

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



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ενεργειακά Αυτόνομη Κατοικία Εξοπλισμένη με Ηλιακό Φωτοβολταϊκό  
Σύστημα Μετατροπής Υδρογόνου**

**Μερταράκης Ανδρέας**

**ΑΜ: 2015030054**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Σταυρακάκης Γεώργιος, Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ (επιβλέπων)**

**Κουτρούλης Ευτύχιος, Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ**

**Δρ. Σεργάκη Ελευθερία, ΕΔΙΠ Σχολής ΗΜΜΥ**

**Χανιά, Ιούλιος 2024**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς όλους εκείνους που συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου μου.

Πρώτα και κύρια, εκφράζω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σταυρακάκη Γεώργιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την ευκαιρία που μου παρείχε να συνεργαστώ μαζί του και να ερευνήσω το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιο και την Δρα Ελευθερία Σεργάκη για την αποδοχή τους να συμμετάσχουν στην επιτροπή αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Εκφράζω, επίσης, την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τους φίλους και συμφοιτητές μου, με τους οποίους μοιράστηκα αυτό το υπέροχο ταξίδι κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων. Η συνεργασία μας και οι κοινές μας εμπειρίες υπήρξαν σημαντική πηγή ενθάρρυνσης και έμπνευσης.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, την αδελφή μου και τη σύντροφό μου, οι οποίοι υπήρξαν δίπλα μου σε κάθε στιγμή αυτής της διαδρομής. Η αγάπη, η υπομονή και η αμέριστη υποστήριξή τους ήταν το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκα για την επίτευξη των στόχων μου.

Τέλος, ευχαριστώ όλους εκείνους που με τον τρόπο τους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, είτε παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες και δεδομένα είτε προσφέροντας ηθική υποστήριξη και ενθάρρυνση. Η συνεισφορά τους υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών μιας κατοικίας τεσσάρων ατόμων μέσω ενός υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το οποίο συνδυάζει φωτοβολταϊκά συστήματα και τεχνολογία υδρογόνου. Το προτεινόμενο σύστημα αξιοποιεί την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, μετατρέποντάς την σε υδρογόνο μέσω μιας μονάδας ηλεκτρόλυσης. Το υδρογόνο αυτό αποθηκεύεται σε ειδική δεξαμενή και, κατά τις περιόδους όπου η ηλιοφάνεια είναι περιορισμένη, χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξασφαλίζοντας έτσι την κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου της κατοικίας.

Η μοντελοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού HOMER και περιλαμβάνει την εξέταση τριών σεναρίων, καθένα εκ των οποίων αποτελεί διαφορετική παραλλαγή του συστήματος. Τα σενάρια διαφοροποιούνται βάσει του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην ηλεκτροπαραγωγή: το πρώτο σενάριο προβλέπει συμμετοχή 50%, το δεύτερο 80% και το τρίτο 100%. Η συγκριτική ανάλυση των σεναρίων στοχεύει στην εξεύρεση της βέλτιστης λύσης από ενεργειακή και οικονομική σκοπιά.

Αρχικά, η εργασία παρουσιάζει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα πλεονεκτήματά τους, παρέχοντας μια συνολική επισκόπηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και της σημασίας τους για τη βιώσιμη ενέργεια. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της τεχνολογίας υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου, αναδεικνύοντας τη λειτουργικότητά τους σε συνδυασμό με τα φωτοβολταϊκά. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα μικροδίκτυα και τα χαρακτηριστικά τους, τα οποία αποτελούν σύγχρονες λύσεις για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην καθημερινή ζωή.

Στο πειραματικό μέρος, δίνεται έμφαση στη χρήση του λογισμικού HOMER για τη μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος. Η ανάλυση περιλαμβάνει την προσομοίωση των τριών προαναφερθέντων σεναρίων με στόχο την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητας. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να καλύψει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας, προσφέροντας μια βιώσιμη και αποδοτική λύση. Επίσης, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ενώ προτείνονται

κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις δυναμικές της αγοράς.

## **Abstract**

This thesis investigates the potential for meeting the energy needs of a household of four using a hybrid renewable energy system that combines photovoltaic (PV) technology with hydrogen fuel cells. The proposed system utilizes excess energy generated by photovoltaic panels, converting it into hydrogen via an electrolysis unit. This hydrogen is stored in a dedicated tank and, during periods of limited sunlight, is used in a fuel cell to produce electricity, thereby ensuring that the household's energy demands are consistently met.

The system was modeled using the HOMER software and includes an examination of three scenarios, each representing a different system configuration. The scenarios differ based on the proportion of renewable energy sources (RES) contributing to electricity production: the first scenario assumes 50% RES participation, the second 80%, and the third 100%. The comparative analysis of these scenarios aims to identify the optimal solution from both an energy and economic perspective.

Initially, the thesis reviews renewable energy sources and their advantages, offering an overview of photovoltaic systems and their importance for sustainable energy. It then presents a detailed analysis of hydrogen technology and fuel cells, highlighting their functionality in conjunction with photovoltaics. Following this, the study explores microgrids and their characteristics, positioning them as contemporary solutions for integrating renewable energy sources into daily life.

The experimental section emphasizes the use of HOMER software for the system's modeling. The analysis includes simulating the aforementioned three scenarios to achieve optimal performance and economic feasibility. The results demonstrate that the proposed system can fully meet the household's energy needs, providing a sustainable and efficient solution while significantly reducing the environmental footprint. The thesis concludes with suggestions for future research and improvements, considering technological advancements and market dynamics.

### **Λέξεις κλειδιά**

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Φωτοβολταϊκά συστήματα, Ενεργειακή αυτονομία, Κυψέλες καυσίμου, Τεχνολογία υδρογόνου, Πράσινη ενέργεια, Ηλεκτρόλυση νερού, Υδρογόνο ως καύσιμο, Ηλιακή ενέργεια, Υβριδικά συστήματα ενέργειας, Διαχείριση ενέργειας.

### **Key Words**

Renewable sources of energy, Photovoltaic systems, Energy autonomy, Hydrogen fuel cells, Hydrogen technology, Green energy, Water Electrolysis, Hydrogen as fuel, Solar energy, Hybrid energy systems, Energy management.

## Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη .....	2
Abstract.....	3
Λέξεις κλειδιά.....	4
Εισαγωγή .....	7
Αντικείμενο της Εργασίας .....	7
Δομή της Εργασίας.....	7
Μέρος Α: Βιβλιογραφική ανασκόπηση - Θεωρητικό υπόβαθρο.....	9
1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας [8][9][14].....	9
1.1 Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	9
1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	10
1.3 Υβριδικά συστήματα. [9][16][22][23].....	13
1.3.1 Διασυνδεδεμένα Υβριδικά συστήματα .....	15
1.3.2 Αυτόνομα Υβριδικά συστήματα .....	16
2. Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα.[8][9][19][23][29][30] .....	16
2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο.[8][19] .....	20
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.[8][9][19][23] .....	22
2.3 Αρχή λειτουργίας και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων.[8][19].....	24
2.4 Απόδοση και υπολογισμός ισχύος αιχμής Φ/Β πλαισίου.[19].....	29
2.5 Αποθήκευση ενέργειας – Συσσωρευτές.[23][31] .....	33
2.6 Μετατροπείς- Inverters.[8][19][23] .....	38
3. Υδρογόνο και κυψέλες καυσίμου[8][24][26] .....	41
3.1 Το υδρογόνο ως καύσιμο .....	41
3.2 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου [9][19][23] .....	43
3.3 Είδη και τεχνολογίες κυψελών[19][23] .....	46
3.4 Αποθήκευση υδρογόνου[26].....	48
4. Μικροδίκτυα και Διεσπαρμένη Παραγωγή [9][12][14].....	50
4.1 Τρόπος λειτουργίας.....	50
4.2 Τρόπος λειτουργίας.....	52
4.3 Λειτουργία και Έλεγχος Μικροδικτύου.....	54
Μέρος Β. Μοντελοποίηση υπό εξέταση συστήματος.....	56

5.Περιγραφή λογισμικού HOMER [16][17][20][29].....	56
5.1 Δημιουργία νέου αρχείου HOMER .....	58
5.2 Καθορισμός φορτίου.....	59
5.3 Σχεδίαση συστήματος- εισαγωγή Components. ....	60
5.4 Εισαγωγή πόρων συστήματος.....	62
5.5 Εισαγωγή λοιπών παραμέτρων και περιορισμών συστήματος. ....	63
5.6 Προσομοίωση συστήματος και αποτελέσματα.....	64
6.Σχεδιασμός και προσομοίωση ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής υδρογόνου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κατοικίας με τη χρήση του λογισμικού HOMER – Παρουσίαση αποτελεσμάτων. [1][2][3][5][7][10][11][17][26][29].....	65
6.1 Δεδομένα εισόδου στο λογισμικό HOMER .....	66
6.1.1 Καθορισμός τοποθεσίας.....	66
6.1.2 Καθορισμός πόρων συστήματος. ....	67
6.2 Υπολογισμός και εισαγωγή φορτίου στο HOMER.....	69
6.3 Καθορισμός βασικών στοιχείων συστήματος.....	74
6.3.1 Φωτοβολταϊκά.....	74
6.3.2 Κυψέλη καυσίμου. ....	75
6.3.3 Inverter.....	77
6.3.4 Συσκευή ηλεκτρόλυσης.....	78
6.3.5 Μπαταρίες.....	78
6.3.6 Δίκτυο.....	80
6.3.7 Στρατηγική ελέγχου. ....	81
6.4 Ανάλυση σεναρίων και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	82
6.4.1 Πρώτο σενάριο.....	83
6.4.2 Δεύτερο σενάριο.....	96
6.4.3 Τρίτο σενάριο.....	106
6.5 Απόσβεση συστημάτων. ....	118
6.5.1 Συγκεντρωτικές χρηματοροές .....	119
<b>7.Συμπεράσματα- Προτάσεις .....</b>	<b>128</b>
<b>8.Βιβλιογραφία.....</b>	<b>130</b>

## **Εισαγωγή**

### **Αντικείμενο της Εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον ενεργειακό σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση, την ανάλυση λειτουργίας και την οικονομοτεχνική μελέτη ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο προορίζεται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας κατοικίας. Η υπό εξέταση κατοικία βρίσκεται σε οικισμό στα νότια της πόλης του Ηρακλείου και φιλοξενεί μια τετραμελή οικογένεια. Το αυτόνομο σύστημα που αναπτύσσεται και μοντελοποιείται συνδυάζει μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, τα κύρια στοιχεία του συστήματος περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά πάνελ και κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.

Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού HOMER, με στόχο την επίτευξη της μέγιστης παραγωγής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Μέσω του λογισμικού, μοντελοποιήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια, τα οποία αποτελούν παραλλαγές του βασικού συστήματος, προκειμένου να καθοριστεί ποιο από αυτά είναι το πλέον αποδοτικό και συμφέρον. Τα ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση παρουσιάζονται και αναλύονται στο δεύτερο μέρος της εργασίας.

### **Δομή της Εργασίας**

Η παρούσα εργασία είναι δομημένη σε δύο μέρη και περιλαμβάνει συνολικά οκτώ κεφάλαια. Το πρώτο μέρος εστιάζει στο θεωρητικό υπόβαθρο και τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και παρουσιάζει μια επισκόπηση των διάφορων τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις που σχετίζονται με αυτές, ενώ παράλληλα εξετάζει τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στην ηλιακή ενέργεια και τα ηλιακά συστήματα. Παρέχεται εκτενής αναφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα, με ανάλυση της αρχής λειτουργίας τους και του τρόπου με τον οποίο μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, εξετάζονται οι

μέθοδοι αποθήκευσης της ενέργειας σε συσσωρευτές, καθώς και η χρήση των inverters, που είναι απαραίτητα για την τροφοδοσία των εναλλασσόμενων φορτίων (AC).

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην τεχνολογία του υδρογόνου για την ηλεκτροπαραγωγή, εξετάζοντας τη λειτουργία και τις διάφορες τεχνολογίες των κυψελών καυσίμου, καθώς και τις μεθόδους αποθήκευσης του υδρογόνου.

Το τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο του πρώτου μέρους πραγματεύεται τα μικροδίκτυα, εστιάζοντας στον τρόπο λειτουργίας και ελέγχου τους, καθώς και στα τεχνικά χαρακτηριστικά που τα διέπουν.

Στη συνέχεια, το δεύτερο μέρος της εργασίας ασχολείται με τη μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος που στοχεύει στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της συγκεκριμένης κατοικίας μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών πάνελ και κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής παρουσίαση του λογισμικού HOMER, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συστήματος.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία της προσομοίωσης για καθένα από τα τρία συστήματα που εξετάζονται, με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της κατοικίας. Για κάθε σενάριο, παρατίθενται τα αποτελέσματα και πραγματοποιείται ενδελεχής ανάλυση αυτών.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση κάθε σεναρίου, καθώς και προτάσεις για μελλοντικές εφαρμογές και βελτιώσεις.

Τέλος, το όγδοο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

## **Μέρος Α: Βιβλιογραφική ανασκόπηση - Θεωρητικό υπόβαθρο**

### **1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας [8][9][14]**

#### **1.1 Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πηγές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες και αναπληρώνονται με φυσικό τρόπο και με ταχείς ρυθμούς, σε αντίθεση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα που είναι περιορισμένα και επιβαρύνουν το περιβάλλον με την καύση τους. Η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι κρίσιμη για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την ηλιακή, την αιολική, τη βιομάζα, την υδροηλεκτρική και τη γεωθερμική ενέργεια.

##### **1.1.1 Ηλιακή Ενέργεια**

Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από την ακτινοβολία του ήλιου και μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Οι κύριες τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τα ηλιακά θερμικά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Τα ηλιακά κύτταρα, τα οποία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς όπως το πυρίτιο, διεγείρονται από το φως του ήλιου και παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν σε στέγες κτιρίων, σε αγροτικές περιοχές ή ακόμα και σε επιπλέουσες πλατφόρμες πάνω σε υδάτινες επιφάνειες. Όσον αφορά τα ηλιακά θερμικά συστήματα χρησιμοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για να θερμάνουν νερό ή άλλα υγρά. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και ακόμη και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω θερμοδυναμικών κύκλων.

##### **1.1.2 Αιολική Ενέργεια**

Η αιολική ενέργεια εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κίνηση του αέρα σε μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητριών. Η αιολική

ενέργεια είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας παγκοσμίως, με εφαρμογές τόσο σε χειρσαίες όσο και σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις.

### **1.1.3 Βιομάζα**

Η βιομάζα αναφέρεται σε οργανικά υλικά προερχόμενα από φυτά και ζώα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Η καύση βιομάζας μπορεί να παράγει θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η επεξεργασία της μπορεί να παράγει βιοκαύσιμα όπως αιθανόλη και βιοαέριο. Η εκμετάλλευση της βιομάζας συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και στη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας.

### **1.1.4 Υδροηλεκτρική Ενέργεια**

Η υδροηλεκτρική ενέργεια παράγεται από την κίνηση του νερού, συνήθως μέσω φραγμάτων που δημιουργούν υδατοπτώσεις. Οι τουρμπίνες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννητριών. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μία από τις παλαιότερες και πιο ώριμες τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας, παρέχοντας αξιόπιστη και σταθερή παραγωγή ενέργειας.

### **1.1.5 Γεωθερμική Ενέργεια**

Η γεωθερμική ενέργεια εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης. Οι γεωθερμικές πηγές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού. Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις είναι ιδιαίτερα αποδοτικές και μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.

## **1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα στην παραγωγή ενέργειας όπως η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας και η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Ωστόσο, υπάρχουν και προκλήσεις, όπως η διακοπτόμενη παραγωγή (όπως στην περίπτωση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας), η ανάγκη για μεγάλες αρχικές επενδύσεις και η ανάγκη για ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών

αποθήκευσης ενέργειας. Στη συνέχεια γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΑΠΕ.

## **Πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

### **1.Μείωση Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου**

Οι ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, παράγουν ελάχιστες έως μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και άλλων αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, συμβάλλοντας σημαντικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

### **2.Ανεξάντλητη Πηγή Ενέργειας**

Οι ΑΠΕ βασίζονται κυρίως στον ήλιο και άλλες σε φυσικές διαδικασίες που ανανεώνονται συνεχώς και δεν εξαντλούνται, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.

### **3.Ενεργειακή Ασφάλεια**

Η εκμετάλλευση τοπικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνει την εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα και ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια των χωρών.

### **4.Δημιουργία Θέσεων Εργασίας**

Η ανάπτυξη και η εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας σε τομείς όπως η κατασκευή, η εγκατάσταση, η συντήρηση και η έρευνα.

### **5.Μείωση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων**

Οι ΑΠΕ έχουν γενικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Για παράδειγμα, δεν προκαλούν ρύπανση του νερού ή του αέρα και δεν απαιτούν εξορύξεις που καταστρέφουν το φυσικό περιβάλλον.

## **6.Σταθεροποίηση Κόστους Ενέργειας**

Οι τεχνολογίες ΑΠΕ, μόλις εγκατασταθούν, έχουν πολύ χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, συμβάλλοντας στη σταθεροποίηση και στη μείωση του κόστους ενέργειας μακροπρόθεσμα.

## **Μειονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

### **1.Διακοπτόμενη Παραγωγή Ενέργειας**

Πολλές ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, είναι διακοπτόμενες και εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. Αυτό δημιουργεί προκλήσεις για την σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου και την εξασφάλιση συνεχούς παροχής ενέργειας.

### **2.Υψηλό Αρχικό Κόστος**

Η εγκατάσταση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνήθως απαιτεί υψηλές αρχικές επενδύσεις σε εξοπλισμό και υποδομές, αν και το κόστος αυτό συχνά αντισταθμίζεται από τα χαμηλά λειτουργικά κόστη και τα οφέλη μακροπρόθεσμα.

### **3.Ανάγκη για χώρο και Γεωγραφικούς Περιορισμούς**

Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ, όπως τα αιολικά πάρκα και τα φωτοβολταϊκά πάρκα, απαιτούν μεγάλες εκτάσεις γης, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή περιοχές με άλλες χρήσεις γης.

### **4.Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις**

Παρά τα γενικά χαμηλά περιβαλλοντικά αποτυπώματα, ορισμένες μορφές ΑΠΕ μπορεί να έχουν τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, τα υδροηλεκτρικά φράγματα μπορούν να επηρεάσουν τα οικοσυστήματα των ποταμών, ενώ οι ανεμογεννήτριες μπορεί να επηρεάσουν την πανίδα.

## 5.Ανάγκη για Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

Η διακοπτόμενη φύση πολλών ΑΠΕ απαιτεί την ανάπτυξη αποδοτικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, για να εξασφαλιστεί η συνεχής παροχή ενέργειας. Η έρευνα και ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών είναι απαραίτητη αλλά και δαπανηρή.

## 6.Κοινωνική Αποδοχή

Η εγκατάσταση μεγάλων έργων ΑΠΕ μπορεί να αντιμετωπίσει αντιδράσεις από τις τοπικές κοινότητες λόγω αισθητικών, περιβαλλοντικών ή άλλων ανησυχιών.

### 1.3 Υβριδικά συστήματα. [9][16][22][23]

Ένα Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (ΥΣΕ) ορίζεται ως ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ενσωματώνει περισσότερες από μία πηγές ενέργειας, συνδυάζοντας τις με τον απαραίτητο υποστηρικτικό εξοπλισμό. Ο κύριος στόχος ενός ΥΣΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είτε στο δίκτυο είτε στο σημείο εγκατάστασής του. Τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν ένα ΥΣΕ περιλαμβάνουν:

1. **Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας:** Εξοπλισμός που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από διαφορετικές πηγές.
2. **Μονάδα Αποθήκευσης Ενέργειας:** Σύστημα για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι απαραίτητο.
3. **Μονάδα Ελέγχου και Συντονισμού:** Εξοπλισμός για την παρακολούθηση και τον συντονισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εξασφαλίζοντας την βέλτιστη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει έναν συνδυασμό συμβατικής μονάδας παραγωγής με τουλάχιστον μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Εκτός από τις μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης, ένα ΥΣΕ περιλαμβάνει συνήθως συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και μηχανισμούς διαχείρισης φορτίου.

Για να σχεδιαστεί ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής, λαμβάνονται υπόψη:

1. Η πολιτική της εκάστοτε χώρας για τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα και για τις ΑΠΕ.
2. Τα μετεωρολογικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα δημιουργηθεί.
3. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού φορτίου, όπως είναι το μέγιστο φορτίο, το συνολικό φορτίο και η διακύμανση.
4. Το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν.
5. Το κόστος της μελέτης, της εγκατάστασης, της συντήρησης καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

#### **Κύρια Οφέλη από τη Χρήση ΥΣΕ:**

- **Αξιοπιστία του Συστήματος:** Τα ΥΣΕ εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του συστήματος παραγωγής ενέργειας, καθώς συνδυάζουν διαφορετικές πηγές ενέργειας που αντισταθμίζουν τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από καιρικές συνθήκες, όπως η ταχύτητα ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.
- **Διαφοροποίηση Ενεργειακών Πηγών:** Η ενσωμάτωσή τους συμβάλλει στην αποφυγή εξάρτησης από συγκεκριμένες πηγές ενέργειας, προσφέροντας μια πιο ευέλικτη και αξιόπιστη ενεργειακή λύση.
- **Οικονομικότερη Λειτουργία Συμβατικών Μονάδων:** Με τη συνδυασμένη χρήση διαφορετικών πηγών, οι συμβατικές μονάδες φορτίζονται με πιο σταθερό φορτίο, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας την ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Η υιοθέτηση των ΥΣΕ ενισχύει την ενεργειακή αποδοτικότητα και συνεισφέρει στη βιωσιμότητα των ενεργειακών συστημάτων, προσφέροντας μια ευέλικτη και αξιόπιστη λύση για τις σύγχρονες ενεργειακές ανάγκες.

Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες σύμφωνα με τη σύνδεση τους ή όχι στο κεντρικό δίκτυο.

### 1.3.1 Διασυνδεδεμένα Υβριδικά συστήματα

Όταν ένας υβριδικός σταθμός ενέργειας συνδεθεί με ένα δίκτυο απείρου ζυγού, τότε υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, το κεντρικό δίκτυο αναλαμβάνει τον έλεγχο των κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος, όπως η τάση, η συχνότητα και η παραγωγή έργου ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται, καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον συστήματα ελέγχου για τις παραμέτρους αυτές.

Ειδικότερα:

- **Κάλυψη Έλλειμματος Ενέργειας:** Εάν η ενέργεια που παράγεται από τον υβριδικό σταθμό δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση, το έλλειμμα καλύπτεται από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.
- **Διαχείριση Περίσσειας Ενέργειας:** Σε περίπτωση που το υβριδικό σύστημα παράγει περισσότερη ενέργεια από την απαιτούμενη, η περίσσεια ενέργεια μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο, με κάποιους περιορισμούς που σχετίζονται με τη στιγμιαία παραγωγή ισχύος του συστήματος.

Ωστόσο, όταν το δίκτυο είναι ασθενές και η ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από τη λειτουργία του υβριδικού συστήματος, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου για την εξασφάλιση της σταθερότητας και της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει συστήματα ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας, καθώς και άλλες τεχνολογίες που διασφαλίζουν την ομαλή ενσωμάτωσή του υβριδικού συστήματος στο δίκτυο.

### 1.3.2 Αυτόνομα Υβριδικά συστήματα

Τα Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση περιοχών που είναι απομονωμένες ή νησιωτικές και δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτές οι περιοχές διαθέτουν μόνο σύστημα διανομής, χωρίς σύστημα μεταφοράς.

Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός αυτόνομου και ενός διασυνδεδεμένου υβριδικού συστήματος είναι η ικανότητα του πρώτου να καλύπτει την πλήρη ενεργειακή ζήτηση οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Επιπλέον, τα ΑΥΣ πρέπει να έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας και παραγωγής έργου ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου. Όταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) υπερβαίνει το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει είτε να αποθηκευτεί είτε να απορριφθεί με ασφαλή τρόπο για να αποτραπεί η αστάθεια του συστήματος.

Για να ανταποκριθούν στις παραπάνω απαιτήσεις, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν:

- **Διατάξεις Αποθήκευσης Ενέργειας:** Για την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας που παράγεται και δεν χρησιμοποιείται άμεσα.
- **Συστήματα Ελέγχου και Διαχείρισης Φορτίου:** Για την παρακολούθηση, την ρύθμιση και την ομαλή λειτουργία του συστήματος ώστε να εξασφαλίζεται η επάρκεια και η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αποτελεσματική λειτουργία ενός ΑΥΣ απαιτεί την ολοκληρωμένη διαχείριση όλων αυτών των παραμέτρων για τη διασφάλιση της ενεργειακής σταθερότητας και αξιοπιστίας στην απομονωμένη περιοχή που εξυπηρετεί.

## 2. Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα.[8][9][19][23][29][30]

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μία ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας, με πρακτικά ανεξάντλητη διαθέσιμη ενέργεια από τον ήλιο. Ετησίως, η ενέργεια που φτάνει στη Γη

από τον ήλιο υπολογίζεται σε διπλάσια από την ενέργεια του συνόλου των ορυκτών καυσίμων του πλανήτη.

Από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης:

- Περίπου το 60% είναι άμεση ηλιακή ακτινοβολία.
- Το υπόλοιπο 40% είναι διάχυτη ακτινοβολία, η οποία έχει διασπαρεί λόγω ατμοσφαιρικών σωματιδίων και σταγονιδίων.

Από την απορροφημένη ηλιακή ενέργεια, περίπου:

- Το 30% καταναλώνεται για την εξάτμιση των επιφανειακών υδάτων.
- Το 20% μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του αέρα (άνεμος).
- Μόλις το 1% συμμετέχει στη φωτοσύνθεση των φυτών.

