάση η οποία αναπτύσσεται στην κυψέλη καυσίμου τύπου PEM κυμαίνεται από 0.6V έως 0.73V με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη της σύνδεσης πολλών κυψελών σε σειρά αυξάνοντας έτσι την συνολική τάση. Η σύνδεση πολλών κυψελών ονομάζεται στοίβα κυψέλης καυσίμου. Ακόμη οι διπολικές πλάκες είναι ηλεκτρικά αγωγίμες, με στόχο τη σύνθεση συνολικής τάσης και τη δυνατότητα σύνδεσης φορτίου στην απόληξη του τελευταίου κελιού της κυψέλης καυσίμου.

Το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο και συναντά την μεμβράνη η οποία διασπά το αέριο υδρογόνο σε ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα. Τα τελευταία οδηγούνται στην κάθοδο διαπερνώντας την μεμβράνη σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια που ακολουθούν την πορεία του εξωτερικού κυκλώματος για να καταλήξουν στην κάθοδο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-8 δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα [2].



**Σχήμα 2-8.** Δομή κυψέλης καυσίμου τύπου PEM [2].

Ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου τύπου PEM είναι περίπου 45% και μεταβάλλεται κυρίως με τη ζήτηση ρεύματος από το φορτίο αλλά και από τις συνθήκες λειτουργίας. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου ο βαθμός απόδοσης σε σύγκριση με το εύρος μεταβολής της ζήτησης ισχύος είναι αρκετά υψηλός, έχοντας δυνατότητα να ανταποκριθεί γρήγορα σε μεταβολές ισχύος. Επιπλέον, παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα ισχύος από 0.2 έως 0.7W/cm<sup>2</sup>, το οποίο την καθιστά συμπαγή και με μικρό βάρος. Επίσης έχει διαπιστωθεί η ικανότητά της για διατήρηση σταθερής λειτουργίας για περισσότερες από 40000 ώρες, επιτρέποντάς της έτσι να είναι μια εμπορικά βιώσιμη λύση [2].

## 2.2.4 Κυψέλες καυσίμου PEM υψηλής θερμοκρασίας

Η πρόσφατη πρόοδος στις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM έχει επικεντρωθεί στην ανάγκη ανάπτυξης κυψελών καυσίμου PEM που λειτουργούν πάνω από 100°C. Σε γενικό πλαίσιο, οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (HT fuel cells) αντιπροσωπεύουν μια σημαντική τεχνολογία για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες, όπως η βιομηχανία και οικιακές εφαρμογές που αντιμετωπίζουν αυξημένες θερμοκρασίες λειτουργίας.

Υπάρχουν αρκετοί επιτακτικοί λόγοι για να λειτουργούν σε υψηλότερο επίπεδο θερμοκρασίας:

- Αύξηση ηλεκτροχημικής κινητικής και για τα δύο ηλεκτρόδια με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις να ενισχύονται/επιταχύνονται.
- Το σύστημα ψύξης απλοποιείται λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας μεταξύ της στοίβας κυψελών καυσίμου και του ψυκτικού υγρού.
- Η θερμότητα που εκλύεται μπορεί να ανακτηθεί ως πρακτική πηγή ενέργειας.
- Η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από το μονοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται κατά την παραγωγή υδρογόνου μέσω φυσικού αερίου ή βιομάζας, το οποίο είναι σημαντικό χαρακτηριστικό καθιστώντας έτσι τις κυψέλες καυσίμου μία καλή λύση σε συστήματα παραγωγής αναμορφωμένου υδρογόνου.

## 2.2.5 Κυψέλες καυσίμου PEM χαμηλής θερμοκρασίας

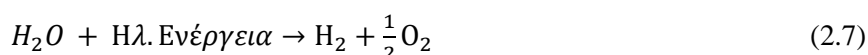
Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας (<100°C) είναι σημαντικές για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες, όπως σε οχήματα με κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε ψυχρά περιβάλλοντα.

Ταυτόχρονα, η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα και γενικώς προσμίξεων άλλων στοιχείων προκαλεί φθορά στους καταλύτες με αποτέλεσμα να είναι καθοριστική η παροχή υδρογόνου με καθαρότητα της τάξεως του 98%.

Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας διατηρούν υψηλή απόδοση ακόμη και όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή, κάτι που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές σε περιοχές με αντίξοες καιρικές συνθήκες. Αντίθετα, συνήθως απαιτούν ειδικά υλικά και τεχνολογίες κατασκευής, προκειμένου να διατηρήσουν τη λειτουργία τους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος παραγωγής. Τέλος, σε υψηλές θερμοκρασίες, οι κυψέλες αυτές μπορεί να έχουν χαμηλή απόδοση σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, γεγονός που περιορίζει την ευελιξία χρήσης τους σε περιβάλλοντα με μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας [2].

## 2.3 Σύστημα Ηλεκτρόλυσης

Κατά την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, τα μόρια του νερού διασπώνται σε άτομα υδρογόνου και άτομα οξυγόνου. Η διάσπαση αυτή προκαλείται με την βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Η δομική σύσταση της συσκευής ηλεκτρόλυσης αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια (ένα ανόδου και ένα καθόδου) και τον ηλεκτρολύτη που είναι υπεύθυνος για την διάχυση των ιόντων. Όπως είναι αναμενόμενο, το ηλεκτρόδιο της καθόδου ανάγει τα πρωτόνια σε υδρογόνο και το ηλεκτρόδιο της ανόδου οξειδώνει το νερό σε οξυγόνο και πρωτόνια, αφήνοντας ελεύθερα δύο ηλεκτρόνια [3]. Η χημική αντίδραση που περιγράφει αυτή την διαδικασία είναι η εξής:

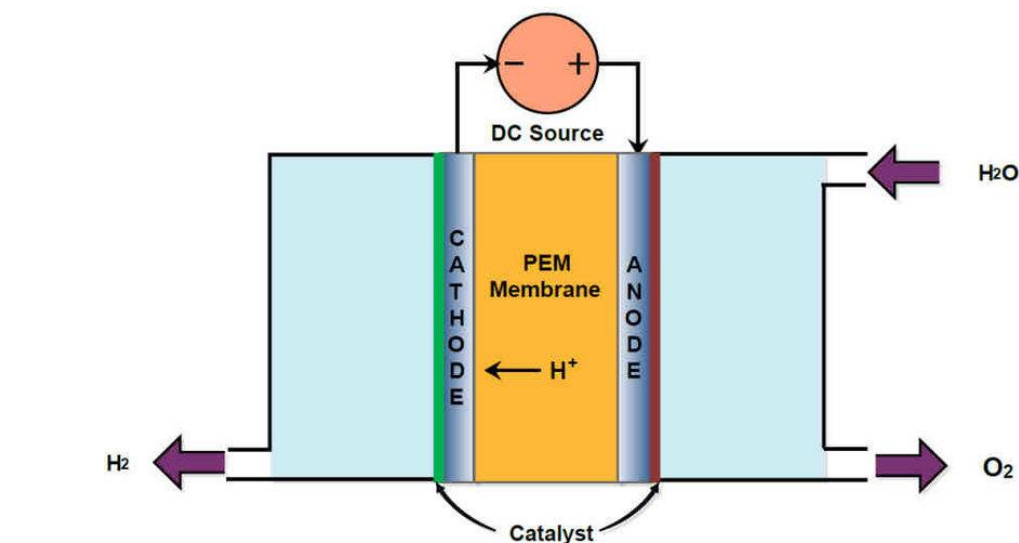


### 2.3.1 Electrolyzer Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων

Η παρασκευή του ηλεκτροδίου της ανόδου στην συσκευή ηλεκτρόλυσης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (τύπου PEM), γίνεται κατά κύριο λόγο από πλατίνα και ιρίδιο, ενώ για την παρασκευή του ηλεκτροδίου της καθόδου χρησιμοποιείται πλατίνα [3]. Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις της συσκευής ηλεκτρόλυσης:

<i><b>Πίνακας 2-1. Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις συσκευής ηλεκτρόλυσης τύπου PEM [3].</b></i>		
<b>Ηλεκτρολύτης</b>	<b>Ανοδος</b>	<b>Κάθοδος</b>
Πολυμερική Μεμβράνη	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$

Η ηλεκτρολυτική μεμβράνη που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ενός electrolyzer τύπου PEM είναι πολυμερής τύπου Nafion και συμβάλει στην αποδοτικότερη διέλευση των πρωτονίων, έχοντας σαν χαρακτηριστικό την αντοχή σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Παράλληλα, η αποφυγή χρήσης υγρού ηλεκτρολύτη λειτουργεί σαν πλεονέκτημα για αυτού του τύπου τη συσκευή ηλεκτρόλυσης, καθώς ο υγρός ηλεκτρολύτης απαιτεί συνεχή επανακυκλοφορία με στόχο την ομοιόμορφη διανομή του ηλεκτρολύτη σε όλη την επιφάνεια των ηλεκτροδίων [3]. Στο Σχήμα 2-9 απεικονίζεται η δομή ενός electrolyzer τύπου PEM.

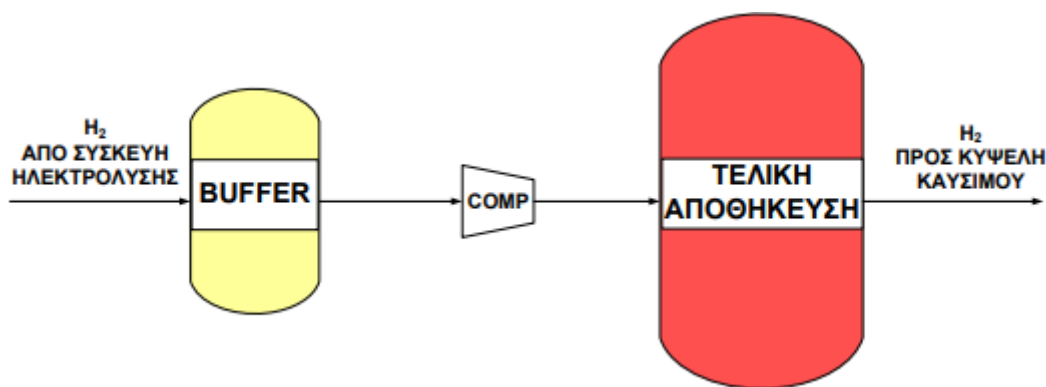


**Σχήμα 2-9.** Δομικά μέρη PEM Electrolyzer [3].

Τέλος, ένας electrolyzer τύπου PEM παρέχει μεγάλη αξιοπιστία (>100000 ώρες συνεχής λειτουργίας), έχοντας απόδοση που κυμαίνεται από 50% έως 92%. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε μία συσκευή ηλεκτρόλυσης τύπου PEM η απόδοση μειώνεται σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος αλλά δεν παύει να υπερσχύει σε σχέση με τις συσκευές ηλεκτρόλυσης διαφορετικού τύπου, παράγοντας παράλληλα υδρογόνο με καθαρότητα που αγγίζει το 99.9% αποφεύγοντας έτσι επιπλέον συσκευές καθαρισμού των παραγόμενων αερίων [3].

## 2.4 Μεταφορά και Αποθήκευση Υδρογόνου

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στην συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου. Το τελευταίο, αν οι συνθήκες το επιτάσσουν, καθαρίζεται από ξένες προσμίξεις και ακαθαρσίες και μεταφέρεται μέσω ειδικά κατασκευασμένων σωληνώσεων για αποφυγή διαρροών, σε αέρια ή υγρή μορφή σε δεξαμενές από αλουμίνιο ή ατσάλι. Το τελευταίο συμφέρει σε σταθερές εγκαταστάσεις όπου το μέγεθος και το βάρος δεν αποτελούν κριτήριο επιλογής. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-10, το υδρογόνο αφού παραχθεί μέσα από την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης αποθηκεύεται προσωρινά σε ένα δοχείο προσωρινής αποθήκευσης (buffer) μέχρι να μεταφερθεί και να συμπιεστεί σε κατάλληλη πίεση και να καταλήξει αποθηκευμένο και συμπιεσμένο στην δεξαμενή αποθήκευσης έτοιμο να τροφοδοτήσει την κυψέλη καυσίμου υπό καθορισμένη πίεση [4].



**Σχήμα 2-10.** Διαδικασία μεταφοράς, αποθήκευσης και συμπίεσης παραγόμενου από ηλεκτρόλυση υδρογόνου[4].

### 2.4.1 Συμπίεση Υδρογόνου

Ο όγκος του υδρογόνου, είτε χρησιμοποιείται τοπικά είτε μεταφέρεται, είναι απαραίτητο να μειωθεί μέσω συμπίεσης για αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας σε συγκεκριμένο χώρο αποθήκευσης. Η συμπίεση αυτή μπορεί να φτάσει και τα 2.000 bars. Ακολουθούν οι τρεις πιο συχνά εφαρμοσμένες τεχνικές συμπίεσης υδρογόνου [5]:

- **Εμβολοφόρος Συμπιεστής:** στον εμβολοφόρο συμπιεστή, το αέριο υδρογόνο που εισέρχεται συμπιέζεται μέσω εμβόλων αποφεύγοντας την χρήση λιπαντικών υλικών που διαταράσσει την καθαρότητα του αερίου.
- **Συμπιεστής Διαφράγματος:** σε αυτό το είδος συμπιεστή, μία μεταλλική μεμβράνη κινείται μέσω εμβόλου και οδηγεί στην συμπίεση του αερίου υδρογόνου.
- **Θερμικός Συμπιεστής:** σε αυτή τη διαδικασία συμπίεσης το αέριο υδρογόνο αρχικά θερμαίνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων του. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται και η πίεση του και μεταφέρεται σε δεξαμενή όπου συμπιέζεται περαιτέρω



με χρήση εμβόλου. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για συμπίεση μεγάλου όγκου αερίου υδρογόνου και μετέπειτα αποθήκευση σε σχετικά μικρό χώρο.

## 2.5 Συστοιχία Μπαταριών

Η τεχνολογία των μπαταριών αποτελεί πόλο έλξης στην επιστημονική κοινότητα αναφορικά τόσο με την αποθήκευση όσο και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω της ικανοποιητικής απόδοσης λειτουργίας τους, αλλά και λόγω της άμεσης απόκρισης τους στην κάλυψη των αναγκών του φορτίου. Παράλληλα, η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως τα Φ/Β συστήματα, καθιστούν την τεχνολογία μπαταριών μια αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή.

Οι παρακάτω είναι οι πιο συχνά εφαρμοσμένοι τύποι μπαταριών λόγω χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης [6]:

- Μπαταρίες Μολύβδου,
- Μπαταρίες Ιόντων λιθίου (Li-on),
- Μπαταρίες Νατρίου-Θείου (NaS).

### 2.5.1 Αρχές Λειτουργίας Συστήματος Μπαταριών

Η μπαταρία δομικά αποτελείται από δύο ακροδέκτες που προεξέχουν εξωτερικά, εκ των οποίων ο ένας είναι θετικός και ο άλλος αρνητικός. Ο αρνητικός ακροδέκτης ενώνεται εσωτερικά με το αρνητικό ηλεκτρόδιο της μπαταρίας και ο θετικός ακροδέκτης ενώνεται εσωτερικά με το θετικό ηλεκτρόδιο της μπαταρίας. Όπως είναι αναμενόμενο, το αρνητικό ηλεκτρόδιο έχει συσσώρευση ηλεκτρονίων και το θετικό ηλεκτρόδιο είναι θετικά φορτισμένος λόγω έλλειψης ηλεκτρονίων. Ανάμεσα τους υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης που διαδραματίζει τον ρόλο διαχωριστή αποτρέποντας την επαφή των δύο ηλεκτροδίων και άγοντας τα ηλεκτρόνια μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου. Έτσι, συνδέοντας ένα φορτίο στα άκρα της μπαταρίας, λόγω διαφοράς δυναμικού των δύο ακροδεκτών, ξεκινάει η ροή των ηλεκτρονίων, δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, ανάλογα με τις ανάγκες τάσης και ρεύματος του φορτίου αυξάνεται ο αριθμός συνδεδεμένων σε σειρά (για αύξηση τάσης) και παράλληλα (για αύξηση ρεύματος) μπαταριών, με αποτέλεσμα να δημιουργείται η συστοιχία μπαταριών (battery bank) [6].

Παρακάτω αναλύονται ορισμένα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόδοση λειτουργίας τους [6]:

### **1. Επίπεδο Φόρτισης**

Το επίπεδο φόρτισης (State of Charge) δηλώνει το ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας που παραμένει διαθέσιμη σε μία μπαταρία. Αυτό το επίπεδο εκφράζεται ως ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας που μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία. Κατά κύριο λόγο η κατώτερη τιμή του επιπέδου φόρτισης είναι το 20% για την αποδοτικότερη λειτουργία της μπαταρίας. Μετριέται σε %.

### **2. Τάση Ακροδεκτών**

Με τον όρο τάση ακροδεκτών ορίζεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της μπαταρίας όταν η έξοδος της είναι συνδεδεμένη σε φορτίο. Η τάση αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και με το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης. Μετριέται σε Volt.

### **3. Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος**

Εκφράζει την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της μπαταρίας όταν δεν είναι συνδεδεμένη σε φορτίο. Στο ίδιο πλαίσιο με την τάση ακροδεκτών, η τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης. Μετριέται σε Volt.

### **4. Εσωτερική Αντίσταση**

Η εσωτερική αντίσταση εκφράζει την ωμική αντίσταση ανάμεσα στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Με την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης μιας μπαταρίας μειώνονται και οι κύκλοι ζωής της. Μετριέται σε Ω.

### **7. Ονομαστική Χωρητικότητα**

Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας δηλώνει την μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει και να αποδώσει μία μπαταρία. Μετριέται σε Ah ή σε Wh.

### **8. Ονομαστική Τάση**

Εκφράζει την διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών σε κατάσταση πλήρους φόρτισης. Μετριέται σε Volt.

### **9. Τάση Διακοπής/Κατωφλίου**

Η τάση κατωφλίου αφορά την τιμή της τάσης κάτω από την οποία η μπαταρία κρίνεται ως μη λειτουργική. Μετριέται σε Volt.

## 10. Κύκλος Ζωής

Ο κύκλος ζωής μιας μπαταρίας εκφράζει τον αριθμό των πλήρων κύκλων, στους οποίους η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται, προτού η λειτουργικότητα και η απόδοση της μειωθεί σημαντικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο κύκλος ζωής μιας μπαταρίας διαφέρει ανάλογα με την χρήση της.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε εφαρμογές όπως η αποθήκευση ενέργεια σε συστήματα κτηρίων όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πιο συνηθισμένη χρήση μπαταριών είναι οι μπαταρίες λιθίου (Li-on). Αυτό συμβαίνει για πολλούς λόγους. Πρώτον, οι μπαταρίες λιθίου έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, προσφέροντας μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα συγκριτικά με τον όγκο αλλά και το βάρος τους. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για χρήση σε χώρους περιορισμένων διαστάσεων, όπως σε κτίρια. Παράλληλα, οι μπαταρίες λιθίου έχουν χαμηλή αυτοεκφόρτιση, που σημαίνει ότι χάνουν λίγη ενέργεια κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Αυτό βοηθάει στη διατήρηση της ενεργειακής απόδοσης όταν η ενέργεια αποθηκεύεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Τέλος, ένας σημαντικός παράγοντας είναι και το χαμηλό κόστος καθώς από την μια οι απαιτήσεις συντήρησης είναι μηδαμινές και από την άλλη η τεχνολογική εξέλιξη αυτού του είδους μπαταριών είναι αρκετά ικανοποιητική, με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής τους να είναι σχετικά χαμηλό.

## 2.6 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι συσκευές που μετατρέπουν την μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία άλλη επιθυμητή. Η μορφή αυτή μπορεί να αφορά είτε το είδος συνέχειας της τάσης και του ρεύματος (εναλλασσόμενο ή συνεχές) είτε το πλάτος και την πολικότητα της τάσης. Παράλληλα, ο ρόλος τους σε ένα σύστημα που αποτελείται από κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες και Φ/Β πλαίσια είναι απαραίτητος για την κατάλληλη προσαρμογή των τάσεων εξόδου των παραπάνω μονάδων και την αποδοτικότερη λειτουργία του συνολικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Συγκεκριμένα, η συνεχής, χαμηλή και ασταθής τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου και η μη προβλεπόμενη με ακρίβεια και συνεχής τάση εξόδου του Φ/Β συστήματος είναι μερικοί λόγοι που η εγκατάσταση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είναι απαραίτητη στο συγκεκριμένο σύστημα. Τα κύρια θετικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω:

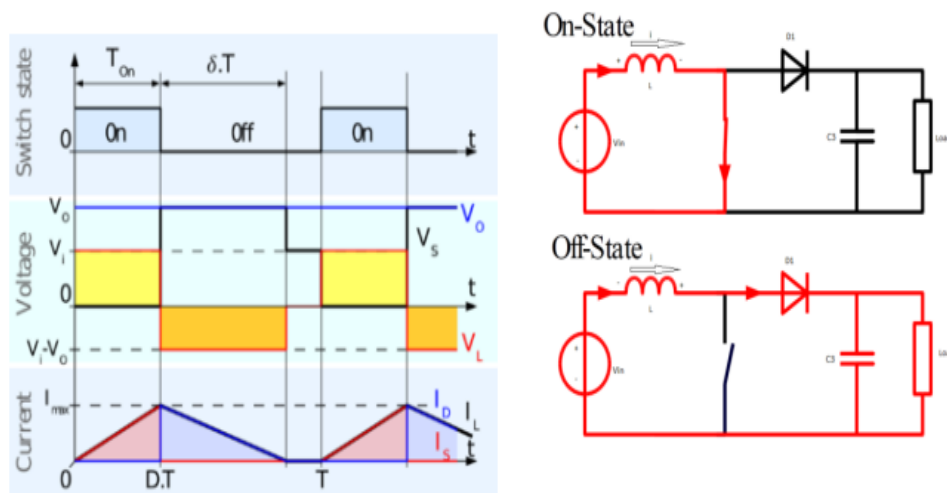
- Μικρότερο βάρος και όγκος.
- Υψηλότερο συντελεστή απόδοσης.
- Ελάχιστες ανάγκες συντήρησης.
- Αθόρυβη λειτουργία.

## 2.6.1 Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-DC Converters)

Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς, μετατρέπουν το πλάτος και την πολικότητα της τάσης που δέχονται στην είσοδο στις επιθυμητές τιμές και πολικότητα στην έξοδο. Ανάλογα με την λειτουργία τους, οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [1]:

### 1. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC-DC Converter)

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας αποτελείται από έναν διακόπτη που λειτουργεί σαν στοιχείο μεταγωγής, ένα πηνίο και μια δίοδο. Ο διακόπτης εναλλάσσει την κατάσταση λειτουργίας του “on” και “off” για να αυξήσει την τάση εισόδου στην επιθυμητή τάση εξόδου. Κατά την ενεργοποίηση του διακόπτη, η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στο πηνίο και ο πυκνωτής τροφοδοτεί το φορτίο με την δίοδο να είναι ανάστροφα πολωμένη στο υποκύκλωμα πυκνωτή-φορτίου. Όταν ο διακόπτης βρίσκεται στην κατάσταση “off” η αποθηκευμένη ενέργεια μεταφέρεται στον πυκνωτή και το φορτίο μέσω της διόδου που είναι ορθά πολωμένη προς το συνολικό κύκλωμα. Στο Σχήμα 2-11 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος αλλά και το ισοδύναμο κύκλωμα του.

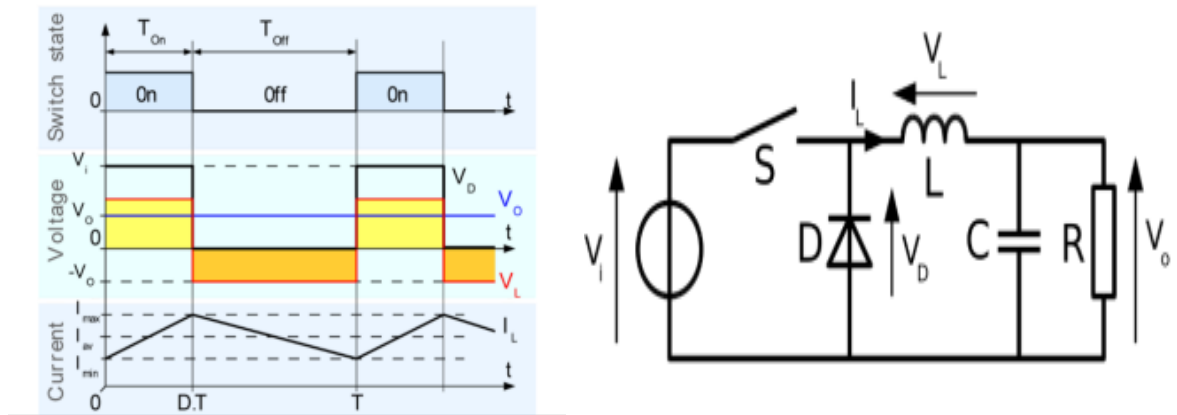


**Σχήμα 2-11.** Κυματομορφές ρεύματος και τάσης μετατροπέα ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (αριστερά) και το ισοδύναμο κύκλωμα του στις καταστάσεις “on” και “off” (δεξιά) [1].

### 2. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step-Down/Buck DC-DC Converter)

Ο μετατροπέας αυτός υποβαθμίζει το επίπεδο της τάσης που δέχεται στην είσοδο στο επιθυμητό επίπεδο εξόδου αυξάνοντας ταυτόχρονα το ρεύμα. Η ειδοποιός διαφορά με τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι ότι η δίοδος και ο διακόπτης τοποθετούνται πριν το πηνίο. Ο πυκνωτής και το πηνίο διαμορφώνουν ένα φίλτρο. Όταν ο διακόπτης είναι σε

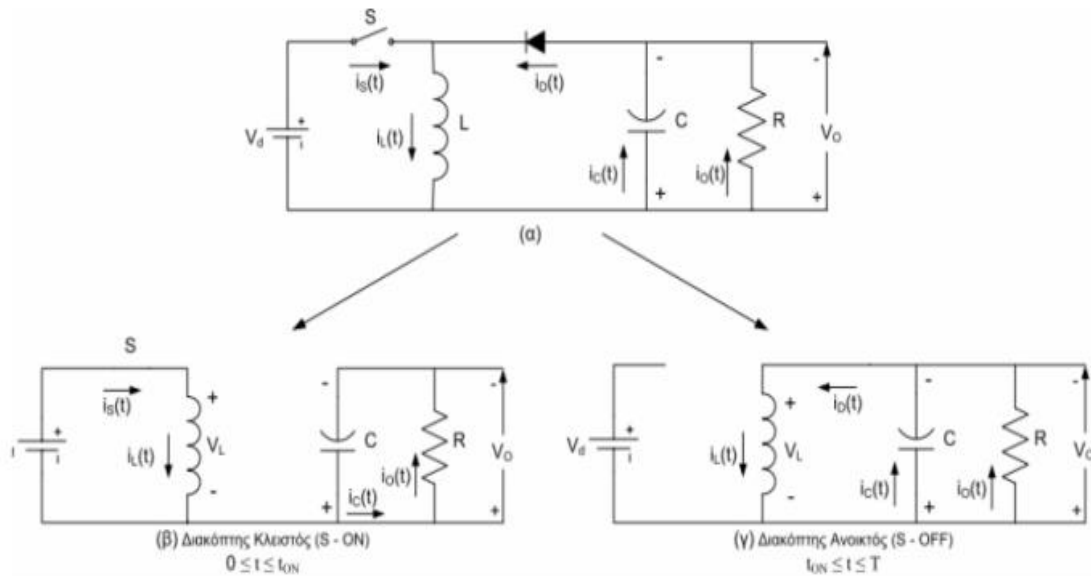
κατάσταση “on” η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη, ενώ όταν είναι σε κατάσταση “off” είναι ορθά πολωμένη. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση το ρεύμα που δημιουργείται από το πηνίο πηγαίνει προς το φορτίο. Στην δεύτερη περίπτωση, το ρεύμα έχει φορά από την πηγή εισόδου προς το φορτίο. Στο Σχήμα 2-12 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος αλλά και το ισοδύναμο κύκλωμα του.



**Σχήμα 2-12.** Κυματομορφές ρεύματος και τάσης μετατροπέα υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (αριστερά) και το ισοδύναμο κύκλωμα του στις καταστάσεις “on” και “off” (δεξιά) [1].

### 3. Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter)

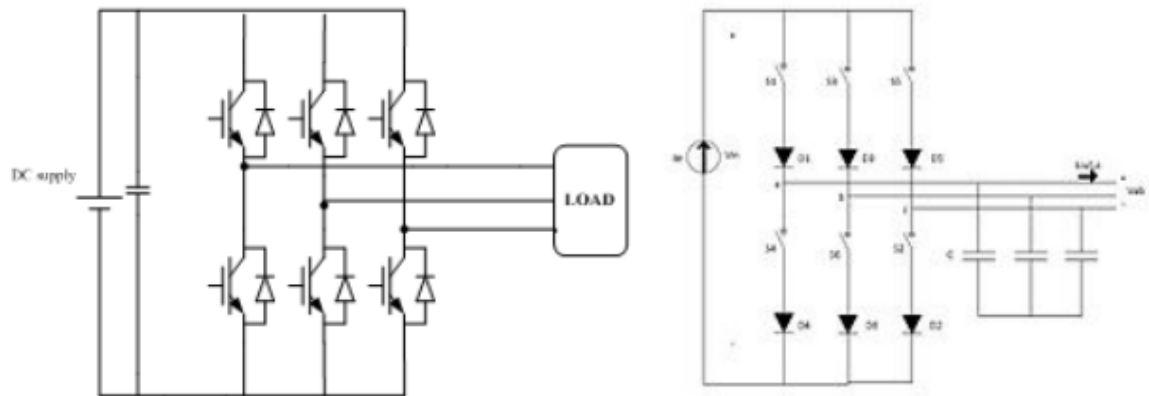
Ο μετατροπέας αυτός δημιουργείται από την σε σειρά σύνδεση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. Έτσι, όταν ο διακόπτης είναι κλειστός η τάση της πηγής εφαρμόζεται στο πηνίο το οποίο αποθηκεύει ενέργεια και το ρεύμα του αυξάνεται. Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, η αποθηκευμένη ενέργεια αποδίδεται στην έξοδο και το ρεύμα του πηνίου μειώνεται. Στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μικτού μετατροπέα συνεχούς ρεύματος.



**Σχήμα 2-13.** Ηλεκτρονικό κύκλωμα αμφίδρομον μικτού μετατροπέα συνεχούς ρεύματος [1].

## 2.6.2 Αντιστροφέας (Inverter)

Τα Φ/Β πλαίσια, η κυψέλη καυσίμου και οι μπαταρίες παράγουν συνεχές (DC) ρεύμα, ενώ συνήθως τα φορτία και το ρεύμα που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι εναλλασσόμενο (AC). Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση μιας συσκευής που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο που ουσιαστικά είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας που έχει την δυνατότητα να αλλάζει την συχνότητα και το πλάτος του ρεύματος και της τάσης που παρέχονται στην είσοδό του. Οι αντιστροφείς μπορούν να τροφοδοτηθούν είτε από πηγή συνεχούς ρεύματος είτε από πηγή συνεχούς τάσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-14. Παράλληλα, συμβάλλουν στην αποδοτικότερη φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών, όσο και στην εύρεση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος των Φ/Β πλαισίων, βελτιώνοντας έτσι την διαχείριση ενέργειας και την απόδοση του συστήματος [1].



**Σχήμα 2-14.** Ηλεκτρονικό κύκλωμα αντιστροφέα με τροφοδοσία τάσης (αριστερά) και τροφοδοσία ρεύματος (δεξιά) [1].

# 3.

## ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

---

### 3.1 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO), είναι ένας εμπνευσμένος από τη φύση αλγόριθμος βελτιστοποίησης που μοντελοποιεί τη συμπεριφορά ενός σμήνους (swarm) σωματιδίων. Κάθε σωματίδιο αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και κινείται στον χώρο αναζήτησης με βάση την προηγούμενη του κίνηση και την καλύτερη λύση που έχει εντοπίσει μέχρι τώρα. Ο αλγόριθμος PSO επιδιώκει να βρει τη βέλτιστη λύση εξερευνώντας τον χώρο αναζήτησης με βάση την ατομική εμπειρία των σωματιδίων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εντοπιστεί η βέλτιστη λύση ή μέχρι να εκπνεύσει ορισμένος αριθμός επαναλήψεων [7].

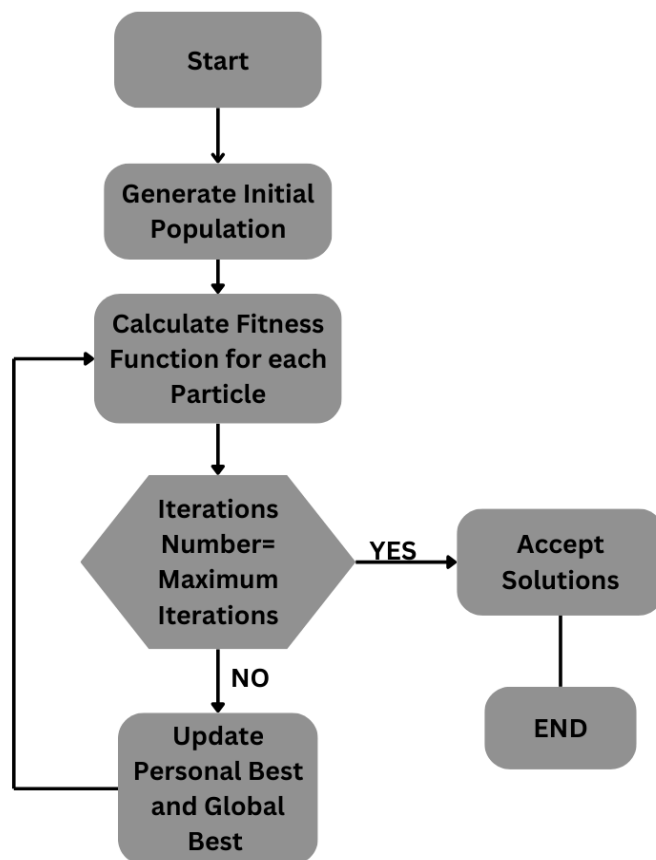
Στον αλγόριθμο που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, η συνάρτηση στην οποία ο αλγόριθμος PSO προσπαθεί να ανιχνεύσει τις βέλτιστες τιμές είναι η συνάρτηση του συνολικού κόστους του συστήματος κατά την διάρκεια της ημέρας με βήμα μιας ώρας. Έτσι, στην συνάρτηση βελτιστοποίησης πρέπει να δηλωθούν τόσο το πλήθος των μεταβλητών που είναι προς βελτιστοποίηση (decision variables) όσο και τα άνω και κάτω όρια (bounds) αυτών, οι επιτρεπτές τιμές, δηλαδή, που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές αυτές. Επιπρόσθετα, επισημαίνεται ότι κάθε δυνητική λύση (σωματίδιο) που παράγει ο αλγόριθμος PSO απορρίπτεται είτε στην περίπτωση που υπερβαίνει τα όρια που έχουν τεθεί, είτε στην περίπτωση που δεν καλύπτεται το αντίστοιχο ωριαίο φορτίο.

Παράλληλα, η διαδικασία της ανίχνευσης των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών προς βελτιστοποίηση εξαρτάται από κάποιες παραμέτρους όπως το μέγεθος σμήνους (swarm size) και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maximum iterations). Το πρώτο αναφέρεται στον αριθμό των σωματιδίων του σμήνους



που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς το σμήνος (swarm) αναπαριστά τον πληθυσμό των πιθανών λύσεων (κάθε σωματίδιο του σμήνους αποτελεί μια υποψήφια λύση). Το δεύτερο αφορά τον αριθμό των επαναλήψεων που εκτελεί ο αλγόριθμος ώσπου να βρει την βέλτιστη λύση, ανανεώνοντας κάθε φορά την θέση των σωματιδίων στο σμήνος.