Η υπόλοιπη ενέργεια θερμαίνει την επιφάνεια του πλανήτη και επανεκπέμπεται στο διάστημα.

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης επηρεάζεται από γεωγραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, η υγρασία και η σύνθεση της ατμόσφαιρας. Η ατμόσφαιρα της Γης μειώνει σημαντικά την ηλιακή ακτινοβολία μέσω:

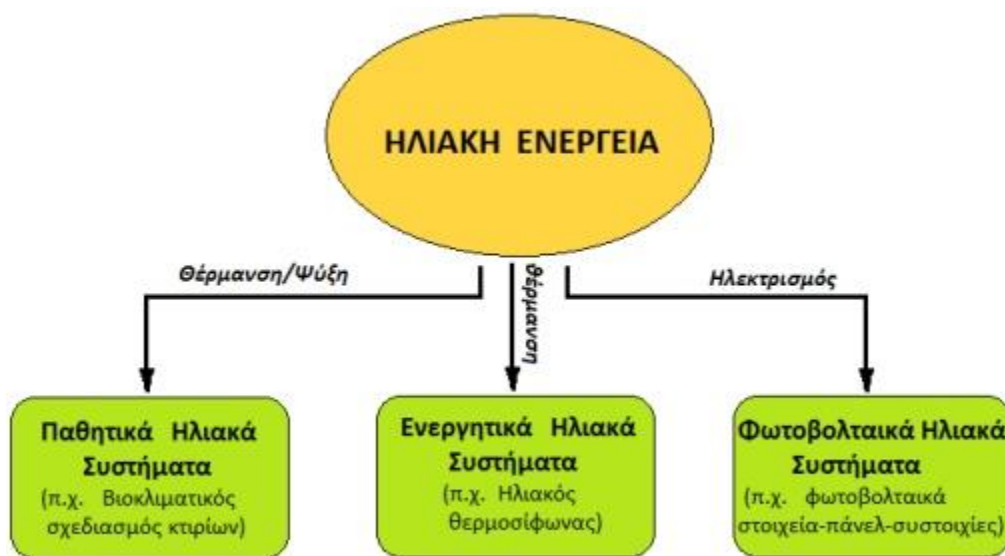
- **Ανάκλασης:** Από διάφορες επιφάνειες.
- **Απορρόφησης:** Από όζον, υδρατμούς, οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα.
- **Σκέδασης:** Από μόρια αέρα, σκόνη ή ρύπους.

Η ηλιακή ενέργεια εκφράζεται συνήθως σε kWh/m<sup>2</sup> ανά έτος για μια δεδομένη περιοχή.

Ειδικότερα, η ηλιακή ενέργεια αποδεικνύεται ιδιαίτερα οικονομική για αναπτυσσόμενες χώρες που επιδιώκουν την ενίσχυση των εθνικών τους δικτύων. Ειδικά για απομακρυσμένα νησιά και άλλες απομονωμένες περιοχές, η ηλιακή ενέργεια προσφέρει μια σημαντική λύση αντικαθιστώντας την ανάγκη για εισαγωγή μεγάλων ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων.

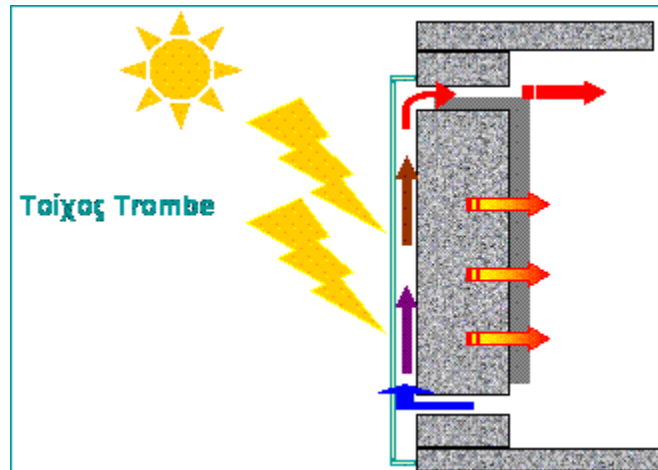
Αντίθετα, στις πλούσιες χώρες όπου η ηλιακή ενέργεια ανταγωνίζεται την παραγωγή από ορυκτά καύσιμα, το κόστος μπορεί να είναι υψηλότερο λόγω των κρατικών επιδοτήσεων που εξακολουθούν να ισχύουν για τη βιομηχανία ορυκτών καυσίμων.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας διακρίνεται σε τρεις βασικές κατηγορίες εφαρμογών:



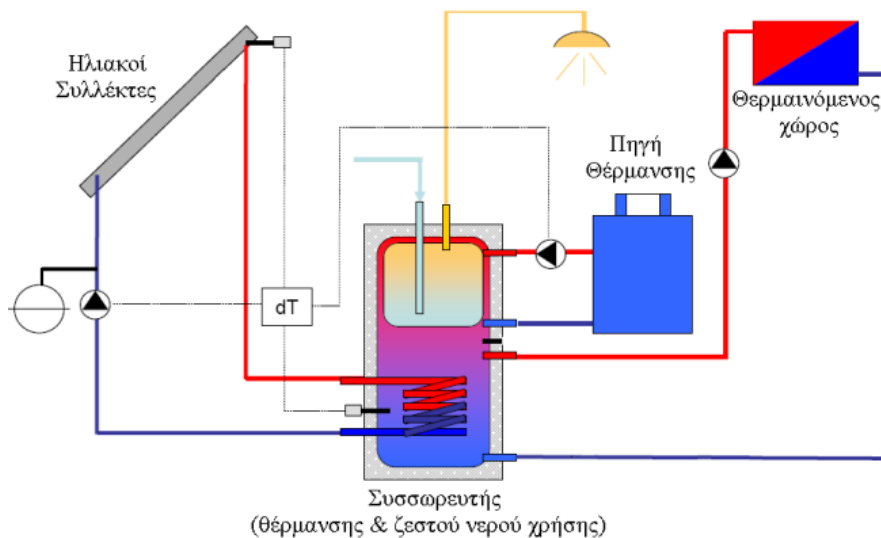
Εικόνα 2. 1 Παραδείγματα συστημάτων αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας

1. **Παθητικά Ηλιακά Συστήματα:** Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αξιοποιούν τη θερμότητα που εκπέμπεται από την ηλιακή ακτινοβολία χωρίς τη χρήση μηχανικών ή ηλεκτρικών συσκευών. Αντίθετα, βασίζονται στην αρχιτεκτονική του κτηρίου και τη φυσική ροή θερμότητας. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν τεχνικές όπως η σωστή τοποθέτηση παραθύρων για την εισροή ηλιακής θερμότητας, η χρήση υλικών με υψηλή θερμική ικανότητα αποθήκευσης, και η βελτιστοποίηση της θερμικής μάζας και της μόνωσης.



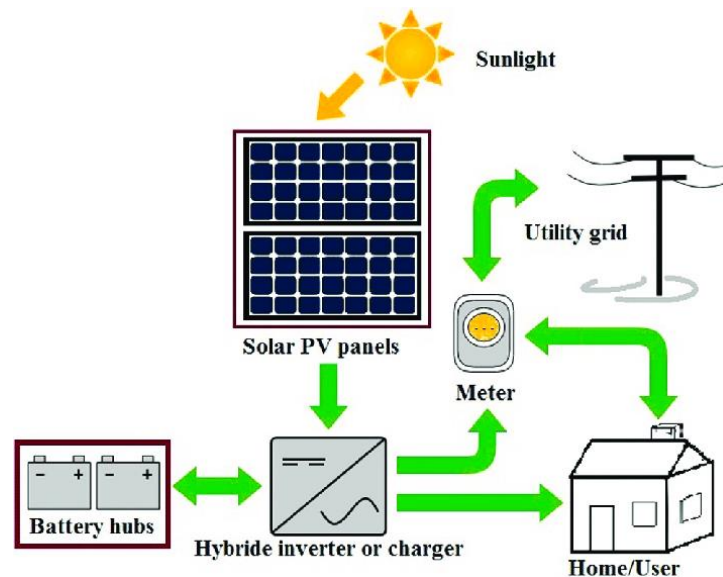
Εικόνα 2. 2 Παράδειγμα παθητικού ηλιακού συστήματος

2. **Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα:** Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση αντλιών θερμότητας, ηλιακών συλλεκτών και άλλων μηχανικών συσκευών. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ηλιακούς θερμοσίφωνες και ηλιοθερμικούς συλλέκτες που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα για χρήση σε θέρμανση νερού, χώρου ή βιομηχανικών διαδικασιών.



Εικόνα 2. 3 Παράδειγμα ενεργητικού ηλιακού συστήματος

3. **Φωτοβολταϊκά Συστήματα:** Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Χρησιμοποιούν ηλιακά πάνελ, τα οποία περιέχουν φωτοβολταϊκά κύτταρα, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη διαρκή προσβολή της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 2. 4 Παράδειγμα φωτοβολταϊκού συστήματος

Αυτές οι τρεις κατηγορίες εφαρμογών προσφέρουν διαφορετικούς τρόπους εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, καλύπτοντας ποικίλες ενεργειακές ανάγκες και προτιμήσεις.

## 2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο.[8][19]

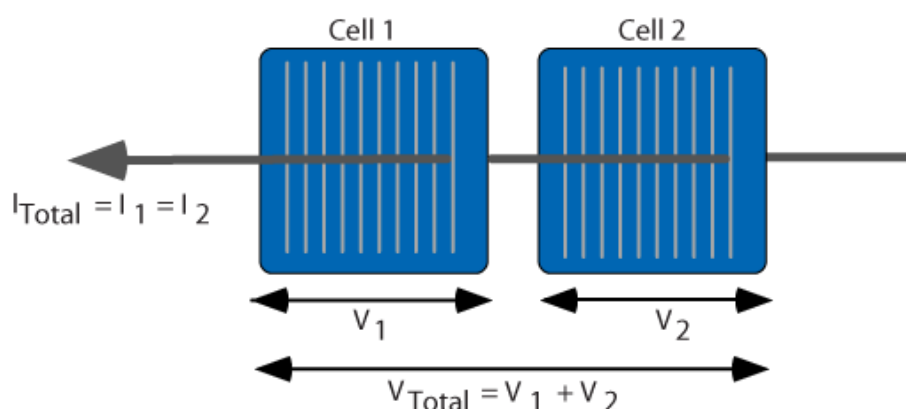
Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και βασίζονται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία γνωστά και ως ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά τα στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που, καθώς εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία, εμφανίζουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Η απόδοση ενός ηλιακού κυττάρου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του και την ένταση της

ακτινοβολίας που δέχεται. Συγκεκριμένα, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0,5 - 1,0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20 - 40 mA ανά  $cm^2$  επιφάνειας.

Η επιλογή του ημιαγωγού ως υλικού κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνεται κυρίως βάσει της τιμής του ενεργειακού διακένου, το οποίο καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνουν περίπου το 25% και επιτυγχάνονται με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5 eV.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς με τετρασθενή και τετραεδρική κρυσταλλική δομή, όπως το πυρίτιο (Si). Σε αυτά τα στοιχεία, όταν ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι ενεργειακά υποβαθμισμένος, δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δεν διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όμως, όταν απορροφήσουν κάποια σημαντική ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, υφίσταται μια ριζική μεταβολή.

Μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες με φωτοβολταϊκά στοιχεία, δηλαδή φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV modules), που ενώνονται και συγκροτούν συστοιχίες (PV string/array).



Εικόνα 2. 5 Συνδεδεμένα ηλιακά κύτταρα

## 2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.[8][9][19][23]

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή ηλιακά κύτταρα, είναι δίοδοι ημιαγωγών με μορφή δίσκου που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, ένα μέρος του φωτός ανακλάται, ένα άλλο διαπερνά το υλικό, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται, συχνά μετατρέπόμενο σε θερμότητα. Ωστόσο, οι ημιαγωγοί έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια.

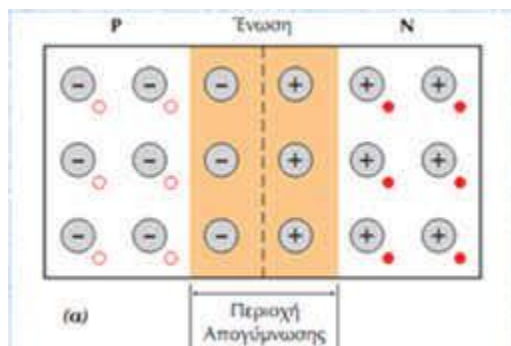
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, βασισμένα σε ημιαγωγούς, είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αυτά τα στοιχεία αποτελούνται κυρίως από δίοδοι ημιαγωγού, οι οποίες έχουν την μορφή δίσκου. Σε αυτά τα στοιχεία, η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου, επιτρέποντας την αποτελεσματική απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσβάλλει το στοιχείο, τα φωτόνια που έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού απορροφώνται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών, δημιουργώντας ζεύγη φορέων. Αυτοί οι φορείς, εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, μπορούν να μετακινηθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, όπου επηρεάζονται από το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο.

Τα φωτόνια που πέφτουν στην μπροστινή όψη του στοιχείου, που είναι τύπου n, δημιουργούν ζεύγη φορέων, μερικοί από τους οποίους διαχωρίζονται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n, ενώ οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p. Αυτό δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται, ενώ μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, μέχρι να φτάσει στο πίσω ηλεκτρόδιο.

Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ των δύο τμημάτων της διόδου, λόγω της φωτοβολταϊκής επίδρασης, παράγει ηλεκτρικό ρεύμα όσο η ηλιακή ακτινοβολία προσβάλλει την επιφάνεια του στοιχείου. Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο, βασίζεται στην αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

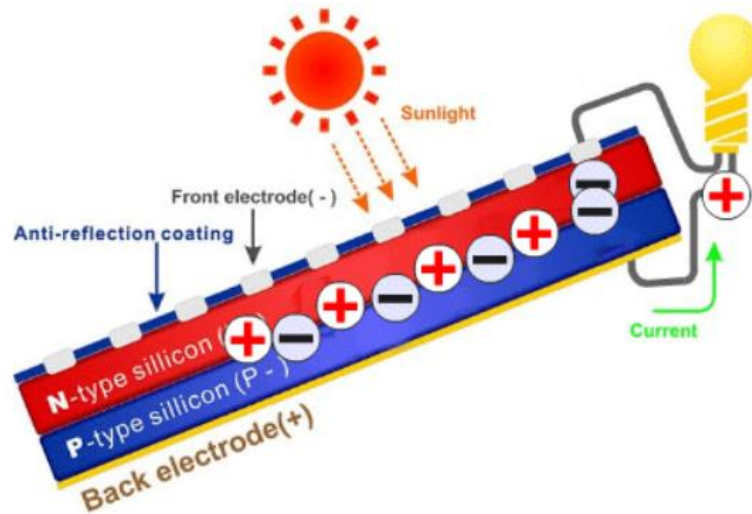
Επιπλέον, η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων υποστηρίζεται από την πρακτική εφαρμογή του ηλεκτροστατικού πεδίου, το οποίο μπορεί να προέρχεται είτε από την ένωση p-n μιας ομογένειας ημιαγωγού είτε από άλλες διατάξεις.



Εικόνα 2. 6 Επαφή P-n ημιαγωγού

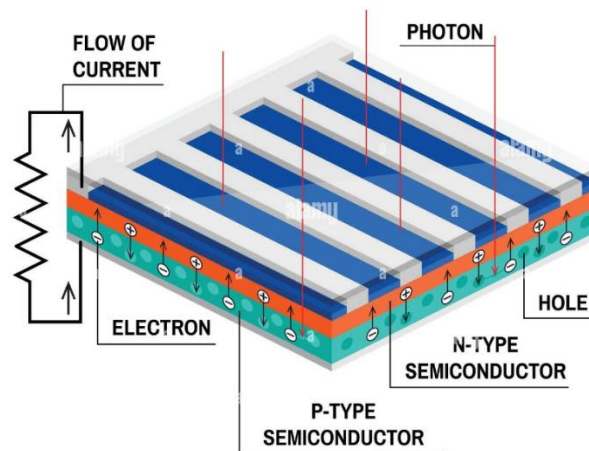
Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται από την απορρόφηση φωτός και τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και από το υλικό κατασκευής τους. Το κρυσταλλικό πυρίτιο είναι το πιο διαδεδομένο υλικό λόγω της υψηλής απόδοσης και της ευρείας χρήσης του στην κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Άλλες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα λεπτά υμένια (thin films) και μεθόδους όπως η Μέθοδος EFG και String Process, που επιδιώκουν τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του κόστους παραγωγής καθαρού πυριτίου.

Συμπερασματικά, η συνεργασία του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου των φωτοαγώγιμων υλικών και του φωτός παράγει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο αποτελεί τη βάση για την αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Εικόνα 2. 7 Εκδήλωση φωτοβολταϊκού φαινομένου

## PHOTOVOLTAIC EFFECT



Εικόνα 2. 8 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε PV Cell

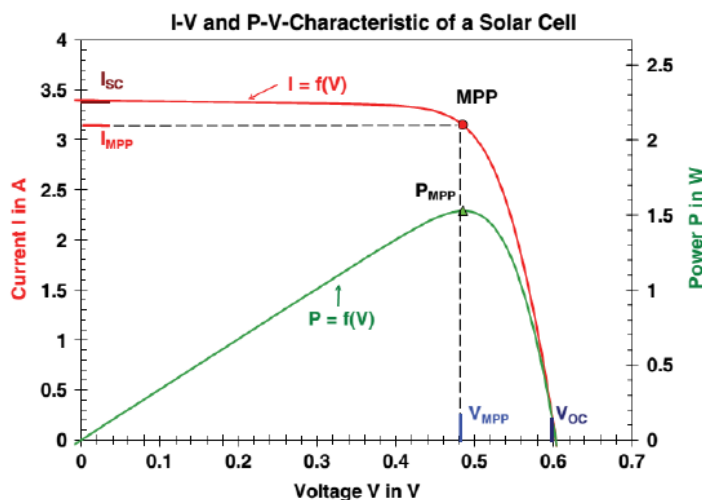
### 2.3 Αρχή λειτουργίας και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Φ/Β συστημάτων.[8][19]

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από ένα τυπικό φωτοβολταϊκό (Φ/Β) κύτταρο είναι συνήθως

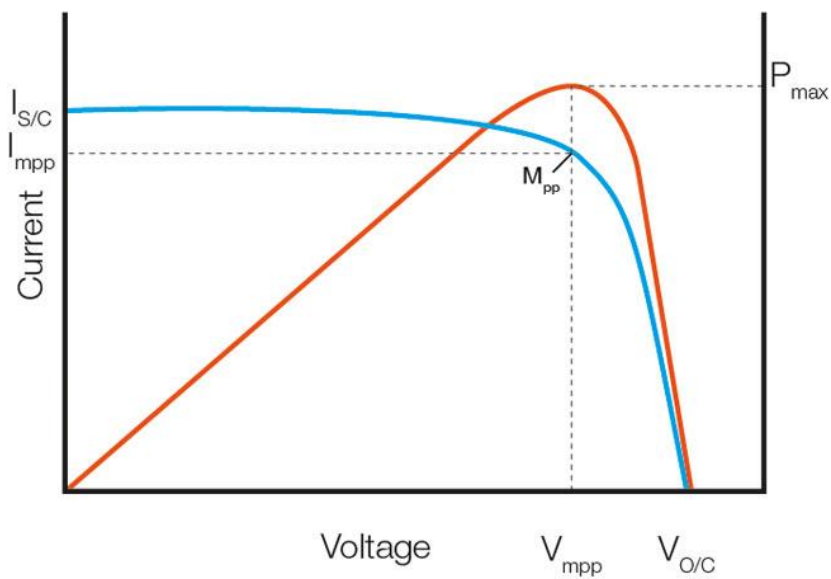
αρκετά μικρή για να καλύψει τις ανάγκες συνηθισμένων ηλεκτρικών φορτίων. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους και τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή έξοδο, δημιουργώντας ένα Φ/Β πλαίσιο. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ το μέγιστο ρεύμα εξόδου καθορίζεται από τον αριθμό των κυττάρων ή ομάδων κυττάρων που είναι συνδεδεμένα παράλληλα.

Έτσι, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των Φ/Β πλαισίων, πέρα από το υλικό κατασκευής, μπορούν να γίνουν με βάση τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά. Κάθε Φ/Β πλαίσιο συνοδεύεται από έναν πίνακα που περιλαμβάνει τις τιμές της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος ( $P_{mpp}$ ), της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ), του ρεύματος βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}$ ), καθώς και των τιμών της τάσης ( $V_{mpp}$ ) και του ρεύματος ( $I_{mpp}$ ) στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Για δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η μέγιστη τάση στα άκρα της φωτογεννήτριας, συμβολιζόμενη ως  $V_{oc}$ , μετράται όταν τα άκρα είναι ανοιχτοκυκλωμένα ( $I_{pv} = 0$ ). Αντίστοιχα, η μέγιστη ένταση του ρεύματος, συμβολιζόμενη ως  $I_{sc}$ , μετράται όταν η έξοδος είναι βραχυκυκλωμένη ( $V_{pv} = 0$ ). Σε αυτές τις συνθήκες, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μηδενική. Η μέγιστη ισχύς ( $P_{mpp}$ ) επιτυγχάνεται για συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης ( $V_{mpp}$ ) και ρεύματος ( $I_{mpp}$ ), όπως απεικονίζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη P-V.



Εικόνα 2. 9 Χαρακτηριστικές I-V και P-V ενός Cell



Εικόνα 2. 10 Χαρακτηριστικές  $I$ - $V$  και  $P$ - $V$  ενός φωτοβολταϊκού

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από άλλες πηγές ενέργειας. Ενώ οι περισσότερες ηλεκτρικές πηγές διατηρούν σχετικά σταθερή τάση, η τάση των φωτογεννητριών μεταβάλλεται δραστικά και μη γραμμικά σε σχέση με την ένταση του ρεύματος που παρέχουν, ακόμα και αν οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας παραμένουν σταθερές.

Συγκεκριμένα, η ένταση του παραγόμενου ρεύματος εξαρτάται από την τάση στα άκρα του Φ/Β πλαισίου, με τη μορφή της καμπύλης ρεύματος-τάσης (χαρακτηριστική  $I$ - $V$ ). Αριστερά του γονάτου της καμπύλης, το ρεύμα μεταβάλλεται ελάχιστα με μεγάλες μεταβολές της τάσης, ενώ δεξιά του γονάτου, μεταβάλλεται σημαντικά με μικρές αλλαγές στην τάση. Η τάση καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού του κυττάρου, ενώ το ρεύμα εξαρτάται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα συμπεράσματα για την εξάρτηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία είναι τα εξής:

1. Όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και το ρεύμα βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}$ ) μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) δεν επηρεάζεται σημαντικά. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V μετατοπίζονται κατακόρυφα, αλλά η μορφή τους παραμένει η ίδια.
2. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί ενώ η ηλιακή ακτινοβολία παραμένει σταθερή, η απόδοση των φωτοβολταϊκών μειώνεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ενεργειακού χάσματος του ημιαγώγιμου υλικού και αύξηση των επανασυνδεόμενων φορέων, με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) και τη μικρή αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}$ ). Αυτές οι αλλαγές οδηγούν σε μείωση της ισχύος εξόδου και αλλαγές στη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V, με πιο στρογγυλεμένο γόνατο.

Η θερμοκρασία επηρεάζει τις τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος εξόδου της Φ/Β γεννήτριας, καθοριζόμενη από τρεις συντελεστές: την μείωση της τάσης ( $V_{oc}$ ) ανά βαθμό Κελσίου, την αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}$ ) και την ποσοστιαία μεταβολή της ισχύος ( $P_{mpp}$ ) για την ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι συντελεστές αυτοί παρέχονται συνήθως από τον κατασκευαστή με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου.

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

$$I_{cell} = I_{l,cell} - I_{o,cell} \left[ e^{\frac{V_{cell} + I_{cell} R_{s,cell}}{n_{cell} V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_{s,cell}}{R_{sh,cell}}$$

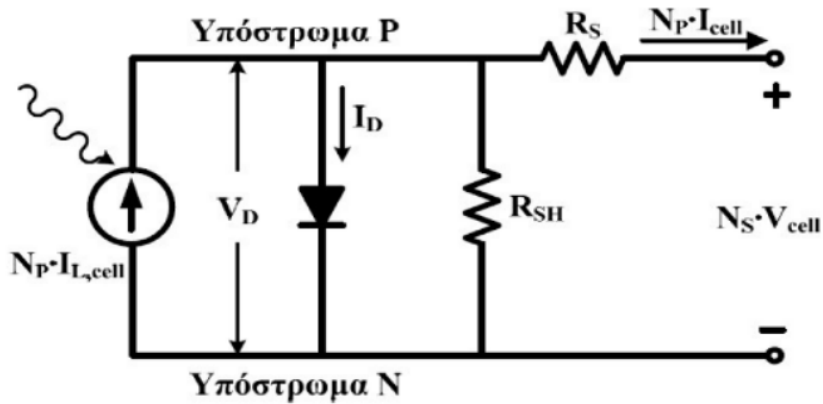
Όπου:

- $V_t$ : η θερμική τάση (V), η οποία υπολογίζεται με τη σχέση  $V_t = \frac{kT}{q}$ , όπου k είναι η σταθερά Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ), T η απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου σε βαθμούς Kelvin (K), και q το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$ ).

Για θερμοκρασία δωματίου ( $27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$ ), η θερμική τάση είναι περίπου  $V_t \approx 25.85 \text{ mV}$ .

- $n_{cell}$ : ο συντελεστής διόρθωσης, ο οποίος προκύπτει από φαινόμενα επανασύνδεσης και μη ιδανικής διάχυσης που συμβαίνουν στην περιοχή της P-N επαφής. Οι τιμές του συντελεστή διόρθωσης κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1 και 2.
- $I_{cell}$ : το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου.
- $V_{cell}$ : η τάση στην έξοδο του κυττάρου.
- $I_{l,cell}$ : το ρεύμα που παράγεται λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο κυτταρικό στοιχείο (φωτόρευμα).
- $I_{o,cell}$ : το ρεύμα κόρου της διόδου, με τιμές που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ  $10^{-4}$  και  $10^{-15}$  A.
- $R_{s,cell}$ : η αντίσταση του κυττάρου, η οποία συγκεντρώνει όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κύριο ημιαγωγό. Αυτή περιλαμβάνει την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-N), την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού και ωμικής επαφής, καθώς και την ωμική επαφή. Η αντίσταση  $R_{s,cell}$  είναι συνήθως μικρότερη από 1 Ω.
- $R_{s,h,cell}$ : η αντίσταση που αντιπροσωπεύει τις διαρροές των φορέων είτε στην επαφή P-N (επανασύνδεση), είτε στην εξωτερική επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), είτε σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου. Αυτή η αντίσταση δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια του κυττάρου ούτε μεταξύ δύο όμοιων κυττάρων. Η αντίσταση  $R_{s,h,cell}$  συνήθως κυμαίνεται γύρω από την τάξη των kΩ.

Η εξίσωση αυτή είναι μη γραμμική, της μορφής  $I = f(I, V)$ , και υπό μορφή ισοδυνάμου κυκλώματος, μπορεί να παρασταθεί από το ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω στην εικόνα:



Εικόνα 2. 11 Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ

## 2.4 Απόδοση και υπολογισμός ισχύος αιχμής Φ/Β πλαισίου.[19]

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαθέτει μια μοναδική σειρά τεχνικών χαρακτηριστικών όπως η απόδοση, η τάση και η ισχύς. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζονται από τις αντίστοιχες τιμές των επιμέρους ηλιακών κυψελών που περιέχει το πλαίσιο. Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, σημειούμενος ως  $n_{\pi}$  ορίζει την αναλογία της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το πλαίσιο ( $P_{\pi}$ ) προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνειά του, η οποία συμβολίζεται ως  $S$ . Αυτός ο συντελεστής μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$n_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{HS} \left( \frac{W}{\frac{m^2}{m^2}} \right)$$

Όπου:

- $n_{\pi}$  είναι ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
- $P_{\pi}$  είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παράγει το πλαίσιο.
- $H \cdot S$  είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας.

Εναλλακτικά, αν  $E$  είναι η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια και  $\Pi$  η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$n_{\pi} = \frac{E}{\Pi S} \left( \frac{kW}{\frac{m^2}{m^2}} \right)$$

Επιπλέον, ισχύει και η εξής σχέση:

$$n_{\pi} = n P f$$

Όπου:

- $N$  είναι η μέση απόδοση των επιμέρους ηλιακών στοιχείων.
- $Pf$  είναι ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου.

Ο συντελεστής κάλυψης  $Pf$  ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών κυψελών (της επιφάνειας όπου γίνεται η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας) προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η τιμή του  $Pf$  εξαρτάται από το σχήμα και την πυκνότητα τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων στο πλαίσιο και μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0,78 και 0,98.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τις θερμοκρασιακές συνθήκες. Ωστόσο, ο συντελεστής απόδοσης που παρέχεται για τα ηλιακά στοιχεία ή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αναφέρεται σε μια συμβατική θερμοκρασία των 20°C, που συχνά, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, διαφέρει σημαντικά από την πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων.

Για να διορθωθεί αυτή η ανακρίβεια, χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής  $\sigma_{\theta}$ , με τον οποίο πολλαπλασιάζεται ο συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο ισχύει και για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Σε θερμοκρασίες που διαφέρουν από τη συμβατική, ο συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων υπολογίζεται ως το γινόμενο  $n_p \sigma_{\theta}$ .

Στη συμβατική θερμοκρασία των 20°C, ο  $\sigma_\theta$ , είναι ίσος με τη μονάδα. Για τα κοινά ηλιακά στοιχεία πυριτίου, ο  $\sigma_\theta$ , μειώνεται περίπου κατά 0,005 για κάθε βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτήν τη θερμοκρασία.

Ένας επιπλέον παράγοντας που μπορεί να μειώσει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδιαίτερα όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους λόγω σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλάτων από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ρυπαντικών ουσιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητος ο περιοδικός καθαρισμός των επιφανειών των φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη χρήση απορρυπαντικών.

Όταν μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι εγκατεστημένη σε περιοχή όπου αναμένεται σημαντική ρύπανση, είναι σκόπιμο να ληφθεί υπόψη η πιθανή μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής κατά τις σχετικές υπολογιστικές διαδικασίες. Για αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής καθαρότητας,  $\sigma_\rho$ , , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει ένα ρυπασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την ισχύ που θα παρήγαγε αν η επιφάνειά του ήταν εντελώς καθαρή. Η τιμή  $\sigma_\rho$ , είναι μικρότερη από τη μονάδα και μειώνεται όσο αυξάνεται η περιβαλλοντική ρύπανση, η μικρότερη κλίση του πλαισίου και η σπανιότητα των βροχοπτώσεων.

Συνεπώς, όταν κρίνεται απαραίτητο, ο υπολογιζόμενος συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων λαμβάνεται ως το γινόμενο του αναμενόμενου συντελεστή απόδοσης  $\eta_p$ , ο οποίος παρέχεται για τη συμβατική θερμοκρασία και την καθαρή επιφάνεια, επί των διορθωτικών συντελεστών για τη θερμοκρασία  $\sigma_\theta$ , και τη ρύπανση  $\sigma_\rho$ . Η γενική μορφή της εξίσωσης είναι:

$$E = \Pi S \eta_p \sigma_\theta \sigma_\rho$$

Σε πολλές περιπτώσεις, δεν έχουμε στη διάθεσή μας τα πλήρη κατασκευαστικά δεδομένα και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πλαισίων, όπως είναι οι διαστάσεις, ο συντελεστής κάλυψης και ο συντελεστής απόδοσης των ηλιακών κυψελών. Συνήθως όμως παρέχεται μια ενδεικτική τιμή της ισχύος αιχμής (Pa), η οποία αντιστοιχεί στην μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να παραχθεί από το Φ/Β πλαίσιο όταν αυτό εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία ίση με  $1 \frac{kW}{m^2}$ .

Η ισχύς αιχμής ενός Φ/Β πλαισίου, μιας Φ/Β εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου, εκφράζεται συχνά σε "watt αιχμής" (watt peak - Wp) ή "kW αιχμής" (kilowatt peak - kWp). Από την εξίσωση που ορίζει την απόδοση ηπ μπορούμε να καταλάβουμε ότι:

$$Pa(kW_p) = 1 \left( \frac{kW}{m^2} \right) S(m^2) n_\pi$$

Έτσι, όταν έχουμε διαθέσιμη μόνο την τιμή της ισχύος αιχμής  $Pa$  για να υπολογίσουμε τη μέση ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το Φ/Β πλαίσιο, χρησιμοποιούμε την εξής εξίσωση αντί της προηγούμενης:

$$Pa \left( \frac{kWh}{d} \right) = \Pi \left( \frac{kWh}{m^2} \right) \frac{Pa}{1 m^2} \sigma_\theta \sigma_\rho$$

Η παραπάνω σχέση μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη ισχύ αιχμής, καθώς και τους διορθωτικούς συντελεστές για τη θερμοκρασία ( $\sigma_\theta$ ) και την καθαρότητα της επιφάνειας του πλαισίου ( $\sigma_\rho$ ).

- $P_a$ : Αντιπροσωπεύει την ισχύ αιχμής που μπορεί να αποδώσει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο υπό ιδανικές συνθήκες ακτινοβολίας.
- $n_\pi$ : Συντελεστής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου.
- $\sigma_\theta$ : Συντελεστής διόρθωσης για τη θερμοκρασία.
- $\sigma_\rho$ : Συντελεστής διόρθωσης για τη ρύπανση.

## 2.5 Αποθήκευση ενέργειας – Συσσωρευτές.[23][31]

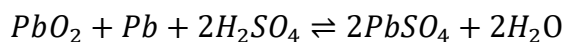
Οι τεχνολογίες αποθήκευσης που ήδη χρησιμοποιούνται ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε ένα Υβριδικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΥΣΗΕ) περιλαμβάνουν συσσωρευτές, αποθήκευση υδρογόνου, σφονδύλους, και υπερπυκνωτές. Οι συσσωρευτές, οι οποίοι μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική, αποτελούν ένα βασικό συστατικό αυτών των συστημάτων. Κατασκευάζονται από ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου, με έναν ηλεκτρολύτη να βρίσκεται ανάμεσά τους. Οι συσσωρευτές σχεδιάζονται για να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, ενώ είναι σε θέση να υποστηρίξουν χιλιάδες κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης ανάλογα με τον τύπο και την εφαρμογή για την οποία χρησιμοποιούνται. Παρόλα αυτά, βαθιές εκφορτίσεις μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους.

Οι συστοιχίες συσσωρευτών είναι η καταλληλότερη λύση για την αποθήκευση μικρών ποσοτήτων ενέργειας, καθιστώντας τις ιδανικές για μικρούς οικισμούς και μεμονωμένες αγροικίες. Το μέγεθος και η διασύνδεση των συσσωρευτών καθορίζονται από τις απαιτήσεις ενεργειακής επάρκειας και τις ανάγκες των καταναλωτών. Το κόστος αυτών των συσσωρευτών είναι αρκετά υψηλό, ειδικά για εκείνους που αντέχουν πολλούς κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης, και η συντήρηση της εγκατάστασης απαιτεί προσοχή. Για καταναλώσεις εναλλασσόμενου ρεύματος, απαιτούνται ανορθωτές, μετατροπείς συχνότητας και σταθεροποιητές τάσης και συχνότητας για τη σωστή λειτουργία.

Οι συσσωρευτές λειτουργούν με συνεχές ρεύμα και βασίζονται σε μια αρχή λειτουργίας που μοιάζει με εκείνη των κυψελών καυσίμου. Η κύρια διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές συνεχούς μετατροπής ενέργειας για όσο διάστημα τροφοδοτούνται με καύσιμο, ενώ οι συσσωρευτές αποτελούν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, και συνεπώς έχουν περιορισμένη χρήση. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συσσωρευτών και τα βασικά τους χαρακτηριστικά περιγράφονται στον Πίνακα 2.10.

Ανάμεσα στους τύπους συσσωρευτών που αναφέρονται στον Πίνακα 2.10, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος παραμένουν η πιο δημοφιλής επιλογή για χρήση σε ΥΣΗΕ. Παρά το γεγονός ότι άλλοι τύποι συσσωρευτών παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε έναν ή περισσότερους τομείς συγκριτικά με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, το χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα

χωρητικότητας καθιστά αυτούς τους συσσωρευτές την καλύτερη επιλογή για την ώρα . Η βασική δομική μονάδα ενός συσσωρευτή είναι η κυψέλη, η οποία αποτελείται από την κάθοδο (μια πλάκα εμπλουτισμένη με Pb), την άνοδο (μια πλάκα εμπλουτισμένη με PbO<sub>2</sub>), και τον ηλεκτρολύτη (διάλυμα H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Η λειτουργία ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος περιγράφεται από την ακόλουθη αντιστρέψιμη χημική αντίδραση:



Όταν η αντίδραση κινείται προς τα δεξιά, εκφορτίζεται ο συσσωρευτής, ενώ όταν κινείται προς τα αριστερά, φορτίζεται.

Τέσσερις κύριοι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση ενός συσσωρευτή: 1) η χωρητικότητα, 2) η απόδοση, 3) ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης, και 4) η διάρκεια ζωής.

Η χωρητικότητα,  $C_{bat}$ , μετράται σε Ah (αμπερώρια) και υποδεικνύει το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν συσσωρευτή. Επειδή η τάση του συσσωρευτή,  $V_{bat}$ , παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη λειτουργία του, είναι πιο χρήσιμο να υπολογίζεται η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν συσσωρευτή,  $E_{bat}$ , σε kWh (κιλοβατώρια) αντί για την απλή χωρητικότητα  $C_{bat}$ .

$$E_{bat} = \frac{C_{bat} V_{bat}}{1000}$$

Η απόδοση αναφέρεται στο ποσοστό της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί από την αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια στο συσσωρευτή. Για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, η τυπική τιμή απόδοσης είναι περίπου  $n_{bat}=80\%$ .

Ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης αντιπροσωπεύει την ταχύτητα με την οποία ο συσσωρευτής μπορεί να απορροφήσει ή να απελευθερώσει ενέργεια. Κατά τη μοντελοποίηση των συσσωρευτών, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι δεν επιτρέπεται να εκφορτιστούν κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο φόρτισης στις περισσότερες περιπτώσεις. Για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνται στα ΥΣΗΕ, το μέγιστο επιτρεπτό βάθος

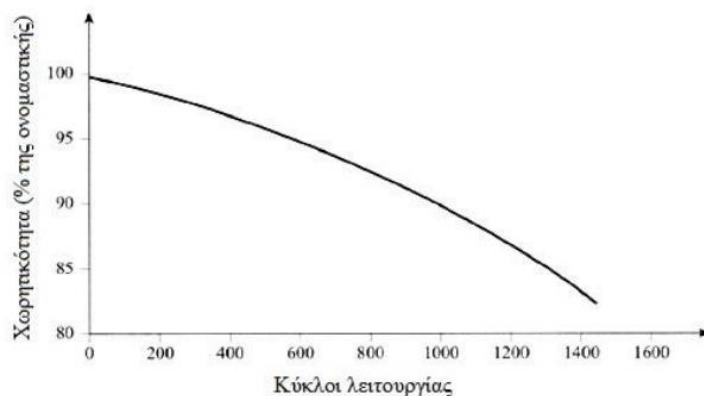
εκφόρτισης καθορίζεται στο 80% της χωρητικότητάς τους. Αυτός ο περιορισμός μειώνει την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα,  $C_{bat}$  (σε Ah), καθώς και την αξιοποιήσιμη ενέργεια,  $E_{bat}$  (σε kWh).

Η διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή προσδιορίζεται από δύο παράγοντες: τον αριθμό των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης και το βάθος εκφόρτισης σε κάθε κύκλο. Ένας κύκλος ζωής περιλαμβάνει τόσο τη φόρτιση όσο και την εκφόρτιση του συσσωρευτή.

Η χωρητικότητα  $C_{bat}$  του συσσωρευτή δεν παραμένει σταθερή αλλά μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των κύκλων ζωής. Για παράδειγμα, ένας ποιοτικός συσσωρευτής  $PbH_2SO_4$  που εκφορτίζεται και φορτίζεται περιοδικά κατά 20% κάτω από τη μέγιστη χωρητικότητά του μπορεί να επιτύχει περίπου 4500 κύκλους ζωής. Αν το βάθος εκφόρτισης αυξηθεί στο 40%, ο αριθμός των κύκλων ζωής μειώνεται σχεδόν στο μισό. Μια χρήσιμη προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς ενός συσσωρευτή, που περιγράφει τη διάρκεια ζωής του, είναι ότι το γινόμενο του βάθους εκφόρτισης (DOD) και του αριθμού κύκλων ζωής ( $N_k$ ) παραμένει σταθερό δηλαδή:

$$DOD \times N_k = \text{σταθερό}$$

Σύμφωνα με αυτήν τη θεώρηση, κάθε συσσωρευτής έχει μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας  $E_{batLife}$  (σε kWh) που μπορεί να αποθηκεύσει και να χρησιμοποιήσει προτού χρειαστεί αντικατάσταση. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι για συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης, όπως οι φωτοβολταϊκοί συσσωρευτές, το γινόμενο αυτό έχει τιμή 1200, ενώ για κοινούς συσσωρευτές περιορίζεται στο 120 .

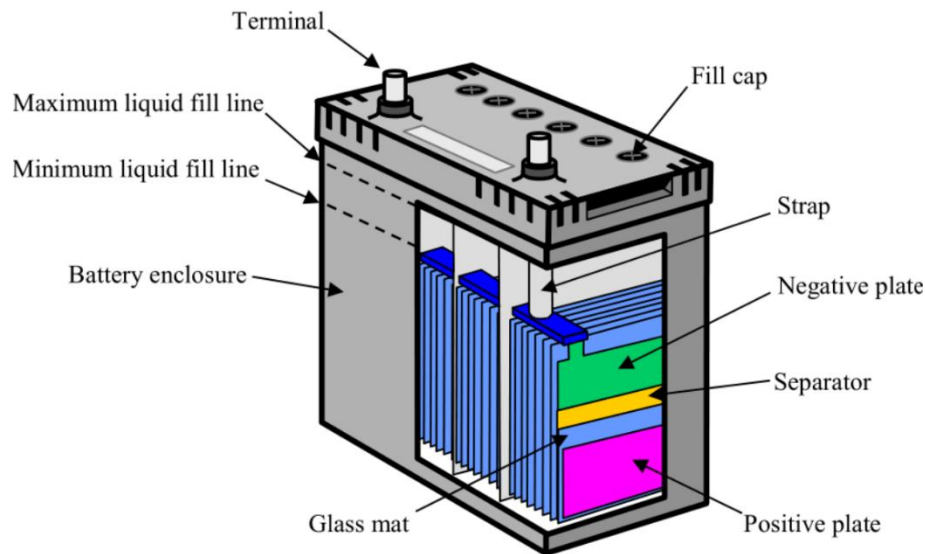


Εικόνα 2. 12 Εξάρτηση της χωρητικότητας συσσωρευτή μολβδου οξέως σε σχέση με τους κύκλους λειτουργίας

Η Εικόνα 2.12 παρουσιάζει την τυπική μείωση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή καθώς αυξάνεται η διάρκεια ζωής του. Όσο ο συσσωρευτής χρησιμοποιείται, η αρχική χωρητικότητά του μειώνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο. Αυτή η πτώση της χωρητικότητας μπορεί να αποδοθεί στη γήρανση των ηλεκτροδίων και στη μείωση της απόδοσης των χημικών αντιδράσεων στον ηλεκτρολύτη. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να επιδεινωθεί από βαθιές εκφορτίσεις, ακραίες θερμοκρασίες, και άλλους παράγοντες που επιβαρύνουν τον συσσωρευτή. Η Εικόνα 2.12 δείχνει ότι για έναν συσσωρευτή μολύβδου-οξέος, η μείωση της χωρητικότητας γίνεται πιο έντονη μετά από περίπου 1000 κύκλους ζωής, ειδικά αν το βάθος εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο του 50%. Συνεπώς, ο σωστός σχεδιασμός και η διαχείριση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητοι για την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής και της αποδοτικότητας του συσσωρευτή.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν μία από τις πιο καθιερωμένες και διαδεδομένες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για πάνω από έναν αιώνα. Η εκτεταμένη χρήση τους οφείλεται στο χαμηλό τους κόστος (300-600 €/kW), στην υψηλή αξιοπιστία και στην εξαιρετική απόδοση (65-80%), καθώς και στο μικρό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, το οποίο αγγίζει μόλις το 1%. Αυτές οι μπαταρίες είναι κατάλληλες για εφαρμογές μικρής και μεσαίας κλίμακας.

Ωστόσο, οι συγκεκριμένες μπαταρίες παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα, με κύριο την περιορισμένη διάρκεια ζωής τους, που κυμαίνεται από 500 έως 1000 κύκλους. Αυτό τις καθιστά ακατάλληλες για ορισμένες εφαρμογές που απαιτούν μακροπρόθεσμη διαχείριση ενέργειας. Επιπλέον, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (30-50 Wh/kg), η ανάγκη για συχνή συντήρηση και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον αποτελούν σοβαρές προκλήσεις. Η απόδοσή τους επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να απαιτούν ειδικά συστήματα ρύθμισης για να λειτουργούν αποτελεσματικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Παρά τα παραπάνω, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μπαταριών μολύβδου-οξέος με ρύθμιση βαλβίδας, οι οποίες προσφέρουν βελτιώσεις όσον αφορά τη συχνότητα συντήρησης, την περιβαλλοντική επιβάρυνση και το ποσοστό αυτοεκφόρτισης.



Μια άλλη κατηγορία συσσωρευτών είναι εκείνη των ιόντων λιθίου. Οι προηγμένες μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν αυξημένη ανθεκτικότητα στους κύκλους ζωής σε σχέση με άλλους τύπους μπαταριών. Ωστόσο, το κόστος τους παραμένει υψηλό, γεγονός που τις καθιστά λιγότερο οικονομικές επιλογές για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Παρόλα αυτά, είναι ιδανικές για συστήματα όπου το βάρος και η χωρητικότητα παίζουν καθοριστικό ρόλο, όπως σε φορητές συσκευές και οχήματα ηλεκτρικής κίνησης.

Από την άλλη πλευρά, οι υπερπυκνωτές αποτελούν μια εναλλακτική επιλογή αποθήκευσης ενέργειας που επιδεικνύει μεγάλη αντοχή σε κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, υψηλή απόδοση, και μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Παρά το γεγονός ότι οι υπερπυκνωτές έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες, οι χαρακτηριστικές ιδιότητες τους τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές ενεργειακές αποδόσεις σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

Συνολικά, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της συγκεκριμένης εφαρμογής, καθώς και από τους οικονομικούς παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό κόστος του συστήματος. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας αναμένεται να προσφέρει περισσότερες επιλογές και λύσεις για την αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας στο μέλλον.

## **2.6 Μετατροπείς- Inverters.[8][19][23]**

Στα υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΥΣΗΕ), συχνά συνυπάρχουν τεχνολογίες και φορτία που λειτουργούν με συνεχές (DC) και εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Για τη σύνδεση αυτών των διαφορετικών τεχνολογιών απαιτείται η μετατροπή της μορφής του ρεύματος, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μετατροπέων (converters). Ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι μετατροπείς μπορεί να είναι αντιστροφείς (inverters) που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο (DC σε AC), ανορθωτές (rectifiers) που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές (AC σε DC), ή συνδυασμός και των δύο. Στην παρούσα ανάλυση, οι μετατροπείς θεωρούνται ως συσκευές που περιλαμβάνουν τόσο αντιστροφείς όσο και ανορθωτές.

### **Λειτουργία και Εφαρμογές των Μετατροπέων**

Οι μετατροπείς μπορούν να είναι ανεξάρτητες μονάδες ή να ενσωματώνονται σε ελεγκτές φόρτισης. Στην τελευταία περίπτωση, η κύρια λειτουργία τους είναι να προσαρμόζουν την τάση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην τάση του συστήματος αποθήκευσης, ώστε να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

### **Μετατροπείς DC/AC σε Μικροδίκτυα**

Οι μετατροπείς DC/AC χρησιμοποιούνται σε μικροδίκτυα για την τροφοδοσία απομονωμένων φορτίων με AC ισχύ, η οποία προέρχεται από πηγές DC. Οι μετατροπείς αυτοί βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η ενέργεια από DC πηγές, όπως μπαταρίες, φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμου, πρέπει να μετατραπεί για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες φορτίων AC. Παραδείγματα εφαρμογών περιλαμβάνουν αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου η DC ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία μετατρέπεται σε AC ισχύ για την τροφοδοσία συστημάτων που δεν είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.

## Λειτουργίες των Αντιστροφών

Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί ένας αντιστροφέας είναι:

1. Μετατροπή του DC ρεύματος σε AC.
2. Μετασχηματισμός του ρεύματος σε ημιτονοειδή κυματομορφή με συγκεκριμένη συχνότητα.
3. Ενίσχυση της τάσης της DC πηγής με μετατροπέα DC/DC.

## Σχεδιασμός και Απόδοση Αντιστροφών

Ο σχεδιασμός των αντιστροφών περιλαμβάνει διάφορα επιμέρους στοιχεία, τα οποία επηρεάζουν την απόδοση και τις απώλειες τους. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση μετασχηματιστή στην έξοδο του αντιστροφέα μπορεί να αυξήσει τις απώλειες. Αντί αυτού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετατροπέας DC/DC για την ενίσχυση της τάσης. Επίσης, φίλτρα χρησιμοποιούνται στην έξοδο για την αποκοπή των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών, προσφέροντας μια καθαρή ημιτονοειδή κυματομορφή. Οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή έχουν συνήθως υψηλότερες αποδόσεις, με μέγιστες τιμές εμπορικών αντιστροφών να φτάνουν το 96.5%.

## Ευρωπαϊκή Απόδοση Αντιστροφών

Η ευρωπαϊκή απόδοση είναι ένας δείκτης που έχει καθιερωθεί για να δώσει μια εκτίμηση της απόδοσης του αντιστροφέα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ο τύπος για τον υπολογισμό της είναι:  $n_{euro} = 0.03n_5 + 0.06n_{10} + 0.13n_{20} + 0.1n_{30} + 0.48n_{50} + 0.2n_{100}$

Οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή παρουσιάζουν και πάλι τις υψηλότερες ευρωπαϊκές αποδόσεις, περίπου 90%.

## Εφαρμογές Αντιστροφών DC/AC

Οι αντιστροφείς βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς, όπως:

- Έλεγχος ταχύτητας ηλεκτρικών μηχανών AC.
- Αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε δίκτυα.

- Έλεγχος τάσης εξόδου σε αιολικά συστήματα.
- Έλεγχος θερμοκρασίας με επαγωγή.
- Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.
- Διατάξεις Αδιάκοπης Παροχής Ισχύος (UPS).

### **Τύποι Αντιστροφέων**

Οι αντιστροφείς κατατάσσονται κυρίως σε δύο κατηγορίες βάσει της εισόδου τους:

- Αντιστροφείς πηγής τάσεως (VSI), όπου υπάρχει πηγή DC τάσης στην είσοδο.
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος (CSI), όπου υπάρχει πηγή DC ρεύματος στην είσοδο.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσεως (VSI) είναι οι πιο συνηθισμένοι και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές.