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, έπειτα από πολλές δοκιμές, ορίζεται σαν Μέγεθος Σμήνους=1000 και σαν Αριθμός Επαναλήψεων=1500, καθώς ο συνδυασμός των δύο προσφέρει αρκετά ικανοποιητική απόδοση τόσο στον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου όσο και στις τιμές των μεταβλητών που βελτιστοποιούνται. Πιο συγκεκριμένα, ο παραπάνω συνδυασμός τιμών των μεταβλητών Μεγέθους Σμήνους και Αριθμού Επαναλήψεων, καθιστούν τον συγκεκριμένο αλγόριθμο γρήγορο και αποδοτικό ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την τιμή του συνολικού κόστους του συστήματος σε κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 3-1 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος αρχικοποιεί τον πληθυσμό των σωματιδίων που αντιπροσωπεύουν τις δυνητικές λύσεις στο πρόβλημα βελτιστοποίησης σύμφωνα με την ορισμένη τιμή της μεταβλητής του Μεγέθους Σμήνους. Έπειτα, υπολογίζει την τιμή της συνολικής συνάρτησης κόστους για κάθε τρέχουσα θέση του κάθε σωματιδίου. Στην συνέχεια, ελέγχει αν τα κριτήρια τερματισμού ισχύουν και σε περίπτωση που ισχύουν τερματίζει ο αλγόριθμος. Τα κριτήρια αυτά, συνήθως, αφορούν την μεταβλητή Αριθμού Επαναλήψεων. Αν τα κριτήρια αυτά δεν ισχύουν ενημερώνει την μέχρι στιγμής βέλτιστη θέση του κάθε σωματιδίου και το μέχρι στιγμής ολικό βέλτιστο της συνάρτησης και συνεχίζει την αναζήτηση.



Σχήμα 3-1. Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO.

## 3.2 Εξαντλητική Αναζήτηση (Exhaustive Search)

Η μέθοδος εξαντλητικής αναζήτησης (exhaustive search) βρίσκει το ολικό ελάχιστο ή μέγιστο μιας συνάρτησης ανάμεσα σε έναν συγκεκριμένο αριθμό υποψηφίων λύσεων. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου εξαντλητικής αναζήτησης είναι ότι ανιχνεύει εξονυχιστικά τις βέλτιστες λύσεις σε ένα συγκεκριμένο εύρος αναζήτησης, γεγονός που καθιστά τον συγκεκριμένο αλγόριθμο πολύ αξιόπιστο αναφορικά με την εύρεση βέλτιστων τιμών. Ωστόσο, η διαδικασία που ακολουθεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι αρκετά αργή καθιστώντας τον έτσι μη αποδοτικό. Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου μπορεί να μειωθεί με την εισαγωγή αρχικών σημείων (initial points) κατευθύνοντας τον αλγόριθμο στην αναζήτηση βέλτιστων τιμών σε ένα μικρότερο πεδίο αναζήτησης. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αλλά αυξάνεται και η αξιοπιστία των λύσεων που αυτός δίνει.

Ειδικότερα, τα αρχικά σημεία είναι οι τιμές της συνάρτησης κόστους που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του αλγορίθμου PSO για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής Αριθμού Επαναλήψεων, με στόχο την επαλήθευση της ιδανικής τιμής αυτής της μεταβλητής και κατ'επέκταση των βέλτιστων τιμών της συνάρτησης κόστους που προκύπτουν από αυτή.

Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επαλήθευση των βέλτιστων τιμών που προέκυψαν από την PSO. Ειδικότερα, έπειτα από πολλές δοκιμές τιμών Αριθμού Επαναλήψεων στην PSO, προέκυψε ένας αντίστοιχος αριθμός υποψηφίων βέλτιστων τιμών για την συνάρτηση κόστους. Αναλυτικότερα, δοκιμάστηκαν οι τιμές Αριθμός Επαναλήψεων=1000, Αριθμός Επαναλήψεων = 1300, Αριθμός Επαναλήψεων = 1500, Αριθμός Επαναλήψεων = 1700, Αριθμός Επαναλήψεων = 2000 και λήφθηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα της συνάρτησης κόστους από την υλοποίηση του αλγορίθμου PSO για κάθε μία από τις παραπάνω τιμές της μεταβλητής Αριθμού Επαναλήψεων. Έτσι, οι υποψήφιες τιμές της συνάρτησης κόστους που προκύπτουν από τις διάφορες τιμές της μεταβλητής Αριθμού Επαναλήψεων μπαίνουν σαν είσοδο στον αλγόριθμο εξαντλητικής αναζήτησης, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το πεδίο ανίχνευσης και αυξάνοντας την ποιότητα του εντοπισμού της βέλτιστης λύσης για την συνάρτηση κόστους. Συνυπολογίζοντας την επιθυμία για ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους (objective function) αλλά και εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε μικρό χρονικό διάστημα, διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της συνάρτησης κόστους που προέκυψαν από την μέθοδο εξαντλητικής αναζήτησης (exhaustive search) συγκλίνουν σε μεγάλο βαθμό με εκείνες τις PSO, για αριθμό επαναλήψεων=1500.

# 4.

## ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 4.1 Γενική περιγραφή συστήματος

Βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση του κόστους ενός συστήματος το οποίο αποτελείται από συστοιχία Φ/Β πλαισίων (PV array) και κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEM hydrogen fuel cell) η οποία συνεισφέρει τόσο στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου, όσο και στην παροχή θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των θερμικών φορτίων (Combined Cooling Heating, Power). Παράλληλα, στο σύστημα υπάρχει συστοιχία μπαταριών (batteries bank), η οποία χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την συνεισφορά στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου σε ώρες αιχμής. Τέλος, το ολικό σύστημα είναι συνδεδεμένο και με το ηλεκτρικό δίκτυο (electric grid), το οποίο είτε συνεισφέρει σε περιόδους έλλειψης ενέργειας του συστήματος για την κάλυψη του φορτίου, είτε το σύστημα πουλάει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο σε περιόδους ενεργειακού πλεονάσματος.

Επιπρόσθετα, υλοποιούνται και εξετάζονται δύο επιπλέον μοντέλα σύνθεσης συστήματος, παραλλαγμένα από το αρχικό, με στόχο την παρατήρηση της συμπεριφοράς του συστήματος αλλά και το τελικό κόστος που προκύπτει για την κάθε περίπτωση. Οι τρεις περιπτώσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

### **Περίπτωση 1**

Το σύστημα της περίπτωσης 1 αποτελείται από Φ/Β συστοιχία, κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας και συστοιχία μπαταριών. Το υδρογόνο που παρέχεται στην κυψέλη καυσίμου για συνεισφορά στην κάλυψη τόσο του ηλεκτρικού όσο και του θερμικού φορτίου, παρέχεται στην εγκατάσταση συμπιεσμένο και αποθηκεύεται σε δοχεία έτοιμο προς κατανάλωση. Επομένως, το σύστημα δεν δαπανά ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου, αντιθέτως το έχει ήδη αποθηκευμένο και συμπιεσμένο σε δεξαμενή αφού παράγεται και προμηθεύεται στο σύστημα από εξωτερική πηγή. Το σύστημα της περίπτωσης 1 είναι συνδεδεμένο και με το δίκτυο είτε για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας τις ώρες που το φορτίο ξεπερνά την ωριαία ενέργεια που το σύστημα μπορεί να παρέχει είτε για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο τις ώρες που υπάρχει περίσσεια παραγόμενη ενέργεια.

### **Περίπτωση 2**

Το σύστημα της περίπτωσης 2 αποτελείται από Φ/Β συστοιχία, κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας και συστοιχία μπαταριών. Η διαφορά του συστήματος της περίπτωσης 2 με το σύστημα της περίπτωσης 1 είναι ότι το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με ενέργεια που το σύστημα παρέχει. Πιο συγκεκριμένα, σε περιόδους που υπάρχει περίσσεια ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία παράγεται υδρογόνο μέσω electrolyzer, ώστε να παρέχεται στην κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής αλλά και θερμικής ενέργειας με στόχο την κάλυψη θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου. Τέλος, και στην περίπτωση 2 το σύστημα είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο είτε για αγορά είτε για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας.

### **Περίπτωση 3**

Το σύστημα της περίπτωσης 3 αποτελείται από Φ/Β συστοιχία και κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας. Όπως στο σύστημα της περίπτωσης 2 έτσι και στο σύστημα της περίπτωσης 3 το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με ενέργεια που το σύστημα παρέχει. Πιο συγκεκριμένα, σε περιόδους που υπάρχει περίσσεια ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία παράγεται υδρογόνο μέσω electrolyzer, ώστε να παρέχεται στην κυψέλη καυσίμου για την κάλυψη θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου του χρήστη. Παράλληλα, η διαφοροποίηση στην παρούσα περίπτωση σε σχέση με τις περιπτώσεις 1 και 2 είναι ότι το σύστημα της περίπτωσης 3 λειτουργεί χωρίς την υποστήριξη της συστοιχίας μπαταριών. Τέλος, και στην περίπτωση 3 το σύστημα είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο είτε για αγορά είτε για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας.

## 4.2 Προσομοίωση Συστήματος

Στα Σχήματα 4-1, 4-3 και 4-5, φαίνονται τα διαγράμματα των τριών συστημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4-1 απεικονίζεται το σύστημα της περίπτωσης 1, στο Σχήμα 4-3 το σύστημα της περίπτωσης 2 και στο Σχήμα 4-5 το σύστημα της περίπτωσης 3. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας κάθε περίπτωσης συστήματος. Ειδικότερα, στο Σχήμα 4-2 φαίνεται ο αλγόριθμος του συστήματος της περίπτωσης 1, στο Σχήμα 4-4 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του συστήματος της περίπτωσης 2 και στο Σχήμα 4-6 απεικονίζεται ο αλγόριθμος του συστήματος της περίπτωσης 3.

### Περίπτωση 1

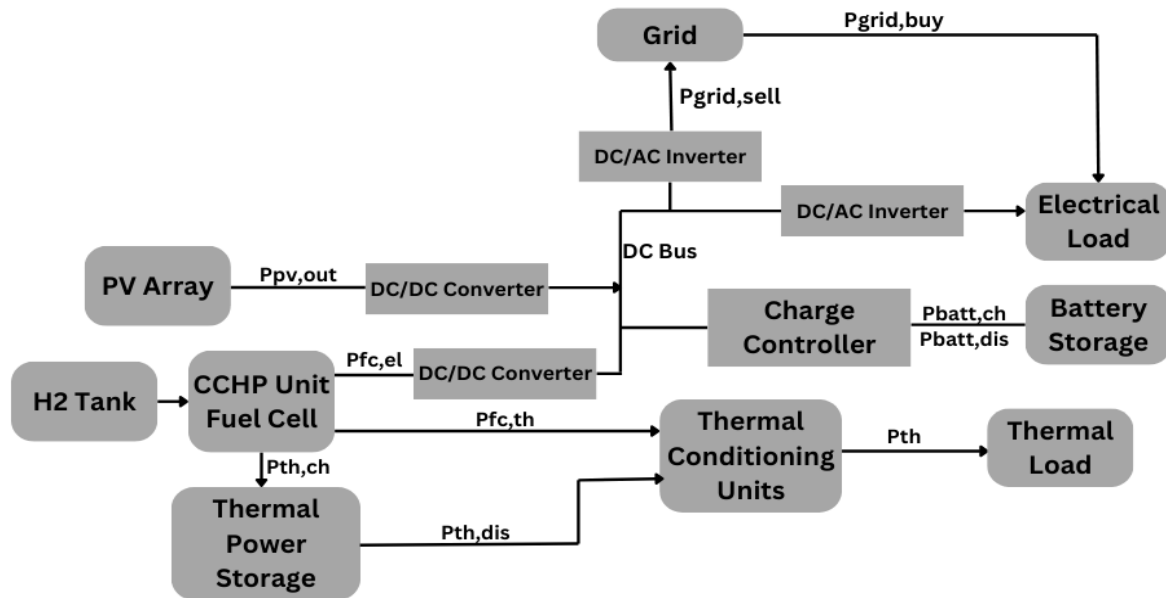
Στο Σχήμα 4-1, φαίνεται η διασύνδεση των μονάδων του συστήματος της περίπτωσης 1, όπου έχουν προστεθεί και οι απαραίτητοι μετατροπείς DC/DC και DC/AC. Αναλυτικότερα, η χρήση του μετατροπέα DC/DC στη σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας με το DC-bus, αποσκοπεί στην προσαρμογή των επιπέδων τάσης (voltage matching) μεταξύ της τάσης εξόδου της Φ/Β συστοιχίας και της τάσης που λειτουργεί η μονάδα με την οποία συνδέεται η Φ/Β συστοιχία και στην σταθεροποίηση της τάσης εξόδου της Φ/Β συστοιχίας. Στο ίδιο πλαίσιο, τοποθετείται ένας DC/DC μετατροπέας στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου, ο οποίος χρησιμεύει επίσης για προσαρμογή τάσης μεταξύ της εξόδου της κυψέλης καυσίμου και της απαιτούμενης τάσης, καθώς και για ρύθμιση ισχύος καθώς συχνά οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν διακυμάνσεις τόσο τάσης όσο και ρεύματος στην έξοδο τους ανάλογα με τις συνθήκες του φορτίου, με αποτέλεσμα ο DC/DC μετατροπέας να συμβάλει στην σταθεροποίηση των διακυμάνσεων αυτών.

Επιπρόσθετα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχει σύνδεση του συστήματος με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για τις περιπτώσεις όπου είτε περισσεύει ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα, η οποία πωλείται στο δίκτυο ( $P_{grid,sell} \times \Delta t$ ), όπου το  $\Delta t$  αναφέρεται στην χρονική διάρκεια για την οποία μετριέται η ποσότητα ενέργειας, είτε το σύστημα αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου, οπότε το δίκτυο προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα και συγκεκριμένα απευθείας στο φορτίο ( $P_{grid,buy} \times \Delta t$ ). Για τον λόγο αυτό, έχει προστεθεί ένας μετατροπέας DC/AC για την μετατροπή της DC τάσης που έχει στην έξοδο του το σύστημα σε AC που λειτουργεί το ηλεκτρικό δίκτυο.

Παράλληλα, μεταξύ DC-bus και ηλεκτρικού φορτίου είναι τοποθετημένος ένας DC/AC μετατροπέας για την μετατροπή της DC τάσης του DC-bus σε AC που χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό φορτίο, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει ότι η τάση και η συχνότητα της AC εξόδου είναι στα επιθυμητά επίπεδα.

Μεταξύ της συστοιχίας μπαταριών και του DC-bus είναι εγκατεστημένος ένας αμφίδρομος ρυθμιστής φόρτισης. Η συσκευή αυτή έχει πολλαπλούς ρόλους καθώς προστατεύει τις μπαταρίες από υπερφόρτιση και προσαρμόζει το ρεύμα φόρτισης τους με στόχο την βέλτιστη αποδοτικότητα τους,

τον μεγαλύτερο χρόνο ζωής τους αλλά και την βέλτιστη διαχείριση της ισχύος φόρτισης ( $P_{batt,ch}$ ) και εκφόρτισής τους ( $P_{batt,dis}$ ).



**Σχήμα 4-1.** Το διάγραμμα του συστήματος με χρήση υδρογόνου εξωτερικής παροχής, μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου και φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Παράλληλα, αξίζει να επισημανθεί ότι τόσο η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Φ/Β συστοιχίας ( $P_{pv,out}$ ) όσο και η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου ( $P_{fc,el}$ ) στοχεύουν στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου.

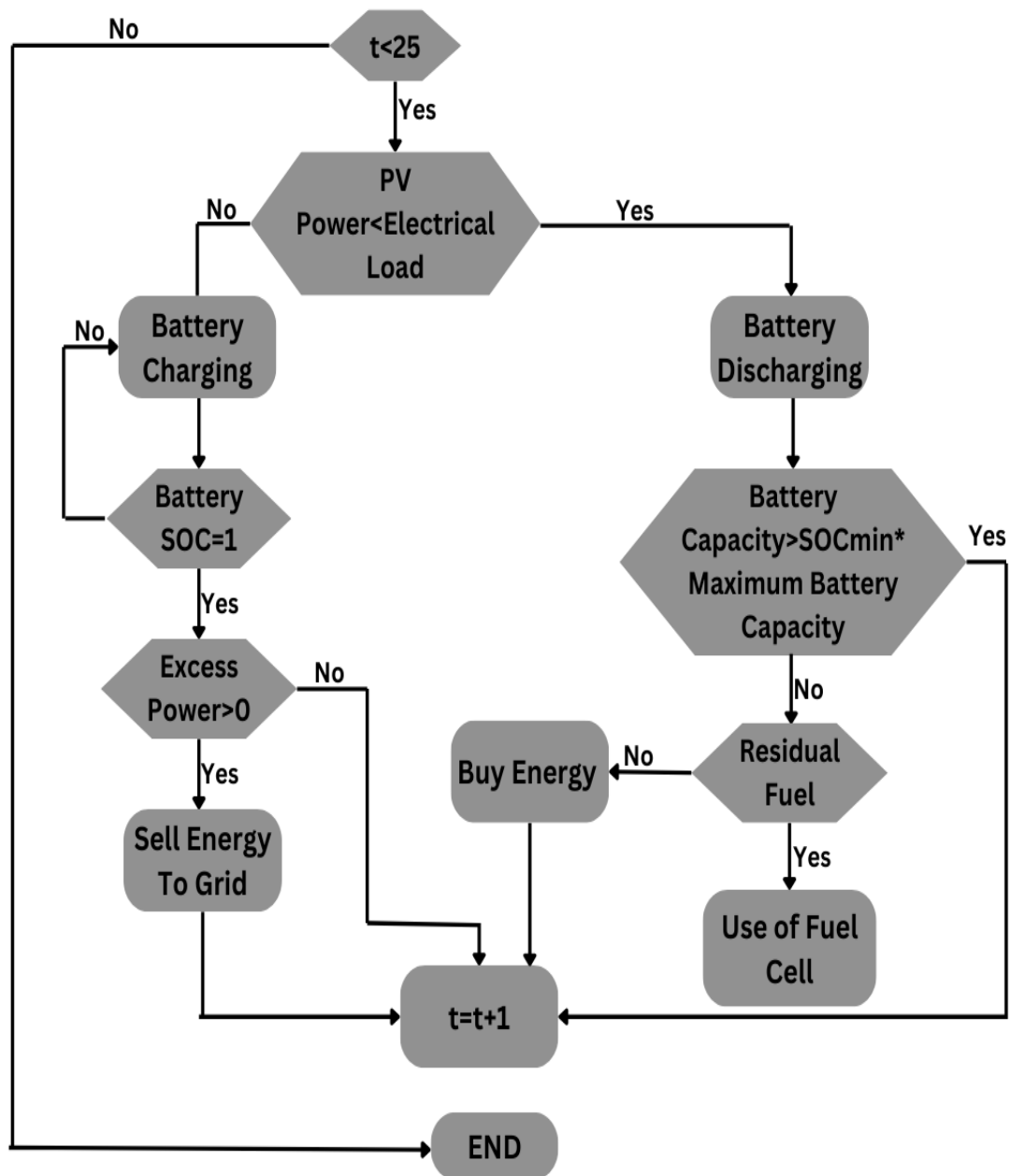
Επιπρόσθετα, το σύστημα είναι ικανό να καλύψει όχι μόνο τα ηλεκτρικά φορτία αλλά και τα θερμικά. Αυτό γίνεται μέσω του συστήματος συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος (Combined Cooling, Heating and Power). Συγκεκριμένα, η κυψέλη καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας ( $>100^{\circ}\text{C}$ ) εκτός από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να διοχετεύσει και θερμική ισχύ ( $P_{fc,th}$ ). Η απόδοση της κυψέλης υδρογόνου τύπου PEM υψηλής θερμοκρασίας είναι περίπου στο 50%, γεγονός που σημαίνει ότι το 50% της ισχύος μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη του θερμικού φορτίου μιας εγκατάστασης. Αν η θερμική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου είναι μεγαλύτερη από το θερμικό φορτίο, τότε το τελευταίο καλύπτεται από την θερμική ισχύ της κυψέλης καυσίμου ( $P_{fc,th}$ ) και η περίσσεια ποσότητα θερμότητας αποθηκεύεται ( $P_{th,ch} \times \Delta t$ ). Αντίθετα, αν η θερμική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου είναι μικρότερη από το θερμικό φορτίο, τότε χρησιμοποιείται και η θερμική ενέργεια ( $P_{th,dis} \times \Delta t$ ) που είναι αποθηκευμένη και διανέμεται σε ψύκτη απορρόφησης (Absorption Chiller) και σε πηνία θέρμανσης (Heating Coil) και από εκεί στα αντίστοιχα φορτία ψύξης ή θέρμανσης για την παροχή της απαιτούμενης ισχύος ( $P_{th}$ ) στα θερμικά φορτία. Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας γίνεται σε ειδικές δεξαμενές (tanks) αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που περιέχουν ένα θερμικό υγρό που χρησιμοποιείται σαν μέσο

αποθήκευσης και μεταφοράς της θερμικής ισχύος αφού έχει την δυνατότητα να απορροφά την θερμική ισχύ. Το υγρό αυτό συνήθως είναι το νερό.

Όπως είναι αναμενόμενο, η διαδικασία της κάλυψης του θερμικού φορτίου προκαλεί αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος λόγω της λειτουργίας και της συντήρησης του υποσυστήματος που αφορά την θερμική ισχύ και συγκεκριμένα της κυψέλης καυσίμου, του ψύκτη απορρόφησης, του πηνίου θέρμανσης αλλά και του συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 4-2 φαίνεται ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας του συστήματος με χρήση υδρογόνου που παράγεται και παρέχεται στο σύστημα συμπιεσμένο από εξωτερική πηγή, συστοιχία μπαταριών, κυψέλη καυσίμου και Φ/Β συστοιχία. Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιείται με βήμα μίας ώρας στο σύνολο μίας ημέρας. Με το πέρας της ημέρας ( $t > 25h$ ) τερματίζει και ο αλγόριθμος, αλλιώς ακολουθεί τις προβλεπόμενες διαδρομές. Αν  $t < 25h$ , ο αλγόριθμος εξετάζει αν υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο. Αν υπάρχει, τότε ξεκινάει να φορτίζει τις μπαταρίες του συστήματος, έως ότου το επίπεδο φόρτισης (SOC) φτάσει στο μέγιστο βαθμό ( $SOC_{max}=1$ ). Εάν φτάσει στο  $SOC=1$  και υπάρχει ακόμα περίσσεια ενέργειας τότε την πουλάει στο δίκτυο στην αντίστοιχη τιμή, ανάλογα με την ώρα. Αν δεν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας ο αλγόριθμος προσπαθεί να καλύψει το φορτίο με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες. Αυτό συμβαίνει μέχρι το SOC φτάσει στην κατώτατη τιμή του ( $SOC_{min}=0,2$ ). Αν το φορτίο εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα της ισχύος εξόδου της Φ/Β συστοιχίας και της ισχύος των μπαταριών την συγκεκριμένη ώρα, γίνεται ο έλεγχος του καυσίμου (υδρογόνο) που είναι αποθηκευμένο στην δεξαμενή. Αν υπάρχει περίσσειμα υδρογόνου τότε χρησιμοποιείται η κυψέλη καυσίμου για την κάλυψη του φορτίου. Αν ούτε αυτό δεν είναι αρκετό, τότε το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο στην εκάστοτε τιμή, ανάλογα με την ώρα.





**Σχήμα 4-2.** Ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας του συστήματος με χρήση υδρογόνου εξωτερικής παροχής, μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου και φωτοβολταϊκή συστοιχία.

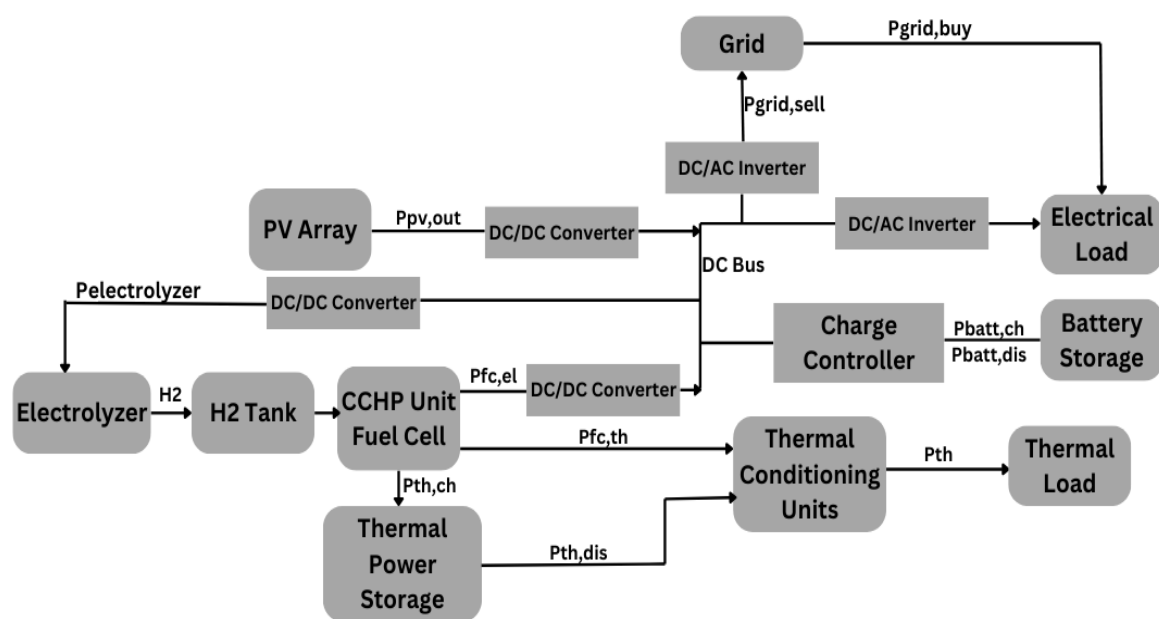
Αναφορικά με την κάλυψη του θερμικού φορτίου, όπως αναφέρθηκε, ο αλγόριθμος ελέγχει κάθε ώρα της ημέρας το θερμικό φορτίο. Αν το θερμικό φορτίο είναι μικρότερο από την παραγόμενη θερμική ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου, τότε το θερμικό φορτίο καλύπτεται και η περίσσεια θερμικής ενέργειας αποθηκεύεται με την διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω. Αντίθετα, αν το θερμικό φορτίο υπερβαίνει την παραγόμενη θερμική ενέργεια από τις κυψέλες καυσίμου, τότε ο αλγόριθμος εξετάζει την ποσότητα θερμικής ενέργειας που έχει αποθηκευτεί τις προηγούμενες ώρες και καλύπτει

το θερμικό φορτίο από το άθροισμα της παραγόμενης θερμικής ενέργειας των κυψέλων καυσίμου με την απαιτούμενη αποθηκευμένη θερμική ενέργεια.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι πριν το πέρας του αλγορίθμου ελέγχεται ότι η υπολειπόμενη διαθέσιμη χωρητικότητα στις μπαταρίες είναι μεγαλύτερη ή ίση από την διαθέσιμη χωρητικότητα των μπαταριών για  $t=1$ .

### Περίπτωση 2

Στο Σχήμα 4-3 φαίνεται το διάγραμμα του συστήματος με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, μπαταριών, κυψέλης καυσίμου και Φ/Β συστοιχίας.



**Σχήμα 4-3.** Το διάγραμμα του συστήματος με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου και φωτοβολταϊκή συστοιχία.

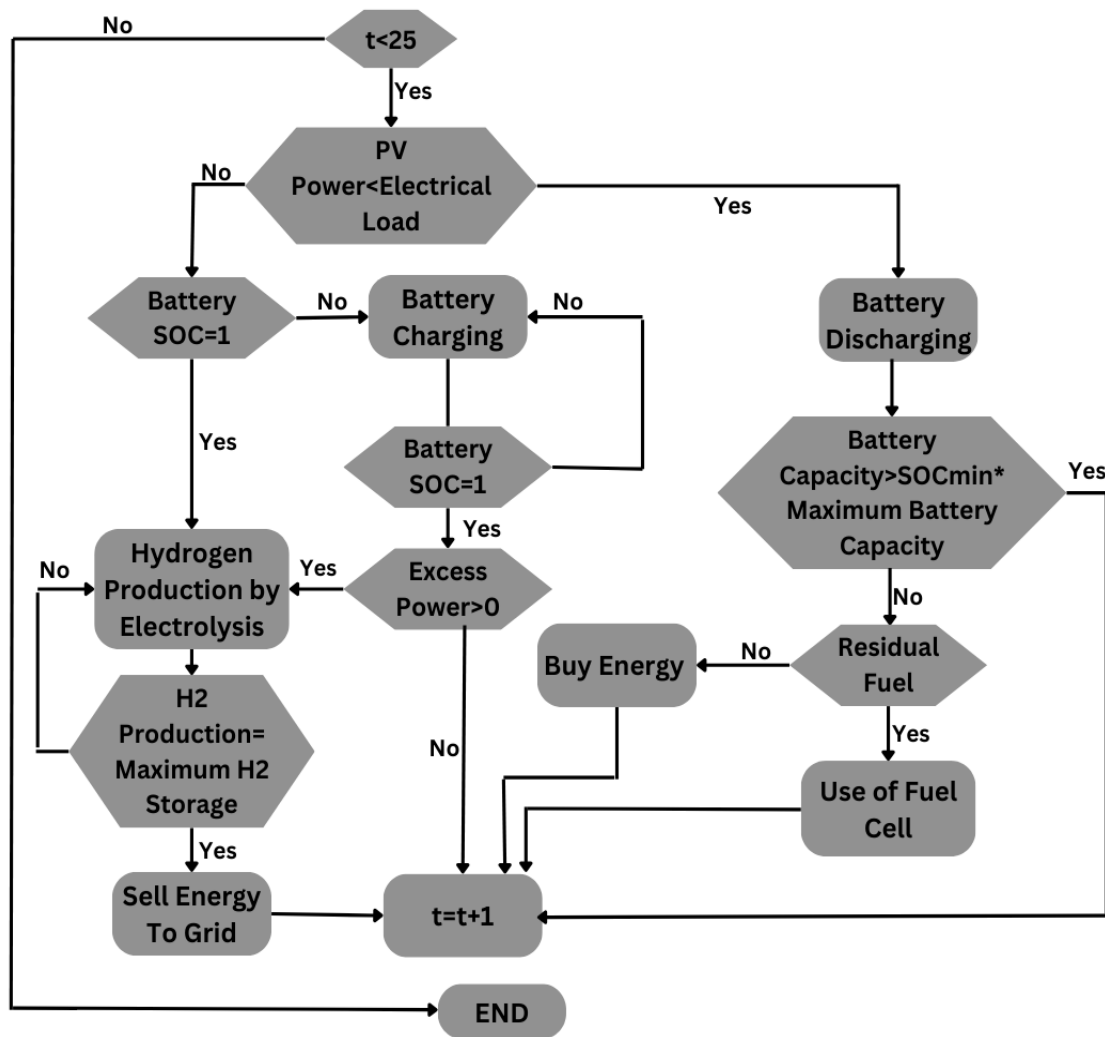
Η διαφοροποίηση στο σύστημα της περίπτωσης 2 είναι ότι η Φ/Β συστοιχία και οι μπαταρίες είναι συνδεδεμένα με τον electrolyzer μέσω του DC bus, ώστε σε περιόδους που υπάρχει περίσσεια ενέργεια να παράγει υδρογόνο που θα τροφοδοτεί την κυψέλη καυσίμου. Συγκεκριμένα, ο electrolyzer είναι συνδεδεμένος με το DC bus, μέσω DC/DC μετατροπέα, από το οποίο όταν ο αλγόριθμος το απαιτεί, τροφοδοτείται ( $P_{electrolyzer}$ ) με στόχο την παραγωγή υδρογόνου. Η τροφοδότηση αυτή, γίνεται μέσω της Φ/Β συστοιχίας όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας. Όσον αφορά το θερμικό φορτίο, η κυψέλη καυσίμου παραμένει η πρωτεύουσα πηγή.

Παράλληλα, όπως και στην περίπτωση 1, πριν το πέρας του αλγορίθμου ελέγχεται ότι η υπολειπόμενη διαθέσιμη χωρητικότητα στις μπαταρίες είναι μεγαλύτερη ή ίση από την διαθέσιμη χωρητικότητα των

μπαταριών για  $t=1$ . Παράλληλα, στην περίπτωση αυτή, πριν την λήξη του αλγορίθμου, ελέγχεται και αν η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου στην δεξαμενή που έχει παραχθεί από τον electrolyzer είναι μεγαλύτερη ή ίση από εκείνη του  $t=1$ .

Στο Σχήμα 4-4 φαίνεται ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας του συστήματος με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου και Φ/Β συστοιχία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται εξίσου με βήμα μίας ώρας στο σύνολο μίας ημέρας. Με το πέρας της ημέρας (24 ώρες) τερματίζει και ο αλγόριθμος, αλλιώς ακολουθεί τις προβλεπόμενες διαδρομές. Αν  $t < 25$ , ο αλγόριθμος εξετάζει αν υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο. Αν υπάρχει, ελέγχει αν το  $SOC=1$ . Αν ισχύει και αυτό, τότε το σύστημα παρέχει την περίσσεια ενέργειας στον electrolyzer για την παραγωγή υδρογόνου, έως ότου είτε η παραγωγή υδρογόνου φτάσει στην μέγιστη επιτρεπτή τιμή της (η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου έχει γεμίσει), είτε δεν υπάρχει περίσσεια ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία. Αν υπάρχει ακόμα διαθέσιμη ενέργεια καθώς επίσης  $SOC=1$  και η παραγωγή υδρογόνου φτάσει στην μέγιστη τιμή, τότε το σύστημα πουλάει στο δίκτυο στην αντίστοιχη τιμή, ανάλογα με την ώρα. Αν εξ αρχής το  $SOC < 1$  το σύστημα δίνει προτεραιότητα στην φόρτιση των μπαταριών και όταν αυτό γίνει  $SOC=1$  παρέχει την ενέργεια για την ηλεκτρόλυση.

Αν, από την άλλη, δεν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας ο αλγόριθμος προσπαθεί να καλύψει το φορτίο με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες. Αυτό συμβαίνει μέχρι το  $SOC$  φτάσει στην κατώτατη τιμή του ( $SOC_{min}=0.2$ ). Αν το φορτίο εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερο, γίνεται ο έλεγχος του καυσίμου (υδρογόνο) που είναι αποθηκευμένο στην δεξαμενή. Αν υπάρχει περίσσειμα υδρογόνου τότε χρησιμοποιείται η κυψέλη υδρογόνου για την κάλυψη του φορτίου. Αν ούτε αυτό δεν είναι αρκετό, τότε το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο στην εκάστοτε τιμή, ανάλογα με την ώρα.

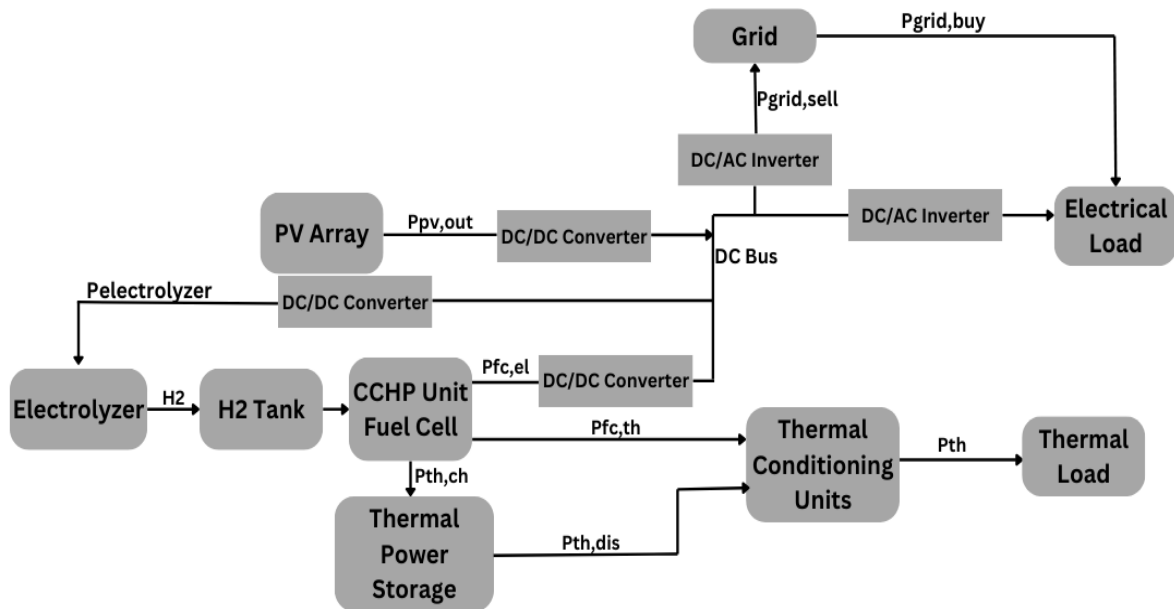


**Σχήμα 4-4.** Ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας του συστήματος με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου και φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Αναφορικά με την κάλυψη του θερμικού φορτίου, ο αλγόριθμος ελέγχει κάθε ώρα της ημέρας το θερμικό φορτίο. Αν το θερμικό φορτίο είναι μικρότερο από την παραγόμενη θερμική ισχύ από την κυψέλη καυσίμου, τότε το θερμικό φορτίο καλύπτεται και η περίσσεια θερμικής ισχύος αποθηκεύεται. Αντίθετα, αν το θερμικό φορτίο υπερβαίνει την παραγόμενη θερμική ισχύς από τις κυψέλες καυσίμου, τότε ο αλγόριθμος εξετάζει την ποσότητα θερμικής ισχύος που έχει αποθηκευτεί τις προηγούμενες ώρες και καλύπτει το θερμικό φορτίο από το άθροισμα της παραγόμενης θερμικής ισχύος των κυψελών καυσίμου με την απαιτούμενη αποθηκευμένη θερμική ισχύ.