### **Τοπολογία Αντιστροφέων**

Υπάρχουν διάφοροι τύποι τοπολογίας αντιστροφέων, ανάλογα με τον αριθμό και τη συνδεσμολογία των διακοπτικών στοιχείων:

- Μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας.
- Μονοφασικοί αντιστροφείς γέφυρας.
- Τριφασικοί αντιστροφείς.

### **Απόδοση Αντιστροφέων**

Η απόδοση των αντιστροφέων δεν παραμένει σταθερή σε όλα τα επίπεδα ισχύος. Οι αντιστροφείς πρέπει να λειτουργούν κοντά στο πλήρες φορτίο για να επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση. Ωστόσο, αυτό δεν είναι πάντα δυνατό, καθώς πολλές φορές τα συστήματα δεν φτάνουν ποτέ την ονομαστική τους ισχύ λόγω ανεπαρκούς κλίσης, προσανατολισμού ή ακτινοβολίας στην περιοχή. Οι μέσες ετήσιες αποδόσεις των αντιστροφέων είναι συνήθως 6-8% χαμηλότερες από τις

Συνολικά, οι τεχνολογίες μετατροπών και αντιστροφών παίζουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία και την αποδοτικότητα των μικροδικτύων, επιτρέποντας τη βέλτιστη διαχείριση της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας.

### **3. Υδρογόνο και κυψέλες καυσίμου[8][24][26]**

#### **3.1 Το υδρογόνο ως καύσιμο**

Η εξάρτηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) από μεταβλητές συνθήκες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου, καθιστά απαραίτητη την ενσωμάτωσή τους σε υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν λύσεις αποθήκευσης ενέργειας. Οι τρέχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές, μπορούν να αναπληρώσουν τα κενά στην παραγωγή ενέργειας με ικανοποιητική ενεργειακή απόδοση, αλλά δεν παρέχουν πλήρη διαθεσιμότητα. Το υψηλό κόστος και η περιορισμένη διαθεσιμότητα αυτών των τεχνολογιών δημιουργούν την ανάγκη για εναλλακτικές λύσεις που χρησιμοποιούν καύσιμα με ελάχιστο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ένα τέτοιο εναλλακτικό καύσιμο είναι το υδρογόνο.

Το υδρογόνο θεωρείται από πολλούς ειδικούς ως το ενεργειακό μέσο του μέλλοντος, με τη δυνατότητα να αντικαταστήσει τα παραδοσιακά υγρά και αέρια καύσιμα, τόσο σε σταθερές εφαρμογές όσο και στις μεταφορές. Παρόλο που το υδρογόνο είναι άφθονο στη φύση, εμφανίζεται μόνο σε μορφή χημικών ενώσεων ή μιγμάτων, και η παραγωγή του απαιτεί σημαντική ενέργεια. Η ποικιλία των πηγών υδρογόνου, όπως το νερό και οι υδρογονάνθρακες, και οι διάφορες μέθοδοι εξαγωγής του από τις χημικές ενώσεις και τα μίγματα τον καθιστούν ιδιαίτερα υποσχόμενο καύσιμο. Υπάρχει η πεποίθηση ότι η ενσωμάτωσή του στο ενεργειακό σύστημα θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια κατάσταση «ενεργειακής δημοκρατίας» σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα κύρια πλεονεκτήματα του υδρογόνου σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα περιλαμβάνουν:

1. **Υψηλή Ενεργειακή Πυκνότητα:** Το υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, φτάνοντας τα 120,7 kJ/g, δηλαδή τρεις φορές περισσότερο από την βενζίνη.
2. **Καθαρή Καύση:** Κατά την καύση του με οξυγόνο, το υδρογόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με ατμοσφαιρικό αέρα, που περιέχει περίπου 68% άζωτο, παράγονται μερικά οξείδια του αζώτου, αλλά σε πολύ μικρές ποσότητες, περιορίζοντας την περιβαλλοντική μόλυνση.
3. **Μείωση Κατανάλωσης Πεπερασμένων Πόρων:** Η χρήση του υδρογόνου μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από τα περιορισμένα φυσικά καύσιμα.
4. **Αποκεντρωμένη Παραγωγή Ενέργειας:** Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με διάφορους τρόπους σε πολλές περιοχές, ενισχύοντας την ανάπτυξη αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων.

Αντίθετα, τα κύρια μειονεκτήματα της χρήσης του υδρογόνου συγκριτικά με τα παραδοσιακά καύσιμα περιλαμβάνουν:

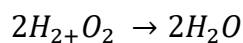
1. **Δυσκολίες στην Αποθήκευση:** Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του υδρογόνου, η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων σε μικρές δεξαμενές απαιτεί υψηλές πιέσεις για την υγροποίησή του.
2. **Απουσία Οργανωμένου Δικτύου Διανομής:** Το δίκτυο διανομής υδρογόνου δεν είναι ακόμα πλήρως ανεπτυγμένο.
3. **Υψηλό Κόστος:** Η τιμή του υδρογόνου είναι συγκριτικά υψηλότερη σε σχέση με τη βενζίνη ή το πετρέλαιο.
4. **Υψηλό Κόστος Τεχνολογιών:** Οι τεχνολογίες που σχετίζονται με το υδρογόνο, όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι ηλεκτρολύτες, έχουν υψηλό κόστος.

Η τεχνολογία του υδρογόνου αξιοποιεί την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο για την παραγωγή νερού, που είναι η αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Οι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω αυτής της διαδικασίας ονομάζονται κυψέλες καυσίμου, ενώ οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου μέσω διάσπασης του νερού ονομάζονται ηλεκτρολύτες.

### 3.2 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου [9][19][23]

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, χωρίς την ανάγκη καύσης. Το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το υδρογόνο. Σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, που καίνε το καύσιμο για να παράγουν έργο και θερμότητα, οι κυψέλες καυσίμου προχωρούν σε χημικές αντιδράσεις σε ειδικά διαχωρισμένα μέρη της συσκευής, παράγοντας ηλεκτρισμό και θερμότητα με μεγαλύτερη απόδοση.

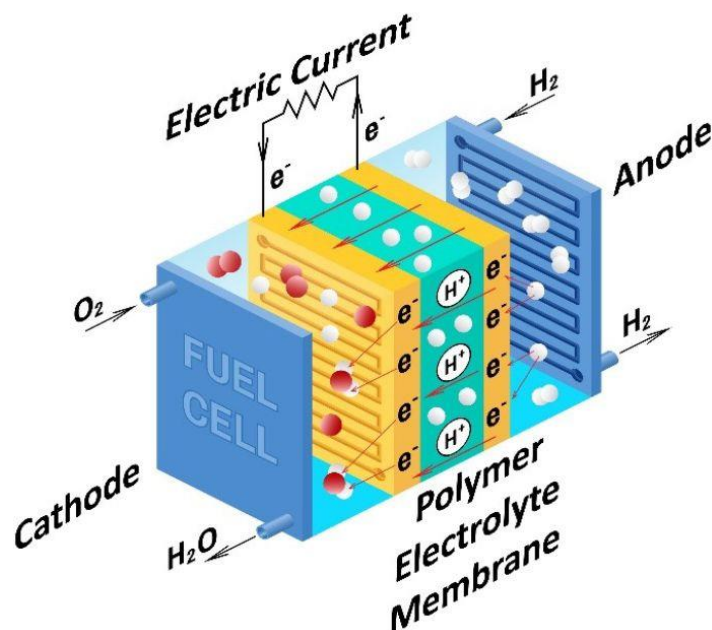
Η βασική χημική αντίδραση σε μια κυψέλη καυσίμου με υδρογόνο είναι η εξής:



Στις κυψέλες καυσίμου, η συνολική αντίδραση διαχωρίζεται σε δύο ημιαντιδράσεις που συμβαίνουν σε διαφορετικά τμήματα της κυψέλης:

- **Άνοδος:**  $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
- **Κάθοδος:**  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Αυτή η διαδικασία συμβαίνει σε τρία βασικά μέρη της κυψέλης καυσίμου: την άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο), την κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) και τον ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης, που συνήθως είναι μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), επιτρέπει τη μεταφορά μόνο θετικών ιόντων και λειτουργεί ως ιοντική γέφυρα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Ο καταλύτης, ο οποίος συχνά αποτελείται από λευκόχρυσο ή παλλάδιο, επιταχύνει την αντίδραση χωρίς να καταναλώνεται.



Εικόνα 3. 1 Δομή κυψέλης καυσίμου

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι ιδιαίτερα ευεργετική λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων:

- **Υψηλή Απόδοση:** Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν υψηλή απόδοση μετατροπής ενέργειας, με δυνατότητα υπέρβασης του 90% όταν συνδυάζονται με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Αυτό είναι δυνατό λόγω της μη λειτουργίας τους σε θερμοδυναμικό κύκλο, που δεν περιορίζεται από το θερμοδυναμικό όριο των παραδοσιακών μηχανών εσωτερικής καύσης.
- **Μηδενικές Εκπομπές Ρύπων:** Κατά τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας, οι κυψέλες καυσίμου παράγουν μόνο νερό και θερμότητα. Αυτό σημαίνει ότι συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων ρύπων.
- **Χαμηλά Επίπεδα Θορύβου:** Η απουσία μηχανικών μερών που κινούνται μειώνει σημαντικά τα επίπεδα θορύβου και κραδασμών.
- **Αυξημένη Αξιοπιστία:** Η απουσία κινητών μηχανικών μερών ενισχύει την αξιοπιστία και μειώνει τις ανάγκες συντήρησης.

- **Λειτουργία σε Χαμηλές Θερμοκρασίες:** Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ ανταποκρίνονται γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου.

Αν και οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν αυτά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα:

- **Υψηλό Κόστος:** Το κόστος παραγωγής και εγκατάστασης κυψελών καυσίμου είναι ακόμα υψηλό. Επιπλέον, το κόστος των τεχνολογιών που απαιτούνται για τη λειτουργία τους, όπως οι ηλεκτρολύτες και οι καταλύτες, συμβάλλει στην αύξηση της συνολικής τιμής.
- **Δυσκολία Αποθήκευσης Υδρογόνου:** Το υδρογόνο είναι ένα ελαφρύ αέριο και η αποθήκευσή του απαιτεί υψηλές πιέσεις ή κρυογενική ψύξη, κάτι που δημιουργεί τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις.
- **Βαρύτητα και Όγκος Συστήματος:** Τα συστήματα κυψελών καυσίμου, όταν συνυπολογίζεται ο συνολικός εξοπλισμός τους, μπορεί να είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που παράγουν παρόμοια ποσότητα ενέργειας.

Σε σχέση με τις μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- **Συνεχής Παραγωγή Ενέργειας:** Οι κυψέλες καυσίμου συνεχίζουν να παράγουν ενέργεια όσο έχουν πρόσβαση σε υδρογόνο και οξυγόνο, σε αντίθεση με τις μπαταρίες που χρειάζονται περιοδική φόρτιση.
- **Ελαφρύτεροι Συσκευές:** Τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι συνήθως πιο ελαφριά από τα αντίστοιχα συστήματα με μπαταρίες.
- **Μεγαλύτερη Διάρκεια Ζωής:** Οι κυψέλες καυσίμου έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τις μπαταρίες.

Οι κυριότεροι τύποι κυψελών καυσίμου περιλαμβάνουν:

1. **Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC):** Χρησιμοποιεί αλκαλικό διάλυμα ως ηλεκτρολύτη.
2. **Κυψέλη Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC):** Χρησιμοποιεί μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων ως ηλεκτρολύτη.

3. **Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC):** Χρησιμοποιεί φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη.
4. **Κυψέλη Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC):** Χρησιμοποιεί τήγμα ανθρακικών αλάτων ως ηλεκτρολύτη.
5. **Κυψέλη Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC):** Χρησιμοποιεί στερεά οξείδια ως ηλεκτρολύτη.

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς της και της δυνατότητάς της να χρησιμοποιείται σε αυτόνομα συστήματα ενέργειας, όπως εξετάζεται στη διπλωματική εργασία, παρά το υψηλό κόστος της συγκριτικά με τις γεννήτριες ντίζελ.

Αυτή η τεχνολογία, αν και έχει ακόμα προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος και την αποθήκευση υδρογόνου, αναδεικνύεται ως μία βιώσιμη λύση για τη μετάβαση σε καθαρές και αποτελεσματικές πηγές ενέργειας.

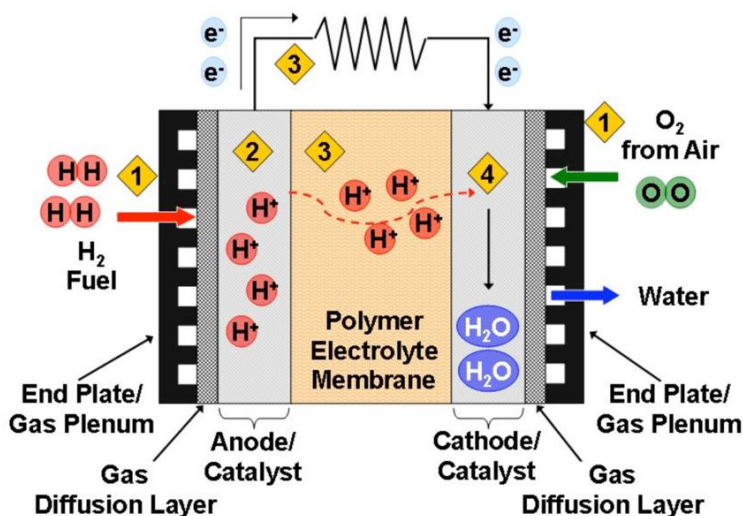
### 3.3 Είδη και τεχνολογίες κυψελών[19][23]

Οι κυψέλες καυσίμου αναγνωρίζονται ως μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για την παραγωγή καθαρής και αποδοτικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας χημικές αντιδράσεις για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος με ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Αυτές οι συσκευές χωρίζονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Δύο από τους σημαντικότερους τύπους είναι οι κυψέλες πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEMFC) και οι κυψέλες στερεού οξειδίου (SOFC). Κάθε τύπος προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και αντιμετωπίζει διαφορετικές προκλήσεις, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και τις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί. Στην ανάλυση που ακολουθεί, εξετάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των δύο τύπων κυψελών καυσίμου, εστιάζοντας στις τεχνολογικές και οικονομικές πτυχές τους.

## Πολυμερούς Ηλεκτρολυτικής Μεμβράνης - Κυψέλες Καυσίμου (PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης (PEMFC) λειτουργούν με υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό, χωρίς την ανάγκη για διαβρωτικά ρευστά όπως συμβαίνει σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Το υδρογόνο παρέχεται συνήθως μέσω αποθηκευτικών δεξαμενών. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των PEMFC είναι ότι λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας γρήγορη εκκίνηση και μειώνοντας έτσι τη φθορά και τη βλάβη των εξαρτημάτων, κάτι που ενισχύει τη διάρκεια ζωής της κυψέλης.

Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα των PEMFC είναι η χρήση λευκόχρυσου ως καταλύτη, ο οποίος είναι ακριβός, αυξάνοντας το συνολικό κόστος της κυψέλης. Επίσης, οι κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης είναι ευαίσθητες σε ακαθαρσίες στο καύσιμο, ειδικότερα στο μονοξείδιο του άνθρακα, γεγονός που ενδέχεται να καταστήσει απαραίτητη την αναζήτηση εναλλακτικών υλικών για την καταλυτική αντίδραση.



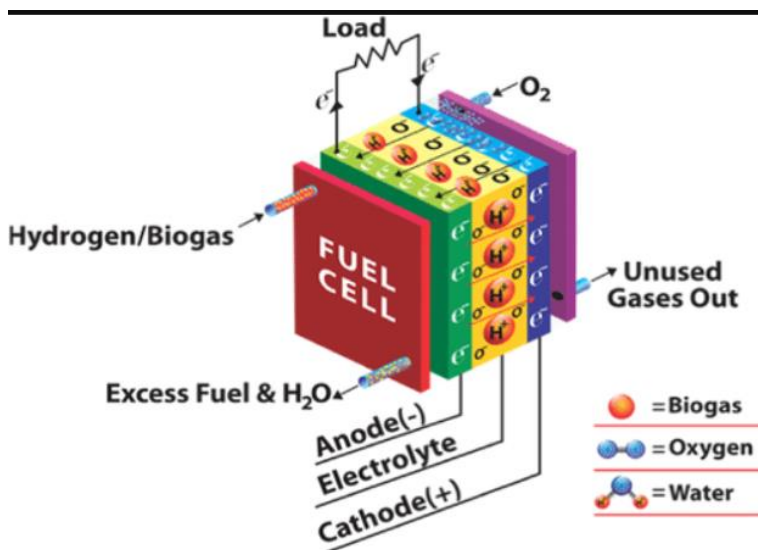
Εικόνα 3. 2 Σχηματικό διάγραμμα PEM κυψέλης

## Στερεού Οξειδίου - Κυψέλες Καυσίμου (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με άλλες κυψέλες καυσίμου, κυρίως λόγω της χρήσης στερεού ηλεκτρολύτη. Αυτό

επιτρέπει την κατασκευή τους χωρίς τις περιοριστικές απαιτήσεις άλλων τύπων κυψελών καυσίμου. Οι SOFC λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, περίπου 1000°C, γεγονός που τους επιτρέπει να παράγουν ατμό για την κίνηση τουρμπίνων και την παραγωγή επιπρόσθετης ενέργειας.

Η χρήση λευκόχρυσου ως καταλύτη στις SOFC μπορεί να μειωθεί ή και να αποφευχθεί, γεγονός που συντελεί στη μείωση του κόστους των κυψελών. Ωστόσο, η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες ενέχει κινδύνους για την ασφάλεια του προσωπικού και απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο εκκίνησης. Το κόστος που αποφεύγεται από την περιορισμένη χρήση λευκόχρυσου αντισταθμίζεται με την ανάγκη για θερμική μόνωση, η οποία διατηρεί τη θερμότητα και προστατεύει τους εργαζόμενους.



Εικόνα 3. 3 Σχηματικό διάγραμμα κυψέλης στερεού οξειδίου

### 3.4 Αποθήκευση υδρογόνου[26]

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι μια κρίσιμη πτυχή της τεχνολογίας υδρογόνου, καθώς επηρεάζει την αποδοτικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων που το χρησιμοποιούν. Το υδρογόνο, αν και το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν, συνήθως δε βρίσκεται σε ελεύθερη μορφή

και απαιτεί ειδικές τεχνικές για να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου:

### 1. Αποθήκευση σε Υγρή Μορφή

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή, όπου ψύχεται στους  $-253^{\circ}\text{C}$  για να διατηρηθεί σε υγρή κατάσταση. Η αποθήκευση σε υγρή μορφή επιτρέπει υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τη συμπιεσμένη μορφή. Ωστόσο, η διαδικασία ψύξης απαιτεί σημαντική ενέργεια και οι δεξαμενές υγρού υδρογόνου χρειάζονται ισχυρή θερμομονωτική προστασία για να διατηρούν τη χαμηλή θερμοκρασία.

### 2. Αποθήκευση υπό Υψηλή Πίεση

Σε αυτή την προσέγγιση, το υδρογόνο συμπιέζεται σε υψηλές πιέσεις (συνήθως έως 700 bar) για να μειωθεί ο όγκος που καταλαμβάνει. Η συμπίεση του υδρογόνου επιτρέπει τη δημιουργία πιο συμπαγών και εύχρηστων δεξαμενών σε σχέση με την υγρή μορφή. Ωστόσο, η διαδικασία συμπίεσης απαιτεί ενέργεια και οι δεξαμενές πρέπει να είναι κατασκευασμένες από ανθεκτικά υλικά για να αντέχουν τις υψηλές πιέσεις.

### 3. Αποθήκευση σε Στερεά Υλικά

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την αποθήκευση του υδρογόνου σε στερεά υλικά, όπως μέταλλα ή χημικές ενώσεις, μέσω απορρόφησης ή χημικής αντίδρασης. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι στερεάς αποθήκευσης:

- **Μετεωριστές:** Ειδικά κράματα μετάλλων που απορροφούν υδρογόνο και το απελευθερώνουν υπό συγκεκριμένες συνθήκες.
- **Χημικές Ενώσεις:** Υδρογόνο που δεσμεύεται σε χημικές ενώσεις, όπως αμμίδιο του υδρογόνου ή υδρογονοποιημένα οργανικά υλικά, και απελευθερώνεται μέσω χημικών αντιδράσεων.

Η αποθήκευση σε στερεά υλικά είναι υπό ανάπτυξη και προσφέρει ελπιδοφόρες προοπτικές για μείωση του όγκου και της πίεσης που απαιτείται για την αποθήκευση υδρογόνου. Ωστόσο, οι

τρέχουσες τεχνολογίες έχουν περιορισμούς σχετικά με τη θερμοκρασία λειτουργίας και την ταχύτητα απελευθέρωσης του υδρογόνου.

### Προκλήσεις και Επιλύσεις

Η αποθήκευση υδρογόνου αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις, όπως:

- **Κόστος:** Οι τεχνολογίες αποθήκευσης, ειδικά για υγρό και υψηλής πίεσης υδρογόνο, ενδέχεται να είναι δαπανηρές, τόσο για κατασκευή όσο και για συντήρηση.
- **Ασφάλεια:** Οι υψηλές πιέσεις και οι χαμηλές θερμοκρασίες απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό και υλικά που να αντέχουν σε αυτές τις συνθήκες.
- **Ενεργειακή Απόδοση:** Η αποθήκευση και η απελευθέρωση του υδρογόνου απαιτούν ενέργεια, η οποία επηρεάζει την συνολική ενεργειακή απόδοση των συστημάτων υδρογόνου.

## 4. Μικροδίκτυα και Διεσπαρμένη Παραγωγή [9][12][14]

### 4.1 Τρόπος λειτουργίας

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων είναι ο συντονισμένος έλεγχος, που διασφαλίζει πως δεν επιβαρύνουν το κεντρικό δίκτυο. Επίσης, μπορούν να λειτουργούν σε διπλή λειτουργία, δηλαδή να συνδέονται και να αποσυνδέονται από το κεντρικό δίκτυο ανάλογα με τις απαιτήσεις τους, βάσει των σημάτων που λαμβάνουν από το δικό τους σύστημα ελέγχου, διατηρώντας έτσι αδιάλειπτη λειτουργία. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως τα μικροδίκτυα δεν απαιτούν σήματα από το σύστημα ελέγχου του κεντρικού δικτύου, αποφεύγοντας έτσι την επιβάρυνσή του.

Αυτή η δυνατότητα απαιτεί προηγμένες υποδομές προστασίας, ελέγχου και τηλεπικοινωνιών για να μπορούν να απομονώνουν το μικροδίκτυο και να προσφέρουν σταθερή και αυτόνομη λειτουργία. Η συνεχής πρόοδος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και των ελεγκτών για πηγές

διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας καθιστά αυτή τη λειτουργία όλο και πιο τεχνικά και οικονομικά εφικτή.

Οι πηγές ενέργειας σε μικροδίκτυα μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Ανεμογεννήτριες
- Φωτοβολταϊκά
- Κυψέλες καυσίμου
- Βιομάζα
- Γεννήτριες Diesel
- Γεννήτριες φυσικού αερίου
- Συμπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού χρήσης
- Γεωθερμία
- Ηλιοθερμία

Τα συνδεδεμένα φορτία μπορούν να είναι κρίσιμα ή μη κρίσιμα. Τα κρίσιμα φορτία απαιτούν αξιόπιστη πηγή ενέργειας και αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας ισχύος, ενώ συνήθως υποστηρίζονται από τις μικροπηγές λόγω της ανάγκης για συνεχή παροχή ενεργειακού εφοδιασμού. Τα μη κρίσιμα φορτία μπορούν να απορριφθούν κατά τη διάρκεια εκτάκτων συνθηκών και όπως ορίζεται από τις πολιτικές λειτουργίας του μικροδικτύου.

Η ενδιάμεση συσκευή αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει αντιστροφέα, συστοιχία μπαταριών, υπερπυκνωτές ή σφονδύλους. Αυτή η συσκευή αποθήκευσης στο μικροδίκτυο είναι αντίστοιχη με τη στρεφόμενη εφεδρεία των μεγάλων γεννητριών στο συμβατικό δίκτυο, διασφαλίζοντας την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια απότομων αλλαγών στο φορτίο ή στην παραγωγή.

Οι μονάδες αποθήκευσης σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Μπαταρίες μολύβδου οξέως βαθιάς εκφόρτισης
- Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (CAES), όπου ο συμπιεσμένος αέρας κινεί στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Σφόνδylους, όπου μέσω κινητήρα-γεννήτριας γίνεται αποθήκευση κινητικής ενέργειας

- Υπεραγώγιμες διατάξεις, που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο ή υγρό άζωτο
- Αντλησιοταμίευση, όπου η ενέργεια από αιολικά πάρκα και υβριδικά συστήματα χρησιμοποιείται για την άντληση νερού που παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω υδροστροβίλου

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως μια ελεγχόμενη οντότητα από το ενεργειακό σύστημα, εξυπηρετώντας μεμονωμένα φορτία ή λειτουργώντας ως υποστηρικτική δραστηριότητα του δικτύου. Για τον καταναλωτή, το μικροδίκτυο καλύπτει τις ανάγκες του σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, βελτιώνοντας την τοπική αξιοπιστία, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ενισχύοντας την ποιότητα ισχύος.

Υπό κανονικές συνθήκες, τα μικροδίκτυα συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο, αλλά μπορούν να απομονωθούν αυτόματα σε μεμονωμένες περιπτώσεις. Με τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα, μπορούν να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες στο κεντρικό δίκτυο, αξιοποιώντας την υποδομή των συστημάτων ελέγχου τους.

## 4.2 Τρόπος λειτουργίας

Στο υβριδικό σύστημα των μικροδικτύων, ενσωματώνονται ποικίλες μονάδες που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες και οι ανεμογεννήτριες. Συχνά, προστίθεται μια γεννήτρια diesel ως εφεδρεία. Στο παρελθόν, ήταν σύνηθες να συνδέονται τα μεμονωμένα συστήματα στην πλευρά DC του συστήματος. Στην DC σύζευξη, τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες φορτίζουν τις μπαταρίες μέσω κατάλληλων ρυθμιστών, ενώ η αποθηκευμένη ενέργεια αντλείται για άμεση τροφοδότηση φορτίων DC ή μέσω αντιστροφέων για τις AC καταναλώσεις.