### Περίπτωση 3

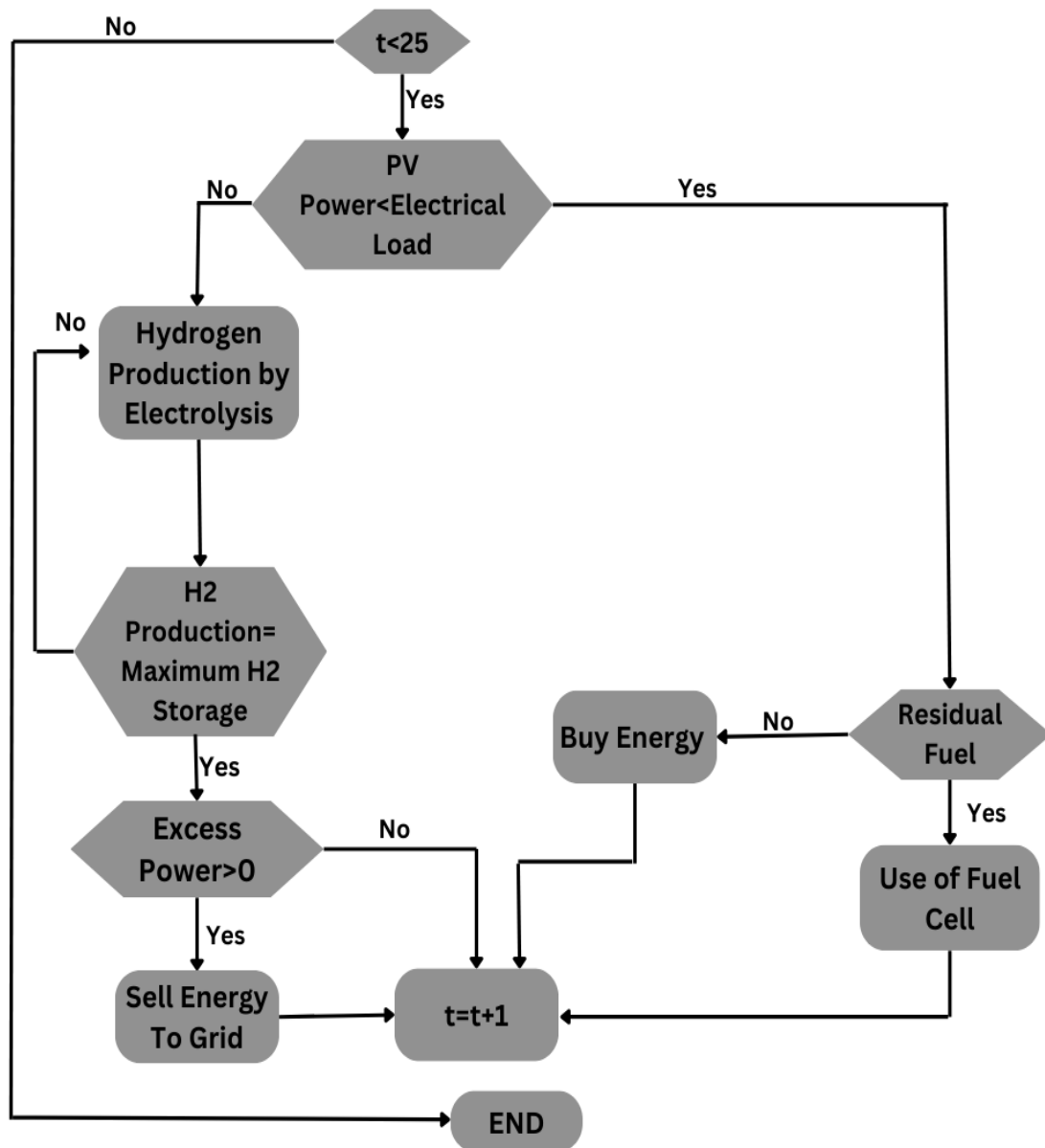
Στο Σχήμα 4-5 φαίνεται το διάγραμμα του συστήματος με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, κυψέλη καυσίμου και Φ/Β συστοιχία.



**Σχήμα 4-5.** Το διάγραμμα του συστήματος με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, κυψέλη καυσίμου και φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Η διαφοροποίηση της περίπτωσης 3 από την περίπτωση 2 είναι ότι δεν υπάρχει η συστοιχία μπαταριών για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και στήριξη του συστήματος σε περιόδους χαμηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία ή σε περιόδους υψηλών φορτίων. Έτσι, το σύστημα βασίζεται στην παροχή ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία και στην παροχή ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου, όταν το πρώτο αδυνατεί να καλύψει το φορτίο. Όσον αφορά το θερμικό φορτίο, η κυψέλη καυσίμου παραμένει η πρωτεύουσα πηγή. Το σύστημα παραγωγής θερμικής ενέργειας παραμένει το ίδιο εφόσον υπάρχει η κυψέλη καυσίμου.

Στο Σχήμα 4-6 φαίνεται ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας του συστήματος διαχείρισης ενέργειας με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, κυψέλη καυσίμου και Φ/Β συστοιγία.



**Σχήμα 4-6.** Ο αλγόριθμος του συστήματος διαχείρισης ενέργειας με παραγωγή και χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, κυψέλη καυσίμου και φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος ξεκινάει όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις και υλοποιείται εξίσου με βήμα μίας ώρας στο σύνολο μίας ημέρας. Με το πέρας της ημέρας (24 ώρες) τερματίζει και ο αλγόριθμος, αλλιώς ακολουθεί τις προβλεπόμενες διαδρομές. Αν  $t < 25$ , ο αλγόριθμος εξετάζει αν υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο. Αν υπάρχει, τότε παρέχει την περίσσεια ενέργεια στον electrolyzer για την παραγωγή υδρογόνου είτε μέχρι να μην υπάρχει περίσσεια ενέργειας είτε μέχρι η δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου να γεμίσει πλήρως. Αν αυτή φτάσει στο μέγιστο βαθμό (η δεξαμενή

αποθήκευσης υδρογόνου γεμίσει πλήρως), τότε το σύστημα πουλάει την υπόλοιπη διαθέσιμη ενέργεια στο δίκτυο στην αντίστοιχη τιμή, ανάλογα με την ώρα.

Αν από την άλλη δεν υπάρχει περίσσεια ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία, ο αλγόριθμος εξετάζει αν υπάρχει διαθέσιμο υδρογόνο. Αν υπάρχει, παρέχεται το αποθηκευμένο υδρογόνο στη κυψέλη καυσίμου για την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Αν ούτε αυτό αρκεί ή αν δεν υπάρχει διαθέσιμο υδρογόνο, τότε το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο στην εκάστοτε τιμή, ανάλογα με την ώρα.

Αναφορικά με την κάλυψη του θερμικού φορτίου, ο αλγόριθμος ελέγχει κάθε ώρα της ημέρας το θερμικό φορτίο. Αν το θερμικό φορτίο είναι μικρότερο από την παραγόμενη θερμική ισχύς από την κυψέλη καυσίμου, τότε το θερμικό φορτίο καλύπτεται και η περίσσεια θερμικής ισχύος αποθηκεύεται. Αντίθετα, αν το θερμικό φορτίο υπερβαίνει την παραγόμενη θερμική ισχύς από τις κυψέλες καυσίμου, τότε ο αλγόριθμος εξετάζει την ποσότητα θερμικής ισχύος που έχει αποθηκευτεί τις προηγούμενες ώρες και καλύπτει το θερμικό φορτίο από το άθροισμα της παραγόμενης θερμικής ισχύος των κυψελών καυσίμου με την απαιτούμενη αποθηκευμένη θερμική ισχύ.

Στην περίπτωση αυτή, πριν την λήξη του αλγορίθμου, ελέγχεται και αν η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου στην δεξαμενή που έχει παραχθεί από τον electrolyzer είναι μεγαλύτερη ή ίση από εκείνη του  $t=1$ .

## 4.3 Μεταβλητές Απόφασης

Όπως έχει αναφερθεί, ο βασικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο Particle Swarm Optimization (PSO). Σε γενικό πλαίσιο, αφού δηλώθηκαν οι μεταβλητές και οι μεταβλητές απόφασης (decision variables), τέθηκαν τα άνω και κάτω όρια τους, ώστε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε να βελτιστοποιεί τις μεταβλητές απόφασης (decision variables) εντός επιθυμητών ορίων και κατ'επέκταση και την συνολική συνάρτηση κόστους που απαρτίζεται από τις μεταβλητές αυτές. Στην συνέχεια, κλήθηκε η συνάρτηση βελτιστοποίησης μέσα στην οποία καλείται η αντικειμενική συνάρτηση κόστους (cost objective function), η οποία υπολογίζει το ελάχιστο ημερήσιο κόστος του συστήματος και επιστρέφει τις μεταβλητές απόφασης (decision variables) και το ελάχιστο δυνατό κόστος στην συνάρτηση βελτιστοποίησης. Τέλος, ο αλγόριθμος υπολογίζει το ωριαίο κόστος και τις ωριαίες τιμές των μεταβλητών απόφασης (decision variables) με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους σε 24 ώρες (μία ημέρα).

Οι μεταβλητές που βελτιστοποιεί ο αλγόριθμος είναι οι εξής:

### **1. Θερμική ισχύς για αποθήκευση**

Η συγκεκριμένη μεταβλητή απόφασης εκφράζει την θερμική ισχύ που αποθηκεύεται.

### **2. Θερμική ισχύς που αφαιρείται από την αποθηκευμένη**

Η συγκεκριμένη μεταβλητή απόφασης εκφράζει την θερμική ισχύ που αφαιρείται από την αποθηκευμένη.

### **3. Ηλεκτρική ισχύς κυψέλης καυσίμου**

Εκφράζει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου. Ο λόγος που βελτιστοποιείται είναι διότι η κυψέλη καυσίμου συμβάλει στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου και επηρεάζει άμεσα την λειτουργία των υπόλοιπων υποσυστημάτων.

### **4. Ισχύς που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο**

Η μεταβλητή αυτή εκφράζει την ισχύ που το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει από το δίκτυο κάθε ώρα και βελτιστοποιείται με στόχο την ελαχιστοποίηση της ισχύος που το σύστημα αγοράζει από το ηλεκτρικό δίκτυο και του συνολικού κόστους.

### **5. Ισχύς φόρτισης μπαταριών**

Η συγκεκριμένη μεταβλητή που βελτιστοποιείται αφορά την ωριαία ισχύ φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών και αποτελεί καθοριστική παράμετρο στην διαχείριση ενέργειας του συστήματος.

### **6. Ισχύς εκφόρτισης μπαταριών**

Αντίστοιχα, αυτή η μεταβλητή εκφράζει την ωριαία ισχύ εκφόρτισης των μπαταριών.



## 4.4 Συνάρτηση Κόστους

Η συνολική συνάρτηση κόστους υπολογίζει το συνολικό κόστος που προκύπτει από την λειτουργία του συστήματος για τη διάρκεια μιας ημέρας με βήμα μιας ώρας [9]. Αυτό, όπως είναι αναμενόμενο, μεταβάλλεται ανάλογα με την περίπτωση.

### Περίπτωση 1

Η συνολική συνάρτηση κόστους για το σύστημα της περίπτωσης 1 δίνεται από τη σχέση (4.1):

$$\text{Cost} = \sum_{t=1}^{24} \{C_{cchp}(t) + C_{grid,buy}(t) + C_{om}(t) - C_{grid,sell}(t)\} \quad (4.1)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$C_{cchp}(t)$ : εκφράζει το συνολικό κόστος της μονάδας συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος (€),

$C_{grid,buy}(t)$ : εκφράζει τα έξοδα που δαπανά ο χρήστης για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο (€),

$C_{om}(t)$ : εκφράζει τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού του συστήματος (€),

$C_{grid,sell}(t)$ : εκφράζει τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο (€).

Η συνάρτηση (4.1) συνολικού κόστους είναι μια σύνθεση πολλών όρων, όπου ο καθένας αντιπροσωπεύει ένα κόστος που σχετίζεται με διάφορες πτυχές της διαχείρισης ενέργειας. Η συνάρτηση κόστους εξαρτάται από τον χρόνο, υποδεικνύοντας ότι τα κόστη μπορεί να ποικίλουν κατά τη διάρκεια του χρόνου λόγω παραγόντων όπως οι αλλαγές στις τιμές της ενέργειας, οι κλιματικές συνθήκες και το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους εκφράζεται από το άθροισμα των επιμέρους συναρτήσεων κόστους σε χρονικό διάστημα μιας ημέρας (24 ώρες) με βήμα μιας ώρας. Τέλος, για την υλοποίηση του αλγορίθμου της περίπτωσης 1 ορίζεται σαν Πλήθος Σμηνών=1000 και σαν Αριθμός Επαναλήψεων=1500, καθώς ο συνδυασμός των δύο προσφέρει αρκετά ικανοποιητική απόδοση τόσο στον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου όσο και στις τιμές των μεταβλητών που βελτιστοποιούνται και κατ' επέκταση στο συνολικό κόστος του συστήματος.

Αναλυτικότερα, η συνάρτηση κόστους της μονάδας συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος της περίπτωσης 1 περιγράφεται στην σχέση (4.2):

$$C_{chp}(t) = C_{fuel} \times (P_{fc,electrical}(t) + P_{fc,thermal}(t)) \times \Delta t + (C_a + C_{beta}) \times \left(1 - e^{-\frac{t_0}{t_{const}}}\right) \quad (4.2)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$C_{fuel}$ : κόστος υδρογόνου κατανάλωσης (€/kWh),

$P_{fc,electrical}(t)$ : ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου (kW),

$P_{fc,thermal}(t)$ : θερμική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου (kW),

$C_a, C_{beta}$ : κόστη εκκίνησης της κυψέλης καυσίμου (€),

$t_0$ : ο χρόνος που η κυψέλη καυσίμου είναι εκτός λειτουργίας (h),

$t_{const}$ : σταθερά κυψέλης καυσίμου (h).

Το  $t_0$  εκφράζεται από την σχέση (4.3):

$$t_0(t) = \begin{cases} 0, & P_{fc,electrical}(t) > 0 \\ t_0(t-1) + 1, & P_{fc,electrical}(t) = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

για  $t=[1,24]$  και με  $t_0(0) = 0$ .

Όπως έχει αναφερθεί, το σύστημα συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος βασίζεται στην κυψέλη καυσίμου. Κατά τη λειτουργία της, το υδρογόνο αντιδρά με το οξυγόνο από τον αέρα, παράγοντας ηλεκτρισμό, νερό και θερμότητα. Η περίσσεια θερμότητας ανακτάται και χρησιμοποιείται για θέρμανση. Παράλληλα, μπορεί να παράγεται ψύξη με τη χρήση ενός ψύκτη απορρόφησης (absorption chiller).

Στην συνάρτηση (4.2), το κόστος  $C_{startup} = (C_a + C_{beta}) \times \left(1 - e^{-\frac{t_0}{t_{const}}}\right)$ , δηλώνει το κόστος εκκίνησης της κυψέλης καυσίμου καθώς απαιτείται μια αρχική παροχή ενέργειας για να αρχίσει η χημική αντίδραση μεταξύ του υδρογόνου και του οξυγόνου. Ειδικότερα, τα κόστη εκκίνησης (cold-start costs) αφορούν την αρχική αύξηση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου ώστε να φτάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα με στόχο την ενεργοποίηση των καταλυτών και την σωστή ενυδάτωση της ηλεκτρολυτικής μεμβράνης αυξάνοντας έτσι την αγωγιμότητα της. Στην εκθετική συνάρτηση  $e^{-\frac{t_0}{t_{const}}}$ , το  $t_0$  αναπαριστά τον χρόνο που η κυψέλη καυσίμου είναι εκτός λειτουργίας και το  $t_{const}$  είναι ένας χαρακτηριστικός χρόνος που περιγράφει το πόσο γρήγορα εκτελείται η διαδικασία της εκκίνησης της κυψέλης καυσίμου.

Η εκθετική συνάρτηση εμφανίζει μια αρχική απότομη μείωση, αλλά σταδιακά συγκλίνει προς το μηδέν. Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με την πάροδο του χρόνου η επιπλέον ενέργεια που είναι απαραίτητη για την εκκίνηση μειώνεται. Στην πράξη, αυτό αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι η

διαδικασία εκκίνησης είναι πιο απαιτητική σε ενέργεια στην αρχή, αλλά με τον χρόνο απαιτείται λιγότερη επιπλέον ενέργεια.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το κόστος του συστήματος συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος εξαρτάται και από το κόστος του υδρογόνου που θα καταναλωθεί ανάλογα με την ηλεκτρική ( $P_{fc,electrical}(t)$ ) και θερμική ( $P_{fc,thermal}(t)$ ) ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου.

Στην σχέση (4.4), αναλύεται το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο ( $C_{grid,buy}(t)$ ) κάθε ώρα, όταν το σύστημα της περίπτωσης 1 είναι ανεπαρκές να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου:

$$C_{grid,buy}(t) = C_g \times P_{grid,buy}(t) \times \Delta t + C_{grid,emiss} \times C_{grid,emiss,factor} \times P_{grid,buy}(t) \times \Delta t \quad (4.4)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{grid,buy}(t)$ : η ηλεκτρική ισχύς που αγοράζεται κάθε ώρα από το ηλεκτρικό δίκτυο (kW),

$C_{grid,emiss}$ : κόστος εκπομπών CO<sub>2</sub> που παράγονται κατά την διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί και διανέμει το δίκτυο (€/kg),

$C_{grid,emiss,factor}$ : παράγοντας εκπομπών άνθρακα (kg/kWh),

$C_g$ : τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο, που μεταβάλλεται ανά ώρα (€/kWh).

Η σχέση (4.4) είναι μια συνάρτηση χρόνου καθώς κατά την διάρκεια της ημέρας ( $t=[1,24]$ ) μεταβάλλεται τόσο η τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο για λόγους ζήτησης, καιρικών συνθηκών και άλλων, όσο και η ποσότητα ισχύος που απαιτείται για την κάλυψη του φορτίου. Αυτά αναλύονται στην σχέση (4.4) όπου φαίνεται ότι η συνάρτηση κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο είναι ίση με το άθροισμα των γινομένων του κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (κάθε ώρα)  $C_g$  με την ισχύ που αγοράζεται το συγκεκριμένο χρονικό σημείο  $P_{grid,buy}(t)$  και του παράγοντα εκπομπών άνθρακα  $C_{grid,emiss,factor}$  με το κόστος εκπομπών άνθρακα λόγω της χρήσης του δικτύου  $C_{grid,emiss}$  και την αντίστοιχη ισχύ που αγοράζεται εκείνη την ώρα  $P_{grid,buy}(t)$ . Το κόστος  $C_{grid,emiss}$  και ο παράγοντας  $C_{grid,emiss,factor}$  επιβαρύνουν τον χρήστη για περιβαλλοντολογικούς λόγους, καθώς η κατανάλωση ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο δεν αποτελεί ανανεώσιμο μέσο χρήσης ενέργειας και επιβαρύνει το περιβάλλον μέσω των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά την παραγωγή της. Συγκεκριμένα, ο παράγοντας εκπομπών άνθρακα από την χρήση του δικτύου  $C_{grid,emiss,factor}$  εκφράζει την ποσότητα εκπομπών άνθρακα που παράγονται κατά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δίκτυο και το κόστος εκπομπών άνθρακα από το δίκτυο  $C_{grid,emiss}$  εκφράζει το οικονομικό κόστος που σχετίζεται με τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που είναι απόρροια των μη-φιλικών προς το περιβάλλον μεθόδων παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ( $C_{om}(t)$ ) του συστήματος της περίπτωσης 1 δίνεται από τη σχέση (4.5):

$$C_{om}(t) = C_{om,fc} \times P_{fc}(t) \times \Delta t + C_{om,tes} \times \left( P_{th,ch}(t) \times \eta_{th,ch} + \frac{P_{th,dis}(t)}{\eta_{th,dis}} \right) \times \Delta t + C_{om,pv} \times P_{pv}(t) \times \Delta t + C_{om,bes} \times \left( P_{batt,ch}(t) \times \eta_{batt,ch} + \frac{P_{batt,dis}(t)}{\eta_{batt,dis}} \right) \times \Delta t \quad (4.5)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$C_{om,fc}, C_{om,tes}, C_{om,pv}, C_{om,bes}$ : κόστη λειτουργίας και συντήρησης κυψέλης καυσίμου, αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, Φ/Β συστοιχίας και μπαταριών, αντίστοιχα (€/kWh),

$P_{fc}(t)$ : ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου κάθε ώρα (kW),

$P_{batt,ch}(t)$ : ισχύς φόρτισης μπαταριών κάθε ώρα (kW),

$P_{batt,dis}(t)$ : ισχύς εκφόρτισης μπαταριών κάθε ώρα (kW),

$P_{th,ch}(t)$ : θερμική ισχύς για αποθήκευση κάθε ώρα (kW),

$P_{th,dis}(t)$ : θερμική ισχύς που αφαιρείται από την αποθηκευμένη κάθε ώρα (kW),

$\eta_{th,ch}$ : απόδοση θερμικής ισχύος για αποθήκευση,

$\eta_{th,dis}$ : απόδοση θερμικής ισχύος που αφαιρείται από την αποθηκευμένη.

$\eta_{batt,ch}, \eta_{batt,dis}$ : απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών, αντίστοιχα,

$P_{pv}(t)$ : ηλεκτρική ισχύς παραγόμενη από την Φ/Β συστοιχία κάθε ώρα (kW).

Στην σχέση (4.5) αναλύεται η χρονική συνάρτηση κόστους για την λειτουργία και συντήρηση (operation and maintainance) του συστήματος για την διάρκεια μιας ημέρας ( $t=[1,24]$ ) με βήμα μιας ώρας. Η συνάρτηση κόστους λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος είναι ένα άθροισμα γινομένων αποτελούμενο από τα επιμέρους κόστη λειτουργίας και συντήρησης των υποσυστημάτων και την αντίστοιχη ωριαία ισχύ του υποσυστήματος αυτού. Συγκεκριμένα, το πρώτο γινόμενο είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της κυψέλης καυσίμου ( $C_{om,fc}$ ) με την ισχύ (ηλεκτρική και θερμική) που απαιτείται την εκάστοτε ώρα της ημέρας από την κυψέλη καυσίμου ( $P_{fc}(t)$ ). Τα πιο συνηθισμένα έξοδα σε αυτόν τον τομέα για τις κυψέλες καυσίμου είναι η αντικατάσταση μεμβρανών και καταλυτών. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα κόστη που αφορούν την λειτουργία και την συντήρηση κυψελών καυσίμου είναι σχετικά χαμηλά. Το δεύτερο γινόμενο αφορά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ( $C_{om,tes}$ ) με την αντίστοιχη ωριαία θερμική ισχύ φόρτισης ( $P_{th,ch}(t)$ ) ή εκφόρτισης ( $P_{th,dis}(t)$ ). Αναλυτικότερα, το κόστος εδώ περιλαμβάνει την τακτική επίβλεψη και καθαρισμό του εξοπλισμού όπως οι βαλβίδες και οι σωλήνες διανομής θερμότητας για την αποφυγή διάβρωσης και την βελτίωση της αποδοτικότητας. Στο συγκεκριμένο σύστημα, έχει επιλεχθεί ως μέσο αποθήκευσης και διανομής της θερμότητας το νερό, το οποίο αποτελεί μια πολύ φθηνή, αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον λύση. Στο ίδιο πλαίσιο,

το γινόμενο του κόστους συντήρησης και λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας ( $C_{om,pv}$ ) με την αντίστοιχη ωριαία ισχύ που παράγεται από τη Φ/Β συστοιχία ( $P_{pv}(t)$ ) προστίθεται στην παραπάνω συνάρτηση. Σε αυτή την περίπτωση, τα κόστη αφορούν τον καθαρισμό της Φ/Β συστοιχίας από τις ακαθαρσίες οι οποίες μειώνουν την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και κατ'επέκταση την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, το συγκεκριμένο κόστος περιλαμβάνει και την συντήρηση του μετατροπέα DC/DC μεταξύ της Φ/Β συστοιχίας και του DC-bus και των αυτοματισμών που εμπεριέχονται σε αυτόν.

Ο τελευταίος όρος του αθροίσματος είναι το γινόμενο μεταξύ του κόστους λειτουργίας και συντήρησης της συστοιχίας μπαταριών ( $C_{om,bes}$ ) με την αντίστοιχη ωριαία ισχύ φόρτισης ( $P_{batt,ch}(t)$ ) ή εκφόρτισης ( $P_{batt,dis}(t)$ ). Το κόστος αυτό περιλαμβάνει το σύστημα ψύξης το οποίο αποτρέπει τις υπέρμετρες τιμές της θερμοκρασίας στην συστοιχία μπαταριών, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της απόδοσης του συστήματος μακροπρόθεσμα. Παράλληλα, ένα μέρος του κόστους αυτού αφορά την αναβάθμιση και συντήρηση του ρυθμιστή φόρτισης τους.

Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι για κάθε χρονική στιγμή  $t$  ισχύει είτε  $P_{batt,ch}(t) = 0$  είτε  $P_{batt,dis}(t) = 0$ , δηλαδή η συστοιχία μπαταριών είτε φορτίζεται είτε εκφορτίζεται στην διάρκεια μίας ώρας  $t$ . Όπως είναι λογικό, το ίδιο ισχύει και με τις τιμές ισχύος εκφόρτισης και φόρτισης της αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας όπου ισχύει είτε  $P_{th,ch}(t) = 0$  είτε  $P_{th,dis}(t) = 0$  για κάθε χρονική στιγμή  $t$ .

Η συνάρτηση που περιγράφει τα έσοδα από την πώληση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο της περίπτωσης 1 δίνεται από τη σχέση (4.6):

$$C_{grid,sell}(t) = C_{sell}(t) \times P_{grid,sell}(t) \times \Delta t \quad (4.6)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$C_{sell}$ : τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, ανάλογα με την ώρα (€/kWh),

$P_{grid,sell}(t)$ : η ηλεκτρική ισχύς που πωλείται στο δίκτυο κάθε ώρα (kW).

Η συνάρτηση (4.8) εκφράζει τα έσοδα που έχει ο χρήστης από την πώληση της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, κάθε ώρα. Η τιμή πώλησης ( $C_{sell}(t)$ ) είναι μεταβαλλόμενη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η εποχή του χρόνου, την ζήτηση από το δίκτυο ανάλογα με την ώρα αλλά και τον τρόπο παραγωγής της ενέργειας που πωλείται (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κλπ). Η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με την τιμή της ισχύος που είναι διαθέσιμη προς πώληση την αντίστοιχη ώρα της ημέρας ( $P_{grid,sell}(t)$ ).

### Μεταβλητές Απόφασης και Περιορισμοί

Ο αλγόριθμος που υλοποιείται στην περίπτωση 1 στην οποία μελετάται το σύστημα αποτελούμενο από συστοιχία Φ/Β πλαισίων, κυψέλη καυσίμου (με παροχή υδρογόνου το οποίο δεν απαιτεί ενέργεια του συστήματος για να παραχθεί), συστοιχία μπαταριών και σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, προσπαθεί να ανιχνεύσει τις βέλτιστες τιμές ορισμένων μεταβλητών που ονομάζονται μεταβλητές απόφασης (decision variables). Παράλληλα, οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν τιμές μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών (constraints). Οι μεταβλητές απόφασης με τους αντίστοιχους περιορισμούς είναι οι εξής:

#### 1. Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου

Στην σχέση (4.7) φαίνονται οι περιορισμοί της μεταβλητής απόφασης  $P_{fc,electrical}(t)$  της περίπτωσης 1:

$$0 \leq P_{fc,electrical}(t) \leq P_{fc,electrical,MAX} \quad (4.7)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{fc,electrical,MAX}$ : η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου (kW).

#### 2. Ηλεκτρική Ισχύς που αγοράζεται από το δίκτυο

Στην σχέση (4.8) φαίνονται οι περιορισμοί της μεταβλητής απόφασης  $P_{grid,buy}(t)$  της περίπτωσης 1:

$$0 \leq P_{grid,buy}(t) \leq P_{grid,buy,MAX} \quad (4.8)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{grid,buy,MAX}$  : η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος που το σύστημα μπορεί να αγοράσει από το δίκτυο (kW).

#### 3. Θερμική ισχύς για αποθήκευση

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφαση  $P_{th,ch}(t)$  της περίπτωσης 1 φαίνονται στην σχέση (4.9):

$$0 \leq P_{th,ch}(t) \leq P_{th,ch,MAX} \quad (4.9)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{th,ch,MAX}$  : η μέγιστη τιμή θερμικής ισχύος που μπορεί να φορτίζεται το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (kW).

4. Θερμική ισχύς που αφαιρείται από την αποθηκευμένη

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφαση  $P_{th,dis}(t)$  της περίπτωσης 1 φαίνονται στην σχέση (4.10):

$$0 \leq P_{th,ch}(t) \leq P_{th,dis,MAX} \quad (4.10)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{th,dis,MAX}$  : η μέγιστη τιμή θερμικής ισχύος που μπορεί να εκφορτίζεται το σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (kW).

5. Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης μπαταριών

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφασης  $P_{batt,ch}(t)$  της περίπτωσης 1 φαίνονται στην σχέση (4.11):

$$0 \leq P_{batt,ch}(t) \leq P_{batt,ch,MAX} \quad (4.11)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{batt,ch,MAX}$  : η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος που φορτίζει τις μπαταρίες (kW).

6. Ηλεκτρική Ισχύς εκφόρτισης μπαταριών

Τα όρια της μεταβλητής απόφασης  $P_{batt,dis}(t)$  της περίπτωσης 1 φαίνονται στην σχέση (4.12):

$$0 \leq P_{batt,dis}(t) \leq P_{batt,dis,MAX} \quad (4.12)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{batt,dis,MAX}$  : η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος που εκφορτίζει τις μπαταρίες (kW).

Περίπτωση 2

Η ειδοποιός διαφορά στον υπολογισμό του συνολικού κόστους του συστήματος της περίπτωσης 2 σε σχέση με τον υπολογισμό του συνολικού κόστους στο σύστημα της περίπτωσης 1 είναι ότι προστίθεται το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του electrolyzer. Κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση 1 έτσι και στην περίπτωση 2, έπειτα από πολλές δοκιμές, ορίζεται σαν Πλήθος Σμήνους=1000 και σαν Αριθμός Επαναλήψεων=1500.

Η συνολική συνάρτηση κόστους για το σύστημα της περίπτωσης 2 δίνεται από τη σχέση (4.13):

$$Cost = \sum_{t=1}^{24} \{C_{chp}(t) + C_{grid}(t) + C_{om}(t) + C_{electrolyzer}(t) - C_{grid,sell}(t)\} \quad (4.13)$$

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του electrolyzer της περίπτωσης 2 εκφράζεται από την σχέση (4.14):

$$C_{electrolyzer}(t) = P_{electrolyzer}(t) \times C_{om,electrolyzer} \times \Delta t + P_{compressor}(t) \times C_{compressor} \times \Delta t \quad (4.14)$$

για  $t=[1,24]$ , όπου:

$P_{electrolyzer}(t)$ : η απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας του electrolyzer κάθε ώρα (kW),

$C_{om,electrolyzer}$ : κόστος λειτουργίας και συντήρησης του electrolyzer (€/kWh),

$P_{compressor}(t)$ : ισχύς που απαιτείται για την λειτουργία του συμπιεστή (compressor) (kW),

$C_{compressor}$ : κόστος συντήρησης και λειτουργίας συμπιεστή (€/kWh).

Η συνάρτηση (4.14) περιγράφει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του electrolyzer. Ο πρώτος όρος του αθροίσματος, είναι το γινόμενο της ισχύος που απαιτείται ( $P_{electrolyzer}(t)$ ) για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας υδρογόνου με το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του ( $C_{om,electrolyzer}$ ). Στα κόστη αυτά συμπεριλαμβάνονται η αντικατάσταση και η συντήρηση των ηλεκτροδίων και των μεμβρανών αλλά και ο τακτικός καθαρισμός του νερού από ακαθαρσίες για βέλτιστη λειτουργία και αποφυγή διαβρώσεων. Ο δεύτερος όρος αφορά την λειτουργία του συμπιεστή, στον οποίο πολλαπλασιάζεται η απαιτούμενη ωριαία ισχύς ( $P_{compressor}(t)$ ) του συμπιεστή για την συμπίεση του υδρογόνου με το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του ( $C_{compressor}$ ). Τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας του συμπιεστή αφορούν την αντικατάσταση βαλβίδων, φίλτρων και δακτυλίων για στεγανοποίηση αλλά και την τακτική συντήρηση των συστημάτων ελέγχου πίεσης και θερμοκρασίας.

Επιπρόσθετα, όπως είναι αναμενόμενο στο σύστημα της περίπτωσης 2 διαφοροποιείται και η συνάρτηση κόστους της μονάδας συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος αφού σε αυτό το σύστημα το υδρογόνο δεν παρέχεται από εξωτερική πηγή αλλά παράγεται με ενέργεια του συστήματος. Έτσι, στην σχέση (4.15) περιγράφεται η συνάρτηση κόστους της μονάδας συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος του συστήματος της περίπτωσης 2 στην οποία δεν συμπεριλαμβάνεται το ωριαίο κόστος αγοράς υδρογόνου:

$$C_{chp}(t) = (Ca + C_{beta}) \times \left(1 - e^{-\frac{to}{t_{const}}}\right) \quad (4.15)$$

### **Μεταβλητές Απόφασης και Περιορισμοί**

Στο ίδιο πλαίσιο με την περίπτωση 1, ο αλγόριθμος που υλοποιείται στην περίπτωση 2 στην οποία μελετάται το σύστημα αποτελούμενο από συστοιχία Φ/Β πλαισίων, κυψέλης καυσίμου, συστοιχία μπαταριών, σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και σύστημα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου (το οποίο παράγεται με ενέργεια του συστήματος), προσπαθεί να ανιχνεύσει τις βέλτιστες τιμές ορισμένων μεταβλητών που ονομάζονται μεταβλητές απόφασης. Παράλληλα, οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν τιμές μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος τιμών (constraints). Οι μεταβλητές απόφασης με τους αντίστοιχους περιορισμούς της περίπτωσης 2 είναι οι εξής:

1. Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου



Στην σχέση (4.16) φαίνονται οι περιορισμοί της μεταβλητής απόφασης  $P_{fc,electrical}(t)$  της περίπτωσης 2:

$$0 \leq P_{fc,electrical}(t) \leq P_{fc,electrical,MAX} \quad (4.16)$$

για  $t=[1,24]$ .

## 2. Ηλεκτρική ισχύς που αγοράζεται από το δίκτυο

Στην σχέση (4.17) φαίνονται οι περιορισμοί της μεταβλητής απόφασης  $P_{grid,buy}(t)$  της περίπτωσης 2:

$$0 \leq P_{grid,buy}(t) \leq P_{grid,buy,MAX} \quad (4.17)$$

για  $t=[1,24]$ .

## 3. Θερμική ισχύς για αποθήκευση

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφαση  $P_{th,ch}(t)$  της περίπτωσης 2 φαίνονται στην σχέση (4.18):

$$0 \leq P_{th,ch}(t) \leq P_{th,ch,MAX} \quad (4.18)$$

για  $t=[1,24]$ .

## 4. Θερμική ισχύς που αφαιρείται από την αποθηκευμένη

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφαση  $P_{th,dis}(t)$  της περίπτωσης 2 φαίνονται στην σχέση (4.19):

$$0 \leq P_{th,dis}(t) \leq P_{th,dis,MAX} \quad (4.19)$$

για  $t=[1,24]$ .

## 5. Ηλεκτρική ισχύς Φόρτισης Μπαταριών

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφασης  $P_{batt,ch}(t)$  της περίπτωσης 2 φαίνονται στην σχέση (4.20):

$$0 \leq P_{batt,ch}(t) \leq P_{batt,ch,MAX} \quad (4.20)$$

για  $t=[1,24]$ .

## 6. Ηλεκτρική Ισχύς εκφόρτισης Μπαταριών

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφασης  $P_{batt,dis}(t)$  της περίπτωσης 2 φαίνονται στην σχέση (4.21):

$$0 \leq P_{batt,dis}(t) \leq P_{batt,dis,MAX} \quad (4.21)$$

για  $t=[1,24]$ .

## Περίπτωση 3

Στη περίπτωση 3 που το σύστημα δεν διαθέτει συστοιχία μπαταριών το κόστος υπολογίζεται από την σχέση (4.22):

$$\text{Cost} = \sum_{t=1}^{24} \{C_{cchp}(t) + C_{grid}(t) + C_{om}(t) + C_{electrolyzer}(t) - C_{grid,sell}(t)\} \quad (4.22)$$

για  $t=[1,24]$ .

Η απουσία της συστοιχίας μπαταριών, όπως είναι αναμενόμενο, διαφοροποιεί την συνάρτηση κόστους συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος της περίπτωσης 3, η οποία αναλύεται στην σχέση (4.23):

$$C_{om}(t) = C_{om,fc} \times P_{fc,electrical}(t) \times \Delta t + C_{om,tes} \times \left( P_{th,ch}(t) \times \eta_{th,ch} + \frac{P_{th,dis}(t)}{\eta_{th,dis}} \right) \times \Delta t + C_{om,pv} \times P_{pv}(t) \times \Delta t \quad (4.23)$$

για  $t=[1,24]$ .

Αξίζει να αναφερθεί ότι και στον αλγόριθμο που υλοποιείται στην περίπτωση 3 ορίζεται σαν Πλήθος Σμήνους=1000 και σαν Αριθμός επαναλήψεων=1500. Παράλληλα,, όπως έχει αναφερθεί, για κάθε χρονική στιγμή  $t$  ισχύει είτε  $P_{th,ch}(t) = 0$  είτε  $P_{th,dis}(t) = 0$ . Τέλος, επισημαίνεται ότι η συνάρτηση κόστους της μονάδας συνδυαζόμενης ψύξης, θέρμανσης και ισχύος είναι ίδια με την περίπτωση 2 όπως περιγράφεται στην σχέση (4.16), αφού και σε αυτή την περίπτωση το υδρογόνο δεν αγοράζεται αλλά παράγεται με ενέργεια του συστήματος.

### Μεταβλητές Απόφασης και Περιορισμοί

Στην περίπτωση 3, οι μεταβλητές απόφασης με τους αντίστοιχους περιορισμούς είναι όμοια με τις περιπτώσεις 1 και 2, με την διαφορά ότι στην περίπτωση 3 δεν υπάρχουν οι μεταβλητές και οι περιορισμοί που εκφράζουν την λειτουργία των μπαταριών, καθώς το σύστημα της περίπτωσης 3 αποτελείται από συστοιχία Φ/Β πλαισίων, κυψέλη καυσίμου, σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και σύστημα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου (το οποίο παράγεται με ενέργεια του συστήματος).

#### 1. Ηλεκτρική Ισχύς Εξόδου Κυψέλης Καυσίμου

Στην σχέση (4.24) φαίνονται οι περιορισμοί της μεταβλητής απόφασης  $P_{fc,electrical}(t)$  της περίπτωσης 3:

$$0 \leq P_{fc,electrical}(t) \leq P_{fc,electrical,MAX} \quad (4.24)$$

για  $t=[1,24]$

#### 2. Ηλεκτρική ισχύς που αγοράζεται από το δίκτυο

Στην σχέση (4.25) φαίνονται οι περιορισμοί της μεταβλητής απόφασης  $P_{grid,buy}(t)$  της περίπτωσης 3:

$$0 \leq P_{grid,buy}(t) \leq P_{grid,buy,MAX} \quad (4.25)$$

για  $t=[1,24]$ .

### 3. Θερμική ισχύς για αποθήκευση

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφαση  $P_{th,ch}(t)$  της περίπτωσης 3 φαίνονται στην σχέση (4.26):

$$0 \leq P_{th,ch}(t) \leq P_{th,ch,MAX} \quad (4.26)$$

για  $t=[1,24]$ .

### 4. Θερμική ισχύς που αφαιρείται από την αποθηκευμένη

Τα όρια τιμών της μεταβλητής απόφαση  $P_{th,dis}(t)$  της περίπτωσης 3 φαίνονται στην σχέση (4.27):

$$0 \leq P_{th,dis}(t) \leq P_{th,dis,MAX} \quad (4.27)$$

για  $t=[1,24]$ . Οι παρακάτω συναρτήσεις εκφράζουν τα μεγέθη κάποιων μεταβλητών του συστήματος.

Συγκεκριμένα, η σχέση (4.28) αποτυπώνει την συνολική ισχύ (ηλεκτρική και θερμική) που μπορεί να παράγει η κυψέλη υδρογόνου κάθε ώρα (kW):

$$P_{fc}(t) = P_{fc,electrical}(t) + P_{fc,thermal}(t) \quad (4.28)$$

για  $t=[1,24]$ .

Στην σχέση (4.29) υπολογίζεται το επίπεδο φόρτισης κάθε επόμενης ώρας σύμφωνα με το επίπεδο φόρτισης της προηγούμενης και την ισχύ φόρτισης και εκφόρτισης της προηγούμενης ώρας:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{(P_{batt,ch}(t) \times \eta_{batt,ch} - \frac{P_{batt,dis}(t)}{\eta_{batt,dis}}) \times \Delta t}{E_{batt}} \quad (4.29)$$

για  $t=[1,24]$  και  $SOC(0) = 0.5$ , όπου:

$E_{batt}$ : συνολική χωρητικότητα μπαταριών (kWh),

Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί για ακόμη μία φορά ότι για κάθε χρονική στιγμή  $t$  ισχύει είτε  $P_{batt,ch}(t) = 0$  είτε  $P_{batt,dis}(t) = 0$ , δηλαδή η συστοιχία μπαταριών είτε φορτίζεται είτε εκφορτίζεται στην διάρκεια μίας ώρας  $t$ .

Στην σχέση (4.30) υπολογίζεται το επίπεδο θερμικής ενέργειας (σε kWh) που είναι αποθηκευμένη κάθε ώρα:

$$E_{thermal}(t) = E_{thermal}(t-1) + (P_{th,ch}(t) \times \eta_{th,ch} - \frac{P_{th,dis}(t)}{\eta_{th,dis}}) \times \Delta t \quad (4.30)$$

για  $t=[1,24]$  και  $E_{thermal}(0) = \frac{E_{thermal,MAX}}{2}$ , όπου:

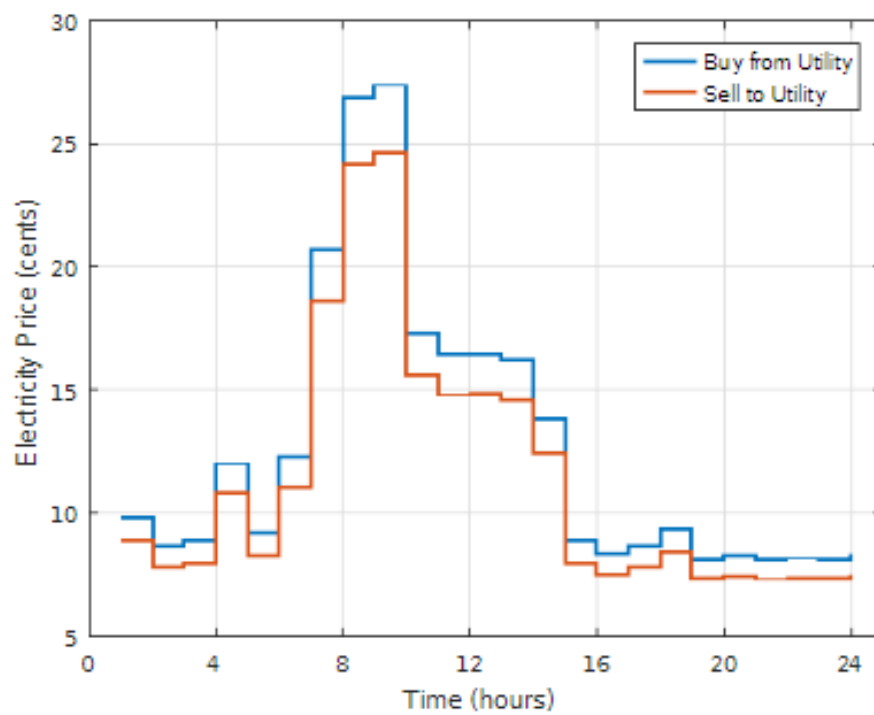
$E_{thermal,MAX}$ : μέγιστη τιμή αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας (kWh).

Παράλληλα, επισημαίνεται ότι την ίδια χρονική στιγμή  $t$  είτε ισχύει είτε  $P_{th,ch}(t) = 0$  είτε  $P_{th,ch}(t) = 0$ .

Στον Πίνακα 4-1 φαίνονται οι τιμές των σταθερών των εξισώσεων κόστους:

<b>Πίνακας 4-1.</b> Τιμές παραμέτρων των εξισώσεων κόστους.	
$C_{om,tes}$	0.0002 €/kWh
$C_{fuel}$	0.06 €/kWh
$C_a$	0.05 €
$C_{beta}$	0.15 €
$t_{const}$	0.05
$\eta_{batt,ch}$	0.9
$\eta_{batt,dis}$	0.9
$C_{om,fc}$	0.005 €/ kWh
$C_{om,pv}$	0.005 ευρώ/ kWh
$C_{om,bes}$	0.006 €/ kWh
$C_{om,electrolyzer}$	0.1 €/ kWh
$\eta_{th,ch}$	0.87
$\eta_{th,dis}$	0.87
$\eta_{fc}$	0.5
$C_{compressor}$	0.01 €/ kWh
$E_{batt}$	8 kWh

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το ηλεκτρικό δίκτυο στην διάρκεια μίας ημέρας. Όπως είναι αναμενόμενο, οι τιμές αυτές μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της ημέρας καθώς καθορίζονται από διάφορους μεταβαλλόμενος παράγοντες όπως ζήτηση και ώρες αιχμής.



**Σχήμα 4-7.** Τιμές αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο στην διάρκεια μίας ημέρας [10].

---

# 5.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

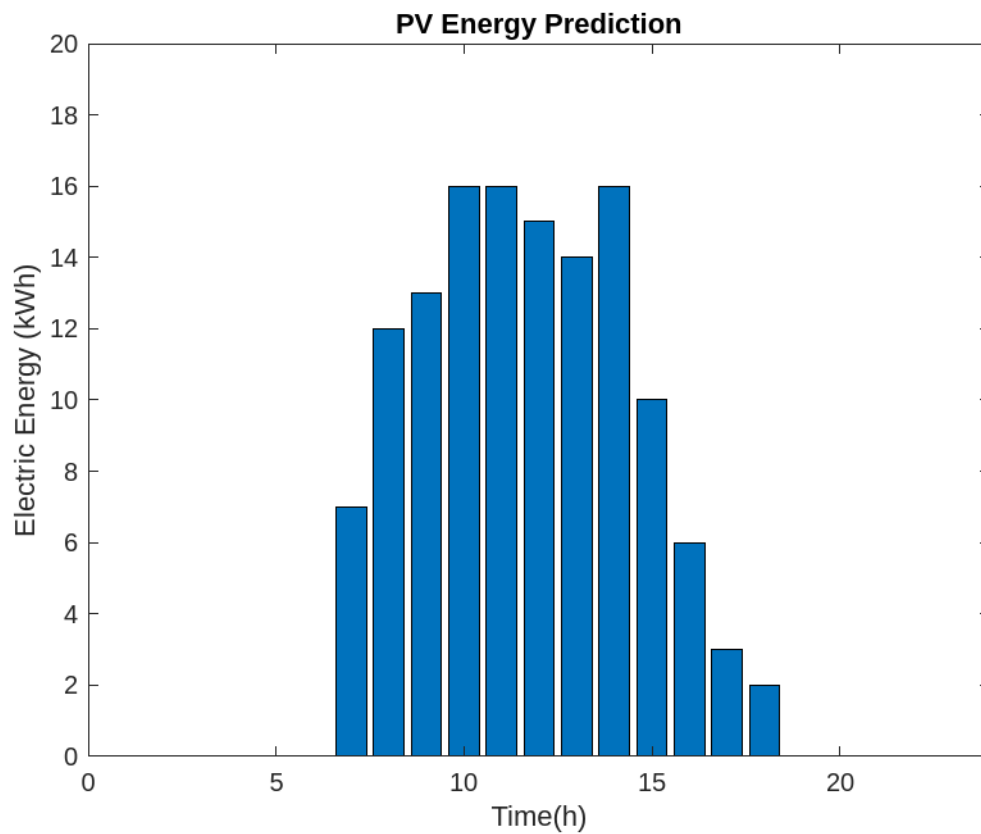
---

### 5.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης των συστημάτων όλων των περιπτώσεων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα παρατίθενται τα διαγράμματα τιμών των μεταβλητών απόφασης αλλά και των συναρτήσεων συνολικού κόστους κάθε περίπτωσης στην διάρκεια μίας ημέρας σε τρία διαφορετικά σενάρια καιρικών συνθηκών και φορτίων. Με αυτό τον τρόπο, παρατηρείται και αξιολογείται η ικανότητα κάθε συστήματος να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις ανάγκες του ηλεκτρικού και του θερμικού φορτίου εστιάζοντας, παράλληλα, στην αυτονομία, την αξιοπιστία και το κόστος κάθε συστήματος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο βασικός στόχος της μελέτης αυτών των σεναρίων είναι η παρατήρηση της απόκρισης των συστημάτων σε όσο το δυνατόν περισσότερες ρεαλιστικές συνθήκες όπως είναι ακραία καιρικά φαινόμενα, μεγάλος όγκος φορτίων αλλά και σε φυσιολογικές συνθήκες.

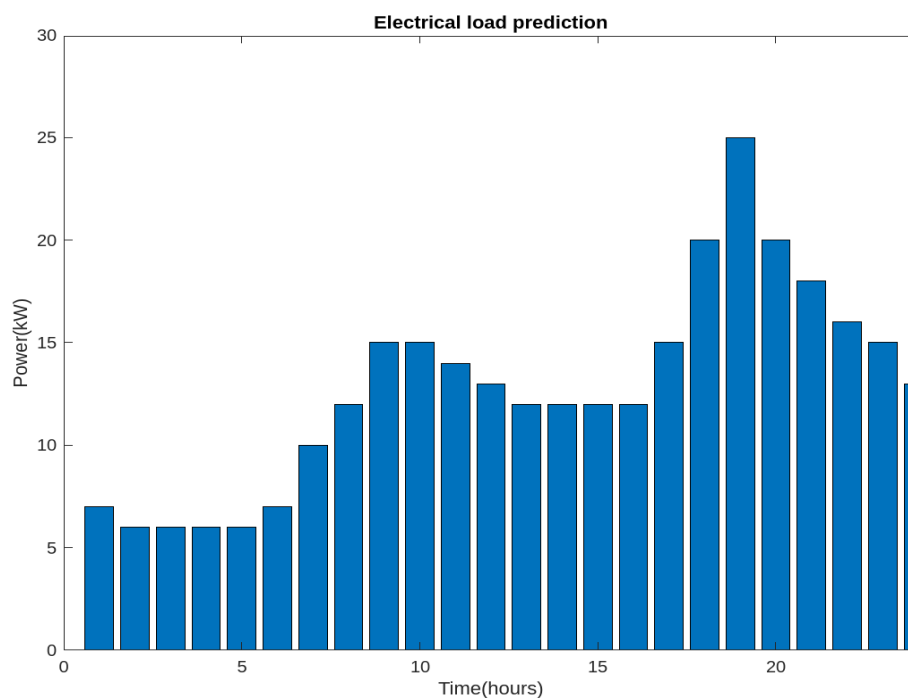
#### Σενάριο 1

Το σενάριο 1 αντικατοπτρίζει μία μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία αλλά και έναν μέσο όγκο ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5-1 φαίνεται η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του σενάριο 1 στο οποίο τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες της ημέρας η ηλιακή ακτινοβολία και κατ' επέκταση η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι αυξημένες ενώ τις απογευματινές ώρες τόσο η ηλιακή ακτινοβολία όσο και η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την Φ/Β συστοιχία είναι αισθητά μειωμένες.



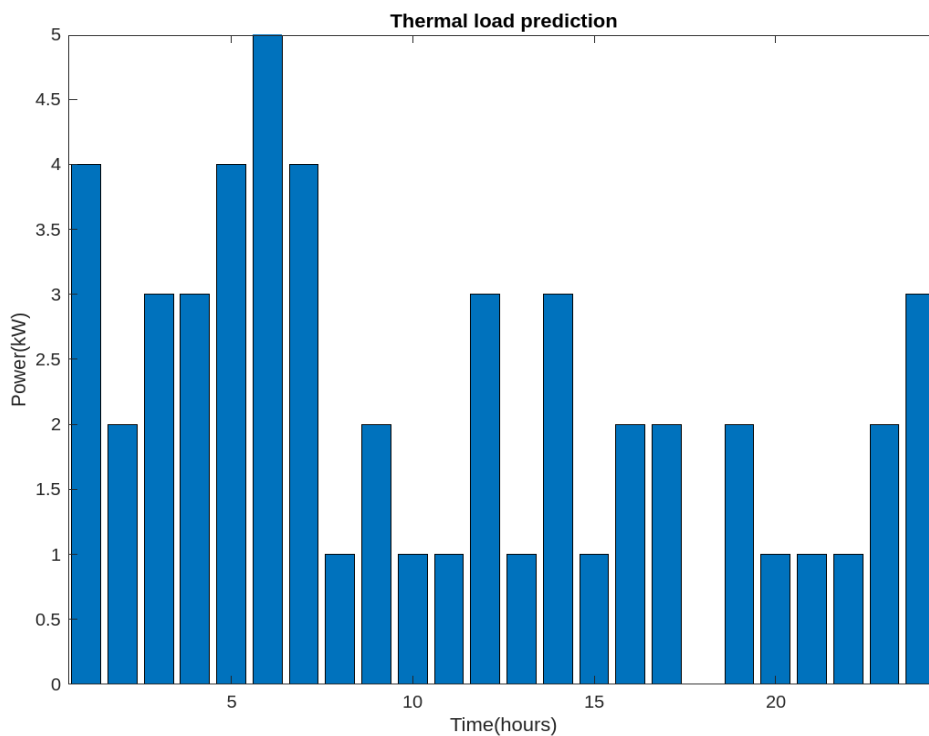
**Σχήμα 5-1.** Πρόβλεψη ισχύος εξόδου Φ/Β συστοιχίας σεναρίου 1.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-2 φαίνεται το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο του σεναρίου 1, όπου οι τιμές του ηλεκτρικού φορτίου σε κάποιες ώρες αιχμής της ημέρας όπως 10:00 π.μ και 19:00 μ.μ είναι αυξημένες, ενώ τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας είναι σε φυσιολογικά επίπεδα.



**Σχήμα 5-2.** Πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου σεναρίου 1.

Τέλος, στο Σχήμα 5-3 φαίνεται το ημερήσιο θερμικό φορτίο του σεναρίου 1, με τις τιμές του θερμικού φορτίου τις πρώτες πρωινές ώρες, στις οποίες οι θερμοκρασία μειώνεται, να είναι ελαφρώς αυξημένες ενώ τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας είναι σε φυσιολογικά επίπεδα.



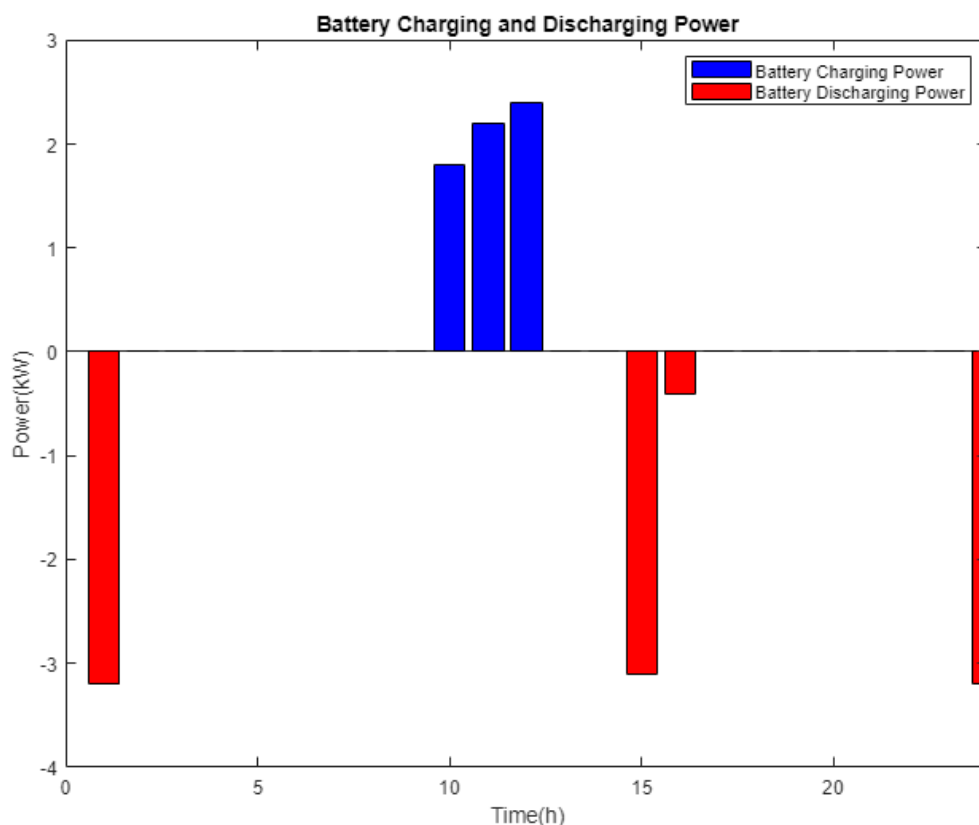
**Σχήμα 5-3.** Πρόβλεψη θερμικού φορτίου σεναρίου 1.



Όπως έχει αναφερθεί, τα κριτήρια αξιολόγησης της συμπεριφοράς του συστήματος σε κάθε περίπτωση είναι τα βελτιστοποιημένα αποτελέσματα τόσο των μεταβλητών απόφασης όσο και της συνολικής συνάρτησης κόστους κατά την διάρκεια της ημέρας. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μεταβλητών απόφασης που προέκυψαν μετά την βελτιστοποίηση και της συνολικής συνάρτησης κόστους κάθε περίπτωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο στην διάρκεια μίας ημέρας.

#### Περίπτωση 1

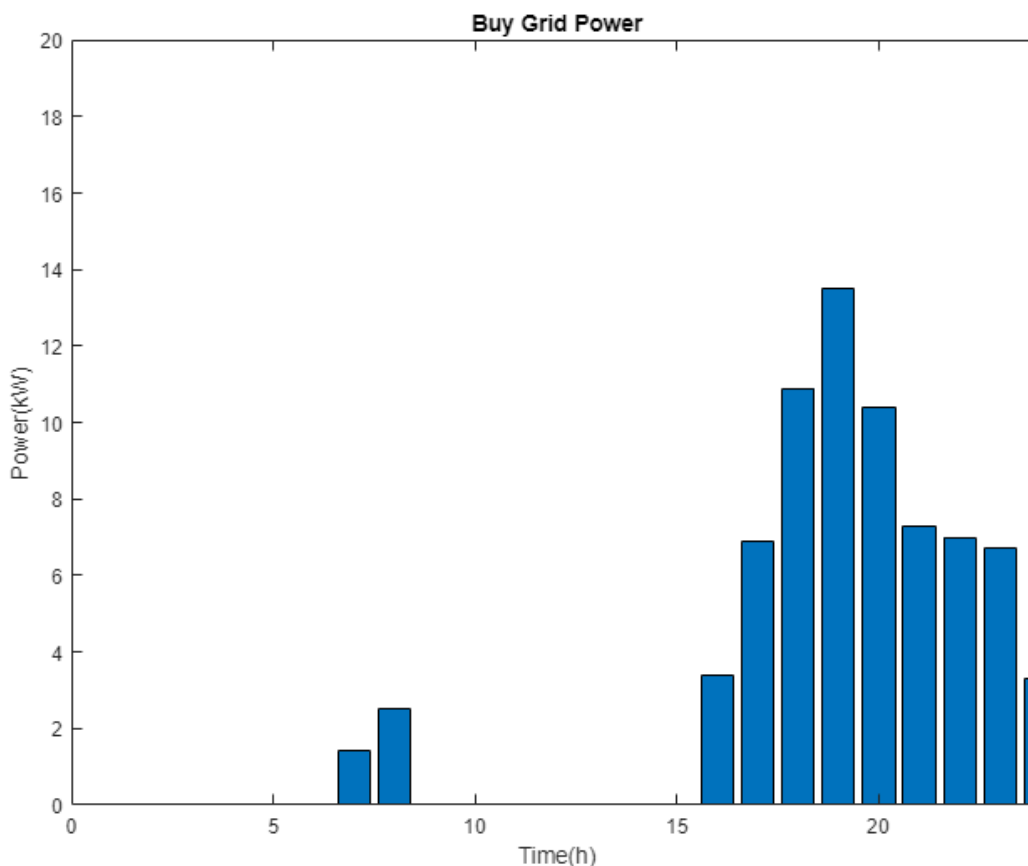
Στο Σχήμα 5-4 φαίνεται η ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών κατά την διάρκεια της ημέρας για το σύστημα της περίπτωσης 1. Ειδικότερα, γίνεται αντιληπτό ότι η φόρτιση των μπαταριών γίνεται κυρίως τις πρωινές ώρες της ημέρας που η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυξημένη και η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία ξεπερνάει το ηλεκτρικό φορτίο και υπάρχει περίσσεια ενέργειας για την φόρτισή τους. Αντίθετα, η εκφόρτιση των μπαταριών γίνεται από τις 15:00 έως τις 16:00 όπου το φορτίο δεν μπορεί να καλυφθεί αποκλειστικά από την Φ/Β συστοιχία και από τότε και έπειτα δεν υπάρχει περίσσεια ενέργεια για την φόρτισή τους.



**Σχήμα 5-4.** Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών περίπτωσης 1 και σεναρίου 1.

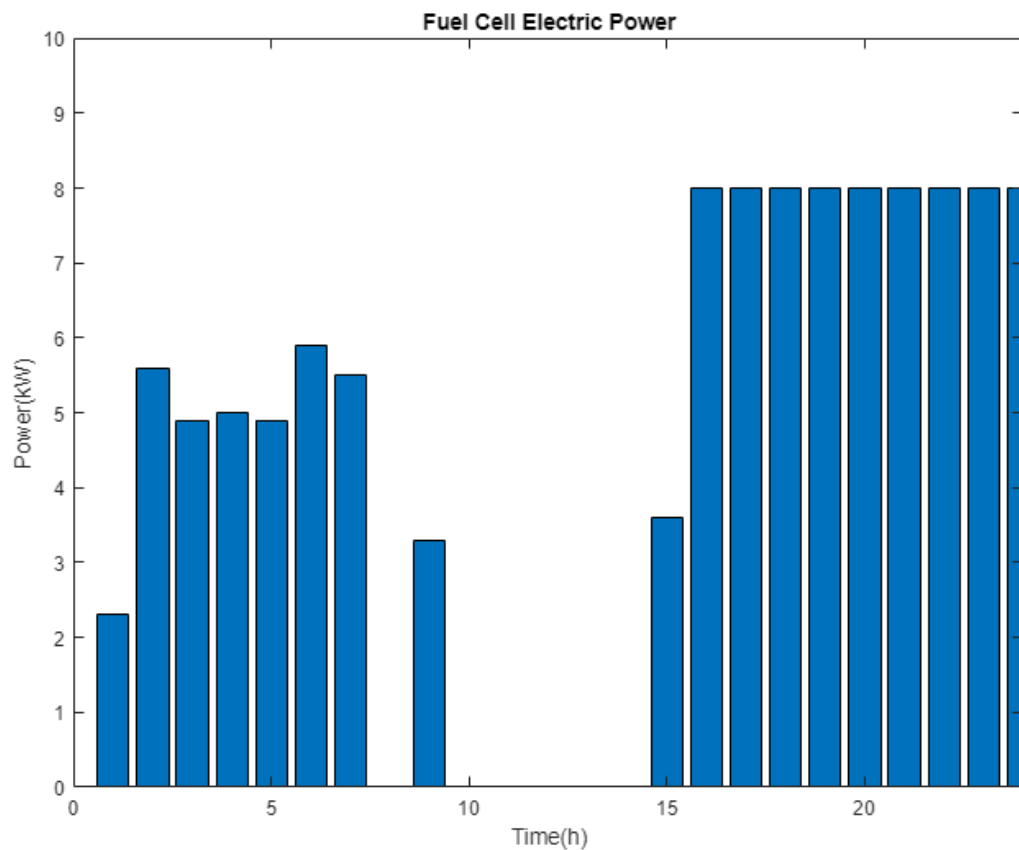
Παράλληλα, στο Σχήμα 5-5 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται κάθε ώρα από το ηλεκτρικό δίκτυο στην διάρκεια μίας ημέρας με στόχο την κάλυψη του φορτίου σε χρονικές στιγμές ανεπάρκειας του συστήματος της περίπτωσης 1. Αναλυτικότερα, από το Σχήμα 5-5 γίνεται σαφές ότι η αγορά

ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται κυρίως τις βραδινές ώρες όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι αισθητά μειωμένη.



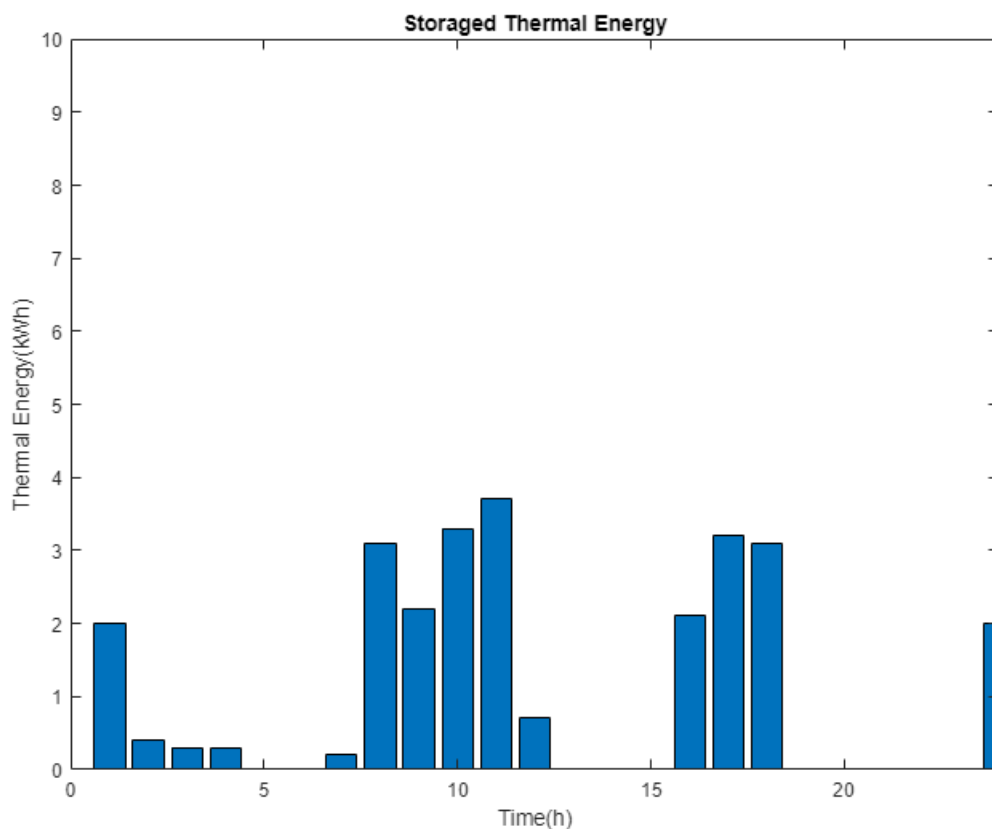
**Σχήμα 5-5.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 1 και σεναρίου 1.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-6 φαίνεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου στην διάρκεια μίας ημέρας του συστήματος της περίπτωσης 1. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 5-6 φαίνεται πως η κυψέλη καυσίμου συμβάλει στην κάλυψη του φορτίου σε όλη την διάρκεια της ημέρας εκτός από τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρική ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία. Η συνεχής στήριξη του συστήματος από την κυψέλη καυσίμου οφείλεται στην χρήση υδρογόνου για την τροφοδότηση της χωρίς να απαιτείται ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος για την παραγωγή του.



**Σχήμα 5-6.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 1 και σεναρίου 1.

Στο ίδιο πλαίσιο, στο Σχήμα 5-7 φαίνεται η ωριαία θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα της περίπτωσης 1 του πρώτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσό θερμικής ενέργειας αποθηκεύεται τις πρωινές που υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου.

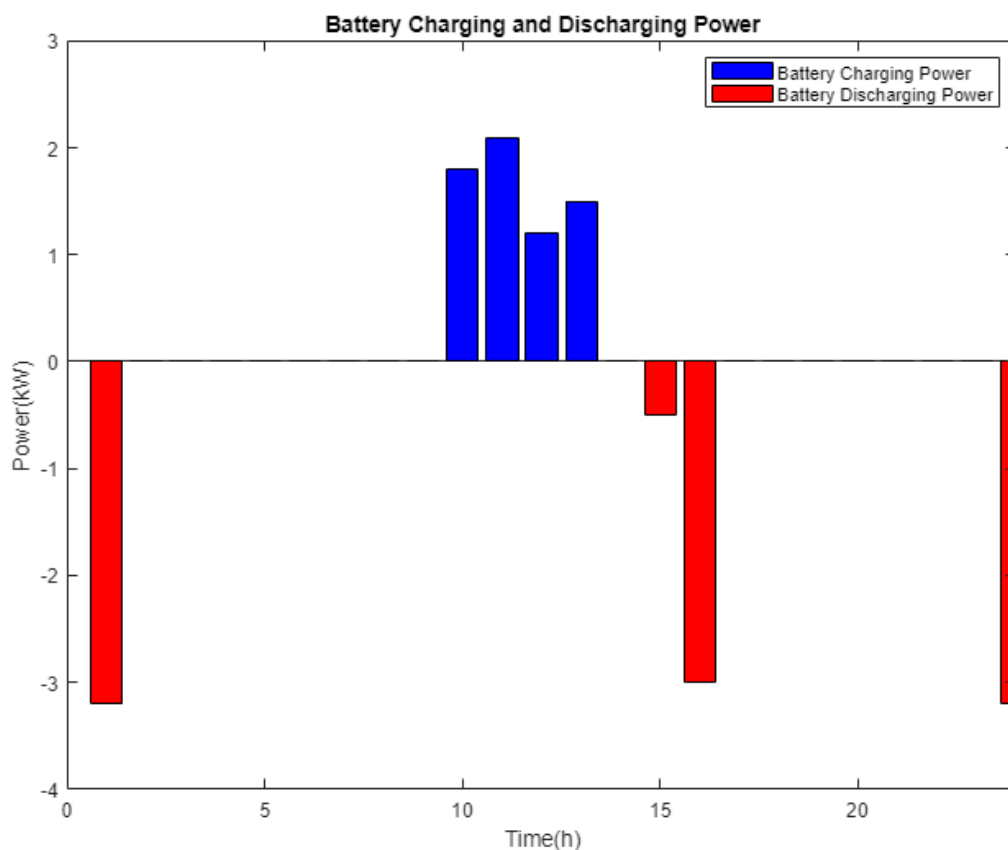


**Σχήμα 5-7.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 1 και σεναρίου 1.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του πρώτου σεναρίου είναι 78.8 €.