Η σύζευξη AC αποτελεί την τεχνολογία του μέλλοντος για συστήματα τροφοδοσίας σε απομακρυσμένες περιοχές, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Η διαμόρφωση των μικροδικτύων με σύζευξη στην πλευρά AC περιλαμβάνει:

- Ένα απλό αντιστροφέα δικτύου χωρίς μπαταρίες που μετατρέπει το DC ρεύμα των ανανεώσιμων πηγών σε AC.
- Έναν αντιστροφέα μπαταριών που διαχειρίζεται την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών, σχηματίζοντας το AC δίκτυο.
- Ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές που κατευθύνεται προς τις μπαταρίες μέσω δύο διαδοχικών μετατροπών DC/AC και AC/DC.

Η Εικόνα 3.2 παρουσιάζει ένα αυτόνομο σύστημα με σύζευξη DC, όπου η φωτοβολταϊκή πηγή φορτίζει τη συστοιχία μπαταριών μέσω ρυθμιστή MPPT και ο αντιστροφέας διαχειρίζεται τις μπαταρίες και την εφεδρική γεννήτρια, καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες των φορτίων μέσω της μετατροπής DC/AC.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της σύζευξης AC περιλαμβάνουν την επεκτασιμότητα και την ευκολία διαμόρφωσης λόγω της χρήσης τυποποιημένου εξοπλισμού, επιτρέποντας την απλή σύνδεση κάθε συστήματος (πηγές, φορτία, μπαταρίες) σε ένα δίκτυο AC. Αυτό διευκολύνει την εφαρμογή καθιερωμένων προτύπων και την επέκταση του συστήματος, αντιμετωπίζοντας τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες χωρίς υπέρ- ή υποδιαστασιολόγηση.

Επιπλέον, τα μικροδίκτυα μπορούν να συνδέονται και να λειτουργούν με βάση κοινές παραμέτρους, επιτρέποντας τη διαμόρφωση μεγαλύτερων συστημάτων σε επίπεδο κοινότητας και ενισχύοντας την αξιοπιστία της κάλυψης των φορτίων. Τα μικροδίκτυα AC έχουν επίσης τη δυνατότητα σύνδεσης με το δημόσιο δίκτυο οποιαδήποτε στιγμή, διασφαλίζοντας την τροφοδότηση φορτίων σε περιπτώσεις διακοπής της δημόσιας παροχής.

Παρότι τα μικροδίκτυα AC έχουν λίγο μικρότερη απόδοση λόγω των μετατροπών από DC σε AC και αντίστροφα, αυτό μπορεί να επηρεάσει συστήματα όπου η κατανάλωση και η παραγωγή συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους. Η μεγαλύτερη πρόκληση στα μικροδίκτυα AC είναι ο συντονισμός των αντιστροφέων μπαταριών, οι οποίοι διαμορφώνουν το δίκτυο AC, ρυθμίζοντας την τάση και τη συχνότητα.

Η Εικόνα 3.3 παρουσιάζει ένα σύστημα σύζευξης AC με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο, όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα αποδίδει την ενέργεια που παράγει στο δίκτυο AC, ενώ οι μπαταρίες

συνδέονται στον αντιστροφέα/φορτιστή και το πλεονάζον μέρος της ενέργειας διοχετεύεται στο δημόσιο δίκτυο.

Σε συστήματα με πολλούς κεντρικούς αντιστροφείς μπαταριών, απαιτείται ακριβής συγχρονισμός συχνότητας και φάσης, που επιτυγχάνεται μέσω επικοινωνίας master/slave ή με τη μέθοδο drooping που επιτρέπει τη multi-master λειτουργία.

Η σύνδεση συμβατικής γεννήτριας σε μικροδίκτυο AC απαιτεί διατάξεις ελέγχου υψηλού κόστους, με τη γεννήτρια να ελέγχεται από τον αντιστροφέα μπαταριών. Οι αντιστροφείς μετατρέπουν την DC ισχύ σε AC, καθιστώντας τους κατάλληλους για διασύνδεση με το δημόσιο δίκτυο ή για αυτόνομη λειτουργία, καθώς και για χρήση με μέσα αποθήκευσης ενέργειας και πηγές ενέργειας, διαφοροποιούμενοι ανάλογα με την εφαρμογή, την ονομαστική ισχύ, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και την απόδοση.

### **4.3 Λειτουργία και Έλεγχος Μικροδικτύου.**

Στα μικροδίκτυα, τα συστατικά στοιχεία ελέγχονται με μία αποκεντρωμένη διαδικασία λήψης αποφάσεων, διασφαλίζοντας την ισορροπία μεταξύ ζήτησης και προσφοράς ενέργειας από τις διάφορες πηγές και το δίκτυο. Ο ιεραρχικός έλεγχος χρησιμοποιεί έναν κεντρικό ελεγκτή, τον Microgrid Central Controller (MGCC), ο οποίος επιβλέπει το σύστημα ελέγχου και το σύστημα προστασίας του μικροδικτύου μέσω των ελεγκτών μικροπηγής και φορτίου.

#### **Βασικές Λειτουργίες του MGCC**

Ο MGCC επιτελεί σημαντικές λειτουργίες, όπως:

- Διατήρηση της ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας του μικροδικτύου.
- Παροχή τιμών ισχύος και τάσης λειτουργίας (set points) στους μικροελεγκτές.
- Διασφάλιση κάλυψης θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων.
- Διαχείριση ανταλλαγών ισχύος και συνεργασίας με το δίκτυο μεταφοράς.
- Ελαχιστοποίηση εκπομπών ρύπων και απωλειών συστήματος, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα των μικροπηγών.

- Προγραμματισμός οικονομικής παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.
- Στρατηγικές ελέγχου για νησιδοποίηση και επανασύνδεση του μικροδικτύου.
- Διατήρηση συχνότητας και τάσης σε αποδεκτά επίπεδα για τα ηλεκτρικά φορτία.

Ο κεντρικός ελεγκτής είναι σχεδιασμένος για αυτόματη λειτουργία, αλλά επιτρέπει και χειροκίνητη ανθρώπινη παρέμβαση όταν χρειάζεται.

### **Λειτουργία Διασυνδεδεμένου Μικροδικτύου**

Όταν το μικροδίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, λειτουργεί είτε ως ελεγχόμενο φορτίο είτε ως πηγή, χωρίς να ρυθμίζει ενεργά την τάση, καθώς αυτή ρυθμίζεται από το δίκτυο. Οι αρμονικές και το συνεχές ρεύμα που διοχετεύει στο δίκτυο πρέπει να είναι εντός απαιτούμενων επιπέδων. Το μικροδίκτυο πρέπει να αποσυνδέεται σε περίπτωση ανώμαλης κατάστασης στο δίκτυο, μεταβαίνοντας σε λειτουργία νησιδοποίησης.

### **Διαχείριση Κατά τη Νησιδοποίηση**

Κατά τη λειτουργία νησιδοποίησης, το μικροδίκτυο αντιμετωπίζει τις ακόλουθες προκλήσεις:

#### **1. Διαχείριση Τάσης και Συχνότητας**

Όταν το μικροδίκτυο είναι αυτόνομο, μία ή περισσότερες πρωτογενείς πηγές ενέργειας πρέπει να ρυθμίζουν την τάση και τη συχνότητα, διαφορετικά το μικροδίκτυο θα καταρρεύσει. Εάν η συχνότητα πέσει χαμηλά, κάποια φορτία μπορεί να απορριφθούν για να επιταχυνθεί η ανάκαμψή της (Εικόνα 3.5).

#### **2. Ισορροπία Προσφοράς και Ζήτησης**

Εάν το μικροδίκτυο εξάγει ή εισάγει ρεύμα πριν την αποσύνδεση, δευτερεύουσες ενέργειες ελέγχου πρέπει να εφαρμοστούν για την εξισορρόπηση της παραγωγής και κατανάλωσης. Μέτρα διαχείρισης της ζήτησης και επαρκής αποθήκευση ενέργειας είναι απαραίτητα για την αρχική ισορροπία μετά από αλλαγές στο φορτίο ή την παραγωγή.

### **3. Ποιότητα Ισχύος**

Το μικροδίκτυο πρέπει να διατηρεί αποδεκτή ποιότητα ισχύος σε αυτόνομη λειτουργία, παρέχοντας άεργο ισχύ για τον περιορισμό της βύθισης τάσης. Η αποθήκευση ενέργειας πρέπει να αντιδρά γρήγορα σε αποκλίσεις συχνότητας και τάσης (Εικόνα 3.6).

### **4. Θέματα Μικροπηγών Ενέργειας**

Οι μικροπηγές δεν έχουν αδράνεια όπως οι παραδοσιακές πηγές στο δίκτυο και συνήθως έχουν αργή απόκριση στις αλλαγές. Η διασύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπει στις μικροπηγές να ανταποκρίνονται γρήγορα σε απότομες αλλαγές.

### **5. Επικοινωνία Μεταξύ Εξαρτημάτων**

Η επικοινωνιακή υποδομή μεταξύ των εξαρτημάτων του μικροδικτύου είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ισορροπίας και της ακεραιότητας του μικροδικτύου. Η αρχιτεκτονική Plug and play επιτρέπει στις πηγές να βασίζονται σε τοπικά διαθέσιμες πληροφορίες για τον έλεγχο της παραγόμενης ενέργειας. Οι μικροπηγές και οι συσκευές αποθήκευσης πρέπει να συνεργάζονται για να διατηρήσουν την ισορροπία του μικροδικτύου.

Με αυτές τις αρχές, το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά τόσο σε συνδεδεμένη όσο και σε αυτόνομη λειτουργία, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας.

## **Μέρος Β. Μοντελοποίηση υπό εξέταση συστήματος.**

### **5.Περιγραφή λογισμικού HOMER [16][17][20][29]**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται συνοπτική παρουσίαση του λογισμικού HOMER, το οποίο αποτέλεσε το βασικό εργαλείο της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και μετατροπής υδρογόνου.

Το λογισμικό HOMER, που χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση μικρής κλίμακας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων

Πηγών Ενέργειας των ΗΠΑ (NREL). Σκοπός του είναι να διευκολύνει το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων και να επιτρέψει τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες εφαρμογές. Το HOMER προσομοιώνει τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και υπολογίζει το συνολικό κόστος κύκλου ζωής του, δηλαδή το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Το λογισμικό αυτό δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να συγκρίνουν διάφορες σχεδιαστικές επιλογές τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική άποψη. Επίσης, συμβάλλει στην κατανόηση των συστημάτων και στην ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της αβεβαιότητας ή των αλλαγών στις εισερχόμενες μεταβλητές.

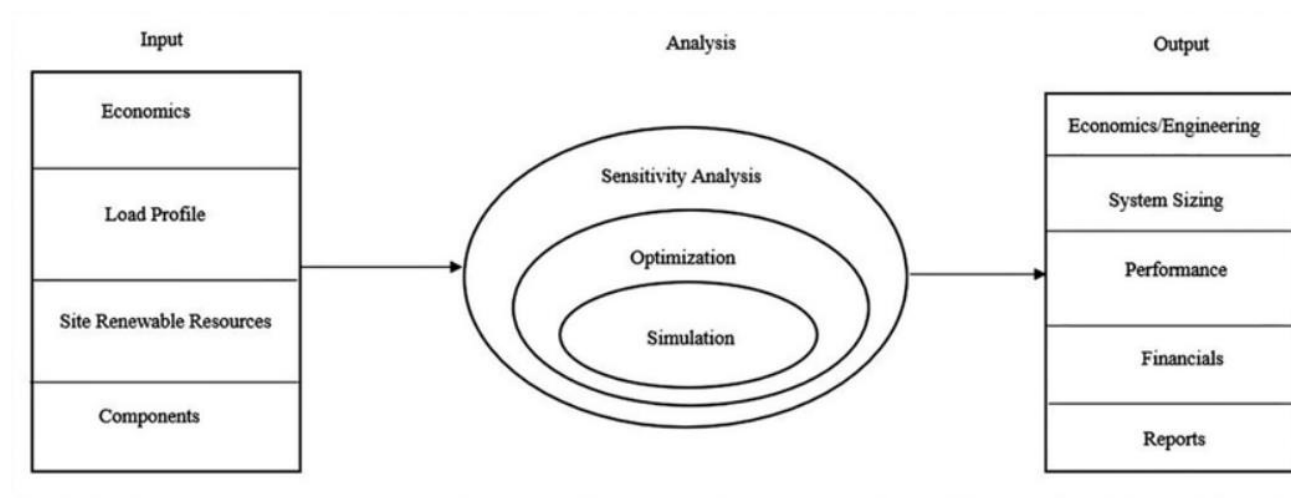
Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας παράγει ηλεκτρική ενέργεια, και ενδεχομένως θερμότητα, για να καλύψει ένα τοπικό φορτίο. Μπορεί να περιλαμβάνει ένα μείγμα παραγωγικών και αποθηκευτικών μονάδων ενέργειας και μπορεί να είναι είτε συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε αυτόνομο. Το HOMER μπορεί να προσομοιώσει διάφορους τύπους συστημάτων που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μικρά υδροηλεκτρικά έργα, γεννήτριες ντίζελ, γεννήτριες βιομάζας, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες και συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου.

Το HOMER εκτελεί τρεις κύριες λειτουργίες: προσομοίωση, βελτιστοποίηση και ανάλυση ευαισθησίας. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, το HOMER αναπαριστά τη λειτουργία ενός συστήματος χρησιμοποιώντας ενεργειακούς υπολογισμούς για κάθε μία από τις 8760 ώρες ενός έτους. Σε κάθε ώρα, συγκρίνει την ζήτηση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με την αντίστοιχη παραγωγή. Για συστήματα που περιλαμβάνουν μπαταρίες ή γεννήτριες, αποφασίζει πώς θα ενεργοποιηθούν οι γεννήτριες και πώς θα φορτιστούν ή εκφορτιστούν οι μπαταρίες. Αυτοί οι υπολογισμοί ενεργειακής ισορροπίας εκτελούνται για κάθε συνδυασμό συστημάτων και καθορίζουν αν ένας συνδυασμός είναι εφικτός και το κόστος του κύκλου ζωής του.

Μετά την προσομοίωση, ακολουθεί η βελτιστοποίηση όπου το HOMER παρουσιάζει έναν κατάλογο συνδυασμών συστημάτων ταξινομημένων με βάση το καθαρό παρόν κόστος. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση των επιλογών και την επιλογή του βέλτιστου συστήματος. Σημειώνεται ότι η ταξινόμηση των συστημάτων είναι πλήρης, περιλαμβάνοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς εφικτών συστημάτων.

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται όταν ορίζονται μεταβλητές ευαισθησίας ως εισαγόμενα δεδομένα, επιτρέποντας στο HOMER να επαναλάβει τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε τιμή της μεταβλητής. Για παράδειγμα, αν η ταχύτητα του ανέμου καθοριστεί ως μεταβλητή ευαισθησίας, το HOMER θα προσομοιώσει όλους τους συνδυασμούς συστημάτων για το εύρος των τιμών ταχύτητας ανέμου που έχει ορίσει ο χρήστης.

Το λογισμικό HOMER μπορεί να διαμορφώσει διάφορους τύπους components και τους συνδυασμούς τους, όπως ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά έργα, φωτοβολταϊκά πάνελ, μετατροπείς, μονάδες ηλεκτρόλυσης, μπαταρίες, δεξαμενές υδρογόνου, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και γεννήτριες.



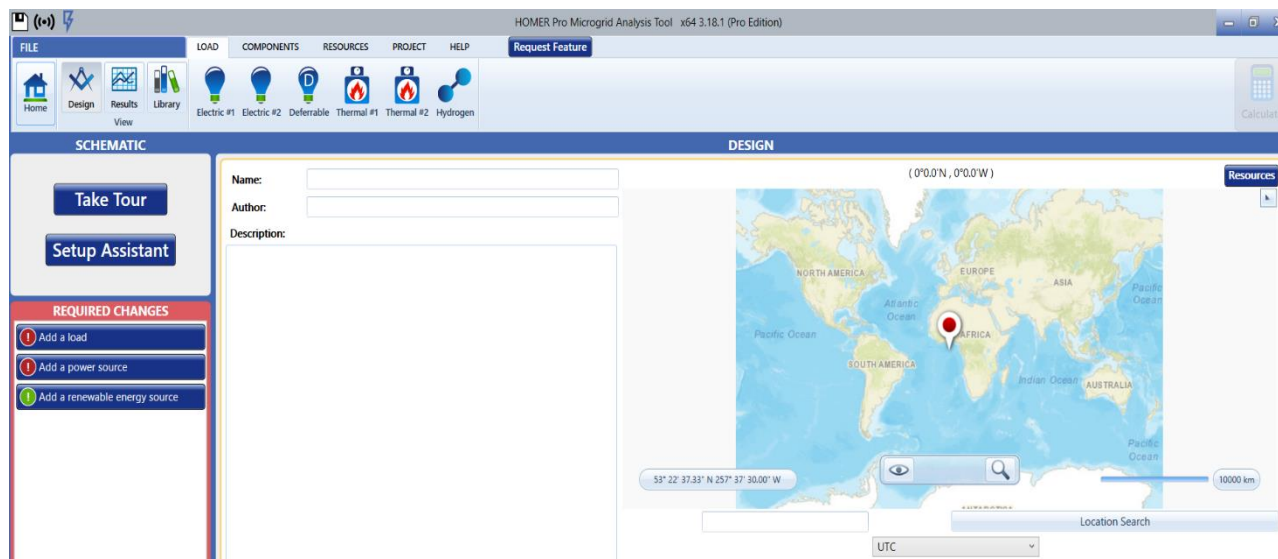
Εικόνα 5. 1 Διάγραμμα λειτουργίας λογισμικού HOMER

## 5.1 Δημιουργία νέου αρχείου HOMER

Το περιβάλλον του λογισμικού HOMER βασίζεται στις ακόλουθες βασικές καρτέλες Design, Results, Load, Components, Resources και Project. Κάθε μία από τις αυτές διαθέτει υποκαρτέλες που χρησιμεύουν στο σχεδιασμό, την ανάλυση και την βελτιστοποίηση του εκάστοτε συστήματος.

Αρχικά, με την εκκίνηση του προγράμματος ο χρήστης βρίσκεται στην καρτέλα DESIGN όπου καλείται να επιλέξει την τοποθεσία στην οποία θα βρίσκεται το σύστημα που επιθυμεί να προσομοιώσει. Η επιλογή της τοποθεσίας μπορεί να γίνει είτε με κύλιση στο χάρτη είτε με

εισαγωγή συντεταγμένων στην αναζήτηση. Ο καθορισμός της τοποθεσίας είναι σημαντικός καθώς μέσα από δορυφόρους το HOMER αντλεί πληροφορίες που χρειάζονται στην συνέχεια για την μοντελοποίηση του συστήματος όπως η θερμοκρασία της περιοχής και η ηλιοφάνεια. Η εικόνα 5.1.1 που ακολουθεί απεικονίζει την αρχική σελίδα του HOMER όπου γίνεται η επιλογή της τοποθεσίας.



Εικόνα 5.1. 1 Αρχική σελίδα -Επιλογή τοποθεσίας

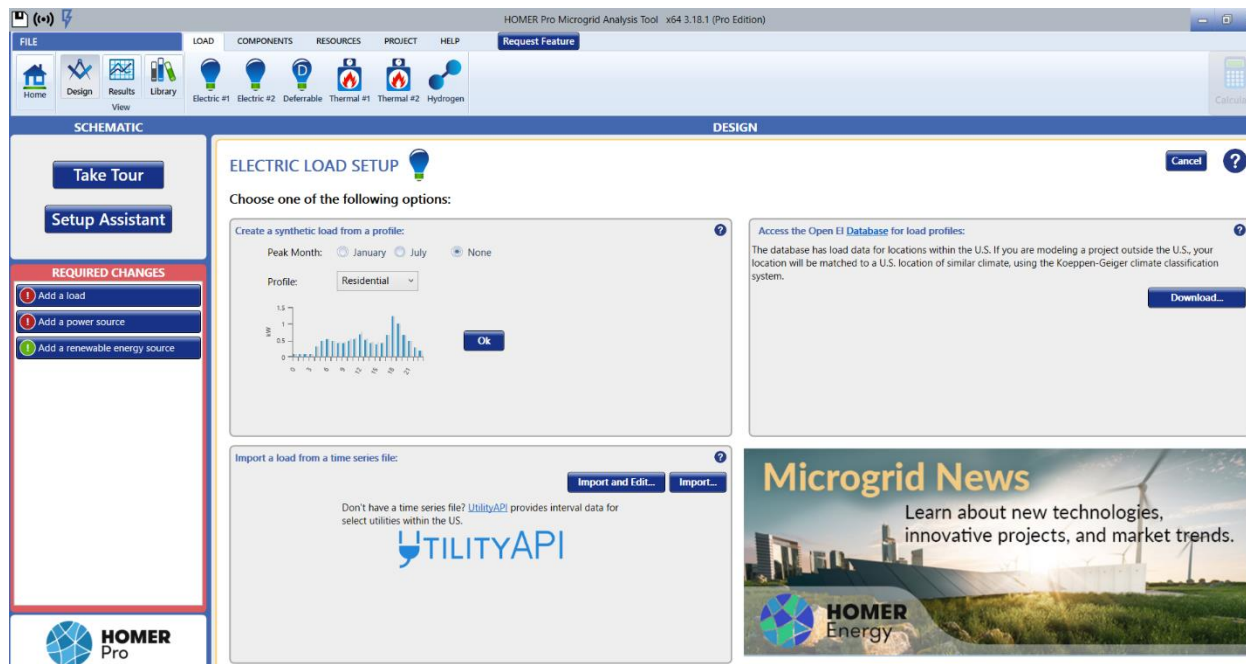
## 5.2 Καθορισμός φορτίου.

Στη συνέχεια ο χρήστης επιλέγοντας την καρτέλα LOAD είναι σε θέση να καθορίσει το φορτίο του συστήματος που καλείται να προσομοιώσει. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.2, το HOMER υποστηρίζει τις ακόλουθες κατηγορίες φορτίων:

- Πρωτεύον, δευτερεύον και αναβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο.
- Πρωτεύον και δευτερεύον θερμικό φορτίου.
- Φορτίο υδρογόνου.

Για τον καθορισμό κάθε ενός από τα παραπάνω φορτία, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα είτε να επιλέξει την καρτέλα Import και να εισάγει αρχείο με 8760 τιμές φορτίου που αντιστοιχούν σε κάθε μια ώρα του έτους είτε να εισάγει χειροκίνητα 24 τιμές φορτίου, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε μία ώρα μιας μέσης ημέρας κάθε μήνα. Η εικόνα 5.2.1 που ακολουθεί απεικονίζει την

επιλογή φορτίου στο λογισμικό στην οποία διακρίνονται οι επιλογές που περιεγράφηκαν παραπάνω.



Εικόνα 5.2. 1 Επιλογή φορτίου

### 5.3 Σχεδίαση συστήματος- εισαγωγή Components.

Σε αυτό το σημείο και αφού έχει καθοριστεί το φορτίο, θα πρέπει να σχεδιαστεί το σύστημα. Για τον σχεδιασμό ο χρήστης επιλέγει την καρτέλα COMPONENTS και έπειτα ανάλογα με το σύστημα που θέλει να δημιουργήσει έχει την δυνατότητα να επιλέξει τον αντίστοιχο εξοπλισμό. Επιλέγοντας κάθε ένα από τα διαθέσιμα components ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις απαιτούμενες παραμέτρους για να είναι εφικτό να γίνει η μοντελοποίηση. Ακολουθεί μια περιγραφή των βασικών παραμέτρων που μπορούν να ρυθμιστούν σε κάθε component:

#### 1. Ανεμογεννήτριες (Wind Turbines)

- **Καθορισμός Ισχύος:** Εισάγονται τα χαρακτηριστικά ισχύος της ανεμογεννήτριας.
- **Καμπύλη Παραγωγής:** Καθορίζεται η καμπύλη παραγωγής ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου.

- ο **Κόστος:** Καθορίζεται το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας.

## 2. Φωτοβολταϊκά (PV Panels)

- ο **Ισχύς και Απόδοση:** Εισάγονται οι τιμές ισχύος και απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάνελ.
- ο **Κόστος:** Καθορίζεται το αρχικό κόστος, καθώς και τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας.
- ο **Καμπύλη Παραγωγής:** Προσαρμογή της παραγωγής ανάλογα με την ηλιοφάνεια και άλλους παράγοντες.

## 3. Γεννήτριες (Generators)

- ο **Τύπος Καυσίμου:** Καθορίζεται ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιείται (ντίζελ, βιομάζα κ.λπ.).
- ο **Ισχύς:** Καθορίζεται η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας.
- ο **Κατανάλωση Καυσίμου:** Καθορίζονται τα χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου.

## 4. Συστήματα Αποθήκευσης (Storage Systems)

- ο **Μπαταρίες (Batteries):**
  - **Χωρητικότητα:** Καθορίζεται η χωρητικότητα των μπαταριών σε kWh.
  - **Αποδοτικότητα:** Καθορίζεται η αποδοτικότητα φόρτισης και εκφόρτισης.
  - **Κόστος:** Καθορίζονται τα κόστη εγκατάστασης και αντικατάστασης.
- ο **Αποθήκευση Υδρογόνου (Hydrogen Storage):**
  - **Χωρητικότητα:** Καθορίζεται η χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου.
  - **Σύστημα Ηλεκτρόλυσης:** Καθορίζονται οι παράμετροι για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης που παράγει υδρογόνο από ηλεκτρική ενέργεια.