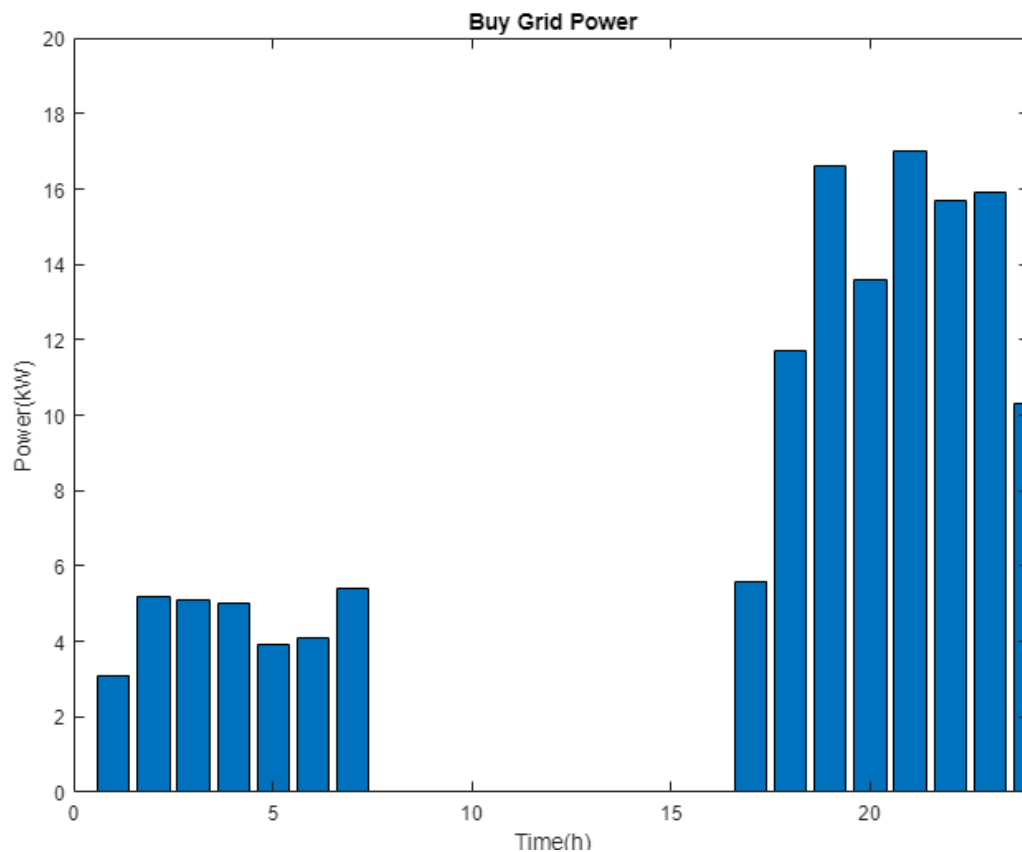
### Περίπτωση 2

Στο Σχήμα 5-8 φαίνεται η ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών του συστήματος της περίπτωσης 2 του σεναρίου 1 που, όπως και στην περίπτωση 1, κατά κύριο λόγο η ισχύς φόρτισης είναι μεγαλύτερη τις πρωινές ώρες που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία, ενώ η εκφόρτιση γίνεται τις ώρες που ξεκινάει η ηλεκτρική ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία να είναι μικρότερη από το ηλεκτρικό φορτίο.



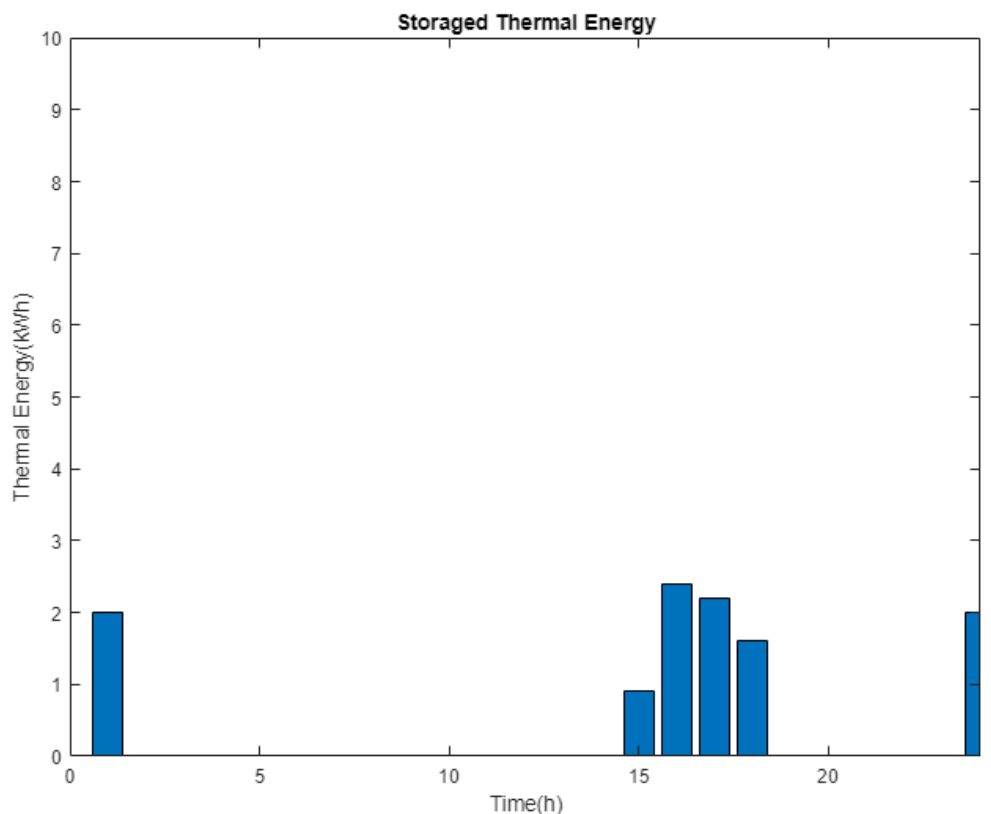
**Σχήμα 5-8.** Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών περίπτωσης 2 και σεναρίου 1.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-9 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο για την κάλυψη του φορτίου του συστήματος της περίπτωσης 2 του πρώτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι οι τιμές της συγκεκριμένης μεταβλητής απόφασης είναι υψηλότερες τις ώρες που δεν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία και οι μπαταρίες έχουν εκφορτιστεί, με αποτέλεσμα το σύστημα να βασίζεται μόνο στην κυψέλη καυσίμου. Αυτές οι ώρες είναι κυρίως οι βραδινές και πρώτες πρωινές.

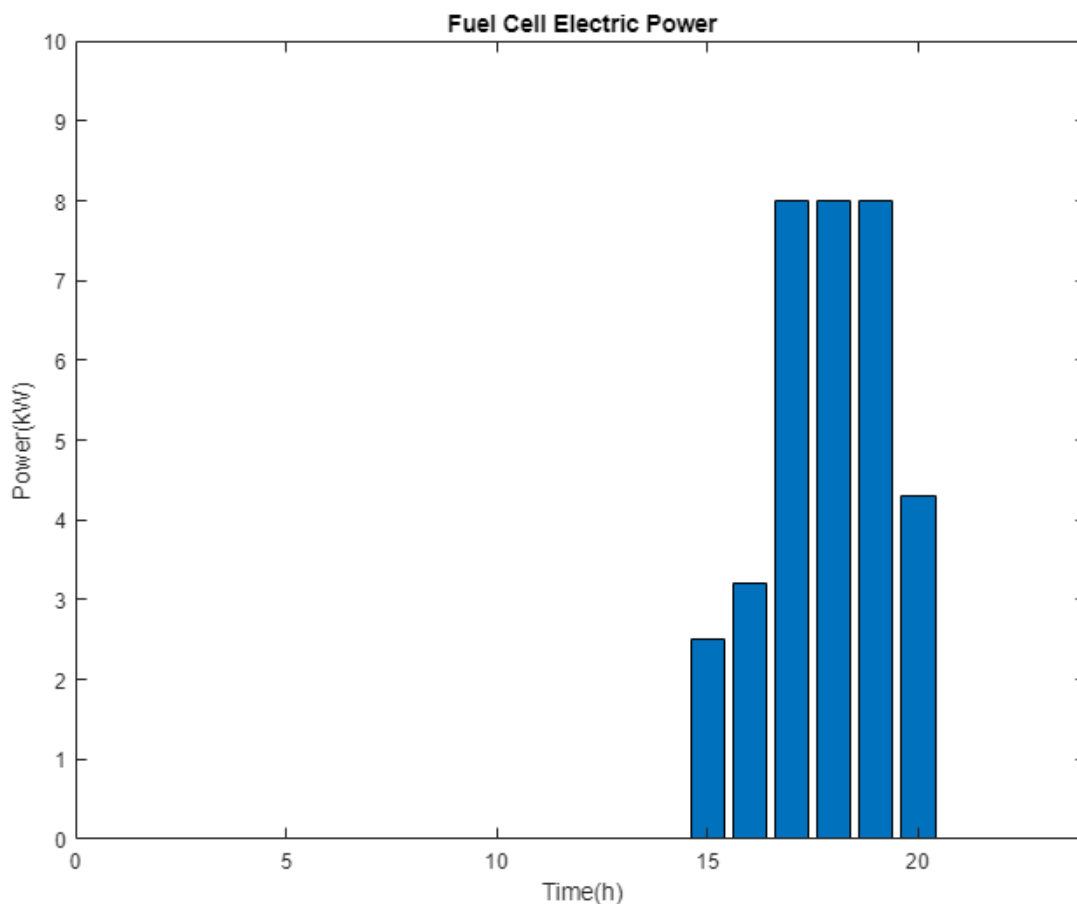


**Σχήμα 5-9.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 2 και σεναρίου 1.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-10 παρατηρείται ότι η θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα της περίπτωσης 2 κατά το σενάριο 1 είναι μεγαλύτερη τις ώρες που ακολουθούν τις χρονικές στιγμές που υπάρχει περίσσεια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία (νωρίς το απόγευμα) με την οποία παράγεται υδρογόνο από το σύστημα ηλεκτρόλυσης και υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 5-10. Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 2 και σεναρίου 1. Όπως αναφέρθηκε, οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου είναι αισθητά αυξημένες τις ώρες που ακολουθούν τις χρονικές στιγμές που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία με αποτέλεσμα να παράγεται υδρογόνο που τροφοδοτεί την κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ώρες αυτές είναι από τις 16:00 μ.μ έως τις 20:00 μ.μ όπου δεν υπάρχει πλέον διαθέσιμο υδρογόνο, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 5-11.



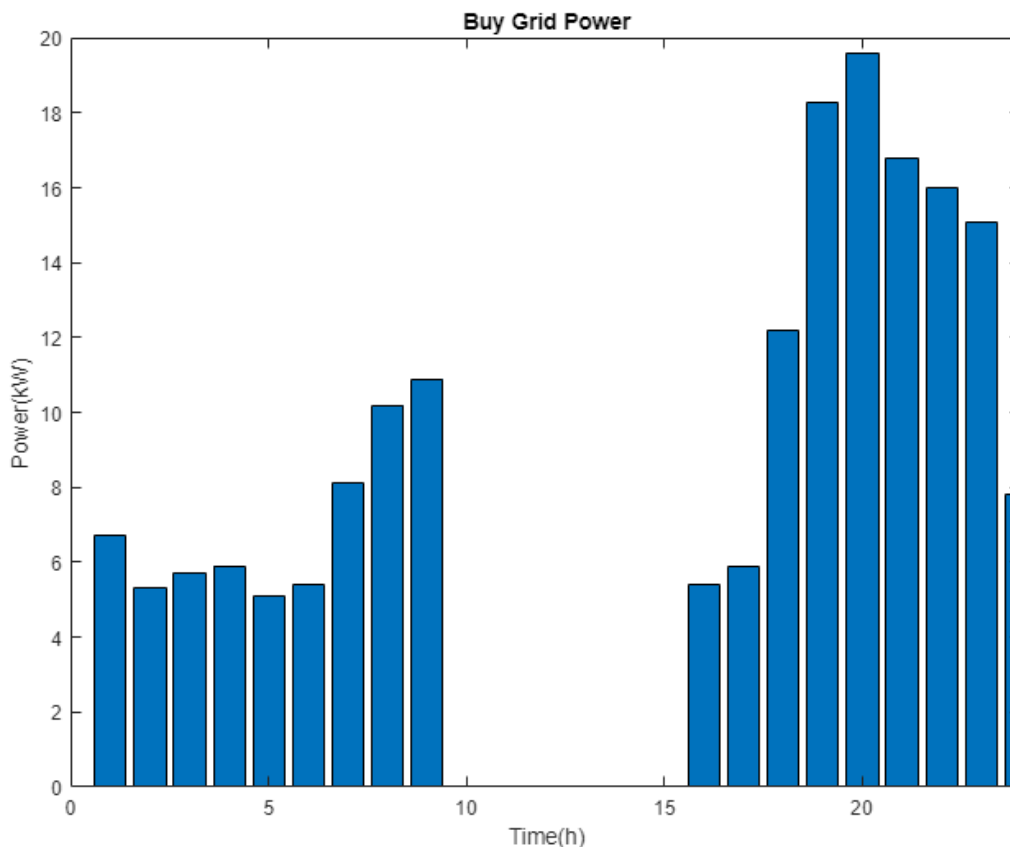
**Σχήμα 5-11.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 2 και σεναρίου 1 σε μία ημέρα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 2 του πρώτου σεναρίου είναι 87.7 €.

### Περίπτωση 3

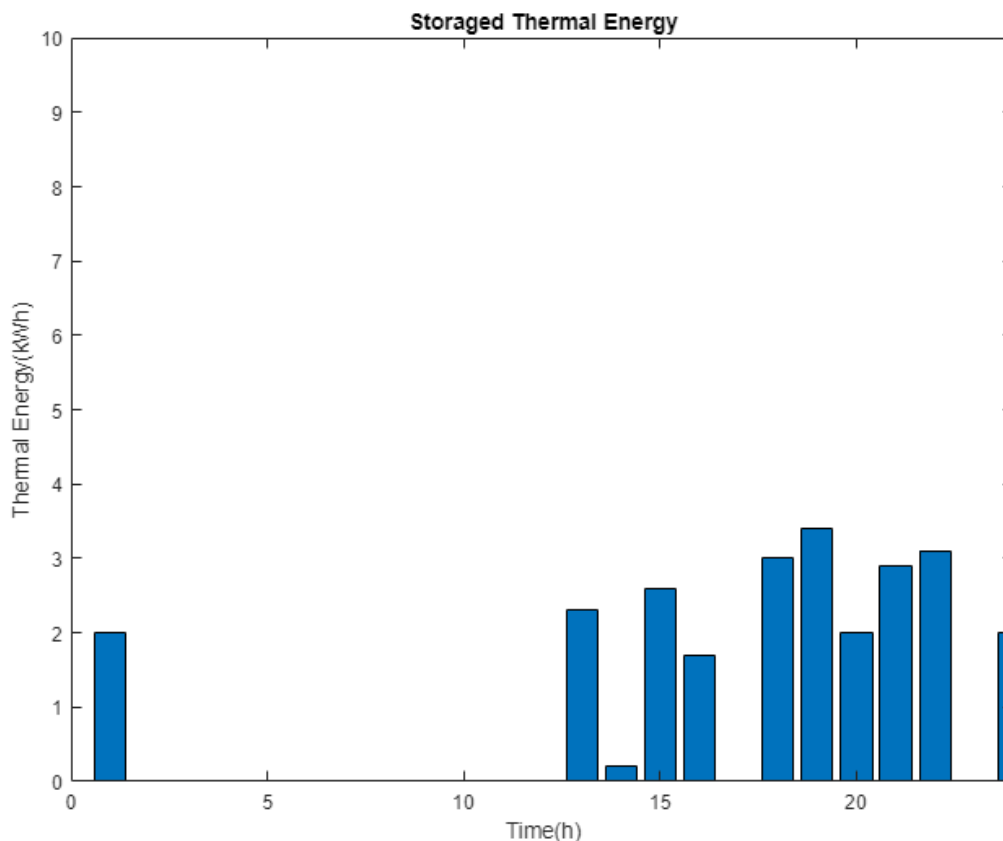
Στο σύστημα της περίπτωσης 3, όπως έχει αναφερθεί, δεν διαθέτει συστοιχία μπαταριών με αποτέλεσμα η κάλυψη του φορτίου να γίνεται μόνο από την Φ/Β συστοιχία και την κυψέλη καυσίμου. Αυτό έχει ως απόρροια την αυξημένη ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, εκτός από τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες που το φορτίο καλύπτεται από την ηλεκτρική ενέργεια της Φ/Β συστοιχίας και τις μπαταρίες. Στο Σχήμα 5-12 φαίνεται η ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου στην διάρκεια μίας ημέρας για το σύστημα της περίπτωσης 3.





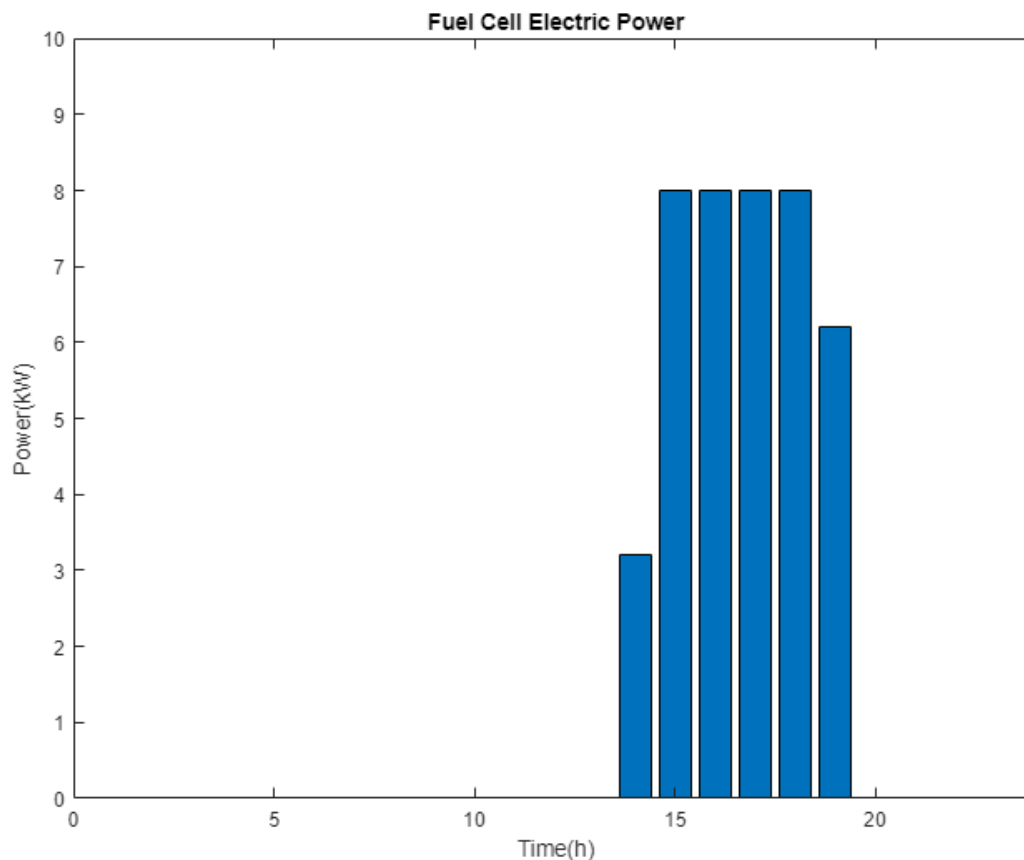
**Σχήμα 5-12.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 3 και σεναρίου 1.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-13 φαίνεται η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια του συστήματος της περίπτωσης 3, κατά την διάρκεια μίας ημέρας. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι τιμές της συγκεκριμένης μεταβλητής είναι αυξημένες από τις άλλες δύο περιπτώσεις τις βραδινές ώρες καθώς η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία διοχετεύεται αποκλειστικά για την παραγωγή υδρογόνου μέσω του συστήματος ηλεκτρόλυσης, λόγω της απουσίας των μπαταριών. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραγωγή θερμικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου.



**Σχήμα 5-13.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 3 και σεναρίου 1.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-14 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 3 του πρώτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η κυψέλη καυσίμου υποστηρίζει το σύστημα για την κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού φορτίου κυρίως τις απογευματινές ώρες, γεγονός που αποδεικνύει ότι έχουν προηγηθεί ώρες περίσσειας παραγόμενης από την Φ/Β συστοιχία ηλεκτρικής ενέργειας που έχει διοχετευθεί στην παραγωγή υδρογόνου μέσω του electrolyzer. Ωστόσο, από το Σχήμα 5-14 φαίνεται ότι μετά τις 19:00 μ.μ το υδρογόνο εξαντλείται με αποτέλεσμα η κυψέλη καυσίμου να μην μπορεί πλέον να στηρίζει το σύστημα στην κάλυψη του φοτίου.

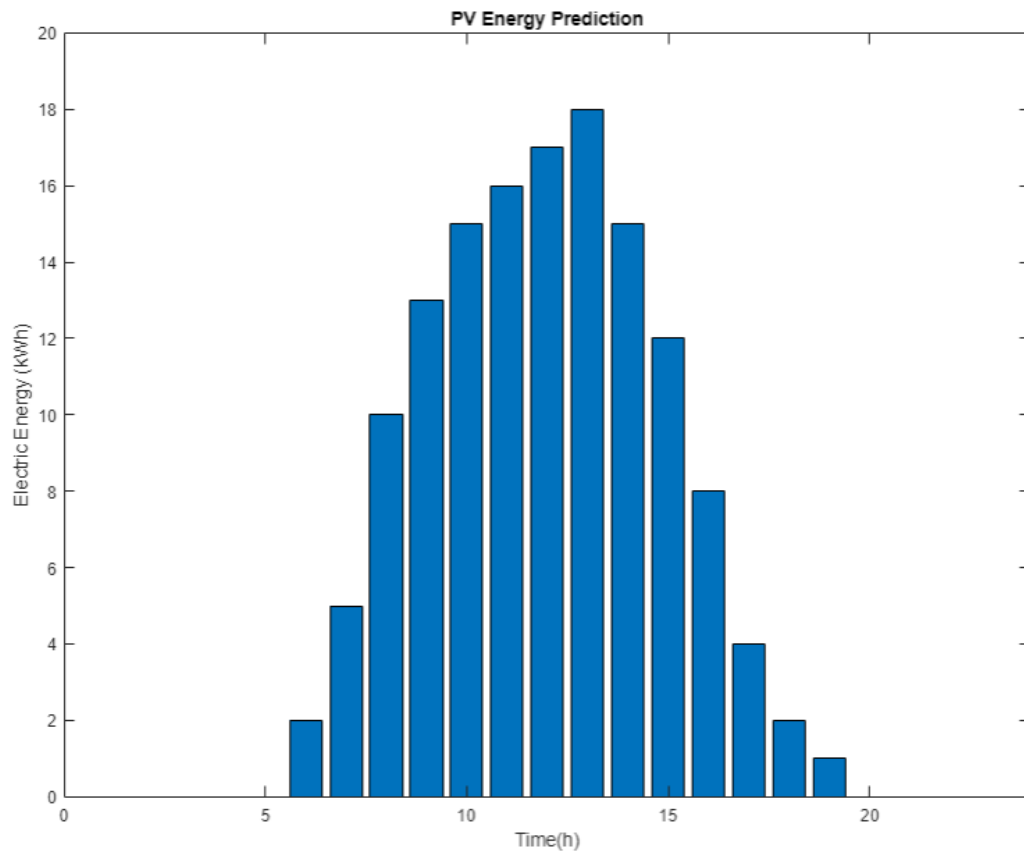


**Σχήμα 5-14.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 3 και σεναρίου 1 σε μία ημέρα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 του πρώτου σεναρίου είναι 96.9 €.

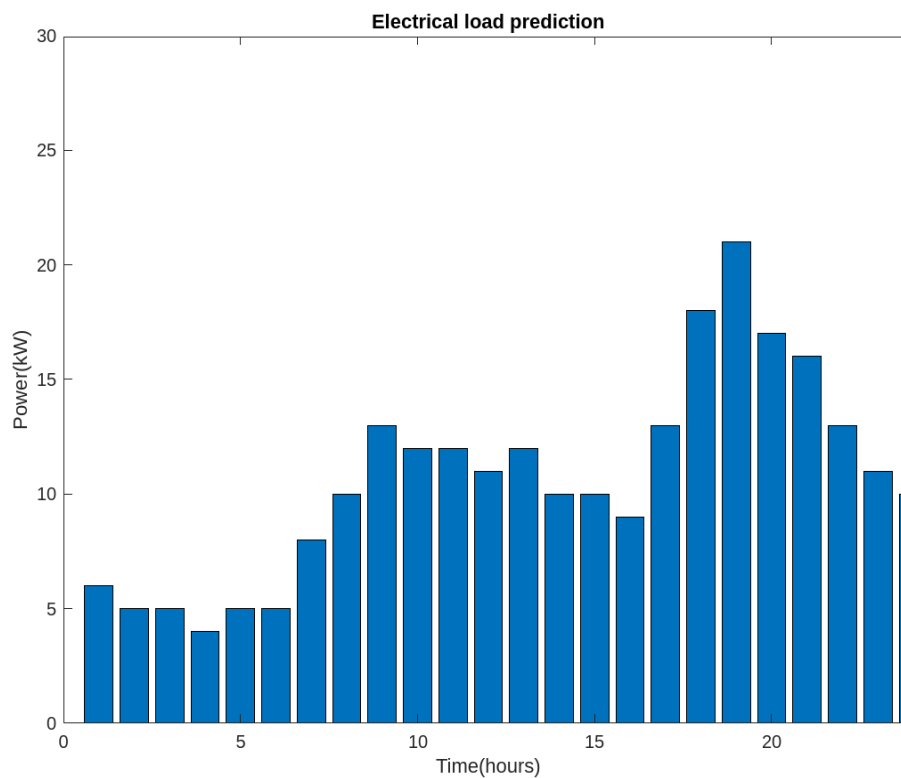
### Σενάριο 2

Το σενάριο 2 αντικατοπτρίζει μία ευνοϊκή προς το σύστημα συνθήκη. Συγκεκριμένα, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι αυξημένη αλλά και το θερμικό και το ηλεκτρικό φορτίο είναι μειωμένα. Στο Σχήμα 5-15 παρουσιάζεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας του σεναρίου 2 για την διάρκεια μίας ημέρας, όπου παρατηρείται αισθητά αυξημένη σε σχέση με το σενάριο 1.



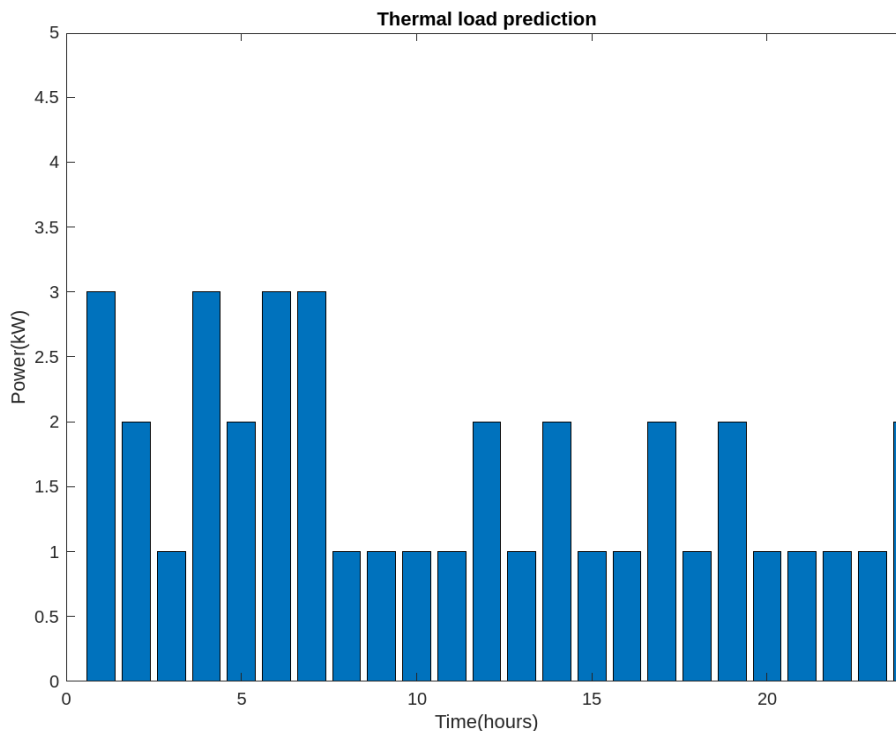
**Σχήμα 5-15.** Πρόβλεψη ηλεκτρικής ισχύος εξόδου Φ/Β συστοιχίας σεναρίου 2.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-16 φαίνεται το ωριαίο ηλεκτρικό φορτίο του σεναρίου 2 στην διάρκεια μίας ημέρας, το οποίο είναι αισθητά μικρότερο συγκριτικά με το ηλεκτρικό φορτίο του σεναρίου 1.



**Σχήμα 5-16.** Πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου σεναρίου 2 [8].

Τέλος, στο Σχήμα 5-17 παρουσιάζεται το ωριαίο θερμικό φορτίο του συστήματος στο σενάριο 2, στην διάρκεια μίας ημέρας το οποίο είναι εξίσου μικρότερο σε σχέση με το θερμικό φορτίο στο σενάριο 1.

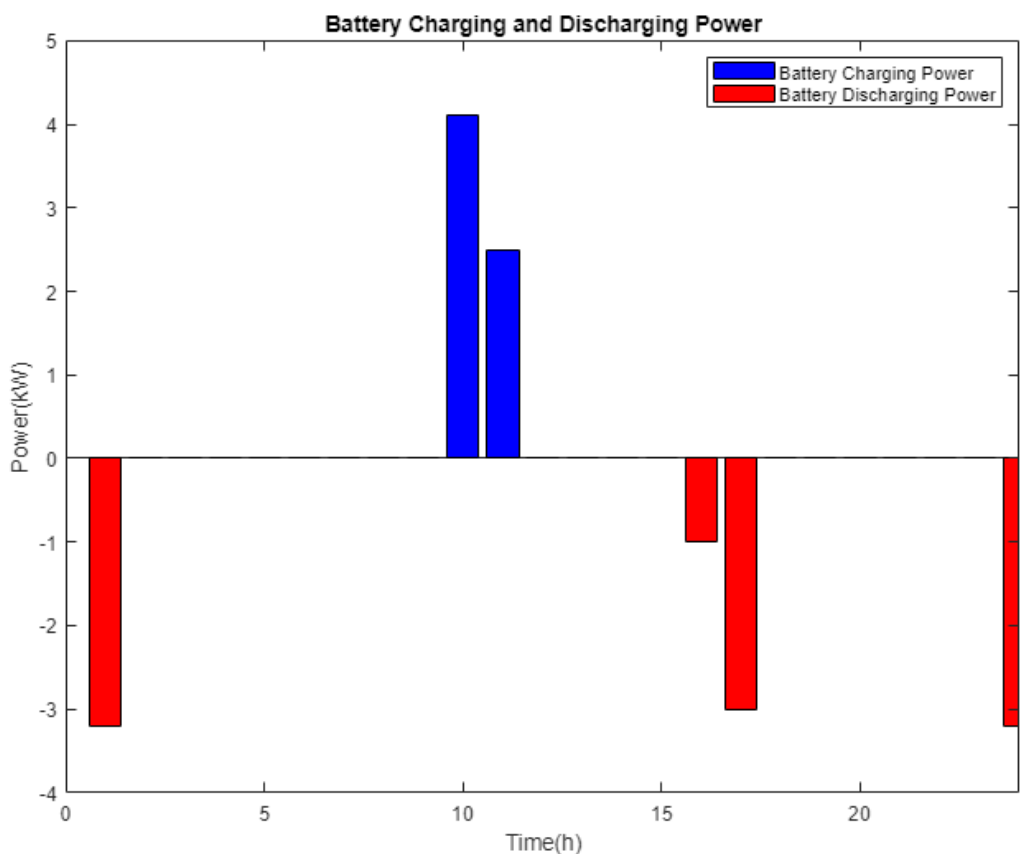


*Σχήμα 5-17. Πρόβλεψη θερμικού φορτίου σεναρίου 2 [8].*

Στο ίδιο πλαίσιο με το σενάριο 1, ακολουθούν τα διαγράμματα των βελτιστοποιημένων τιμών των μεταβλητών απόφασης για κάθε περίπτωση συστήματος του δεύτερου σεναρίου που μελετάται.

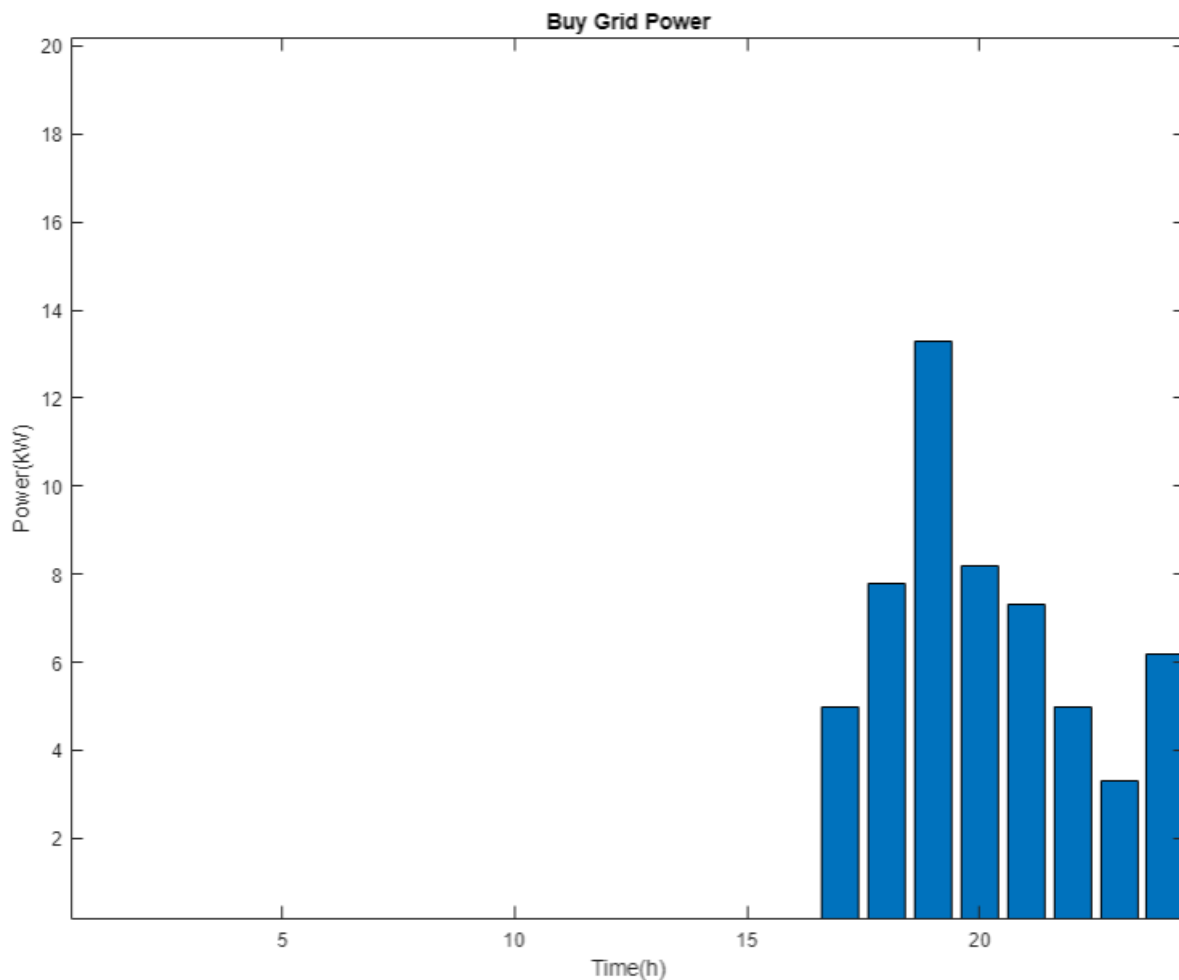
#### Περίπτωση 1

Αρχικά, στο Σχήμα 5-18 φαίνεται η ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών του συστήματος της περίπτωσης 1 στο δεύτερο σενάριο για την διάρκεια μίας ημέρας. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι οι μπαταρίες φορτίζονται τις πρωινές ώρες περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία μέχρι να αποθηκεύσουν την μέγιστη δυνατή ενέργεια, για να την διοχετεύσουν στην συνέχεια για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου. Έπειτα, παρατηρείται ότι εκφορτίζονται τις μεσημεριανές ώρες όπου η Φ/Β συστοιχία αδυνατεί να καλύψει εξ' ολοκλήρου το φορτίο.