## 5. Μετατροπείς (Converters)

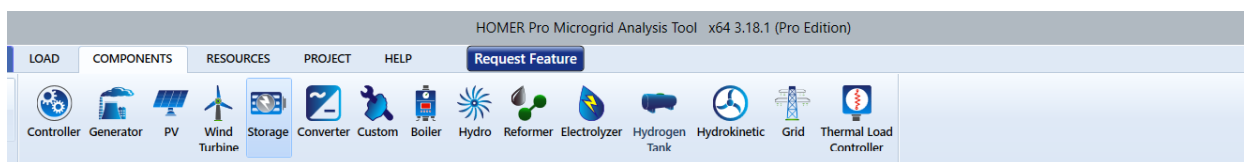
- ο **Ισχύς:** Καθορίζεται η ισχύς των μετατροπέων (DC σε AC και αντίστροφα).
- ο **Αποδοτικότητα:** Καθορίζεται η αποδοτικότητα των μετατροπέων.
- ο **Κόστος:** Καθορίζεται το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

## 6. Άλλα Components

- ο **Μικρογεννήτριες (Microturbines)**
- ο **Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells)**
- ο **Μικρά Υδροηλεκτρικά (Small Hydropower)**

Η καρτέλα **Components** του HOMER είναι ουσιαστική για τη δημιουργία ακριβών και αποδοτικών μοντέλων ενεργειακών συστημάτων, καθώς επιτρέπει την λεπτομερή διαμόρφωση κάθε στοιχείου του συστήματος.

Ο καθορισμός των παραμέτρων για κάθε component του συστήματος της παρούσας εργασίας θα περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6, όπου παρουσιάζεται βήμα βήμα ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση του συστήματος.



Εικόνα 5.3.1 Καρτέλα Components

## 5.4 Εισαγωγή πόρων συστήματος.

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του συστήματος και έγινε η προσθήκη των παραμέτρων του εξοπλισμού θα πρέπει να γίνει καθορισμός των ενεργειακών πόρων που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα στην καρτέλα **RESOURCES** ο χρήστης καθορίζει τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση και τον υπολογισμό του ενεργειακού συστήματος. Στην καρτέλα αυτή μπορούν να διαμορφωθούν διάφορα στοιχεία όπως ηλιακοί συλλέκτες, ανεμογεννήτριες, βιομάζα και άλλες πηγές ενέργειας. Οι κύριες λειτουργίες και ρυθμίσεις περιλαμβάνουν:

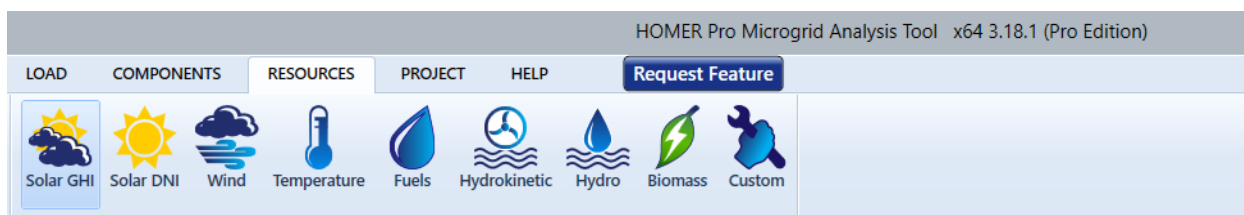
### 1. Ορισμός Πόρων:

- Καθορισμός των διαφορετικών πηγών ενέργειας που θα συμπεριληφθούν στο σύστημα.
- Καθορισμός των χαρακτηριστικών τους όπως η ισχύς, η διαθεσιμότητα και το κόστος.
- Καθορισμός θερμοκρασιακών, ηλιακών και ανεμολογικών δεδομένων.

### 2. Διαχείριση Πόρων:

- ο Προσθήκη νέων πόρων, επεξεργασία των υπαρχόντων ή διαγραφή αυτών που δεν είναι πλέον απαραίτητοι.

Γίνεται αντιληπτό ότι η καρτέλα "Resources" επιτρέπει στο χρήστη να προσαρμόσει τον ενεργειακό προσδιορισμό του συστήματος με βάση τις διαθέσιμες πηγές και τις τοπικές συνθήκες, επιτρέποντας την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων και την επίτευξη βέλτιστων λύσεων για το ενεργειακό σύστημα.



Εικόνα 5.4 1 Πόροι συστήματος

## 5.5 Εισαγωγή λοιπών παραμέτρων και περιορισμών συστήματος.

Το τελευταίο στάδιο του σχεδιασμού όπως φαίνεται στην εικόνα 5.5.1, περιλαμβάνει κάποιες παραμέτρους οι οποίες πρέπει να ρυθμιστούν προκειμένου να γίνει σωστή προσομοίωση του εξεταζόμενου συστήματος. Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι οι ακόλουθες:

### 1. Economics

- ο Καθορισμός οικονομικών παραμέτρων όπως νόμισμα, ποσοστό πληθωρισμού και χρόνος ζωής του συστήματος.

### 2. Constraints

- ο Καθορισμός τυχόν περιορισμών του συστήματος όπως ποσοστό παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ.

### 3. Emissions

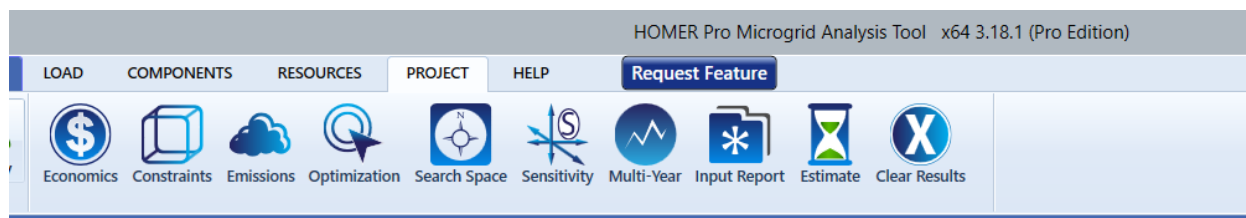
- ο Καθορισμός επιτρεπόμενων ορίων εκπομπών.

### 4. Sensitivity

- ο Καθορισμός μεταβλητών για την ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος.

## 5. Search Space

- Καθορισμός εύρους τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων των Components.



Εικόνα 5.5 1 Λοιπές παράμετροι συστήματος

## 5.6 Προσομοίωση συστήματος και αποτελέσματα.

Αφού ολοκληρωθεί πλήρως το στάδιο του σχεδιασμού, ο χρήστης επιλέγει το πλήκτρο CALCULATE, και αφού γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί από το λογισμικό, οδηγείται στην καρτέλα RESULTS, όπου μπορεί να δει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τη συμπεριφορά του συστήματος στην διάρκεια του έτους. Το HOMER απορρίπτει από τα αποτελέσματα όλες τις ανέφικτες διατάξεις του συστήματος, δηλαδή αυτές που δεν ικανοποιούν επαρκώς το φορτίο, τους διαθέσιμους πόρους ή τους τεθειμένους περιορισμούς. Η επιλογή "CATEGORIZED" προβάλλει τη βέλτιστη λύση για κάθε διαφορετική διάταξη του συστήματος, ενώ η επιλογή "OVERALL" προβάλλει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Τα αποτελέσματα ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά του καθαρού παρόντος κόστους (Net Present Cost – NPC) και παρέχουν πληροφορίες όπως το κόστος της ενέργειας (Cost of Energy – COE) και άλλα σχετικά δεδομένα για τη διάταξη του συστήματος.

## 6.Σχεδιασμός και προσομοίωση ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής υδρογόνου για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κατοικίας με τη χρήση του λογισμικού HOMER – Παρουσίαση αποτελεσμάτων. [1][2][3][5][7][10][11][17][26][29]

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται λεπτομερώς ο σχεδιασμός, η προσομοίωση και η ανάλυση της συμπεριφοράς ενός υβριδικού συστήματος, το οποίο έχει ως στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας κατοικίας. Η εν λόγω κατοικία έχει εμβαδόν 200 τετραγωνικών μέτρων και φιλοξενεί μια τετραμελή οικογένεια. Η προσέγγιση που ακολουθείται περιλαμβάνει μια σειρά από τεχνικές και μεθοδολογίες, οι οποίες αναλύονται διεξοδικά, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση και η ενεργειακή αυτονομία της κατοικίας.

Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών εξετάζονται στο λογισμικό HOMER τρία σενάρια:

1. **Σενάριο 1:** Ένα σύστημα φωτοβολταϊκών και κυψέλης υδρογόνου με σύνδεση στο δίκτυο, όπου το 50% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.
2. **Σενάριο 2:** Ένα σύστημα φωτοβολταϊκών και κυψέλης υδρογόνου με σύνδεση στο δίκτυο, όπου το 80% της ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.
3. **Σενάριο 3:** Ένα σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο με φωτοβολταϊκά, κυψέλη υδρογόνου και μπαταρίες, επιτυγχάνοντας 100% ενεργειακή αυτονομία χωρίς αλληλεπίδραση με το δίκτυο.

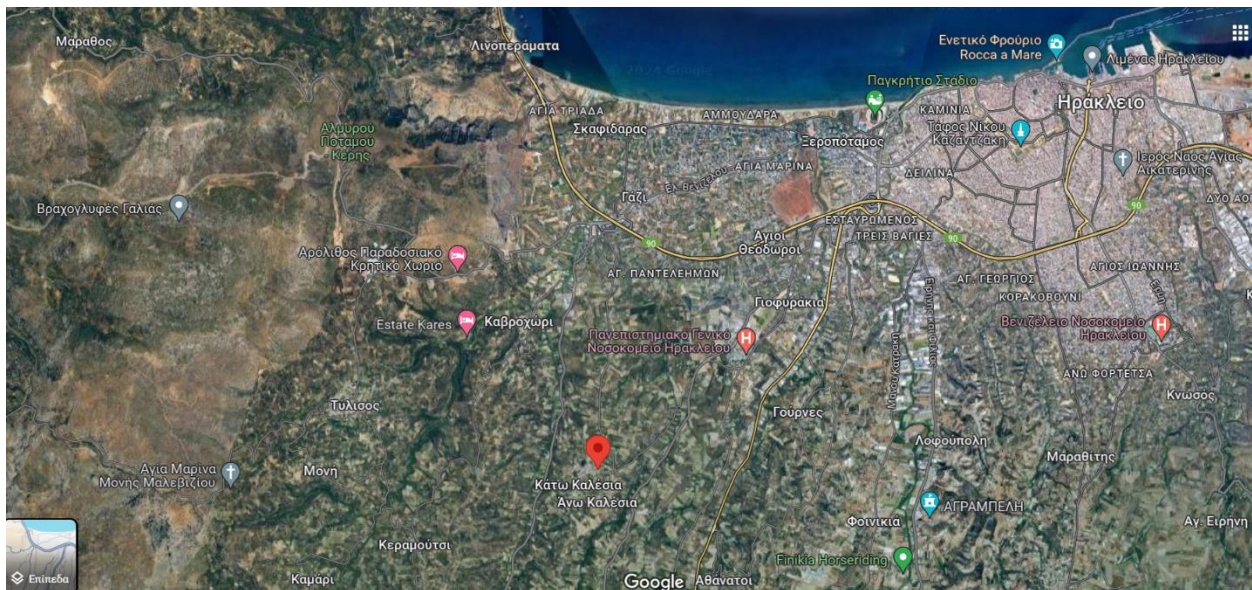
Η ανάλυση των παραπάνω σεναρίων επιτρέπει την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας κάθε λύσης, καθώς και τον προσδιορισμό της βέλτιστης προσέγγισης για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της κατοικίας.

## 6.1 Δεδομένα εισόδου στο λογισμικό HOMER

### 6.1.1 Καθορισμός τοποθεσίας.

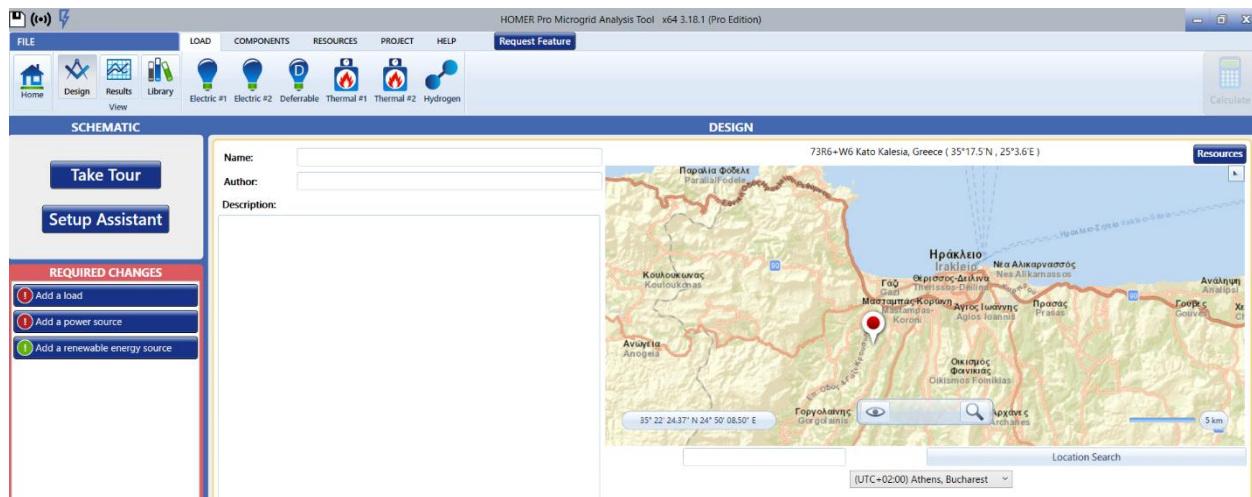
Αρχικά, ορίστηκε η τοποθεσία της κατοικίας στο λογισμικό HOMER. Η κατοικία που εξετάζεται βρίσκεται στα Κάτω Καλέσια του Δήμου Μαλεβιζίου, λίγα χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης του Ηρακλείου Κρήτης, με τις ακόλουθες γεωγραφικές συντεταγμένες:

- Γεωγραφικός πλάτος  $35^{\circ}17'18.1''\text{N}$
- Γεωγραφικό μήκος  $25^{\circ}03'33.4''\text{E}$



Εικόνα 6.1. 1 Τοποθεσία υπό εξέταση κατοικίας

Χρησιμοποιώντας την αναζήτηση στο χάρτη του λογισμικού HOMER καθορίστηκε η τοποθεσία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1.2.



Εικόνα 6.1. 2 Εντοπισμός τοποθεσίας κατοικίας στο HOMER

### 6.1.2 Καθορισμός πόρων συστήματος.

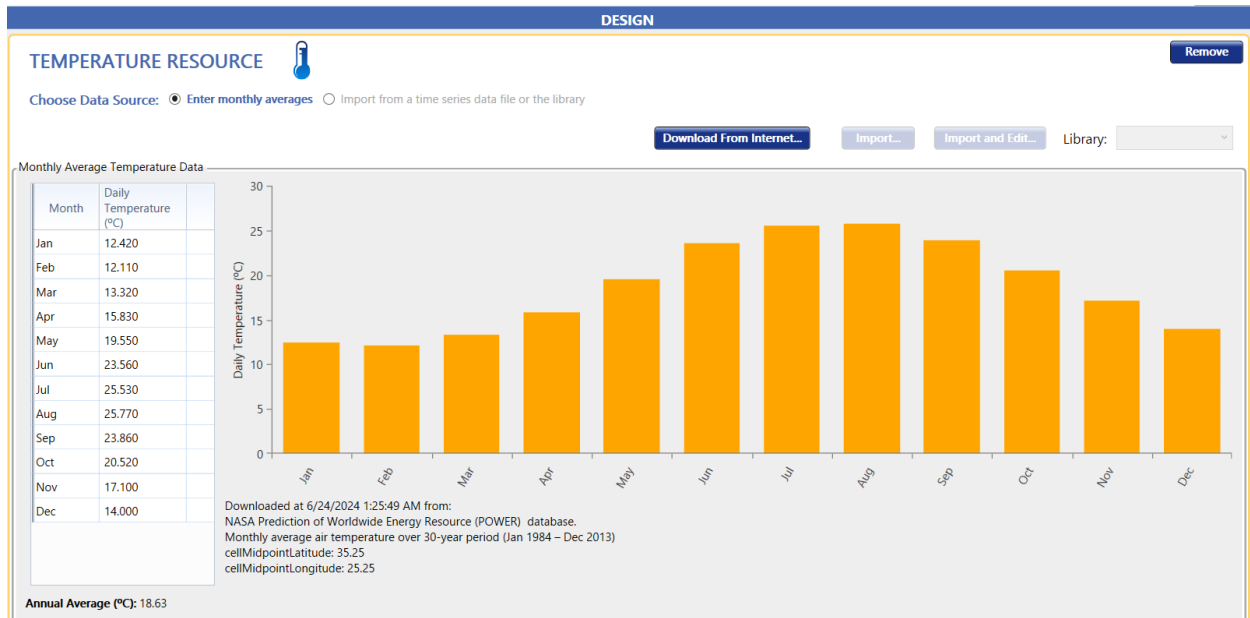
Αφού προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες της κατοικίας, το HOMER δίνει την δυνατότητα να εισαχθούν αυτόματα για τη συγκεκριμένη τοποθεσία οι τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία, το δείκτη αιθριότητας καθώς και τη θερμοκρασία για κάθε ώρα του έτους. Συγκεκριμένα για την ηλιακή ακτινοβολία στην καρτέλα RESOURCES, επιλέχθηκε το SOLAR GHI RESOURCE και στη συνέχεια Download from the internet. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και στην καρτέλα TEMPERATURE. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, του δείκτη αιθριότητας της περιοχής καθώς και οι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας.



Εικόνα 6.1. 3 Γράφημα με τις μηνιαίες μέσες τιμές ημερήσιας ακτινοβολίας- Δείκτης αιθριότητας

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /day)
Jan	0.475	2.390
Feb	0.518	3.310
Mar	0.567	4.680
Apr	0.630	6.290
May	0.673	7.480
Jun	0.734	8.470
Jul	0.748	8.430
Aug	0.737	7.590
Sep	0.711	6.190
Oct	0.634	4.330
Nov	0.525	2.770
Dec	0.453	2.090

Εικόνα 6.1. 4 Πίνακας με τις μηνιαίες μέσες τιμές ημερήσιας ακτινοβολίας- Δείκτης αιθριότητας



Εικόνα 6.1. 5 Γράφημα με τις μηνιαίες μέσες τιμές ημερήσιας θερμοκρασίας

## 6.2 Υπολογισμός και εισαγωγή φορτίου στο HOMER.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να προσδιοριστεί το ηλεκτρικό φορτίο της κατοικίας και να δοθεί σαν είσοδος στο HOMER προκειμένου να προχωρήσει η διαδικασία της προσομοίωσης. Το φορτίο αντιστοιχεί στην ζήτηση ενέργειας που το σύστημα πρέπει να καλύψει για να διασφαλίσει την ενεργειακή αυτονομία της κατοικίας. Στον πίνακα που ακολουθεί απεικονίζονται ενδεικτικά οι ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν στην κατοικία σε μια τυπική μέρα του καλοκαιριού.

Συσκευές	Ισχύς (W)	Αριθμός Συσκευών	Ώρες Λειτ/Ημέρα	Κατανάλωση (kWh/Ημέρα)
Κλιματιστικό	2000	3	3	18
Ψυγείο	150	1	24	1.2
Καταψύκτης	200	1	24	1.6
Πλυντήριο Ρούχων	500	1	1	0.5
Πλυντήριο Πιάτων	1200	1	1	1.2
Ηλεκτρικός Φούρνος	2000	1	1.5	3
Τηλεόραση	100	2	6	1.2
Ηλεκτρικός Βραστήρας	2000	1	0.5	1

Υπολογιστής	300	1	8	2.4
Λαμπτήρες LED	10	10	10	1
Φούρνος Μικροκυμάτων	800	1	1	0.8
Στεγνωτήριο Ρούχων	1500	1	1.5	2.25
Σκούπα Ηλεκτρική	800	1	1	0.8
Θερμοσίφωνας	3000	1	1.5	4.5
Μικρές Συσκευές	50	5	3	0.75
Καφετιέρα	1000	1	1.5	1.5
Φωτιστικά Εξωτερικά	60	4	5	1.2
Κονσόλα Παιχνιδιών	200	1	3	0.6
Σύνολο				45.3 kWh/day

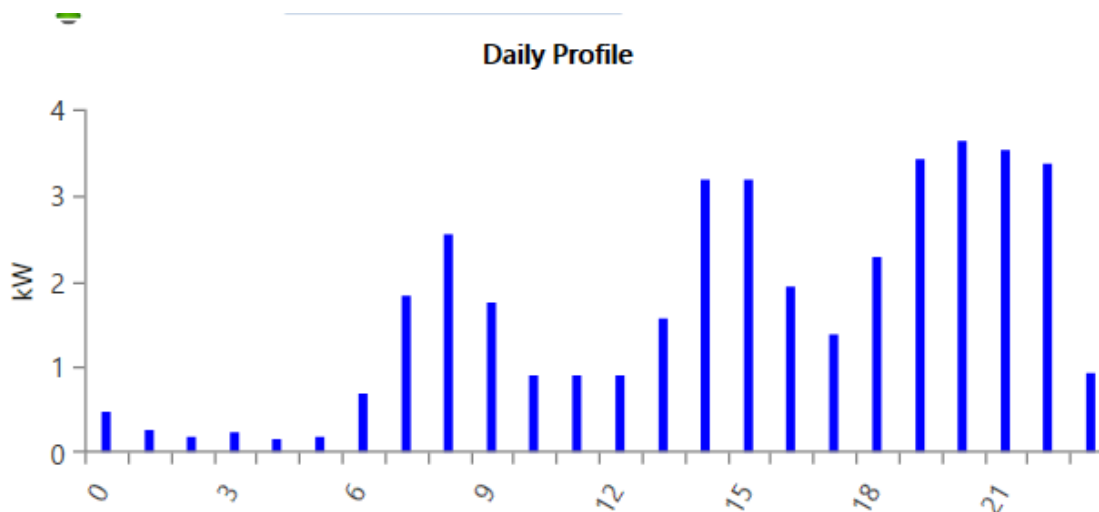
Με βάση τον παραπάνω πίνακα προσδιορίστηκε η ενεργειακή κατανάλωση της εξεταζόμενης οικίας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB δημιουργήθηκε ένα αρχείο με 8760 τιμές καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί στην κατανάλωση της κατοικίας για κάθε μία ώρα του έτους. Στη συνέχεια αυτό το αρχείο εισήχθη στο HOMER, όπου με κατάλληλους υπολογισμούς δημιουργήθηκε το προφίλ κατανάλωσης σε ημερήσιο και ετήσιο επίπεδο. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν η μέση κατανάλωση της κατοικίας είναι 33kWh ανά μέρα, η μέγιστη ζήτηση στη διάρκεια της ημέρας είναι περίπου 5kWh και ο μήνας με την

περισσότερη ζήτηση ενέργειας είναι ο Ιούλιος. Τέλος η κατοικία έχει κατανάλωση 12.273kWh ετησίως.

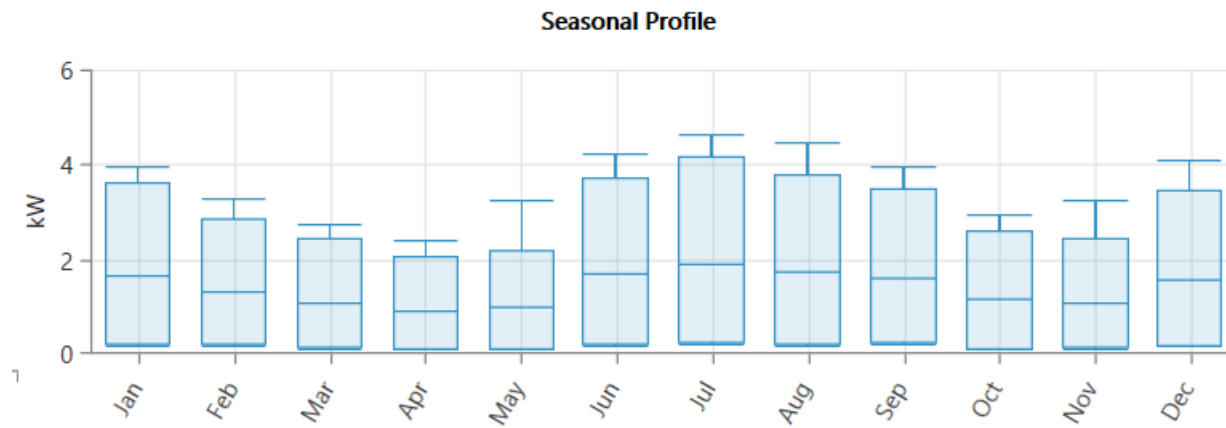


Εικόνα 6.2. 1 Ορισμός φορτίου στο λογισμικό

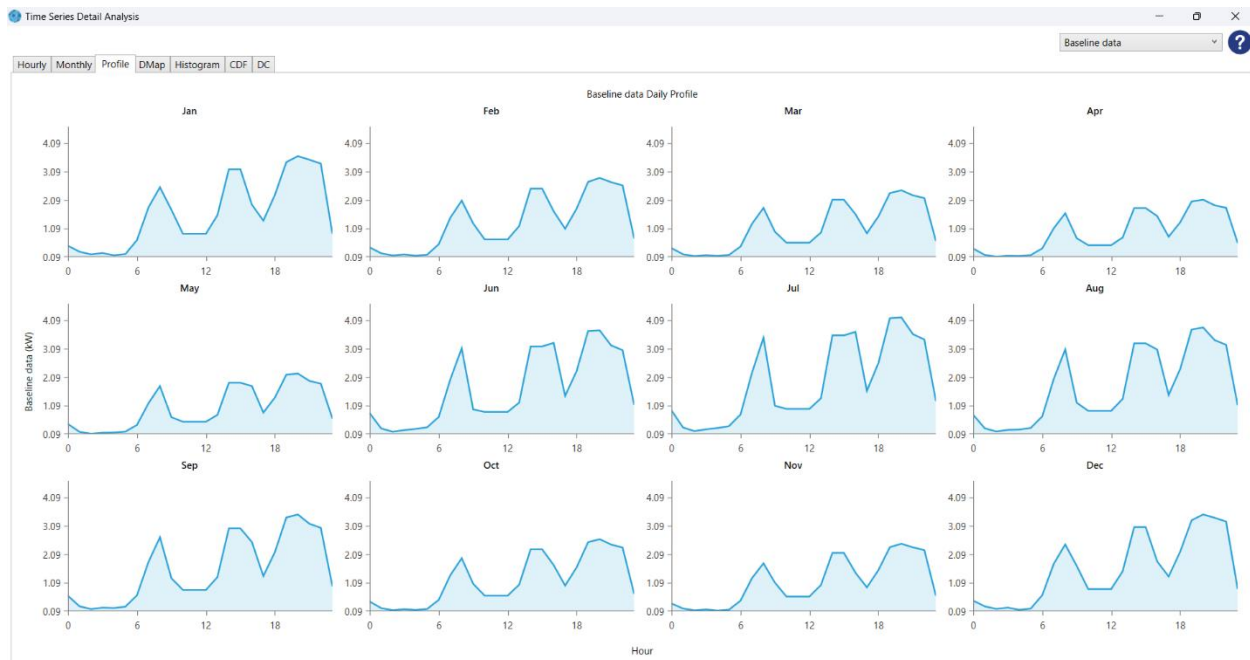
Στο διάγραμμα της εικόνας 6.2.2 απεικονίζεται το ημερήσιο προφίλ κατανάλωσης της κατοικίας ενώ στις εικόνες 6.2.3 και 6.2.4 φαίνεται το η ζήτηση μηνιαίως και ετησίως.