**Σχήμα 5-18.** Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών περίπτωσης 1 και σεναρίου 2.

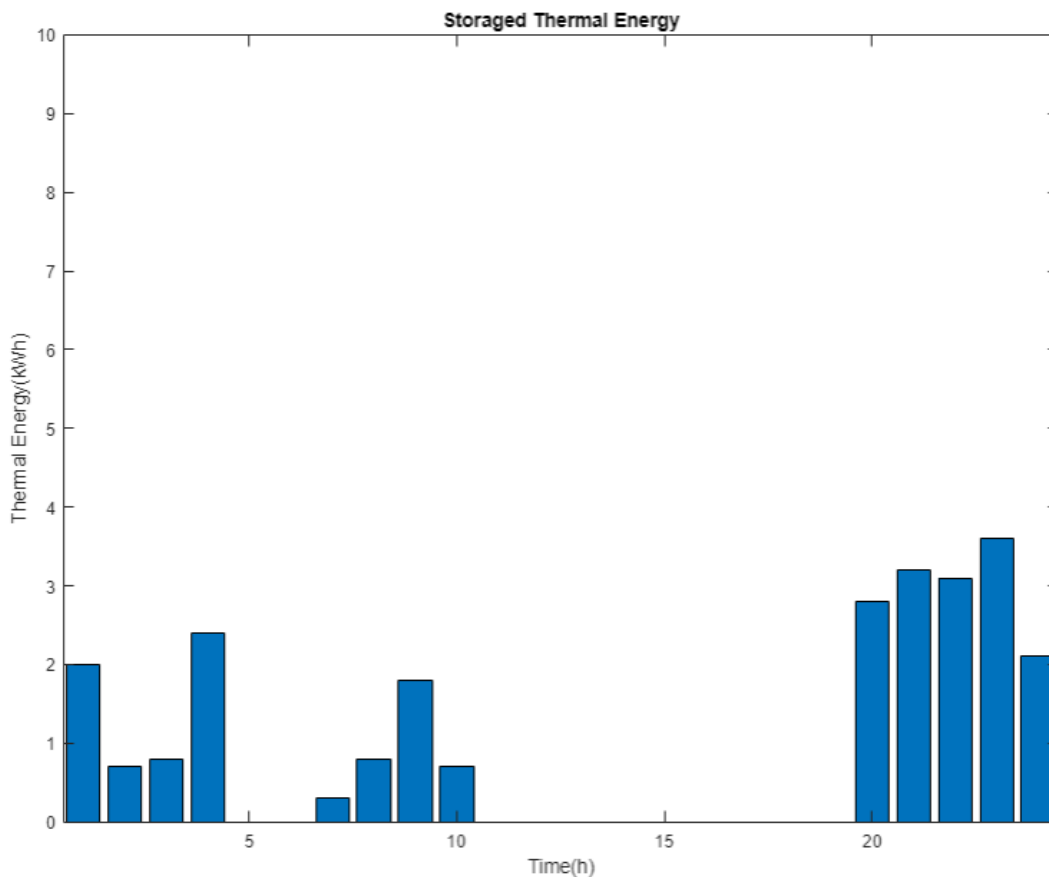
Στο ίδιο πλαίσιο, στο Σχήμα 5-19 φαίνεται η ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου που έχει ως στόχο την κάλυψη των αναγκών του φορτίου σε χρονικές στιγμές ανεπάρκειας του συστήματος της περίπτωσης 1. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι αισθητά μικρότερη συγκριτικά με το σύστημα της περίπτωσης 1 του πρώτου σεναρίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-19, με την ηλεκτρική ισχύ ηλεκτρικού δικτύου να λαμβάνει υψηλότερες τιμές μόνο τις βραδινές ώρες που η Φ/Β συστοιχία δεν παράγει ηλεκτρική ενέργεια, οι μπαταρίες έχουν εκφορτιστεί πλήρως και η κυψέλη καυσίμου αδυνατεί να καλύψει όλο τον όγκο του φορτίου.



**Σχήμα 5-19.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 1 και σεναρίου 2.

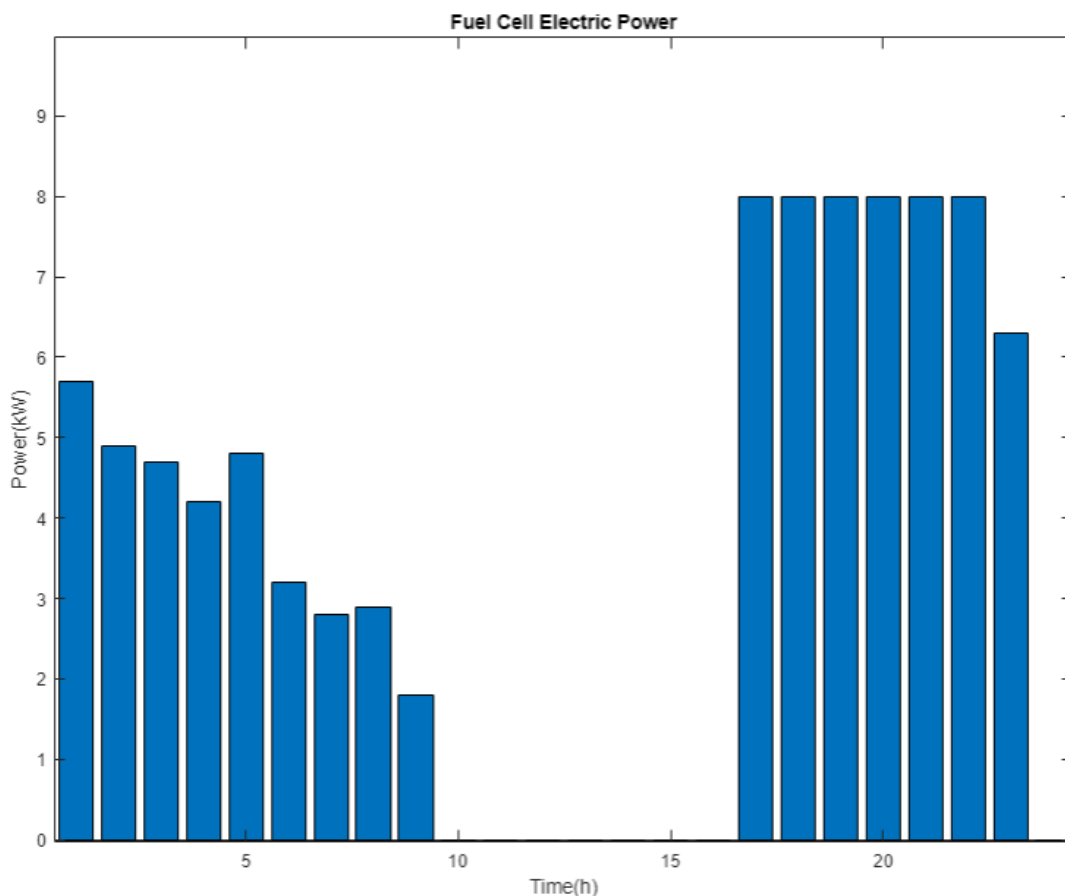
Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-20 φαίνεται η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια του συστήματος της περίπτωσης 1 του δεύτερου σεναρίου, στην διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι τα επίπεδα της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται είναι υψηλότερα κυρίως τις βραδινές ώρες που το θερμικό φορτίο ελαττώνεται και υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου.





**Σχήμα 5-20.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 1 και σεναρίου 2.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-21 παρουσιάζεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 1. Ειδικότερα, στο Σχήμα 5-21 παρατηρείται ότι η κυψέλη καυσίμου συμβάλει στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου σε όλη την διάρκεια της ημέρας εκτός από τις ώρες (10:00 π.μ έως 18:00 μ.μ) που το φορτίο καλύπτεται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την κρισιμότητα και την σημασία να υπάρχει υδρογόνο στο σύστημα που δεν απαιτείται κατανάλωση ενέργειας του συστήματος για την παραγωγή του, αλλά να είναι διαθέσιμο για τροφοδότηση της κυψέλης καυσίμου.

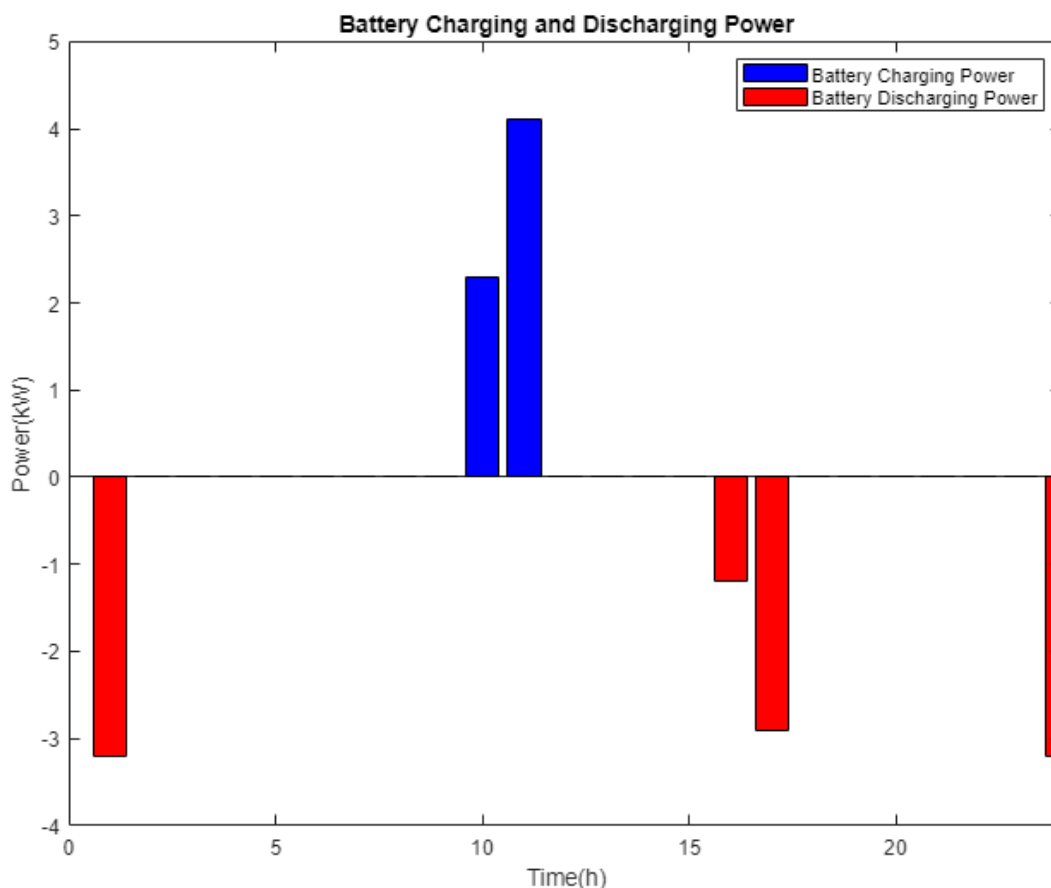


**Σχήμα 5-21.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 1 και σεναρίου 2 σε μία ημέρα.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του δεύτερου σεναρίου είναι 73.3 €.

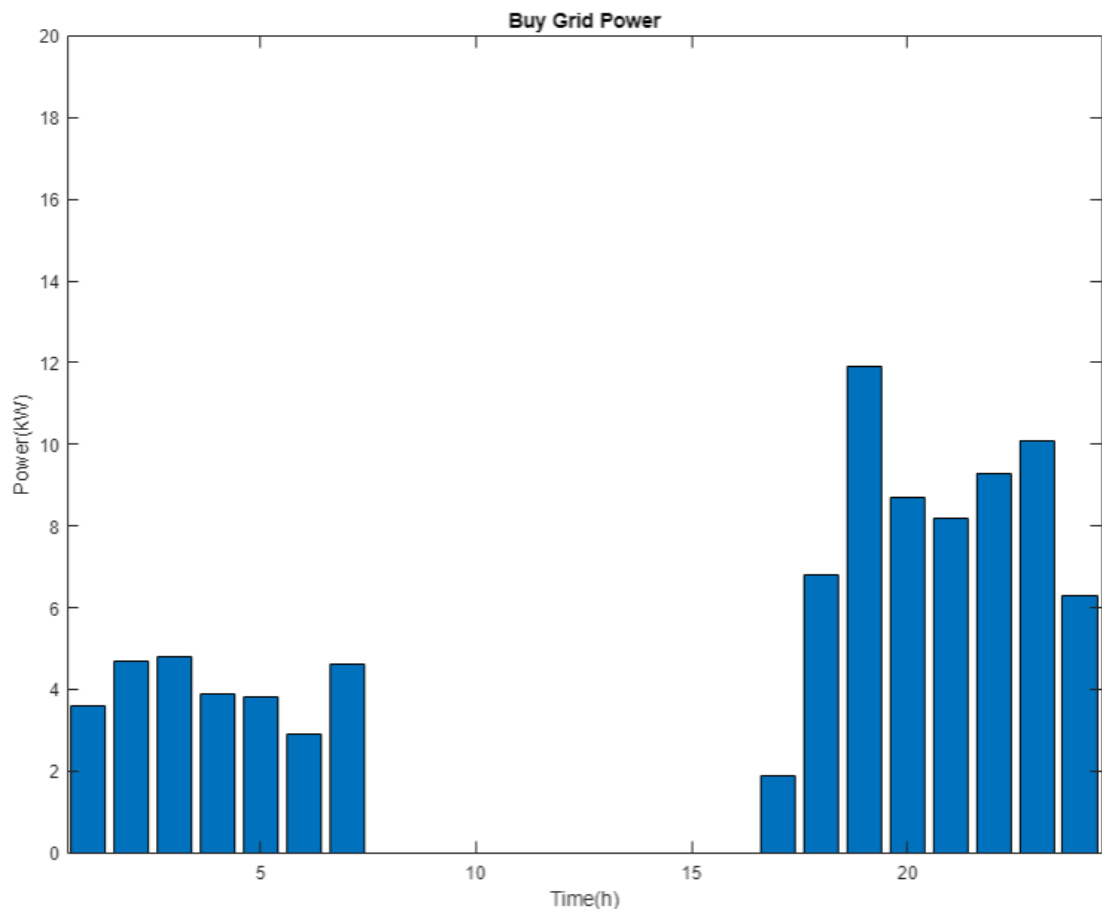
### Περίπτωση 2

Αρχικά, στο Σχήμα 5-22 φαίνεται η ωριαία ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών του συστήματος της περίπτωσης 2 του δεύτερου σεναρίου, στην διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι λόγω των βελτιωμένων καιρικών συνθηκών που αντικατοπτρίζει το σενάριο 2, η ισχύς φόρτισης των μπαταριών είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ισχύς φόρτισης των μπαταριών της περίπτωσης 2 του πρώτου σεναρίου, ενώ η ισχύς εκφόρτισης φαίνεται λίγο μειωμένη λόγω των μικρότερων φορτίων.



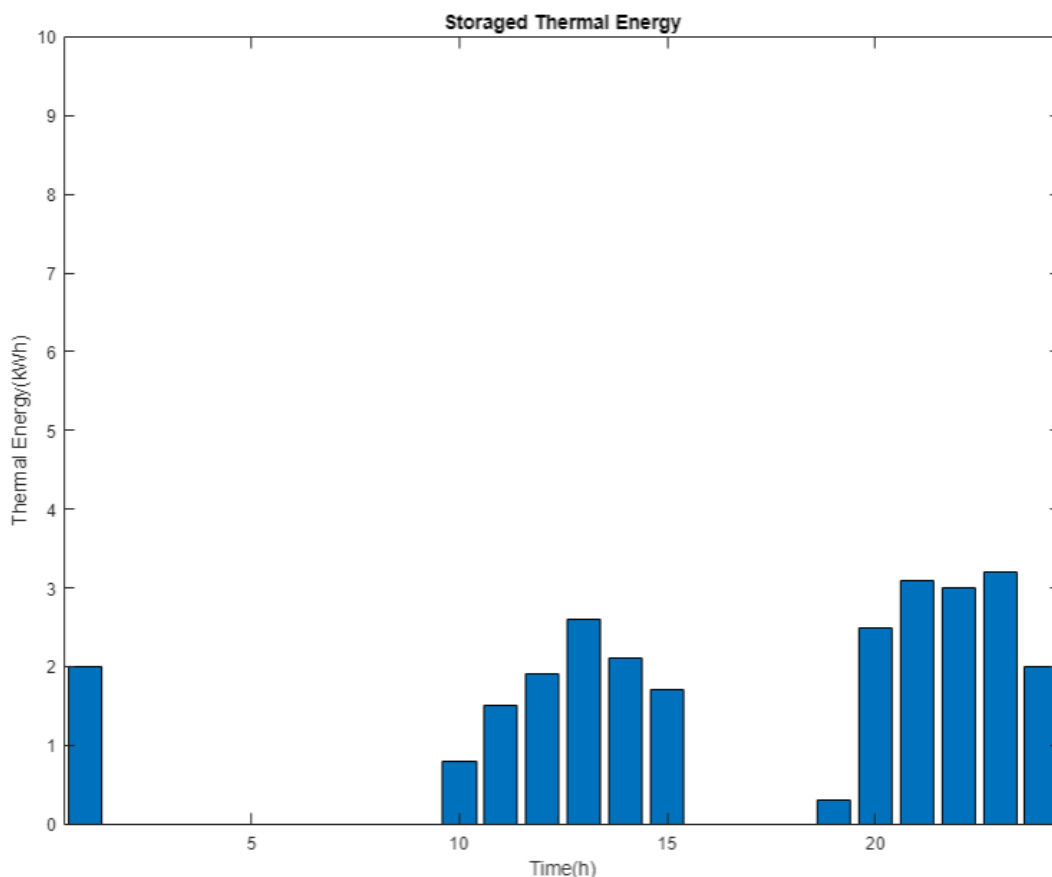
**Σχήμα 5-22.** Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών περίπτωσης 2 και σεναρίου 2.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-23 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς που παρέχει το δίκτυο κάθε ώρα στο σύστημα της περίπτωσης 2 του δεύτερου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Αναλυτικότερα στο Σχήμα 5-23 παρατηρείται ότι η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι αυξημένη κυρίως τις βραδινές ώρες όπου το σύστημα αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου λόγω ανεπαρκούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία αλλά και να παράγει επιπλέον υδρογόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου, ενώ και οι μπαταρίες είναι πλήρως εκφορτισμένες.



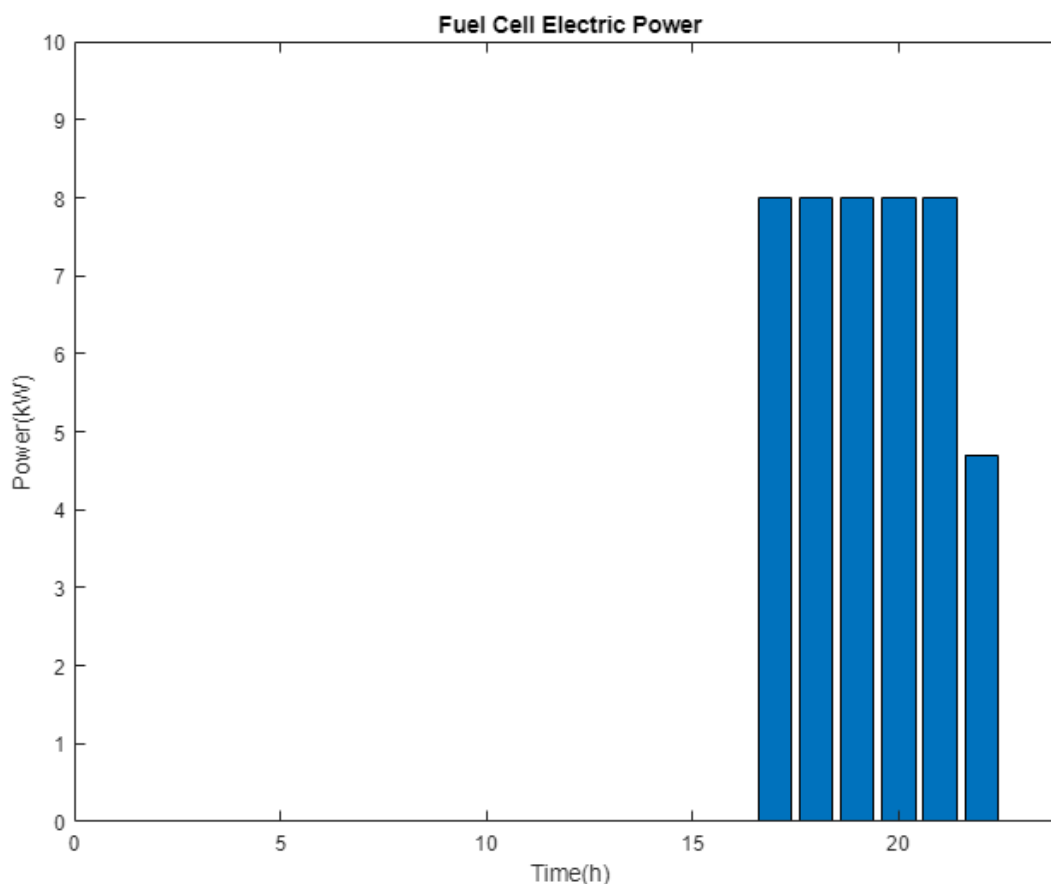
**Σχήμα 5-23.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 2 και σεναρίου 2.

Στο Σχήμα 5-24 παρουσιάζεται η ωριαία θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα της περίπτωσης 2 του δεύτερου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Ειδικότερα, γίνεται αντιληπτό ότι αποθηκεύεται μεγαλύτερη ποσότητα θερμικής ενέργειας κυρίως τις βραδινές ώρες που το θερμικό φορτίο ελαττώνεται και υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου.



**Σχήμα 5-24.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 2 και σεναρίου 2.

Στο ίδιο πλαίσιο, στο Σχήμα 5-25 απεικονίζεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 2 του δεύτερου σεναρίου, στην διάρκεια μίας ημέρας. Είναι φανερό ότι η κυψέλη καυσίμου συμβάλει στην κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού φορτίου κυρίως τις βραδινές ώρες καθώς έχουν προηγηθεί χρονικές στιγμές περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία με αποτέλεσμα να υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια για την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου μέσω του electrolyzer, ενώ παρατηρείται ότι μετά τις 22:00 μ.μ εξαντλείται και η διαθέσιμη ποσότητα υδρογόνου καθιστώντας την κυψέλη καυσίμου ανεπαρκής να στηρίξει το σύστημα στην κάλυψη του φορτίου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση το υδρογόνο εξαντλείται σε ώρα μεταγενέστερη σε σχέση με την περίπτωση 2 του πρώτου σεναρίου, λόγω των μειωμένων φορτίων και της αυξημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία αφού η κυψέλη καυσίμου καλείται να καλύψει μικρότερη όγκο φορτίου.

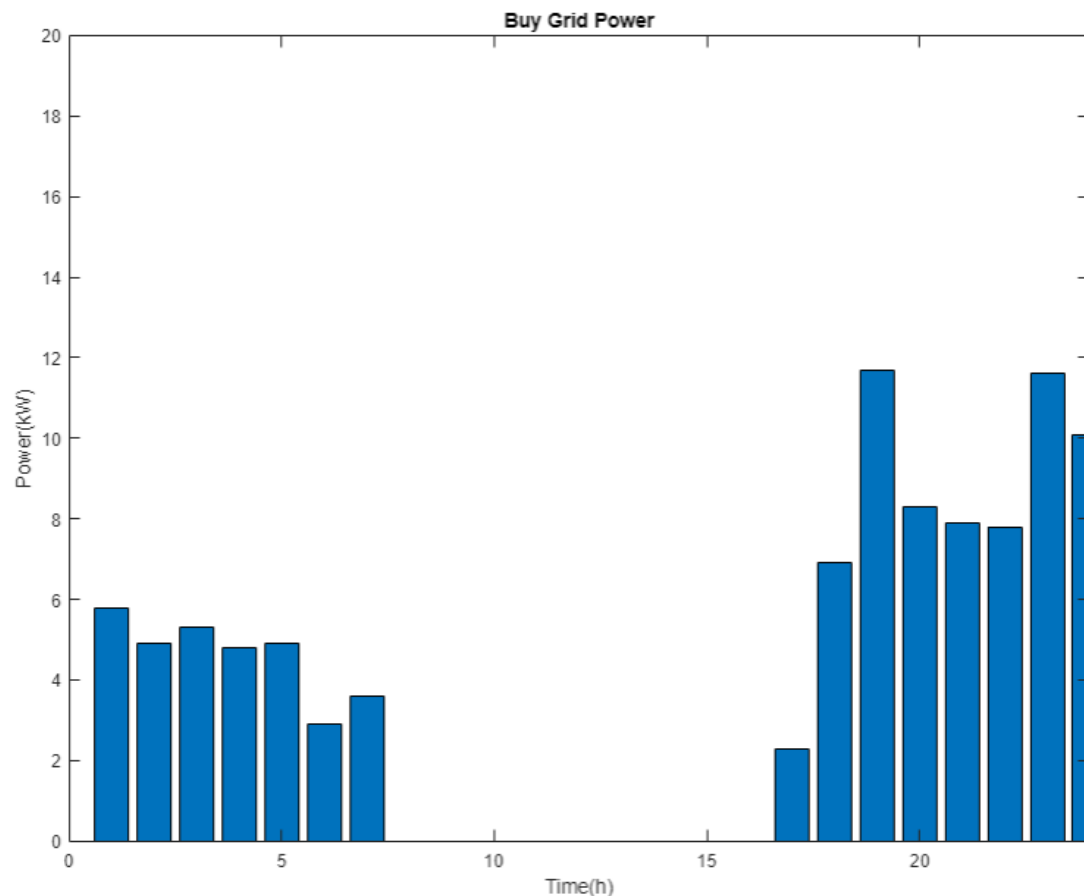


**Σχήμα 5-25.** Ηλεκτρική ισχύς κυψέλης καυσίμου περίπτωση 2 και σεναρίου 2.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του δεύτερου σεναρίου είναι 83.9 €.

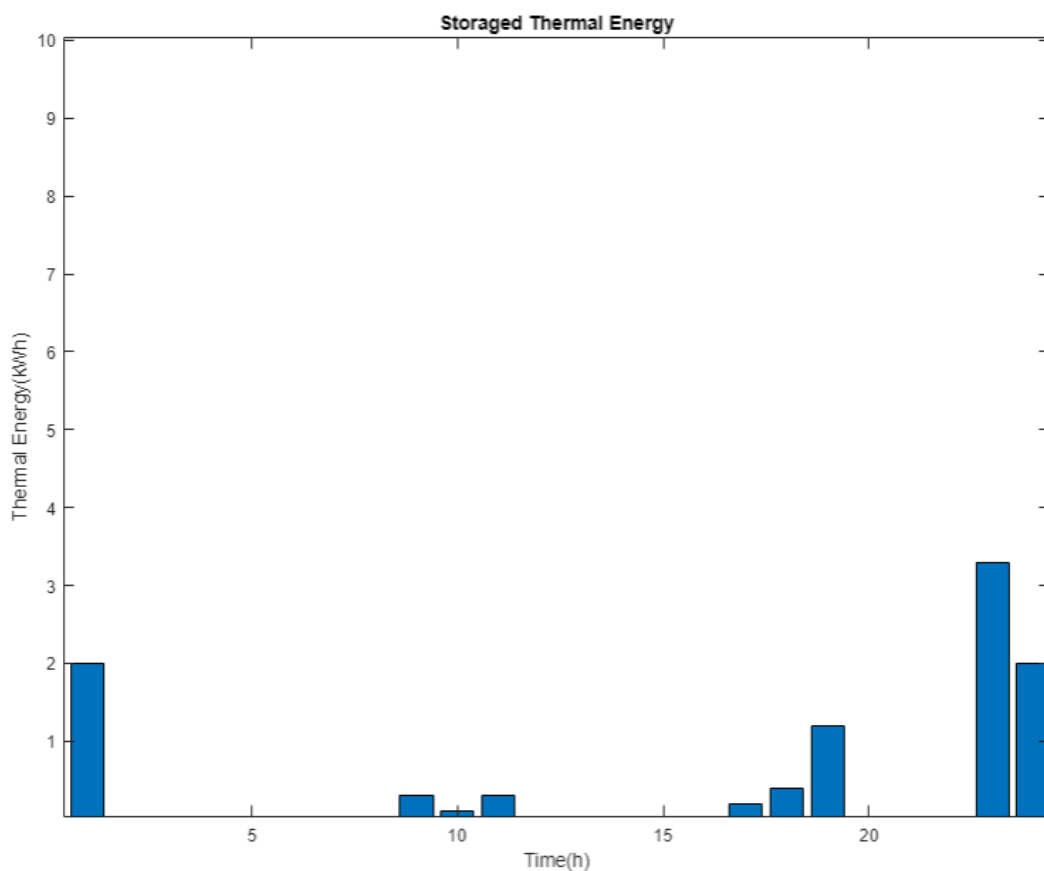
### Περίπτωση 3

Στο Σχήμα 5-26 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς που παρέχει το ηλεκτρικό δίκτυο στο σύστημα τις περίπτωσης 3 του δεύτερου σεναρίου κάθε ώρα για την διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5-26 παρατηρείται ότι η ηλεκτρική ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου είναι μεγαλύτερη τις πρώτες πρωινές και τις βραδινές ώρες αφού αυτές τις χρονικές στιγμές η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι μειωμένη. Παράλληλα, παρατηρείται ότι τις βραδινές ώρες η ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με τις πρώτες πρωινές ώρες, λόγω αυξημένου φορτίου.



**Σχήμα 5-26.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 3 και σεναρίου 2.

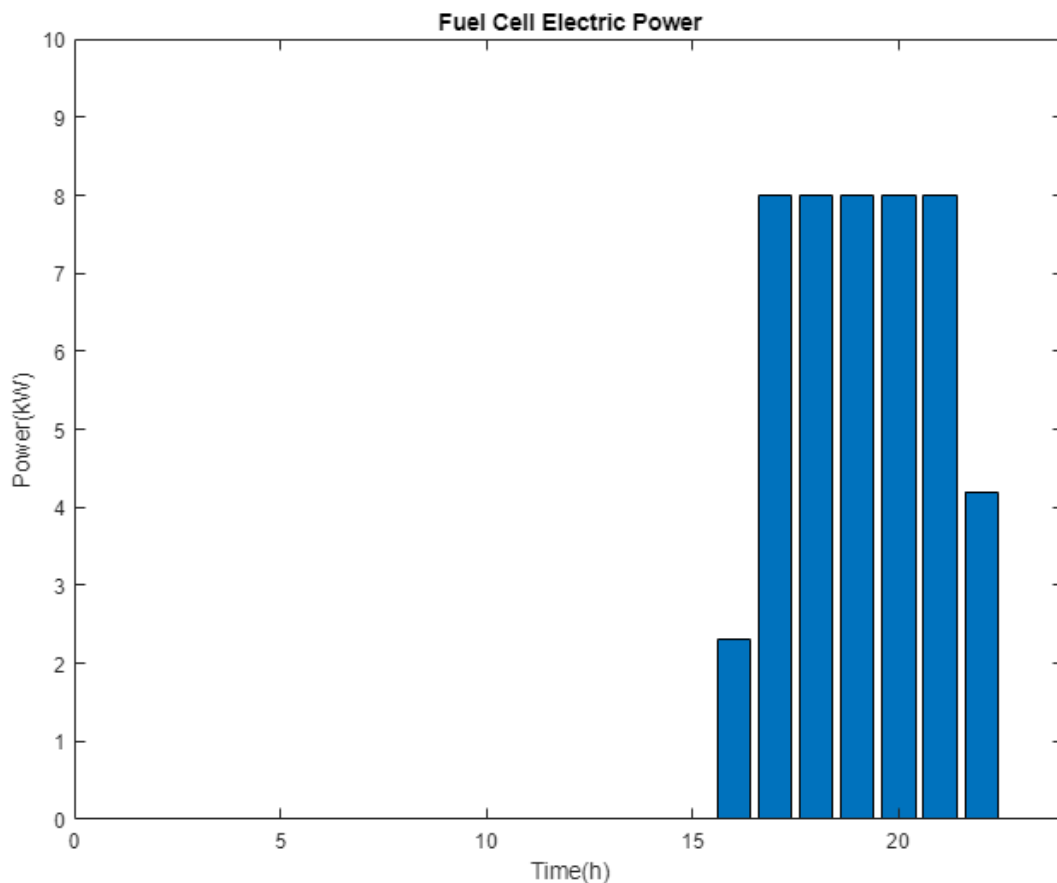
Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-27 φαίνεται η θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα της περίπτωσης 3 του δεύτερου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας, επιβεβαιώνοντας ότι η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται είναι μεγαλύτερη τις ώρες που το θερμικό φορτίο είναι μειωμένο, όπως τις βραδινές ώρες.



**Σχήμα 5-27.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 3 και σεναρίου 2.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-28 φαίνεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 3 του δεύτερου σεναρίου. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 5-28 αποδεικνύεται ότι η κυψέλη καυσίμου συμβάλει στην κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού φορτίου κυρίως τις ώρες τις οποίες έχει προηγηθεί αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία, με αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου μέσω του electrolyzer. Οι ώρες αυξημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι από τις 10:00 π.μ έως τις 16:00 μ.μ και οι ώρες που η κυψέλη καυσίμου συμβάλει σημαντικά στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου είναι οι βραδινές.



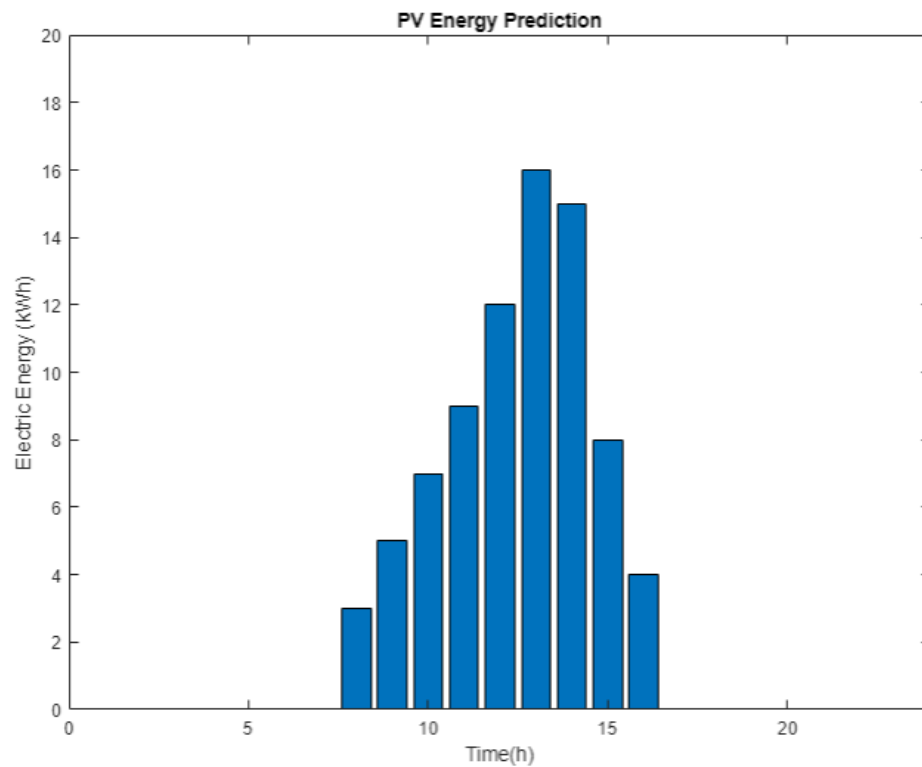


**Σχήμα 5-28.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 3 και σεναρίου 2.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 του δεύτερου σεναρίου είναι 92.9 €.

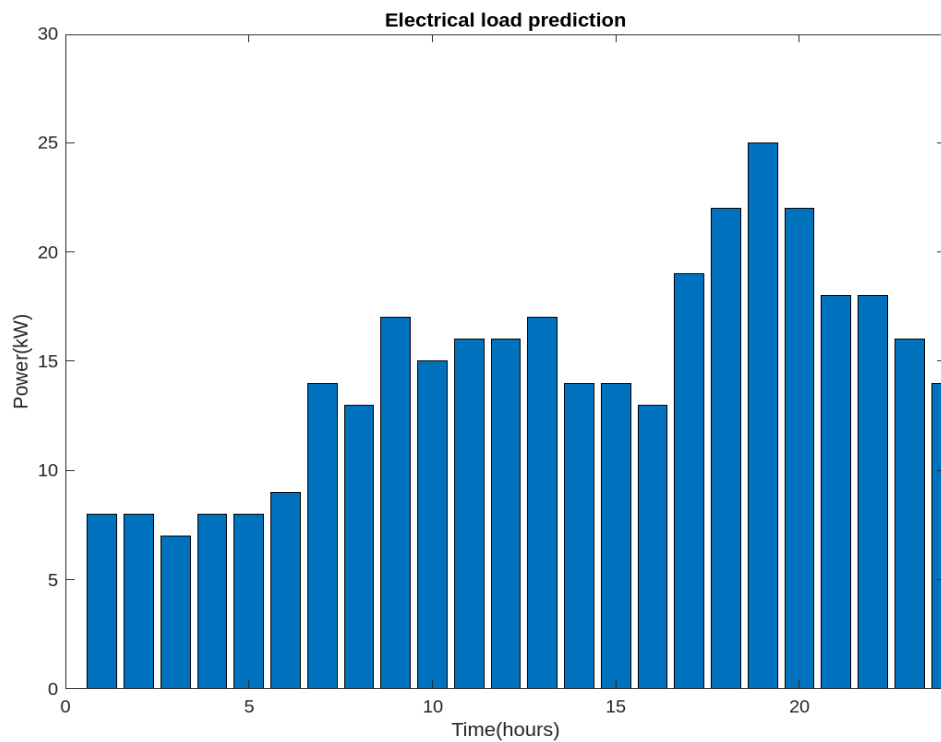
### Σενάριο 3

Το σενάριο 3 αντικατοπτρίζει μια δυσμενή προς το σύστημα συνθήκη στην οποία η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι μειωμένη, ενώ το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο είναι αυξημένα. Στο Σχήμα 5-29 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της Φ/Β συστοιχίας του σεναρίου 3 που μελετάται, με τιμές εμφανώς μικρότερες σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια.



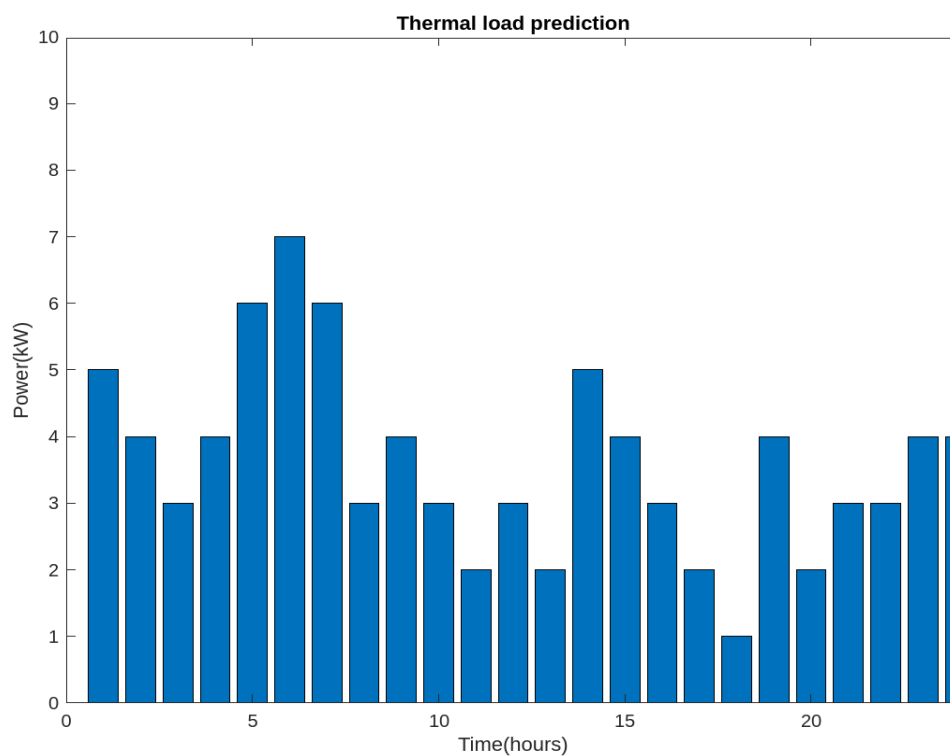
**Σχήμα 5-29.** Πρόβλεψη ηλεκτρικής ισχύος εξόδου Φ/Β συστοιχίας σεναρίου 3.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-30 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό φορτίο του σεναρίου 3 στην διάρκεια μίας ημέρας το οποίο όπως είναι φανερό ότι είναι αρκετά αυξημένο σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια.



**Σχήμα 5-30.** Πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου σεναρίου 3.

Τέλος, στο Σχήμα 5-31 παρουσιάζεται το θερμικό φορτίο του σεναρίου 3 στην διάρκεια μίας ημέρας, το οποίο είναι εξίσου αυξημένο συγκριτικά με το θερμικό φορτίο των άλλων δύο σεναρίων.

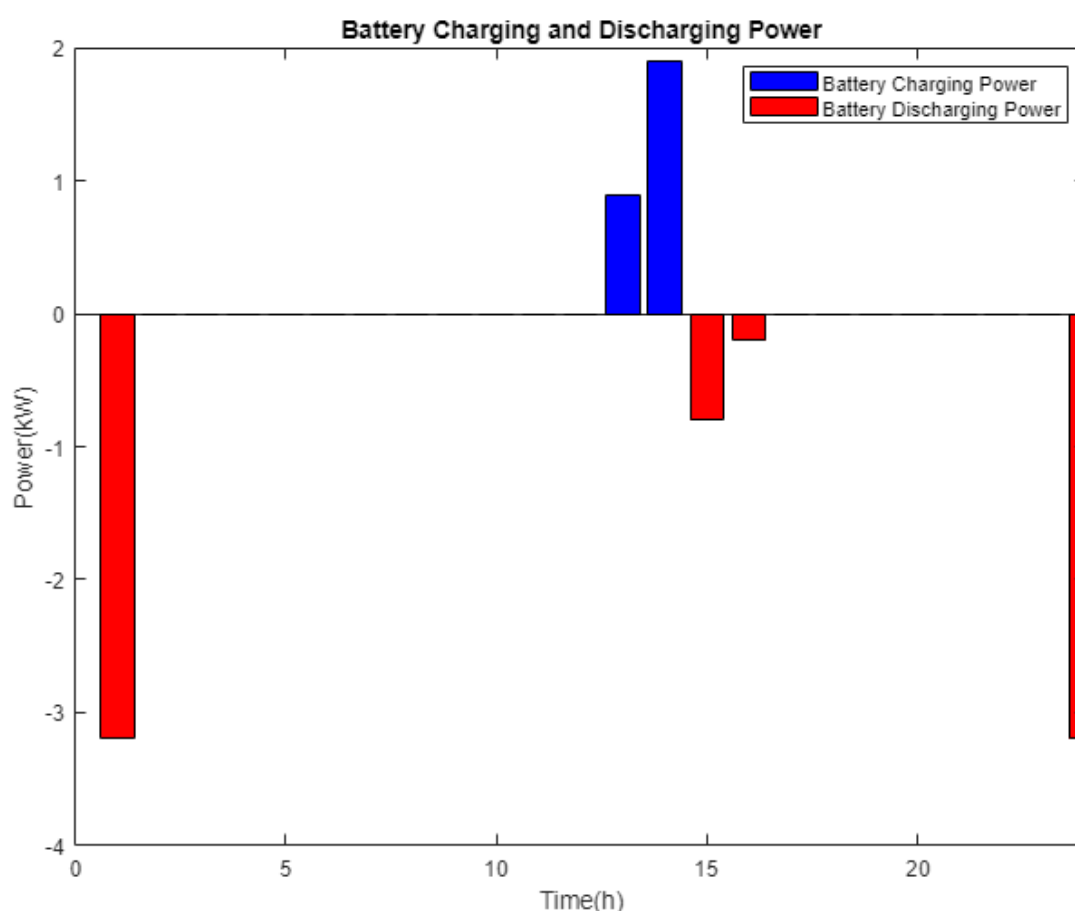


**Σχήμα 5-31.** Πρόβλεψη θερμικού φορτίου σεναρίου 3.

Στο ίδιο πλαίσιο με το σενάριο 1 και το σενάριο 2, ακολουθούν τα διαγράμματα των βελτιστοποιημένων τιμών των μεταβλητών απόφασης για κάθε περίπτωση συστήματος του τρίτου σεναρίου που μελετάται.

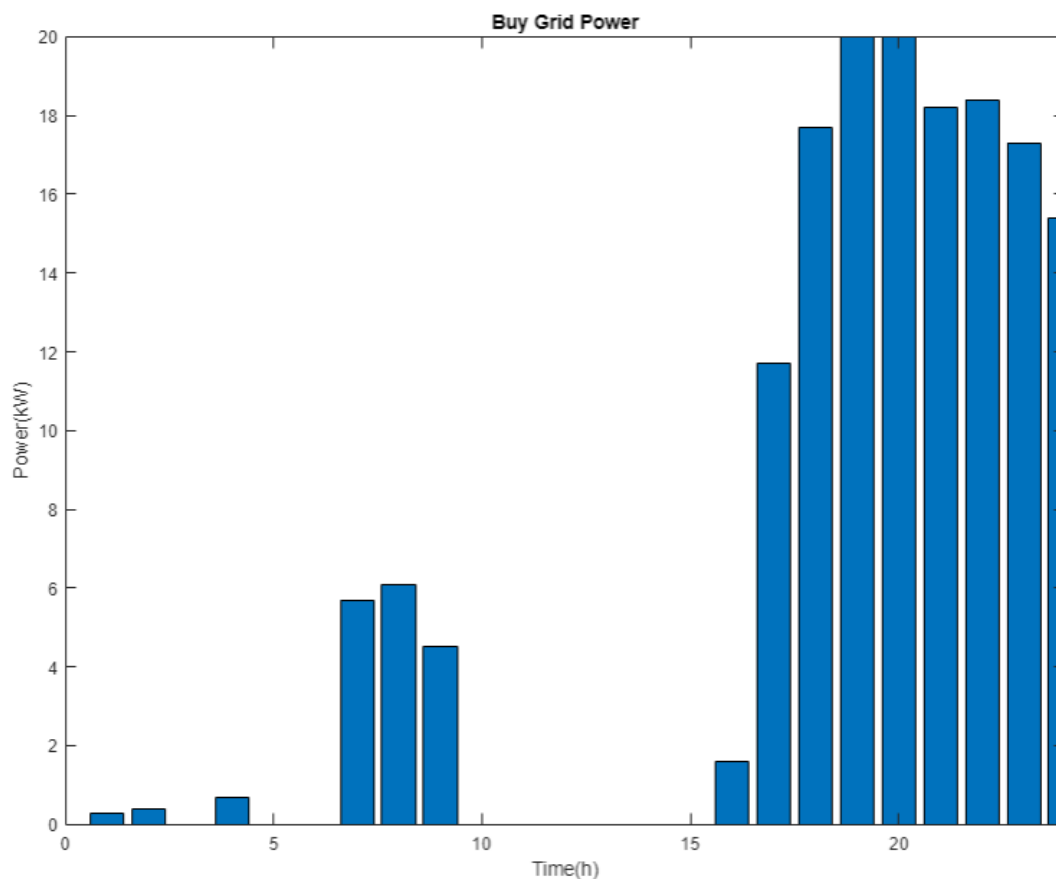
### Περίπτωση 1

Αρχικά, στο Σχήμα 5-32 φαίνεται η ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών του συστήματος της περίπτωσης 1 του σεναρίου 3 στη διάρκεια μίας ημέρας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η φόρτιση των μπαταριών δεν είναι πλήρης καθώς δεν υπάρχει η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, οι μπαταρίες φορτίζονται το μικρό χρονικό διάστημα της ημέρας που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία, όπως στις 14:00 μ.μ, ενώ εκφορτίζουν όση αποθηκευμένη ενέργεια έχουν τις ώρες αμέσως μετά την φόρτισή τους.



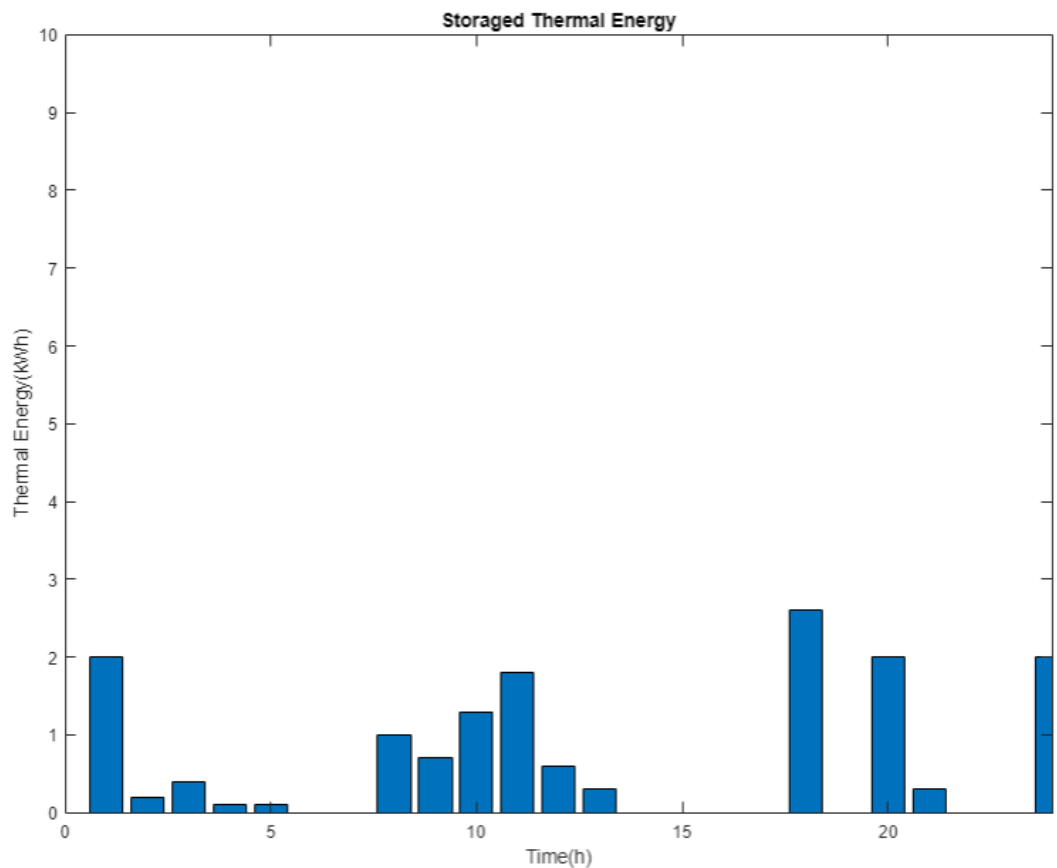
**Σχήμα 5-32.** Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών περίπτωσης 1 και σεναρίου 3.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-33 φαίνεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου που συμβάλει στην κάλυψη του φορτίου στην διάρκεια της ημέρας. Στο Σχήμα 5-33 παρατηρείται ότι οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου είναι εμφανώς αυξημένες τις βραδινές ώρες όπου η ηλεκτρική ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία είναι μηδαμινή, οι μπαταρίες έχουν εκφορτιστεί πλήρως και δεν υπάρχει πλέον διαθέσιμο υδρογόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου.



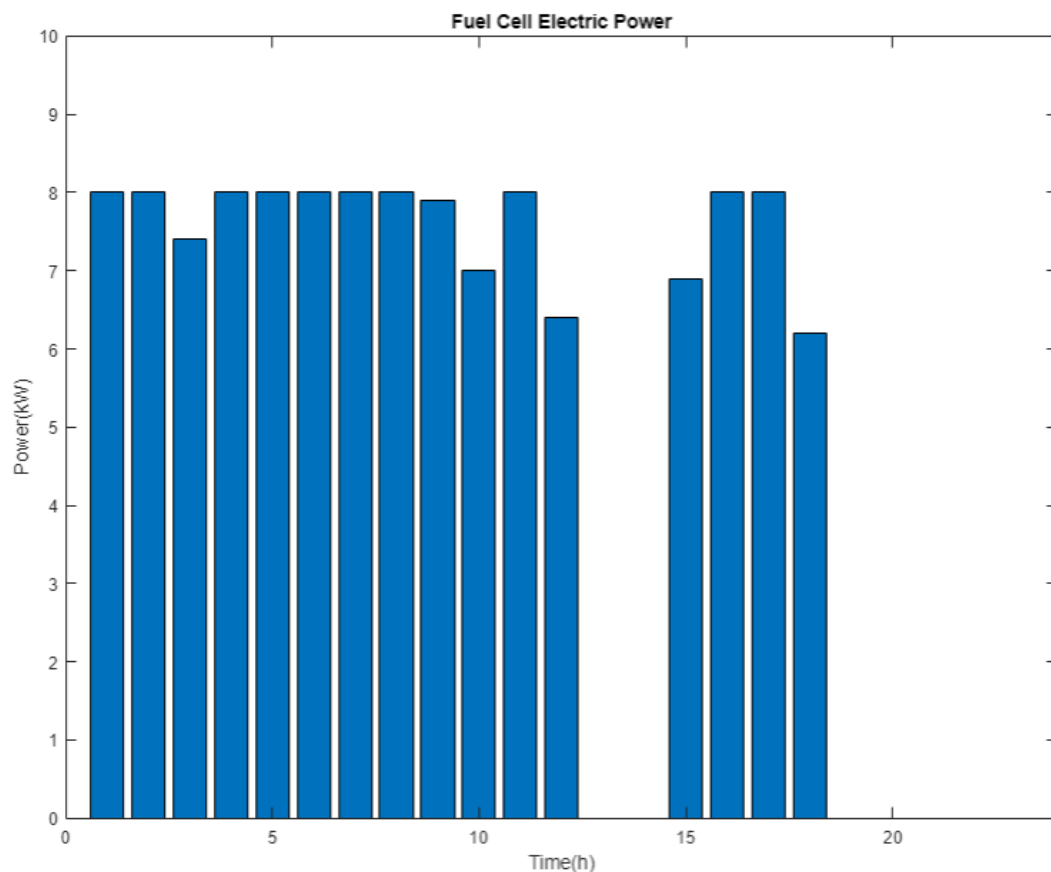
**Σχήμα 5-33.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 1 και σεναρίου 3.

Στο ίδιο πλαίσιο, στο Σχήμα 5-34 φαίνεται η ωριαία θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα της περίπτωσης 1 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Ειδικότερα, η χρήση υδρογόνου χωρίς ενεργειακές απαιτήσεις από το σύστημα οδηγεί στην ύπαρξη περίσσειας ποσότητας θερμικής ενέργειας από την κυψέλη καυσίμου, η οποία αποθηκεύεται στο σύστημα σε ορισμένες χρονικές στιγμές της ημέρας.



**Σχήμα 5-34.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 1 και σεναρίου 3.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-35 φαίνεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωση 1 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Στο Σχήμα 5-35 παρατηρείται ότι η κυψέλη καυσίμου συμβάλει σχεδόν σε όλη την διάρκεια της ημέρας στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την σημασία της χρήσης υδρογόνου που δεν απαιτείται ενέργεια του συστήματος για να παραχθεί. Ωστόσο, τις βραδινές ώρες φαίνεται ότι το υδρογόνο εξαντλείται, με αποτέλεσμα η κυψέλη καυσίμου να μην μπορεί να συμβάλει στην κάλυψη των αναγκών του ηλεκτρικού φορτίου.

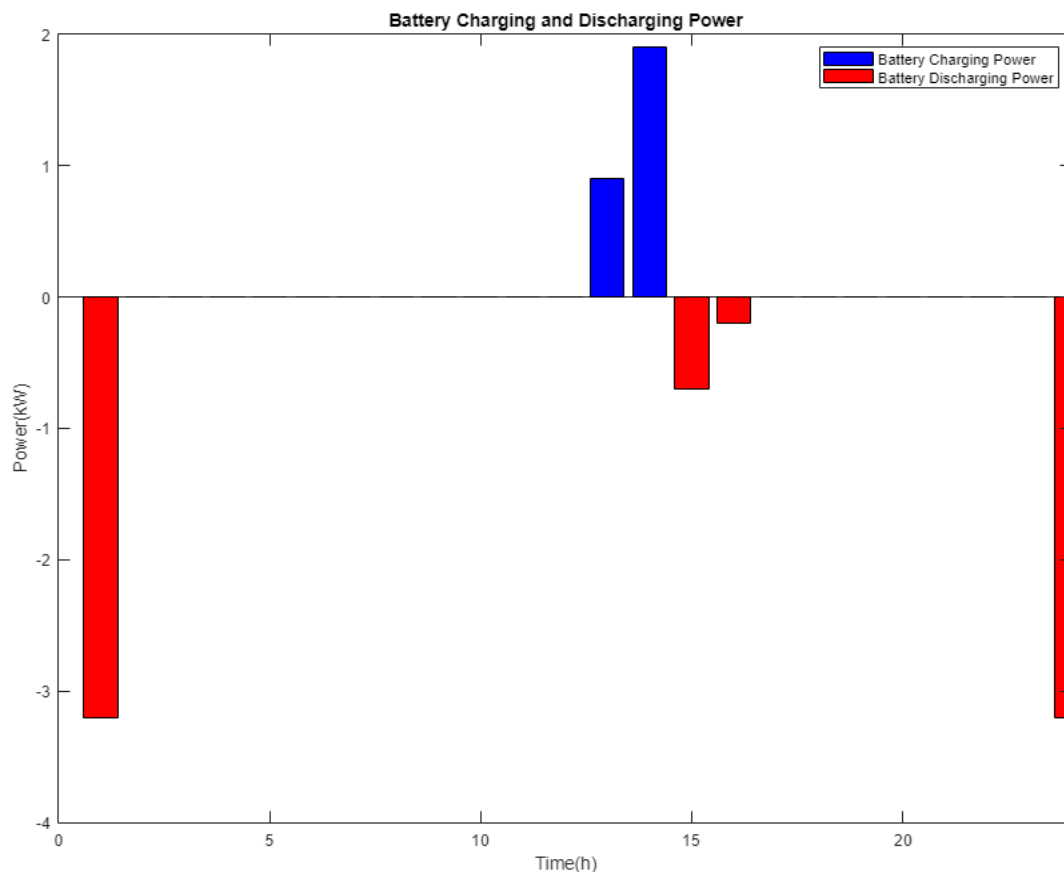


**Σχήμα 5-35.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 1 και σεναρίου 3.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του τρίτου σεναρίου είναι 84.2 €.

#### Περίπτωση 2

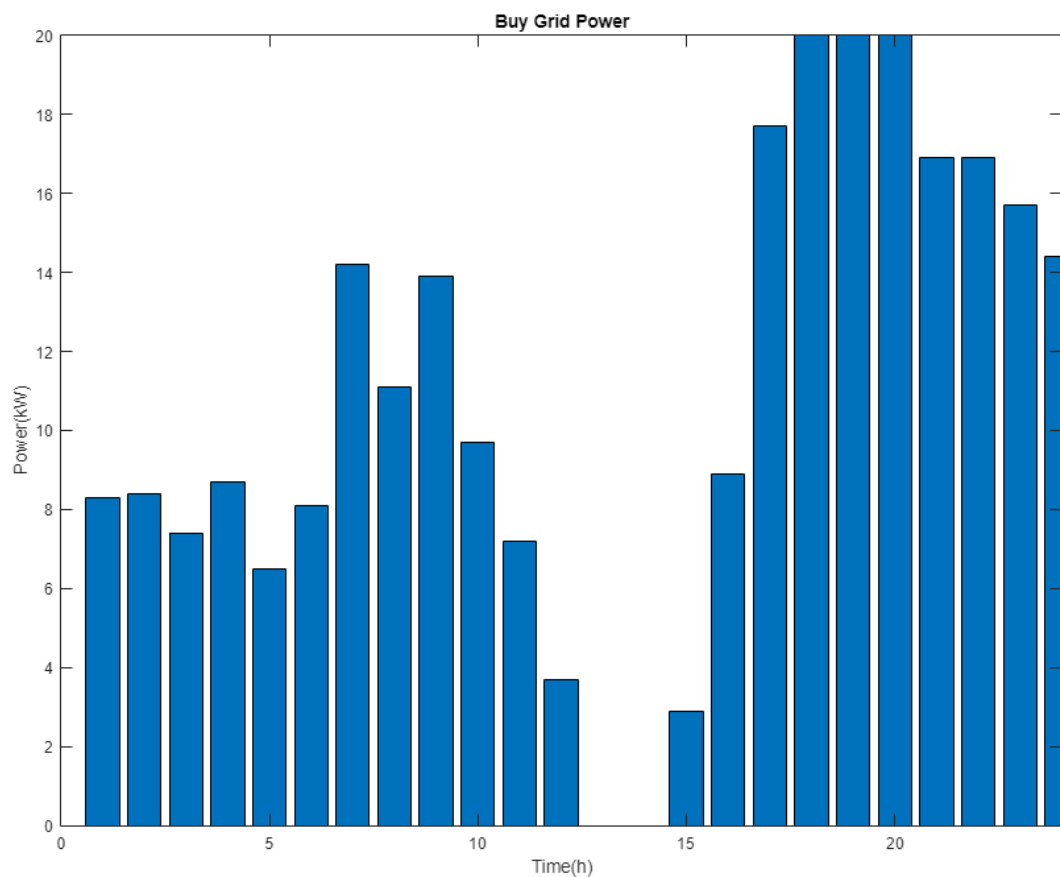
Όπως στο σύστημα της περίπτωσης 1 του τρίτου σεναρίου, έτσι και στο σύστημα της περίπτωσης 2 του τρίτου σεναρίου, η φόρτιση των μπαταριών δεν είναι πλήρης λόγω ανεπάρκειας ηλεκτρικής ενέργειας και γίνεται σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα κυρίως τις μεσημεριανές ώρες όπου υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία, ενώ η εκφόρτιση γίνεται τις ώρες αμέσως μετά την φόρτιση. Το γεγονός αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 5-36 που απεικονίζει την ωριαία ηλεκτρική ισχύ φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών στην διάρκεια μίας ημέρας.



**Σχήμα 5-36.** Ηλεκτρική ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης μπαταριών περίπτωσης 2 και σεναρίου 3.

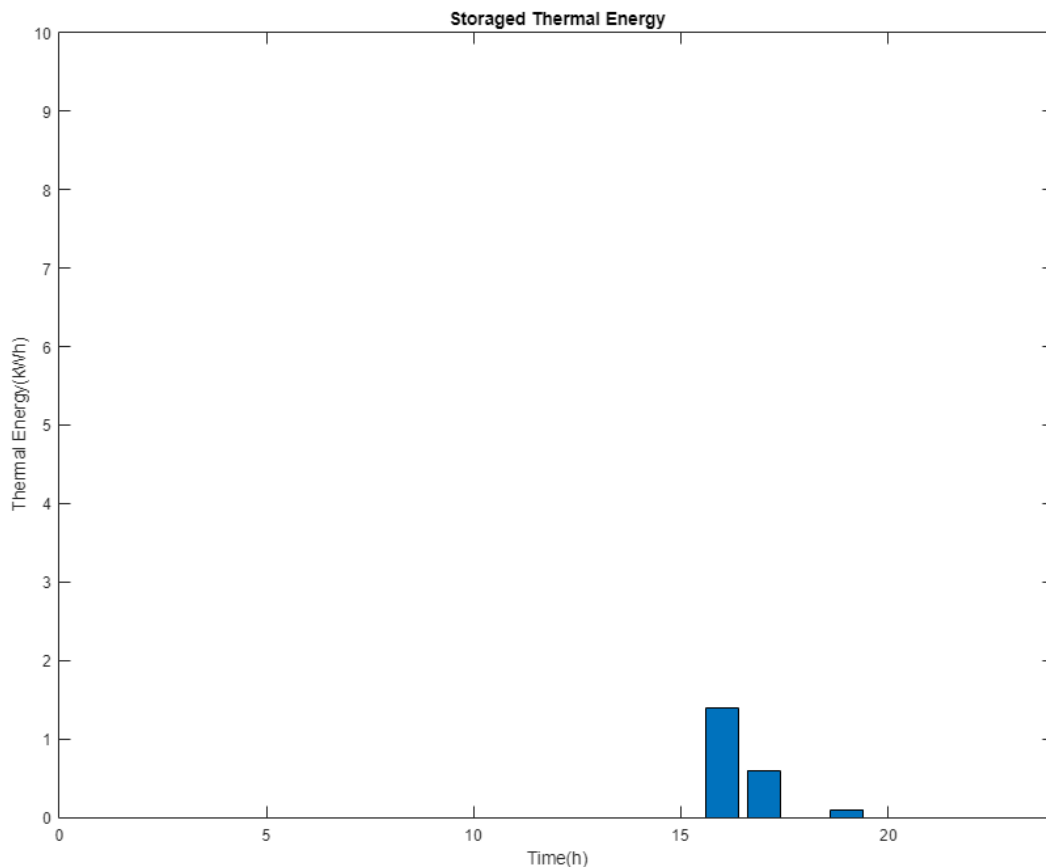
Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-37 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς που παρέχει το ηλεκτρικό δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι σχεδόν σε όλη την διάρκεια της ημέρας αγοράζονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας από το δίκτυο τόσο λόγω υψηλών απαιτήσεων του φορτίου όσο και χαμηλής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία.





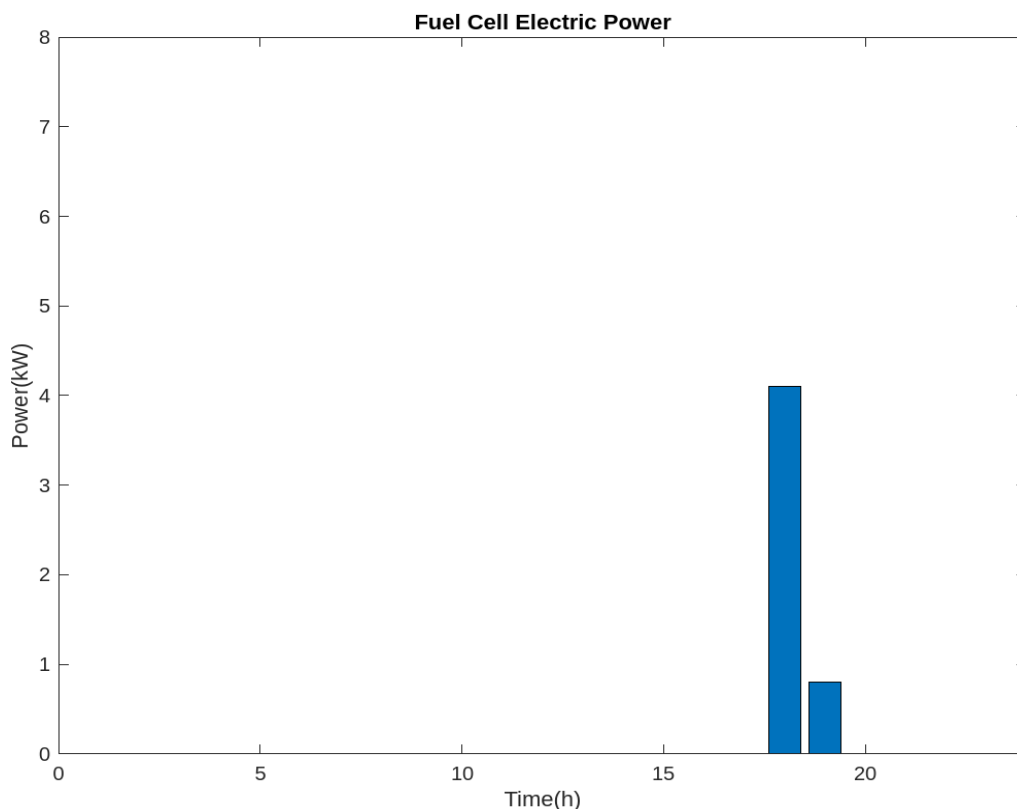
**Σχήμα 5-37.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 2 και σεναρίου 3.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-38 φαίνεται η ελάχιστη ποσότητα αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας στο σύστημα της περίπτωσης 2 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας, λόγω αδυναμίας του συστήματος να καλύψει το φορτίο.



**Σχήμα 5-38.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 2 και σεναρίου 3.

Επίσης, στο Σχήμα 5-39 φαίνεται η ωριαία ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 2 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας, όπου φαίνεται ότι λόγω ενεργειακής ανεπάρκειας του συστήματος να παράγει υδρογόνο μέσω του electrolyzer, η κυψέλη καυσίμου αδυνατεί να συμβάλει στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου, εκτός από μικρά χρονικά διαστήματα έπειτα από χρονικές στιγμές που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία (απογευματινές ώρες).

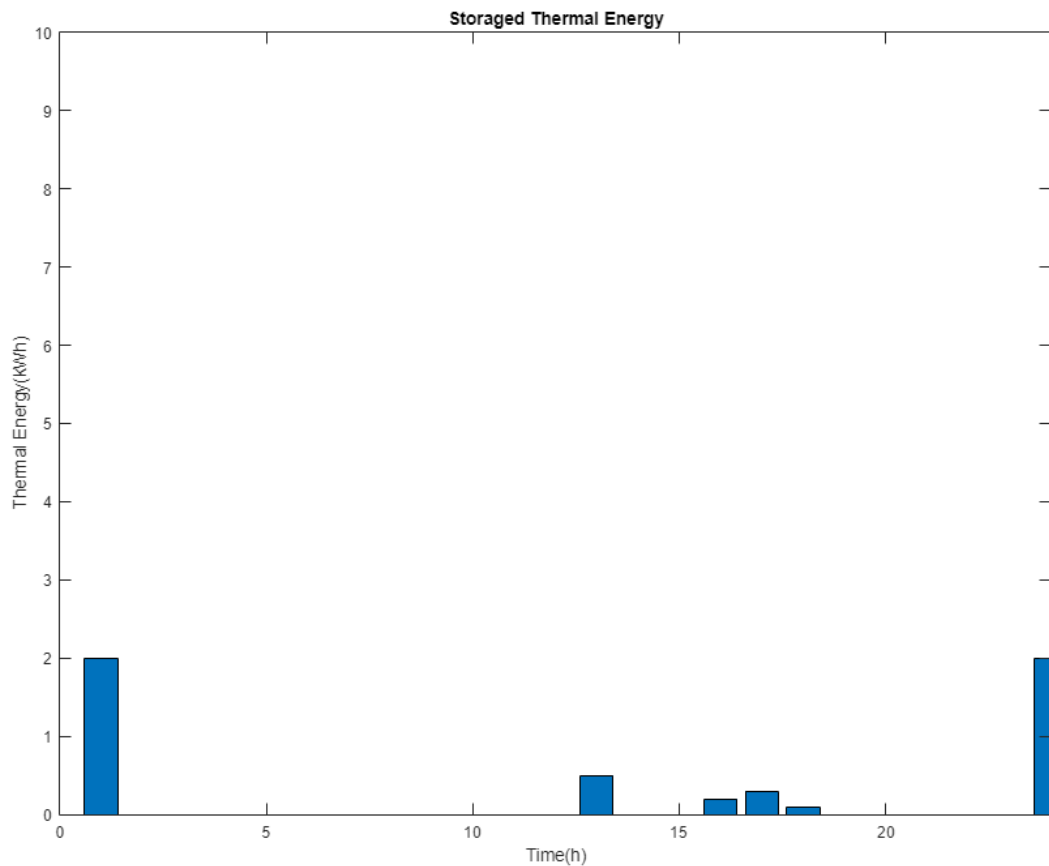


**Σχήμα 5-39.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 2 και σεναρίου 3.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 2 του τρίτου σεναρίου είναι 95.9 €.