Εικόνα 6.2. 2 Ημερήσιο προφίλ φορτίου κατοικίας

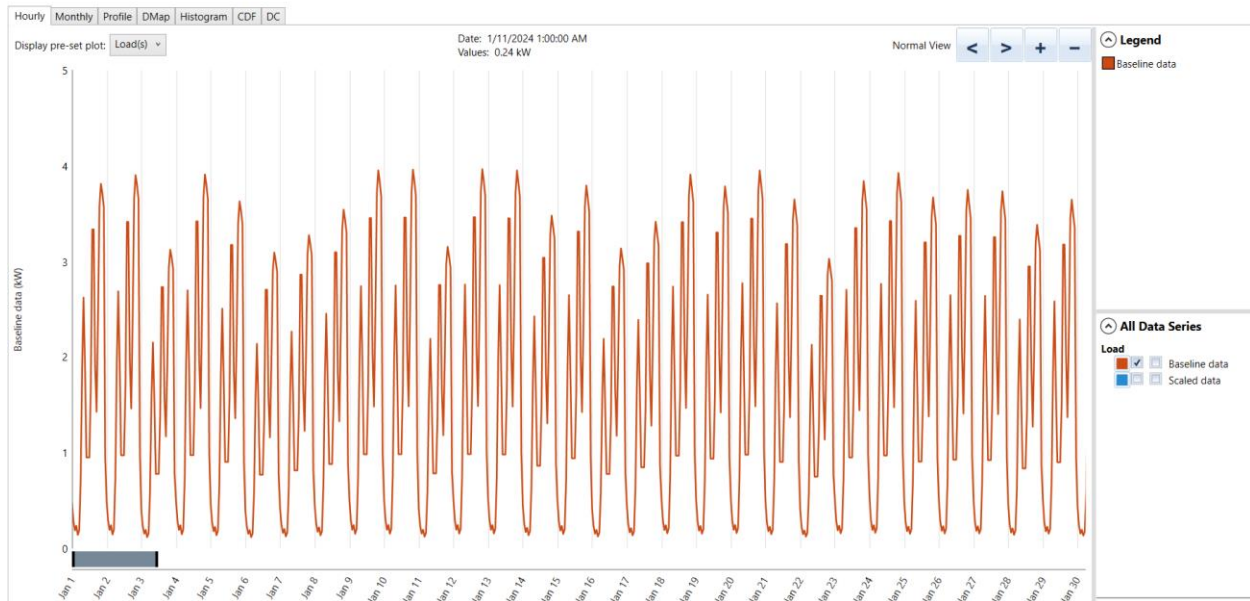


Εικόνα 6.2. 3 Ετήσιο προφίλ φορτίου κατοικίας

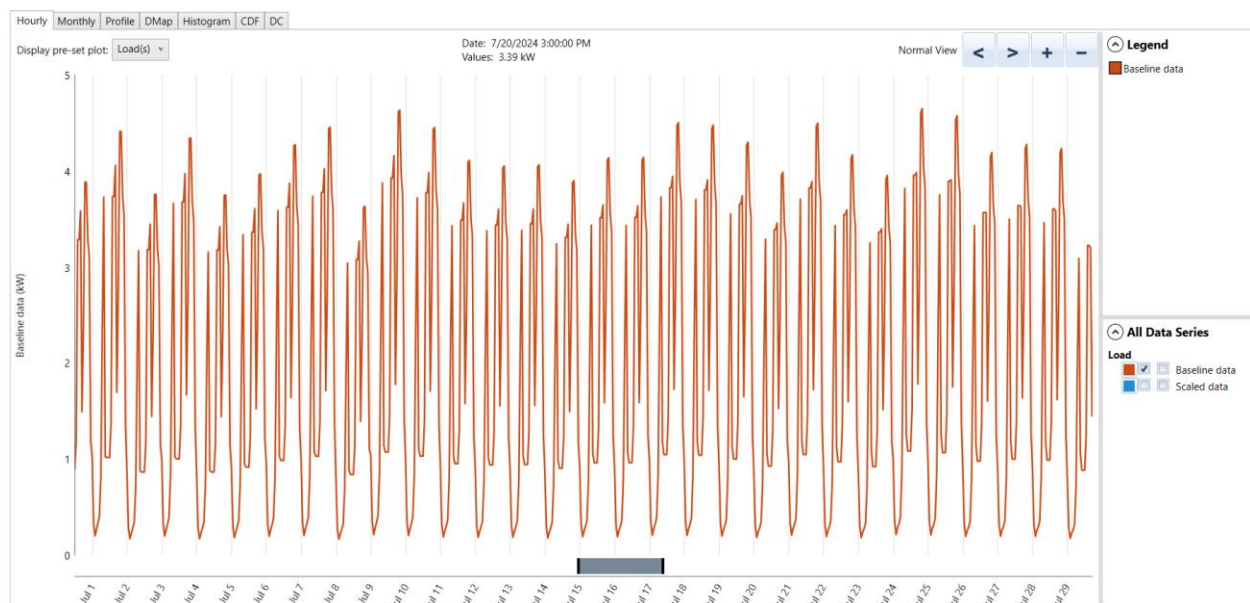


Εικόνα 6.2. 4 Προφίλ φορτίου κάθε μήνα

Τέλος στα ακόλουθα διαγράμματα γίνεται ωριαία απεικόνιση για όλες τις ημέρες του Ιανουαρίου και του Ιουλίου, προκειμένου να υπάρχει εικόνα τόσο για τη ζήτηση του καλοκαιριού όσο και του χειμώνα.



Εικόνα 6.2. 5 Ωριαίο προφίλ φορτίου Ιανουαρίου



Εικόνα 6.2. 6 Ωριαίο προφίλ φορτίου Ιουλίου

## 6.3 Καθορισμός βασικών στοιχείων συστήματος.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται αναφορά στον βασικό εξοπλισμό του συστήματος που επιλέχθηκε σε κάθε σενάριο. Η σωστή επιλογή εξοπλισμού έχει καθοριστικό ρόλο τόσο στην διαδικασία της προσομοίωσης από το λογισμικό όσο και στο τελικό κόστος που θα προκύψει για κάθε σύστημα.

### 6.3.1 Φωτοβολταϊκά.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία επιλέχθηκαν για τη μοντελοποίηση όλων των σεναρίων στο HOMER, είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου ονομαστικής ισχύος 550W χωρίς σύστημα εντοπισμού tracking system. Κατασκευάζονται από την εταιρεία Longi Solar με όνομα μοντέλου LR5-72HPH-550, έχουν 144 κυψέλες και 25 χρόνια ζωής με 12 χρόνια εγγύηση. Είναι συνεχούς ρεύματος με βαθμό απόδοσης 21% και έχουν κόστος 200€ ανά 550W. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι λειτουργίας τους. Σε κάθε σενάριο θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή σχετικά με την διαστασιολόγηση και την προσομοίωση στο λογισμικό.

Electrical Characteristics	STC : AM1.5 1000W/m <sup>2</sup> 25°C	Test uncertainty for Pmax: ±3%				
Power Class	525	530	535	540	545	550
Maximum Power (Pmax/W)	525	530	535	540	545	550
Open Circuit Voltage (Voc/V)	49.05	49.20	49.35	49.50	49.65	49.80
Short Circuit Current (Isc/A)	13.65	13.71	13.78	13.85	13.92	13.98
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	41.20	41.35	41.50	41.65	41.80	41.95
Current at Maximum Power (Imp/A)	12.75	12.82	12.90	12.97	13.04	13.12
Module Efficiency(%)	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3	21.5

Εικόνα 6.3. 1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πάνελ

Operating Parameters	
Operational Temperature	-40°C ~ +85°C
Power Output Tolerance	0 ~ +5 W
Voc and Isc Tolerance	±3%
Maximum System Voltage	DC1500V (IEC/UL)
Maximum Series Fuse Rating	25A
Nominal Operating Cell Temperature	45±2°C
Protection Class	Class II
Fire Rating	UL type 1 or 2

### **6.3.2 Κυψέλη καυσίμου.**

Οι κυψέλες καυσίμου που επιλέχθηκαν σε κάθε σενάριο είναι τεχνολογίας PEM (Πολυμερικής ηλεκτρολυτικής μεμβράνης) και κατασκευάζονται από την εταιρεία Horizon. Στα πρώτα δύο σενάρια χρειάστηκε κυψέλη καυσίμου ισχύος 1 kW ενώ στο τρίτο σενάριο χρησιμοποιήθηκε κυψέλη 2kW. Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν είναι τα H1000W PEM και H2000W PEM αντίστοιχα και οι τιμές τους είναι 4000 €/kW. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των κυψελών.

Fuel Cell Properties	
Number of Cells	48
Rated Power	1000W (1kW)
Rated Performance	28.8V @ 35A
Hydrogen Supply Valve Voltage	12V
Purging Valve Voltage	12V
Blower Voltage	12V
Reactants	Hydrogen and Air
Ambient Temperature	5 - 30 C (41 - 86 F)
Max Stack Temperature	65 C (149 F)
Hydrogen Pressure	0.45 - 0.55 Bar
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Controller Weight	400g ± 30g
Stack Weight (with Fan & Casing)	4kg ± 100g
Hydrogen Flow Rate at Max Output	13 L/min
Stack Size	268 x 219 x 123 mm (10.5" x 8.6" x 4.8")
Hydrogen Purity Requirement	≥ 99.995% (dry H <sub>2</sub> )
Start up time	≤ 30s (ambient temperature)
Efficiency of System	40% at 28.8V
Low Voltage Protection	24V
Over Current Protection	42A
Over Temperature Protection	65 C
External Power Supply	13V ±1V, 5A-8A

*Εικόνα 6.3. 3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας κυψέλης 1kW*

Fuel Cell Properties	
Number of Cells	48
Rated Power	2000W (2kW)
Rated Performance	28.8V @ 70A
Hydrogen Supply Valve Voltage	12V
Purging Valve Voltage	12V
Blower Voltage	12V
Reactants	Hydrogen and Air
Ambient Temperature	5 - 30 C (41 - 86 F)
Max Stack Temperature	65 C (149 F)
Hydrogen Pressure	0.45 - 0.55 Bar
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Controller Weight	2500g (± 100g)
Stack Weight (with Fan & Casing)	10kg ± 200g
Hydrogen Flow Rate at Max Output	26 L/min
Stack Size	350 x 183 x 303mm (13.8" x 7.2" x 11.9")
Hydrogen Purity Requirement	≥ 99.995% (dry H <sub>2</sub> )
Start up time	≤ 30s (ambient temperature)
Efficiency of System	40% at 28.8V
Low Voltage Protection	24V
Over Current Protection	90A
Over Temperature Protection	65 C
External Power Supply	13V (±1V), 5A-10A

Εικόνα 6.3. 4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας κυψέλης 2kW

### 6.3.3 Inverter.

Σε κάθε σενάριο τα φωτοβολταϊκά όπως και η κυψέλη καυσίμου λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι κάθε σύστημα χρειάζεται μετατροπέα προκειμένου να τροφοδοτείται το φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο inverter που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε σε κάθε προσομοίωση είναι γενικής χρήσης που προσφέρεται από το ίδιο το λογισμικό. Όσον αφορά τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας επιλέχθηκαν συνηθισμένες τιμές που είναι κοινές στην πλειοψηφία των inverters. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε βαθμός απόδοσης 97% και 15 χρόνια ζωής ενώ όσον αφορά το κόστος επιλέχθηκε 500 €/kW. Στο πρώτο σενάριο έγινε χρήση

μετατροπέα ισχύος 3kW, στο δεύτερο σενάριο 9kW ενώ στο τρίτο χρησιμοποιήθηκε inverter 14kW.

### **6.3.4 Συσκευή ηλεκτρόλυσης.**

Σε κάθε σενάριο της παρούσας εργασίας, όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά διοχετεύεται σε μια μονάδα ηλεκτρόλυσης η οποία διαχωρίζει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη μοντελοποίηση της ηλεκτρολυτικής μονάδας σε κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκε ο γενικής χρήσης Electrolyzer που παρέχει το HOMER. Ανάλογα τις απαιτήσεις του φορτίου κάθε σεναρίου επιλέχθηκε κατάλληλα η ισχύς της μονάδας ηλεκτρόλυσης και σε κάθε σενάριο επιλέχθηκε κόστος 2000 €/kW το οποίο αποτελεί ένα συνηθισμένο κόστος για τις συγκεκριμένες συσκευές οικιακής χρήσης.

### **6.3.5 Μπαταρίες.**

Στο τρίτο σενάριο εξετάστηκε η πλήρης αυτονομία του συστήματος με κάλυψη όλων των αναγκών της κατοικίας από το σύστημα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Προκειμένου να επιτευχθεί η ενεργειακή ανεξαρτησία και η μηδενική συνεισφορά του δικτύου χρειάστηκε να προστεθούν συσσωρευτές στο υπό εξέταση σύστημα. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι γερμανικής κατασκευής μπαταρίες με όνομα μοντέλου BAE SECURA 2 PVV 140, οι οποίες είναι κλειστού τύπου μολύβδου-οξέος. Αυτός ο τύπος μπαταρίας είναι σχεδιασμένος για να μην απαιτεί συχνή συντήρηση και είναι εξοπλισμένος με βαλβίδες που ρυθμίζουν την εσωτερική πίεση, αποτρέποντας έτσι διαρροές και εξάτμιση των ηλεκτρολυτών. Είναι 140 Ah, έχουν βάθος εκφόρτισης 30% ενώ δεν απαιτούν συντήρηση και είναι κατασκευασμένες για να έχουν αξιόπιστη απόδοση για 18 χρόνια ζωής. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων μπαταριών.

## Technical Specification for Valve Regulated Lead-Acid Batteries (VRLA-GEL)

### 1. Application

BAE SECURA PVV solar batteries don't need to be refilled with water during the whole service life. Therefore, this battery type is maintenance-free. This eliminates checking of electrolyte level.

The batteries are used to store electric energy in medium and large solar photovoltaic installations.

Due to the robust tubular plate design BAE PVV Batteries are excellent suited for highest requirements regarding cycling ability and long lifetime.



### 2. Technical data (Reference temperature 20 °C)

Type	C <sub>1h</sub> Ah	C <sub>10h</sub> Ah	C <sub>20h</sub> Ah	C <sub>72h</sub> Ah	C <sub>100h</sub> Ah	C <sub>120h</sub> Ah	C <sub>240h</sub> Ah	R <sub>i</sub> 1) mΩ	I <sub>k</sub> 2) kA	Length (L) mm	Width (W) mm	Height (H) mm	Weight kg
U <sub>e</sub> V/cell	1.67	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80						
2 PVV 140	71	121	134	153	157	158	165	1.65	1.30	105	208	420	12.4

Εικόνα 6.3. 5 Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών

### 7. Operational data

Depth of discharge (DOD)

max. 80 % (U<sub>e</sub> = 1.91 V/cell for discharge times >10 h; 1.74 V/cell for 1 h), deep discharges of more than 80 % DOD have to be avoided  
unlimited, the minimal charge current has to be 1.5 A/100 Ah C<sub>10</sub>

Initial charge current  
(I or bulk phase)

Charge voltage at cyclic operation

restricted from 2.30 V to 2.40 V per cell, operating instruction is to be observed

Float voltage/non cyclic operation

2.25 V/cell

Adjustment of charge voltage

no adjustment necessary if battery temperature is between 10 °C and 45 °C (50 °F and 113 °F) in the monthly average,  
ΔU/ΔT = -0.003 V/cell per K below 10 °C (50 °F)

Recharge to 100 %

within a period of 1 up to 4 weeks

IEC 61427 cycles

>3,000 (A+B) at 40 °C (104 °F)

Battery temperature

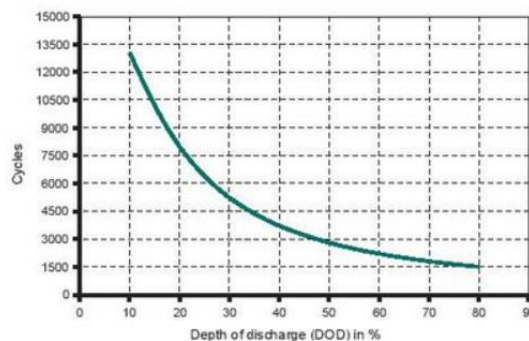
-20 °C to 45 °C (-4 °F to 113 °F),

recommended temperature range 10 °C to 30 °C (50 °F to 86 °F)

Self-discharge

approx. 2 % per month at 20 °C (68 °F)

### 8. Number of cycles as function of Depth of discharge






Εικόνα 6.3. 6 Διάγραμμα κύκλου ζωής μπαταριών

### 6.3.6 Δίκτυο.


Στα πρώτα δύο σενάρια το σύστημα αλληλοεπιδρά με το δίκτυο και συγκεκριμένα, όταν δεν μπορεί να καλύψει το απαιτούμενο φορτίο τότε δέχεται ενέργεια από το σύστημα πληρώνοντας την κιλοβατώρα στην τιμή των 0.185€. Σε αυτή την τιμή συνυπολογίζεται και το κόστος μεταφοράς και διανομής ανά κιλοβατώρα. Σε κάθε ένα από τα τρία σενάρια υπολογίζεται ότι όταν υπάρχει περίσσεια ενέργεια η οποία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου ή για να φορτίσει τις μπαταρίες, τότε θα πωλείται πίσω στο δίκτυο με σταθερή τιμή 0.07 € ανά κιλοβατώρα. Επιπλέον πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι του δικτύου που αφορούν τις εκπομπές ρύπων καθώς όταν το ενεργειακό σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, το λογισμικό υπολογίζει τις ετήσιες εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το δίκτυο και καταναλώνεται στο σύστημα προέρχεται τόσο από τη λειτουργία συμβατικών πηγών ενέργειας, όσο και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το λογισμικό δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες της περιοχής υπό μελέτη και αυτόματα εισάγει τις ποσότητες των ρύπων που εκπέμπονται ανά kWh, τις οποίες αναφέρει για κάθε χώρα. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται η ρύθμιση των παραμέτρων των ρύπων και της τιμής της κιλοβατώρας.

#### Emissions

Carbon Dioxide (g/kWh):	<input type="text" value="632.00"/>	
Carbon Monoxide (g/kWh):	<input type="text" value="0.00"/>	
Unburned Hydrocarbons (g/kWh):	<input type="text" value="0.00"/>	
Particulate Matter (g/kWh):	<input type="text" value="0.00"/>	
Sulfur Dioxide (g/kWh):	<input type="text" value="2.74"/>	
Nitrogen Oxides (g/kWh):	<input type="text" value="1.34"/>	

Εικόνα 6.3. 7 Εκπομπές ρύπων δικτύου

ADVANCED GRID



Name:

☒ Simple Rates
☐ Real Time Rates
☐ Scheduled Rates
☐ Grid Extension

Parameters

Emissions

Simple Rates

Grid Power Price (€/kWh)

⌵ ⌶

Grid Sellback Price (€/kWh):

⌵ ⌶

Εικόνα 6.3. 8 Ρύθμιση τιμής αγοράς και πώλησης κιλοβατώρας

### 6.3.7 Στρατηγική ελέγχου.

Σε αυτό το σημείο γίνεται αναφορά σχετικά με την στρατηγική ελέγχου και τη διαχείριση της ενέργειας για την ασφαλή κάλυψη της ζήτησης. Όπως είναι γνωστό το HOMER είναι ένα λογισμικό σχεδιασμού μικροδικτύων που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας και την ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας. Δύο από τις βασικές στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται στο HOMER είναι οι "Load Following" και "Cycle Charging". Ακολουθούν λεπτομέρειες για κάθε μία από αυτές:

#### Load Following

Η στρατηγική "Load Following" (LF) αναφέρεται στη διαδικασία όπου οι γεννήτριες προσαρμόζουν την παραγωγή τους ώστε να καλύπτουν άμεσα τη ζήτηση φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή ενέργειας προσαρμόζεται συνεχώς σύμφωνα με τις μεταβολές της ζήτησης. Οι γεννήτριες αυξομειώνουν την παραγωγή τους για να ταιριάζουν ακριβώς με την τρέχουσα ζήτηση του φορτίου. Τα αποθηκευτικά συστήματα (όπως μπαταρίες)

χρησιμοποιούνται ελάχιστα ή καθόλου, καθώς η γεννήτρια ρυθμίζει άμεσα την παραγωγή της για να καλύψει το φορτίο. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η εν λόγω στρατηγική είναι ότι έχει απλή εφαρμογή και άμεση απόκριση στη ζήτηση ενώ μειώνει την ανάγκη για εκτεταμένη χρήση αποθηκευτικών συστημάτων. Αντιθέτως τα μειονεκτήματα της είναι ότι η συνεχιζόμενη προσαρμογή μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη φθορά των γεννητριών.

### **Cycle Charging**

Η στρατηγική "Cycle Charging" (CC) αναφέρεται στη διαδικασία όπου οι γεννήτριες λειτουργούν σε μια σταθερή ή σχεδόν σταθερή υψηλή απόδοση, παράγοντας περισσότερη ενέργεια από ό,τι είναι άμεσα απαραίτητο και χρησιμοποιώντας το πλεόνασμα για να φορτίσουν τα αποθηκευτικά συστήματα. Οι γεννήτριες λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο απόδοσης τους για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, ακόμα κι αν αυτό υπερβαίνει την τρέχουσα ζήτηση φορτίου. Η επιπλέον ενέργεια που παράγεται χρησιμοποιείται για να φορτιστούν οι μπαταρίες ή άλλα αποθηκευτικά μέσα. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι επιτρέπει στις γεννήτριες να λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο απόδοσης τους, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το κόστος καυσίμου. Επιπλέον μειώνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους. Αντιθέτως τα μειονεκτήματα της είναι ότι απαιτεί μεγαλύτερη χρήση αποθηκευτικών συστημάτων, τα οποία μπορεί να αυξήσουν το αρχικό κόστος εγκατάστασης. Γίνεται αντιληπτό ότι αυτές οι στρατηγικές επιλέγονται ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος και τα διαθέσιμα μέσα, με στόχο την εξισορρόπηση της ενεργειακής απόδοσης, του κόστους και της διάρκειας ζωής των εξοπλισμών. Σε όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν χρησιμοποιήθηκε η στρατηγική Load Following καθώς λόγω της απλότητας λειτουργίας της και των χαμηλών απαιτήσεων σε κόστος θεωρήθηκε καλύτερη για τα μικροδίκτυα που εξετάστηκαν.

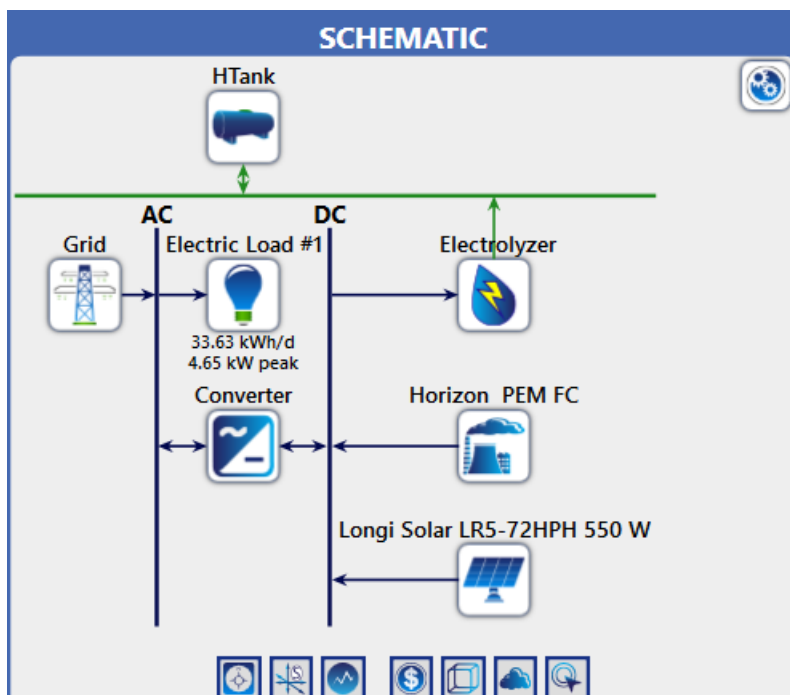
### **6.4 Ανάλυση σεναρίων και σχολιασμός αποτελεσμάτων.**

Μετά την ολοκλήρωση της περιγραφής του εξοπλισμού, το παρόν υποκεφάλαιο προβαίνει σε λεπτομερή ανάλυση των σεναρίων που εξετάστηκαν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της κατοικίας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει ένα σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο, όπου τουλάχιστον το 50% της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει ένα αντίστοιχο σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο, όπου τουλάχιστον το 80% της

ενεργειακής κατανάλωσης καλύπτεται από ΑΠΕ. Τέλος, στο τρίτο σενάριο, το σύστημα παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο, με το 100% της ενέργειας που παράγεται να προέρχεται από ΑΠΕ.