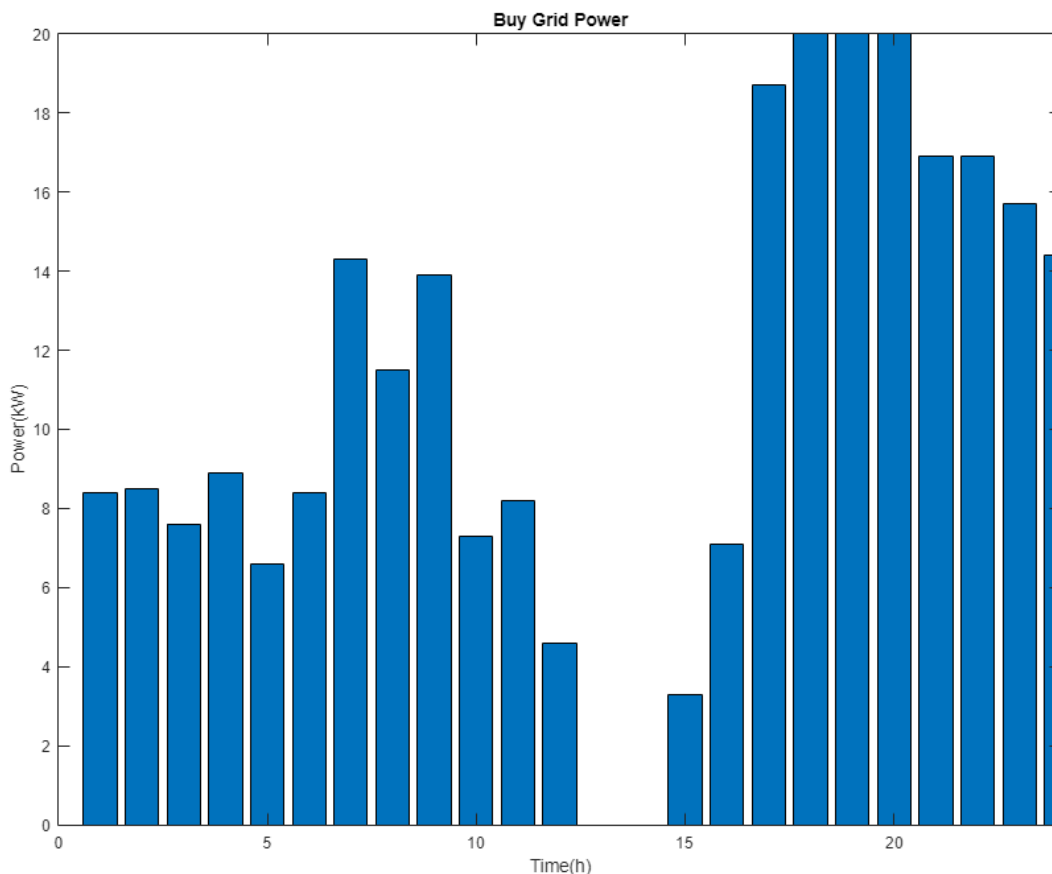
### Περίπτωση 3

Αρχικά, στο Σχήμα 5-40 φαίνεται η ελάχιστη ποσότητα θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα της περίπτωσης 3 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας, γεγονός που καταδεικνύει την αδυναμία του συστήματος αυτού να καλύψει τα φορτία αλλά και να διαχειριστεί την διαθέσιμη ενέργεια.



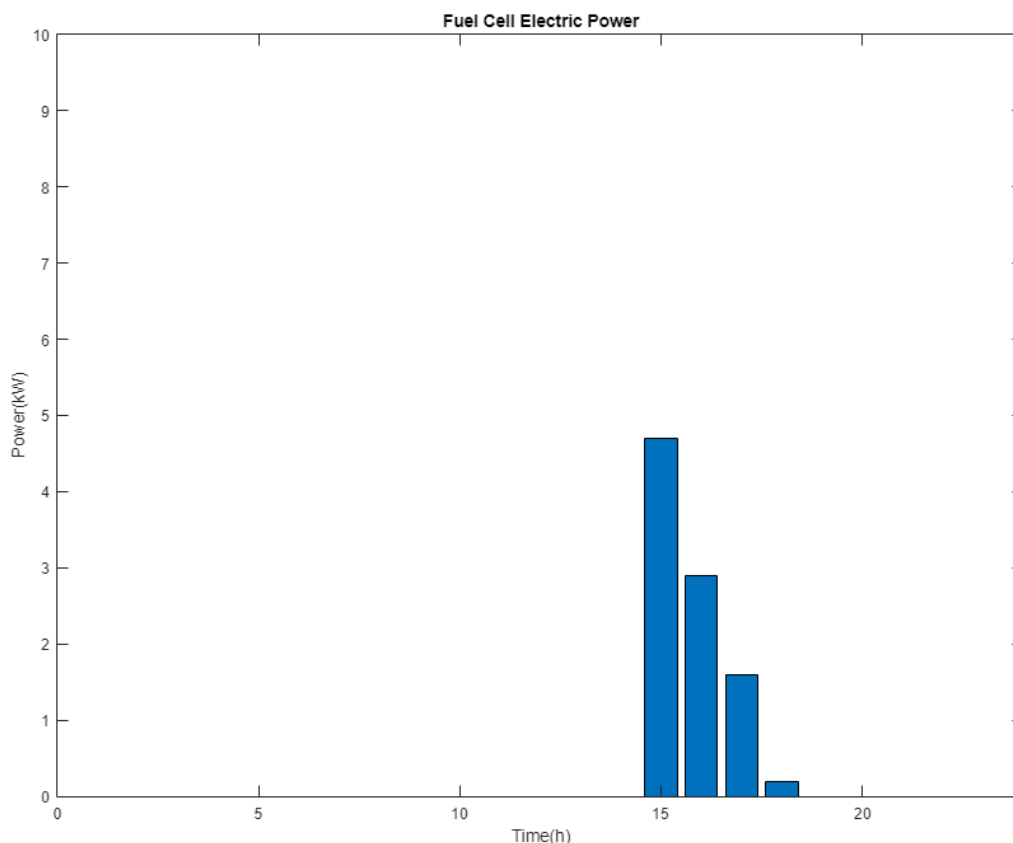
**Σχήμα 5-40.** Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια περίπτωσης 3 και σεναρίου 3.

Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 5-41 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς του ηλεκτρικού δικτύου που παρέχεται στο σύστημα της περίπτωσης 3 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια μίας ημέρας. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών των φορτίων του σε όλη σχεδόν την διάρκεια της ημέρας.



**Σχήμα 5-41.** Ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο περίπτωσης 3 και σεναρίου 3.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5-42 φαίνεται η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 3 του τρίτου σεναρίου στην διάρκεια της ημέρας. Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 5-41 παρατηρείται ότι η κυψέλη καυσίμου συμβάλει στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου τις χρονικές στιγμές που ακολουθούν από τις μικρές περιόδους που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία, όπως από τις 15:00 μ.μ έως τις 18:00 μ.μ. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς τις χρονικές στιγμές που υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία το σύστημα διοχετεύει όλη την περίσσεια ενέργεια στην παραγωγή υδρογόνου μέσω του electrolyzer μιας και δεν υπάρχει συστοιχία μπαταριών στο σύστημα αυτής της περίπτωσης. Ωστόσο, η παραγόμενη ποσότητα του υδρογόνου δεν φαίνεται να μπορεί να καλύψει όλα τις ανάγκες του φορτίου καθώς από τις 18:00 μ.μ και έπειτα δεν υπάρχει πλέον διαθέσιμο υδρογόνο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει και ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου.



**Σχήμα 5-42.** Ηλεκτρική ισχύς εξόδου κυψέλης καυσίμου περίπτωσης 3 και σεναρίου 3.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του τρίτου σεναρίου είναι 104.2 €.

## 5.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Τα διαγράμματα της παραγράφου 5.1 παρέχουν αρκετές πληροφορίες όσον αφορά την συμπεριφορά του συστήματος στην διαχείριση της ενέργειας ανάλογα με την διαφοροποίηση της δομής του αλλά και με τις διάφορες μεταβολές του ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου και της παροχής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία. Παράλληλα, τα αποτελέσματα της υλοποίησης του αλγορίθμου παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τα συνολικά κόστη κάθε περίπτωσης και σεναρίων που μελετήθηκαν. Έτσι, η αξιολόγηση και η σύγκριση γίνεται σύμφωνα με το κόστος, την αξιοπιστία και την αυτονομία κάθε συστήματος, που είναι και τα βασικά χαρακτηριστικά που εστιάζει κάθε χρήστης.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι ονομαστικές τιμές ισχύος των υποσυστημάτων που απαρτίζουν το βασικό σύστημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

<b>Πίνακας 5-1.</b> Ονομαστικές τιμές ισχύος των επιμέρους μονάδων.		
$P_{PV,MAX}$ (kW)	$P_{FC,MAX}$ (kW)	$P_{BATT,MAX}$ (kW)
18	8	8

όπου:

$P_{PV,MAX}$  : ονομαστική ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Φ/Β συστοιχίας (kW),

$P_{FC,MAX}$  : ονομαστική ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου (kW),

$P_{BATT,MAX}$ : ονομαστική ηλεκτρική ισχύς εξόδου των μπαταριών (kW).

### 5.2.1 Σύγκριση Κόστους

Τα αποτελέσματα της υλοποίησης του αλγορίθμου παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το συνολικό κόστος που καλείται να πληρώσει ο χρήστης του συστήματος για την κάλυψη του ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου που καταναλώνει. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα συνολικά κόστη κάθε περίπτωσης συστήματος και σεναρίου που μελετάται για μία ημέρα λειτουργίας.

<b>Πίνακας 5.2</b> Συνολικό κόστος κάθε περίπτωσης συστήματος και σεναρίου.			
Αριθμός περίπτωσης	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
1	78.8 (ευρώ/ημέρα)	73.3 (ευρώ/ημέρα)	84.2 (ευρώ/ημέρα)
2	87.7 (ευρώ/ημέρα)	83.9 (ευρώ/ημέρα)	95.9 (ευρώ/ημέρα)
3	96.8 (ευρώ/ημέρα)	92.9 (ευρώ/ημέρα)	104.2 (ευρώ/ημέρα)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-2, το συνολικό κόστος που καλείται να πληρώσει ο χρήστης εξαρτάται τόσο από την δομή του συστήματος όσο και από τις καιρικές συνθήκες και τα επίπεδα του φορτίου. Αναλυτικότερα, το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του σεναρίου 3 είναι κατά 6.85% αυξημένο σε σχέση με το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 του σεναρίου 1 και κατά 15.18 % συγκριτικά με το συνολικό ημερήσιο κόστος της περίπτωσης 1 του σεναρίου 2.

Η αύξηση αυτή αποδεικνύει την κρισιμότητα και την σημασία των καιρικών συνθηκών αλλά και του επιπέδου ισχύος των φορτίων. Συγκεκριμένα, στο σενάριο 2, στο οποίο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Φ/Β συστοιχίας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια και τα επίπεδα των φορτίων μειωμένα, προκύπτει ένα κόστος χαμηλότερο συγκριτικά τόσο με το σενάριο 3 που η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της Φ/Β συστοιχίας είναι μειωμένη και τα επίπεδα των φορτίων αυξημένα, όσο και με το σενάριο 1 που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Φ/Β συστοιχίας και τα

φορτία είναι σε ενδιάμεσες (φυσιολογικές) τιμές. Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο στο σύστημα της περίπτωσης 2 όσο και στο σύστημα της περίπτωσης 3 του σεναρίου 2, το συνολικό ημερήσιο κόστος είναι αισθητά χαμηλότερο συγκριτικά με το συνολικό ημερήσιο κόστος των ίδιων περιπτώσεων του σεναρίου 1 και του σεναρίου 3. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό ημερήσιο κόστος της περίπτωσης 2 του σεναρίου 2 είναι μειωμένο κατά 4.45% σε σχέση με το ημερήσιο συνολικό κόστος του συστήματος της περίπτωσης 2 του σεναρίου 1 και κατά 12.62% σε σχέση με το ημερήσιο συνολικό κόστος του συστήματος της περίπτωσης 2 του σεναρίου 3. Στο ίδιο πλαίσιο, ημερήσιο συνολικό κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 του σεναρίου 2 είναι κατά 4.33% μειωμένο συγκριτικά με το ημερήσιο συνολικό κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 του σεναρίου 1 και κατά 11.04% συγκριτικά με το ημερήσιο συνολικό κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 του σεναρίου 3. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι όσο χειρότερες είναι οι καιρικές συνθήκες και όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο του συστήματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος που καλείται να χρεωθεί ο χρήστης του συστήματος.

Από την άλλη, συγκρίνοντας τα κόστη μεταξύ των περιπτώσεων γίνεται αντιληπτή η επίδραση της δομής του συστήματος στην τιμή αυτού. Αναλυτικότερα, το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 είναι αισθητά μικρότερο σε σχέση με τα συνολικά ημερήσια κόστη των συστημάτων των άλλων δύο περιπτώσεων για κάθε σενάριο που μελετάται. Παράλληλα, το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 είναι εμφανώς μεγαλύτερο συγκριτικά με το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 2 για όλα τα σενάρια που μελετώνται. Για παράδειγμα, το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 2 στο σενάριο 1 είναι κατά 18.83% αυξημένο σε σχέση με το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 1 και ίδιου σεναρίου. Επιπρόσθετα, το συνολικό ημερήσιο κόστος της περίπτωσης 2 του σεναρίου 2 είναι κατά 10.14% μειωμένο σε σχέση με το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της περίπτωσης 3 του ίδιου σεναρίου. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο η μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή κόστους είναι μεταξύ του συστήματος της περίπτωσης 1 και του συστήματος της περίπτωσης 3, όπου παρατηρείται αύξηση έως και 23.75% στο σενάριο 3. Επομένως, γίνεται φανερό ότι η παραγωγή υδρογόνου που παράγεται χρησιμοποιώντας ενέργεια του συστήματος είναι μια πιο κοστοβόρα λύση από την χρήση υδρογόνου που παρέχεται από εξωτερική πηγή. Παράλληλα, η έλλειψη μπαταριών στο σύστημα της περίπτωσης 3 αυξάνουν το κόστος σε μεγάλο βαθμό, καθώς το σύστημα αναγκάζεται συχνά να αγοράζει μεγάλες ποσότητες ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο για την κάλυψη των φορτίων.

## **5.2.2 Σύγκριση Αξιοπιστίας και Αυτονομίας Συστημάτων**

### **Δομή Συστήματος**

Όπως είναι λογικό η δομή και οι μονάδες του συστήματος διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην διαχείριση της ενέργειας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η δομή της περίπτωσης 1 (Φ/Β συστοιχία-



κυψέλη καυσίμου με παροχή υδρογόνου που προμηθεύεται συμπιεσμένο από εξωτερική πηγή-συστοιχία μπαταριών-ηλεκτρικό δίκτυο) πέραν του ότι αποτελεί την απλούστερη δομή αναφορικά με την συνδεσμολογία μιας και δεν υπάρχει το σύστημα ηλεκτρόλυσης, αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις καθώς διατηρεί σε μεγαλύτερα και αποδοτικότερα επίπεδα την ωριαία αποθηκευμένη θερμική ενέργεια. Αυτό φανερώνεται με τα μεγαλύτερα ποσά αποθηκευμένης ενέργειας, σε όμοια φορτία. Παράλληλα, η ποσότητα ενέργειας που αναγκάζεται να αγοράσει από το δίκτυο σε περιόδους έλλειψης, να μην είναι αμελητέα αλλά είναι μικρότερη συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Από την άλλη, το σύστημα δεν είναι αυτόνομο καθώς εξαρτάται σημαντικά από εξωτερικούς παράγοντες όπως οι συχνά μεταβαλλόμενες τιμές του υδρογόνου.

Από την άλλη η δομή του συστήματος της περίπτωσης 2 (Φ/Β συστοιχία-κυψέλη καυσίμου με υδρογόνο παραγόμενο μέσω ηλεκτρόλυσης-συστοιχία μπαταριών-ηλεκτρικό δίκτυο) έχει το πλεονέκτημα ότι είναι πλήρως αυτόνομο. Όσον αφορά την απόδοση του στην διαχείριση ενέργειας, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία διοχετεύεται πρωτίστως στην φόρτιση των μπαταριών και ύστερα στην παραγωγή υδρογόνου μέσω του electrolyzer, γεγονός που φαίνεται να λειτουργεί αποδοτικά αφού τόσο οι μπαταρίες όσοι και η κυψέλη καυσίμου του συστήματος της περίπτωσης 2 συμβάλουν στον μέγιστο βαθμό στην κάλυψη του φορτίο, μειώνοντας το κόστος από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ταυτόχρονα, τα επίπεδα αποθηκευμένης θερμικής ισχύος να μην κάποιες ώρες της ημέρας παρουσιάζουν ικανοποιητικά επίπεδα αλλά κάποιες άλλες σημειώνονται αρκετά μειωμένες τιμές αποθηκευμένης θερμικής ενέργειας, καθιστώντας το σύστημα ασταθές. Τέλος, το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει ενέργεια από το σύστημα κυρίως είτε τις ώρες αιχμής φορτίου είτε ώρες που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι ανεπαρκής. Ωστόσο, τα ποσά ενέργειας που αγοράζονται από το ηλεκτρικό δίκτυο στην περίπτωση 2 είναι εμφανώς μικρότερα από ότι αυτά της περίπτωσης 3.

Η τρίτη περίπτωση έχει το θετικό ότι είναι ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα. Παράλληλα, αποτελεί μια πιο απλή δομή συστήματος συγκριτικά με την περίπτωση 2, όσον αφορά την συνδεσμολογία και το πλήθος των εξαρτημάτων αφού απουσιάζει η συστοιχία μπαταριών. Από την άλλη, εμφανίζεται ανεπαρκής στην διαχείριση της θερμικής ενέργειας καθώς τα επίπεδα της είναι αρκετά χαμηλά σε συνδυασμό με την αστάθεια που την χαρακτηρίζει καθώς σε αρκετές ώρες της ημέρας η αποθηκευμένη θερμική ενέργεια είναι μηδενική. Αυτό, μπορεί να χαρακτηριστεί αναμενόμενο καθώς η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης υποστηρίζεται ενεργειακά μόνο από την Φ/Β συστοιχία η οποία τις περισσότερες χρονικές στιγμές αδυνατεί να παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια ώστε να παραχθεί η κατάλληλη ποσότητα υδρογόνου με στόχο την κάλυψη των θερμικών φορτίων και κυρίως τις βραδινές ώρες που το σύστημα στηρίζεται μόνο από την κυψέλη καυσίμου, όπου η παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου είναι πολλές φορές ανεπαρκής δίχως την απαιτούμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία. Τέλος, το σύστημα αυτής της περίπτωσης αγοράζει το μεγαλύτερο

ποσό ενέργειας από το δίκτυο, εκφράζοντας έτσι το χαμηλό βαθμό αξιοπιστίας αλλά και την αύξηση του τελικού κόστους, κυρίως τις βραδινές ώρες και τις πρωινές ώρες αιχμής.

### **Καιρικές Συνθήκες και Φορτίο**

Τα διαγράμματα πρόβλεψης ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία και ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου μπαίνουν σαν είσοδοι στον αλγόριθμο με την λογική να καλυφθούν όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά οι συνθήκες της καθημερινότητας. Συγκεκριμένα, το σενάριο 1 εκφράζει μια μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια μέση ηλιακή ακτινοβολία σε μία ημέρα αλλά και μια μέση κατανάλωση φορτίου. Από την άλλη, το σενάριο 2 παρουσιάζει συνθήκες κυρίως καλοκαιρινών μηνών όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Φ/Β συστοιχίας εξίσου μεγαλύτερη. Σε αυτό το σενάριο, τόσο τα θερμικά όσο και τα ηλεκτρικά φορτία είναι μειωμένα. Στο σενάριο 3 παρουσιάζονται συνθήκες χειμερινών μηνών όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Φ/Β συστοιχίας είναι μικρότερη. Τέλος, τα φορτία σε αυτή την περίπτωση είναι αυξημένα.

Τα διαγράμματα των μεταβλητών απόφασης των συστημάτων του σεναρίου 2, δείχνουν μια βελτίωση όσον αφορά την απόδοση των συστημάτων συγκριτικά με το σενάριο 1. Ειδικότερα, σε όλες τις περιπτώσεις η διαχείριση της ενέργειας φαίνεται βελτιωμένη. Αυτό είναι εμφανές από τα αυξημένα επίπεδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και από την μειωμένη ποσότητα ισχύος από το δίκτυο.

Το αξιοσημείωτο είναι ότι τα παραπάνω παρατηρούνται σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό σημαίνει ότι η μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία, παρέχει στο σύστημα μια πιο αυτόνομη και αποδοτικότερη λειτουργία.

Αντιθέτως, στο σενάριο 3 παρατηρείται μεγαλύτερη αδυναμία του συστήματος να καλύψει τα φορτία, κυρίως στις περιπτώσεις 2 και 3, με αποτέλεσμα την αύξηση των ποσών ενέργειας που αγοράζει το σύστημα από το δίκτυο αλλά και τα χαμηλά επίπεδα αποθηκευμένης ενέργειας, καθιστώντας το έτσι ένα πιο ακριβό και αναξιόπιστο σύστημα.

## **5.3 Παραλλαγές Συστήματος**

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται δύο ακόμη συστήματα τα οποία είναι παραλλαγμένα όσον αφορά τα μεγέθη των μεταβλητών εισόδου στον αλγόριθμο. Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές αυτές είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου της Φ/Β συστοιχίας, η ονομαστική ισχύς εξόδου της συστοιχίας μπαταριών αλλά και η ονομαστική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου. Όπως είναι αναμενόμενο, οι μεταβλητές αυτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία αλλά και το κόστος του συστήματος κάθε περίπτωσης και διαφορετικού σεναρίου αφού αλλάζουν οι ποσότητες ισχύος που μπορεί να παρέχει κάθε μονάδα. Έτσι, σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται και συγκρίνονται τα συνολικά ημερήσια κόστη των παραλλαγμένων συστημάτων κάθε περίπτωσης και κάθε σεναρίου που μελετάται.

Οι ονομαστικές τιμές ισχύος των μονάδων του πρώτου και του δεύτερου παραλλαγμένου συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5-3.

<b>Πίνακας 5-3.</b> Ονομαστικές τιμές ισχύος των επιμέρους μονάδων των συστημάτων παραλλαγής 1 και 2.			
Αριθμός παραλλαγής συστήματος	$P_{PV,MAX}$ (kW)	$P_{FC,MAX}$ (kW)	$P_{BATT,MAX}$ (kW)
1	22	13	14
2	10	5	5

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα συνολικά ημερήσια κόστη του παραλλαγμένου συστήματος 1 για κάθε περίπτωση και κάθε σενάριο που μελετάται.

<b>Πίνακας 5.4</b> Συνολικό ημερήσιο κόστος παραλλαγμένου συστήματος 1 κάθε περίπτωσης και σεναρίου.			
Αριθμός περίπτωσης	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
1	74.1 (ευρώ/ημέρα)	70.2 (ευρώ/ημέρα)	80.2 (ευρώ/ημέρα)
2	82.9 (ευρώ/ημέρα)	80.1 (ευρώ/ημέρα)	92.7 (ευρώ/ημέρα)
3	91.4 (ευρώ/ημέρα)	88.6 (ευρώ/ημέρα)	100.8 (ευρώ/ημέρα)

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα συνολικά ημερήσια κόστη του παραλλαγμένου συστήματος 2 για κάθε περίπτωση και κάθε σενάριο που μελετάται.

<b>Πίνακας 5.5</b> Συνολικό ημερήσιο κόστος παραλλαγμένου συστήματος 2 κάθε περίπτωσης και σεναρίου.			
Αριθμός περίπτωσης	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
1	84.2 (ευρώ/ημέρα)	75.7 (ευρώ/ημέρα)	89.9 (ευρώ/ημέρα)
2	91.9 (ευρώ/ημέρα)	88.3 (ευρώ/ημέρα)	97.4 (ευρώ/ημέρα)
3	100.2 (ευρώ/ημέρα)	96.6 (ευρώ/ημέρα)	109.8 (ευρώ/ημέρα)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της παραγράφου, γίνεται αντιληπτή η σημασία και η επίδραση των μεταβλητών εισόδου στην λειτουργία και το κόστος του συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται έντονη διαφορά στα συνολικά ημερήσια κόστη ανάμεσα στις παραλλαγμένα συστήματα 1 και 2.

Από την μία, το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της παραλλαγής 1 λαμβάνει εμφανώς μικρότερες τιμές συγκριτικά τόσο με την αρχική μορφή του συστήματος όσο και με την παραλλαγή 2

για κάθε περίπτωση και κάθε σενάριο που μελετάται. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς τις ώρες της ημέρας που η Φ/Β συστοιχία αναλαμβάνει να καλύψει το μεγαλύτερο ποσοστό του φορτίου, το σύστημα αναγκάζεται να αγοράσει λιγότερη ενέργεια από το δίκτυο καθώς η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την Φ/Β συστοιχία είναι αυξημένη. Στο ίδιο πλαίσιο, τις βραδινές ώρες, τόσο η ηλεκτρική και θερμική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από την κυψέλη καυσίμου όσο και η ενέργεια που παρέχεται από τις μπαταρίες είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα η κάλυψη του φορτίου να γίνεται με εμφανώς μικρότερη παρουσία και στήριξη του ηλεκτρικού δικτύου. Οι δυο παραπάνω λόγοι εξηγούν τις διαφορές στις τιμές που λαμβάνουν οι συνολικές συναρτήσεις κόστους. Συγκεκριμένα, συγκρίνοντας το συνολικό ημερήσιο του συστήματος της παραλλαγής 1 με το συνολικό ημερήσιο του συστήματος της παραλλαγής 2 στην περίπτωση δομής συστήματος της περίπτωσης 1 στο σενάριο 1, παρατηρείται αύξηση κατά 13.63 % ενώ στην περίπτωση δομής συστήματος της περίπτωσης 2 στο σενάριο 2 παρατηρείται αύξηση κατά 10.24 %. Παράλληλα, συγκρίνοντας το συνολικό ημερήσιο του συστήματος της παραλλαγής 1 με το συνολικό ημερήσιο του συστήματος της παραλλαγής 2 στην περίπτωση δομής συστήματος της περίπτωσης 3 στο σενάριο 3, παρατηρείται αύξηση κατά 8.93 %. Από την άλλη, συγκρίνοντας το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος της παραλλαγής 1 με το συνολικό ημερήσιο κόστος του συστήματος με τις αρχικές τιμές των ονομαστικών ισχύων των μονάδων, παρατηρείται ότι το κόστος του τελευταίου είναι κατά 6.34 % αυξημένο στην περίπτωση συστήματος 1 και σεναρίου 1 ενώ στο σύστημα της περίπτωσης 1 του σεναρίου 2 είναι κατά 5.79 % αυξημένο. Οι παραπάνω ποσοστιαίες διαφορές του συνολικού ημερήσιου κόστους αποδεικνύουν την σημασία και την κρισιμότητα των ονομαστικών τιμών ισχύος στον υπολογισμό του κόστους κάθε συστήματος.

Αντίθετα, όπως είναι αναμενόμενο τα συνολικά ημερήσια κόστη του συστήματος της παραλλαγής 2 λαμβάνουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την συνάρτηση κόστους της αρχικής μορφής (με τις αρχικές τιμές ονομαστικών ισχύων των μονάδων) του συστήματος, γεγονός που αποδεικνύει την άμεση σχέση της ανεπάρκειας του συστήματος να καλύψει το φορτίο με την αύξηση του συνολικού κόστους. Ειδικότερα, το κόστος του συστήματος της παραλλαγής 2 είναι εμφανώς αυξημένο λόγω της μειωμένης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία που οδηγεί σε ανεπάρκεια κάλυψης του φορτίου τις πρωινές ώρες αλλά και λόγω της μειωμένης ισχύος που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου και τις μπαταρίες. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η κατά 3.41 % αύξηση του κόστους του συστήματος της παραλλαγής 2 στην περίπτωση 3 του σεναρίου 1 σε σχέση με το αρχικό σύστημα, ενώ δεν πρέπει να παραληφθεί και η κατά 4.21 % αύξηση στην περίπτωση 3 του σεναρίου 2.

# 6.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική έρευνα αναφορικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις αρχές λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας, των μπαταριών, των κυψελών καυσίμου και του συστήματος ηλεκτρόλυσης. Όλα τα παραπάνω αποτελούν το σύστημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Έπειτα, αναλύονται οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που υλοποιούνται με στόχο την βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, που εκφράζει το συνολικό κόστος του συστήματος κατά την διάρκεια μίας ημέρας.

Επιπρόσθετα, η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην παρατήρηση και σύγκριση συστημάτων που διαφέρουν δομικά. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συστημάτων, εκ των οποίων η πρώτη αποτελείται από Φ/Β συστοιχία, κυψέλη καυσίμου η οποία τροφοδοτείται με υδρογόνο που παρέχεται έτοιμο και συμπιεσμένο από εξωτερική πηγή και συστοιχία μπαταριών, η δεύτερη αποτελείται από Φ/Β συστοιχία, κυψέλη καυσίμου η οποία τροφοδοτείται με υδρογόνο που παράγεται από συσκευή ηλεκτρόλυσης η οποία λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια από την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία και συστοιχία μπαταριών, ενώ το σύστημα της τρίτης περίπτωσης αποτελείται από Φ/Β συστοιχία και κυψέλη καυσίμου η οποία τροφοδοτείται με υδρογόνο που παράγεται από συσκευή ηλεκτρόλυσης η οποία λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια από περίσσεια ενέργειας της Φ/Β συστοιχίας. Όλα τα παραπάνω συστήματα είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο για ενεργειακή υποστήριξη σε περιπτώσεις αδυναμίας του συστήματος για κάλυψη του φορτίου.

Παράλληλα, η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει και αναλύει την συμπεριφορά και τις μεταβολές του συστήματος ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τον όγκο του φορτίου. Έτσι, για κάθε περίπτωση αναλύονται οι συναρτήσεις κόστους, οι οποίες αποτελούνται από ορισμένες μεταβλητές που ο αλγόριθμος προσπαθεί να βρει τις βέλτιστες τιμές τους με στόχο την βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους. Έπειτα, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης των συναρτήσεων κόστους και των βελτιστοποιημένων μεταβλητών που την απαρτίζουν κάθε περίπτωσης συστήματος και για διαφορετικές καιρικές συνθήκες και όγκο φορτίου. Τέλος, στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε και η επίδραση που έχουν τα μεγέθη των Φ/Β

πλαισίων, της κυψέλης καυσίμου και της συστοιχίας μπαταριών στο συνολικό κόστος του συστήματος. Αυτό εξετάζεται διαφοροποιώντας την ονομαστική ισχύ εξόδου της Φ/Β συστοιχίας και της κυψέλης καυσίμου αλλά και την μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, παρατηρώντας και αναλύοντας τις επιπτώσεις στο συνολικό κόστος του συστήματος.

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω παρέχουν χρήσιμα συμπεράσματα για την κατανόηση της λειτουργίας και της απόδοσης του συστήματος για διαφορετικές περιπτώσεις συστημάτων και διαφορετικά σενάρια καιρικών συνθηκών και όγκου φορτίου. Ειδικότερα, διαπιστώνεται ότι το σύστημα της περίπτωσης 1 αποδίδει καλύτερα συγκριτικά με τα άλλα δύο καθώς διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, καθώς επίσης η ποσότητα που αναγκάζεται να αγοράσει από το δίκτυο είναι εμφανώς μικρότερη, γεγονός που συμβάλλει σημαντικά στην μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος σημαντικά. Αυτό συμβαίνει καθώς το σύστημα δεν ξοδεύει ενέργεια για την παραγωγή του υδρογόνου που παρέχεται στην κυψέλη καυσίμου και αξιοποιείται μόνο για την κάλυψη του φορτίου. Αντίθετα, στις άλλες δύο περιπτώσεις και κυρίως στην τρίτη περίπτωση συστήματος, φαίνεται ότι το σύστημα είναι ανεπαρκές να καλύψει το φορτίο με αποτέλεσμα να αναγκάζεται να αγοράζει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, αυξάνοντας έτσι το κόστος. Παρατηρείται ότι το σύστημα αγοράζει τις μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας από το δίκτυο είτε τις ώρες που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την Φ/Β συστοιχία είναι μειωμένη (βραδινές ώρες) είτε τις πρωινές ώρες αιχμής. Παράλληλα, η επίδραση τόσο των καιρικών συνθηκών όσο και του όγκου του φορτίου είναι καθοριστική στην συμπεριφορά του συστήματος καθώς παρατηρούνται έντονες μεταβολές μεταξύ των σεναρίων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στο σενάριο που η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυξημένη και ο όγκος φορτίου μειωμένος, το σύστημα αποθηκεύει εμφανώς μεγαλύτερες ποσότητες θερμικής ενέργειας και καταφέρνει να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου αγοράζοντας μικρότερες ποσότητες ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο συγκριτικά τόσο με το σενάριο μέσης ηλιακής ακτινοβολίας και φορτίου όσο και με το σενάριο μικρότερης ηλιακής ακτινοβολίας και μεγαλύτερου όγκου φορτίου. Το γεγονός αυτό οδηγεί και σε μείωση του κόστους του σεναρίου 2 σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι τιμές που λαμβάνουν οι συναρτήσεις ημερήσιου κόστους κάθε περίπτωσης είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση που τα μεγέθη των βασικών υποσυστημάτων είναι μικρότερα και μικρότερες στην περίπτωση που τα μεγέθη των βασικών υποσυστημάτων είναι μεγαλύτερα.

# 7.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Δ. Βαΐα, "Σχεδιασμός και Προσομοίωση Λειτουργίας Αυτόνομου Υβριδικού," Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2016.
- [2] Λ. Κουτσούμπας, "Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου κυψέλης καυσίμου για ηλεκτρικά οχήματα," Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2021.
- [3] Γ. Πληγορόπουλος, "Μελέτη Προσομοίωσης και Βελτιστοποίησης Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος με Αποθήευση Ενέργειας σε Κυψέλες Καυσίμου," Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2009.
- [4] Δ. Ιψάκης, "Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών," Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [5] Μ. Θεόφιλος, "Τεχνολογίες Αποθήκευσης και Αποδοτικής Μετατροπής Υδρογόνου ως Μέσο Αποθήκευσης Ενέργειας," Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα, 2022.
- [6] Γ. Γεώργιος, "Τεχνολογίες Μπαταριών Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας Μεγάλης Κλίμακας," Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2022.
- [7] M. Samy, S. Bakar, H. Ramadan, "A flower pollination optimization algorithm for an off-grid PV-Fuel cell hybrid renewable system", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, pp. 2141-2152, 2018.
- [8] T.F. El-Shatter, M.N. Eskandar, M.T. El-Hagry, "Hybrid PV/fuel cell system design and simulation", Renewable Energy, vol. 27, pp. 479-485, 2002.
- [9] S. Sharma, A. Verma, Y. Xu, B. Panigrahi, "Robustly Coordinated Bi-Level Energy Management of a Multi-Energy Building under Multiple Uncertainties", IEEE Transactions

On Sustainable Energy, vol.12, pp. 3-13, 2021.

- [10] S. Aslam, N. Javaid, F. Khan, A. Alamri, A. Almogren, W.Abdul, "Towards Efficient Energy Management and Power Trading in a Residential Area via Integrating a Grid-Connected Microgrid", Sustainability, vol.10, pp. 1-21, 2018.