#### **6.4.1 Πρώτο σενάριο**

Το σύστημα ενεργειακής παραγωγής που εξετάζεται πρέπει να εξασφαλίζει ότι τουλάχιστον το 50% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές. Το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και αποτελείται από φωτοβολταϊκά και κυψέλη υδρογόνου. Κατά τις ηλιόλουστες ημέρες, η ενεργειακή ζήτηση ικανοποιείται άμεσα από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Κατά τη διάρκεια των περιόδων υπερπαραγωγής, η πλεονάζουσα ενέργεια διοχετεύεται σε μια συσκευή ηλεκτρόλυσης που παράγει υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή. Σε περίπτωση που η δεξαμενή αποθήκευσης είναι γεμάτη τότε η περίσσεια ενέργειας πωλείται πίσω στο δίκτυο. Κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας ή κατά τη διάρκεια της νύχτας, το αποθηκευμένο υδρογόνο χρησιμοποιείται από την κυψέλη καυσίμου, η οποία αναλαμβάνει την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Σε περίπτωση που η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή της κυψέλης καυσίμου, το σύστημα απορροφά ενέργεια από το δίκτυο για να διασφαλίσει τη συνεχή προμήθεια ενέργειας και τη σταθερότητα του συστήματος. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται το σύστημα που εξετάζεται.



Εικόνα 6.4. 1 Σύστημα σεναρίου 1

Για τη δημιουργία του συστήματος στο HOMER, η διαδικασία ξεκινά με την εισαγωγή του φορτίου, όπως αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 6.2. Στη συνέχεια, στην καρτέλα "CONSTRAINTS", ορίζεται ο περιορισμός του συστήματος που αφορά το ελάχιστο ποσοστό συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο 50%

CONSTRAINTS

Maximum annual capacity shortage (%):

Minimum renewable fraction (%):

Operating Reserve

As a percentage of load

Load in current time step (%):

Annual peak load (%):

As a percentage renewable output

Solar power output (%):


Wind power output (%):

Εικόνα 6.4. 2 Περιορισμοί συστήματος

Έπειτα ορίζονται τα μεγέθη που αφορούν κάθε στοιχείο του εξοπλισμού του συστήματος. Για τα φωτοβολταϊκά εξετάζεται ισχύς από 2 kW έως 6 kW. Για την κυψέλη καυσίμου και τον μετατροπέα, εξετάζονται ισχύς από 1 kW έως 5 kW. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης εξετάζεται για ισχύ από 1 kW έως 5 kW, ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης για χωρητικότητα από 1.5 έως 5 kg. Επιπλέον, για κάθε στοιχείο του συστήματος ορίζονται τα κόστη αγοράς, αντικατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τη λειτουργία του.

Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται τα εξεταζόμενα μεγέθη των φωτοβολταϊκών, οι παράμετροι λειτουργίας και τα κόστη.

Add/Remove Longi Solar LR5-72HPH 550 W

**PV**  Name: Longi Solar LR5-72HPH 550 W Abbreviation: Longi S Remove Copy to Library ?

**Properties**

Name: Longi Solar LR5-72HPH 550 W

Abbreviation: Longi Solar LR5-72HPH 550 W

Panel Type: Flat plate

Rated Capacity (kW): 6

Temperature Coefficient: -0.5

Operating Temperature (°C): 45

Efficiency (%): 21

Manufacturer: Generic

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Notes:

This is a generic PV system.

**Cost**

	Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	450.00		200.00	0.00

Lifetime time (years): 25.00 More...

**Site Specific Input**

Derating Factor (%): 80.00

**Sizing**

☐ HOMER Optimizer™

☐ Search Space

kW

2

3

4

5


6

**Electrical Bus**

☐ AC ☒ DC

Advanced...

Εικόνα 6.4. 3 Καθορισμός εξεταζόμενων μεγεθών και κόστους

 PV Advanced Properties

MPPT Orientation **Temperature**

☒ Consider temperature effects?

Using ambient temperature defined in the temperature resource.

Temperature effects on power (%/°C): -0.500 {..}

Nominal operating cell temperature (°C): 45.00 {..}

Efficiency at standard test conditions (%): 21.00 {..}

Εικόνα 6.4. 4 Καθορισμός παραμέτρων λειτουργίας και απόδοσης

Στη συνέχεια ακολουθεί η ρύθμιση των παραμέτρων της κυψέλης καυσίμου όπως απεικονίζεται στις εικόνες που ακολουθούν.

DESIGN

Add/Remove
Horizon 2KW PEM FC

**GENERATOR**

Name: 
 Abbreviation:

**Properties**  
 Name: **Horizon 2KW PEM FC**  
 Abbreviation: **Horizon PEM FC**  
 Manufacturer: **Generic**  
[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)  
 Notes:

**Costs**  

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/op. hr)
1	€4,000.00	€2,000.00	€0.015

Click here to add new item

**Sizing**  

Size (kW)
1
2
3
4
5

**Site Specific Input**  

Minimum Load Ratio (%): 
 Minimum Runtime (Minutes):

CHP Heat Recovery Ratio (%): 
 Stored Hydrogen Fuel Price (€):

Lifetime (Hours): 
☐ Initial Hours

Electrical Bus: ☐ AC ☒ DC

Εικόνα 6.4. 5 Ρύθμιση παραμέτρων και κόστους κυψέλης

**Generator Advanced Properties**

Fuel Resource
Fuel Curve
Biogas
Emissions
Maintenance
Schedule

SELECT FUEL:

Stored Hydrogen

Stored Hydrogen Fuel Price (€/kg):

☐ Limit Consumption (kg/yr):

Εικόνα 6.4. 6 Ρύθμιση κυψέλης με αποθηκευμένο υδρογόνο

Τέλος ακολουθούν εικόνες από την ρύθμιση του inverter , της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου.

System Converter

Complete Catalog

Name: System Converter

Abbreviation: Convert

Remove

Copy to Library

?

Properties

Name: System Converter

Abbreviation: Converter

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Notes: This is a generic system converter.

Generic

[homerenergy.com](http://homerenergy.com)

Costs

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€500.00	€500.00	€0.0

Click here to add new item

Multiplier:

Capacity Optimization

HOMER Optimizer™

Search Space

Size (kW)

1

2

3

4

5

Inverter Input

Lifetime (years): 15.00

Efficiency (%): 97.00

☒ Parallel with AC Generator?

Rectifier Input

Relative Capacity (%): 100.00

Efficiency (%): 95.00

Εικόνα 6.4. 7 Ορισμός παραμέτρων inverter

Generic Electrolyzer

Remove

Copy To Library

Name: Generic Electrolyzer

Abbreviation: Electro

?

Properties

Name: Generic Electrolyzer

Abbreviation: Electrolyzer

Manufacturer: Generic

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Notes: This is a generic electrolyzer.

Costs

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€2,000.00	€2,000.00	€0.0

Click here to add new item

Multiplier:

Capacity Optimization

HOMER Optimizer™

Search Space

Size (kW)

1

2

3

4

5

Site Specific

Schedule

Lifetime (years): 15.00

Efficiency (%): 90.00

Minimum load ratio (%): 0.00

Electrical Bus

AC

DC

☐ Use Efficiency Table?

Input Percentage (%)	Efficiency (%)
100	85
0	85

Click here to add new item

Εικόνα 6.4. 8 Ορισμός παραμέτρων μονάδας ηλεκτρόλυσης

DESIGN

## HYDROGEN TANK

Hydrogen Tank

Name: Hydrogen Tank

Abbreviation: HTank

Remove

Copy To Library

?

**Properties**

Name: **Hydrogen Tank**

Abbreviation: **HTank**

Manufacturer: **Generic**

[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)

Notes:  
This is a generic hydrogen tank.

**Costs**

Size (kg)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€600.00	€300.00	€0.0
Click here to add new item			

Multiplier: 1 1 1

**Capacity Optimization**

Size (kg)
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

Lifetime (years): 25.00 1

Initial Tank Level

☒ Relative to tank size (%):

0.00

1

☐ Absolute amount (kg):

500.00

1

Εικόνα 6.4. 9 Ορισμός παραμέτρων δεξαμενής αποθήκευσης

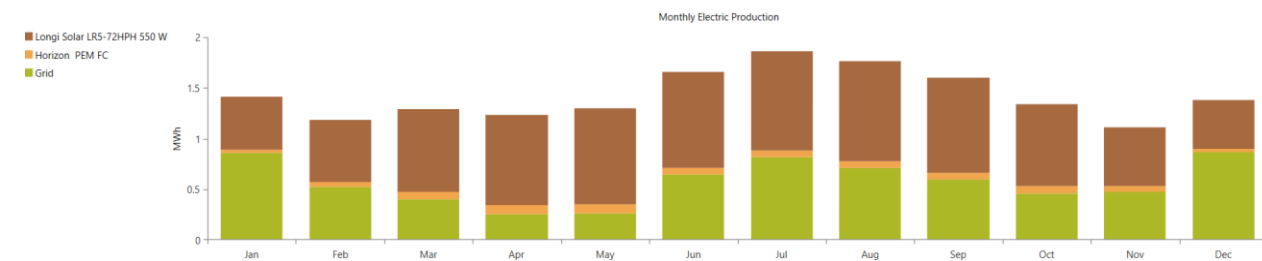
Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων, ξεκινάει η διαδικασία της προσομοίωσης. Το λογισμικό κάνει υπολογισμούς για κάθε μία από τις 8760 ώρες του έτους και εξετάζει κάθε πιθανό συνδυασμό στοιχείων του συστήματος. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης παραθέτει λίστα με όλα τα συστήματα που μπορούν να υλοποιηθούν και πληρούν τους περιορισμούς του χρήστη ταξινομημένα σύμφωνα με το καθαρό παρόν κόστος.

Στην περίπτωση του σεναρίου που εξετάζεται, το λογισμικό έδωσε το σύστημα που απεικονίζεται στην Εικόνα 6.4.10. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ότι το βέλτιστο σύστημα περιλαμβάνει 6kW εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, 1kW κυψέλη καυσίμου, 1 kW μονάδα ηλεκτρόλυσης, δεξαμενή αποθήκευσης χωρητικότητας 1.5kg και inverter ισχύος 3kW με 53.5% ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην παραγωγή.

Summary											
Tables											
Graphs											
Optimization Results											
Double click on a system to see its Simulation Details.											
Architecture											
Cost											
System											
Export...											
Export Details...											
Com											
Longi Solar LR5-72HPH 550 W (kW)											
Horizon PEM FC (kW)											
Grid (kW)											
Electrolyzer (kW)											
HTank (kg)											
Converter (kW)											
NPC (€)											
LCOE (€/kWh)											
Operating cost (€/yr)											
CAPEX (€)											
Ren Frac (%)											
Total Fuel (kg/yr)											
6.00											
1.00											
999,999											
1.00											
1.50											
3.00											
€26,593											
€0.140											
€1,198											
€11,100											
53.5											
45.5											

Εικόνα 6.4. 10 Βέλτιστο σύστημα σεναρίου 1

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά και οικονομικά αποτελέσματα της προαναφερθείσας προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της εικόνας 6.4.11 απεικονίζεται η μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποδίδεται με καφέ χρώμα, η παραγωγή από την κυψέλη καυσίμου με πορτοκαλί, ενώ η συνεισφορά του δικτύου εμφανίζεται με πράσινο χρώμα για κάθε μήνα του έτους. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, ακολουθεί το δίκτυο και τέλος τη μικρότερη συνεισφορά έχει η κυψέλη.



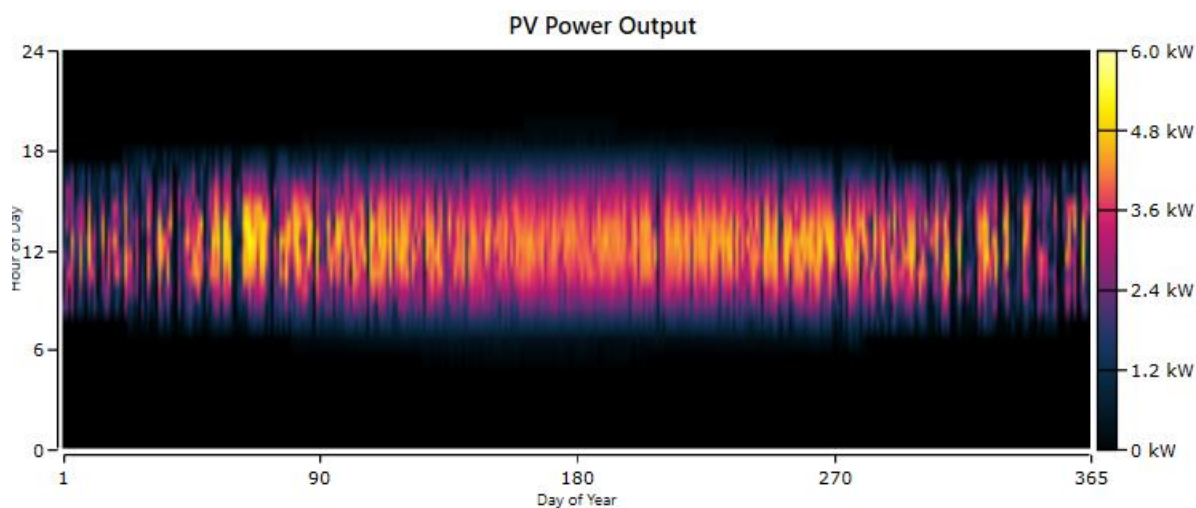
Εικόνα 6.4. 11 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στην εικόνα 6.4.12 παρουσιάζονται ποσοτικά οι κιλοβατώρες που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια του έτους. Το 55.7% της παραγωγής προήλθε από τα φωτοβολταϊκά ενώ το 4.3% από την κυψέλη καυσίμου. Τέλος αγοράστηκαν από το δίκτυο 6.845 kWh στη διάρκεια του έτους.

Production	kWh/yr	%
Longi Solar LR5-72HPH 550 W	9,533	55.7
Horizon 2KW PEM FC	749	4.37
Grid Purchases	6,845	40.0
Total	17,126	100

Εικόνα 6.4. 12 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της παραγωγής από κάθε επιμέρους στοιχείο του συστήματος. Στην εικόνα 6.4.13 απεικονίζεται διάγραμμα που παρουσιάζει την παραγωγή των φωτοβολταϊκών σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν από περίπου τις 7 το πρωί έως περίπου τις 7 το απόγευμα, δηλαδή κατά τις ώρες ηλιοφάνειας. Η μέγιστη τιμή της παραγωγής τους καταγράφεται, όπως αναμένεται, στο χρονικό διάστημα μεταξύ 13:00 και 17:00, όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία.



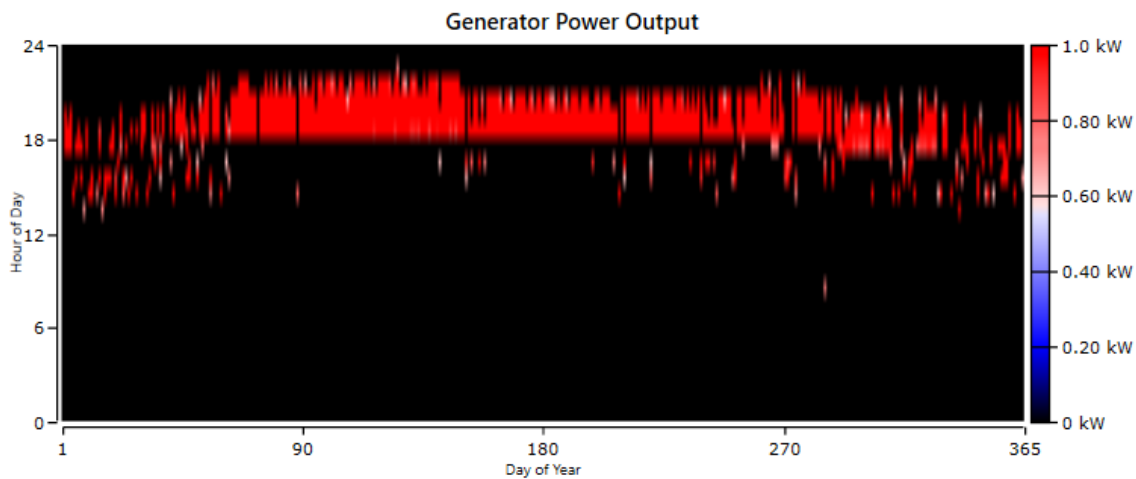
Εικόνα 6.4. 13 Παραγωγή φωτοβολταϊκών σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών, η μέση ημερήσια παραγωγή καθώς και η ετήσια παραγωγή σε κιλοβατώρες.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	6.00	kW
Mean Output	1.09	kW
Mean Output	26.1	kWh/d
Capacity Factor	18.1	%
Total Production	9,533	kWh/yr

Εικόνα 6.4. 14 Στοιχεία παραγωγής φωτοβολταϊκών

Έπειτα παρουσιάζεται η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Όπως φαίνεται από τις ακόλουθες εικόνες, η κυψέλη, όπως ήταν αναμενόμενο, λειτουργεί κατά κύριο λόγο μετά τις 18:00 το απόγευμα και καλύπτει το φορτίο που αδυνατούν να καλύψουν τα φωτοβολταϊκά λόγω έλλειψης ηλιοφάνειας. Παρατηρείται ότι πάντα λειτουργεί και σχεδόν πάντα αποδίδει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεγονός που οφείλεται στην Load following στρατηγική που περιεγράφηκε παραπάνω.



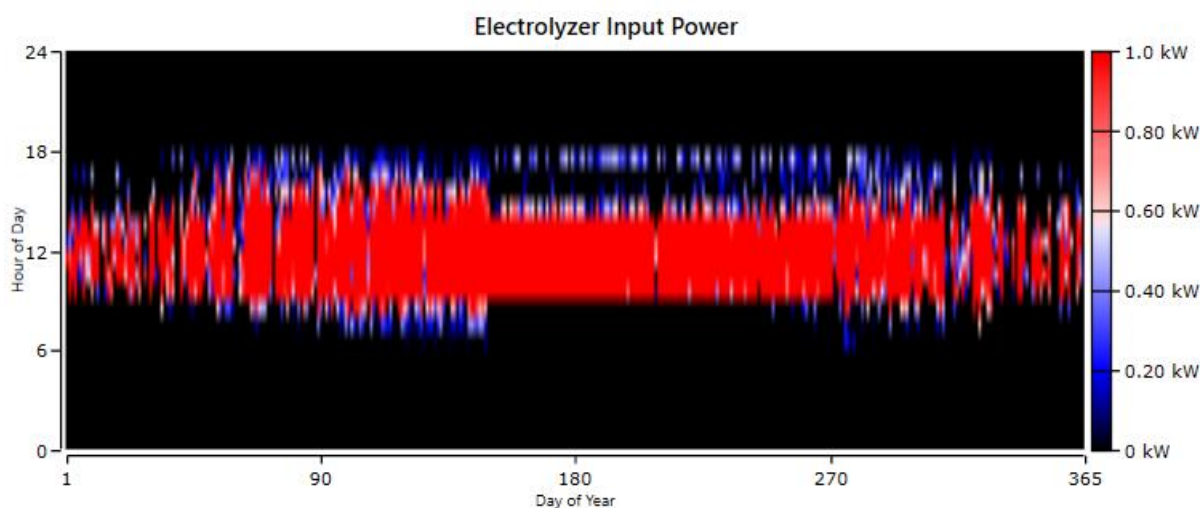
Εικόνα 6.4. 15 Παραγωγή κυψέλης συναρτήσει των ωρών της ημέρας

Στους ακόλουθους πίνακες, παρατηρείται ότι η κυψέλη λειτουργεί 766 ώρες το χρόνο, έχει 371 εκκινήσεις και έχει χρόνο ζωής 26.1 χρόνια. Επιπρόσθετα, η κυψέλη παράγει 749 kWh το χρόνο και η μέση έξοδος της είναι σχεδόν 1 kW.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Hours of Operation	766	hrs/yr	Electrical Production	749	kWh/yr
Number of Starts	371	starts/yr	Mean Electrical Output	0.977	kW
Operational Life	26.1	yr	Minimum Electrical Output	0.644	kW
Capacity Factor	8.55	%	Maximum Electrical Output	1.00	kW
Fixed Generation Cost	0.115	€/hr			
Marginal Generation Cost	0	€/kWh			

Εικόνα 6.4. 16 Χαρακτηριστικά λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Ακολουθεί η παρουσίαση της λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Συγκεκριμένα, όπως ήταν αναμενόμενο η ηλεκτρολυτική μονάδα παρουσιάζει peak λειτουργίας το χρονικό διάστημα από 12:00 έως 17:00. Σε αυτό το χρονικό διάστημα υπάρχει η μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία της ημέρας και συνεπώς η περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά διοχετεύεται στην ηλεκτρολυτική μονάδα με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου. Όπως φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες, η ηλεκτρολυτική συσκευή λειτουργεί 2893 ώρες τη διάρκεια του χρόνου, καταναλώνει 43.8 kWh για κάθε κιλό υδρογόνου που παράγει, και έχει συνολική παραγωγή 45.5 κιλά το χρόνο.



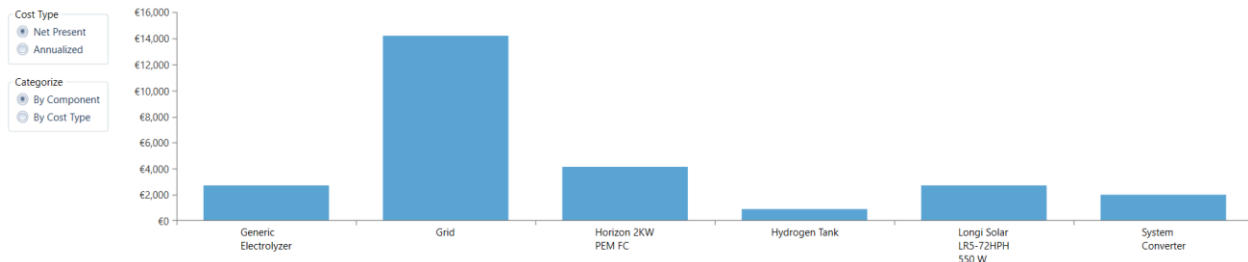
Εικόνα 6.4. 17 Λειτουργία ηλεκτρολυτικής μονάδας σε συνάρτηση με τις ώρες της ημέρας

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated capacity	1.00	kW	Mean output	0.00520	kg/hr
Mean input	0.228	kW	Minimum Output	0	kg/hr
Minimum input	0	kW	Maximum Output	0.0228	kg/hr
Maximum input	1.00	kW	Total production	45.5	kg/yr
Total input energy	1,995	kWh/yr	Specific consumption	43.8	kWh/kg
Capacity Factor	22.8	%			
Hours of operation	2,893	hr/yr			

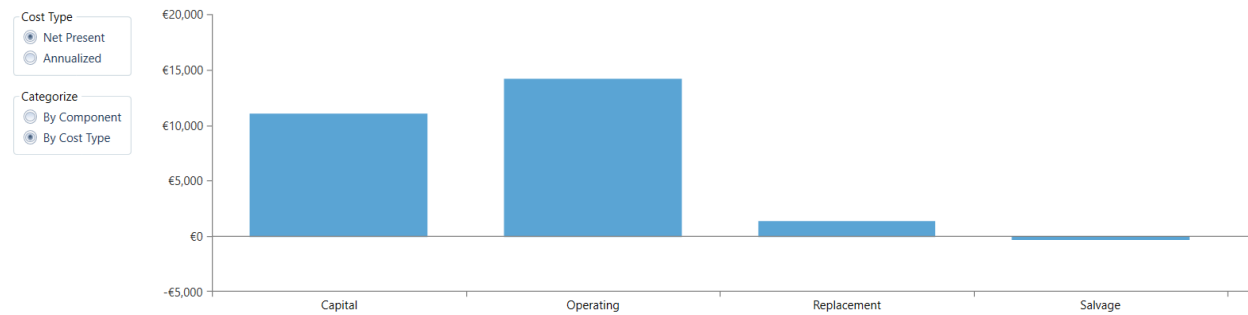
Εικόνα 6.4. 18 Στοιχεία λειτουργίας και παραγωγής μονάδας ηλεκτρόλυσης

Μετά την παρουσίαση της παραγωγής θα πρέπει να παρουσιαστούν και τα οικονομικά αποτελέσματα τα οποία είναι εξίσου σημαντικά για την σωστή επιλογή του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα όπως έχει αναφερθεί οι δυνατοί συνδυασμοί ταξινομούνται με βάση το καθαρό παρόν κόστος του συστήματος. Στο συγκεκριμένο σενάριο, το καθαρό παρόν κόστος είναι 26.593,43 € για διάρκεια ζωής 25 χρόνων. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας διαμορφώνεται στα 1.198,48 € ενώ το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι 0.14 €.

Στην εικόνα 6.4.19 απεικονίζεται το κόστος κάθε εξαρτήματος του συστήματος ενώ στο γράφημα της εικόνας 6.4.20 παρουσιάζεται το αρχικό κεφάλαιο το οποίο είναι 11.100 €, το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού 1.484,96 €, και το κόστος λειτουργίας του συστήματος 14.308,32 € για την 25ετία. Επιπλέον απεικονίζεται και η υπολειμματική αξία η οποία είναι η αξία του συστήματος μετά το πέρας των 25 ετών.



Εικόνα 6.4. 19 Κόστος συναρτήσεως του εξοπλισμού



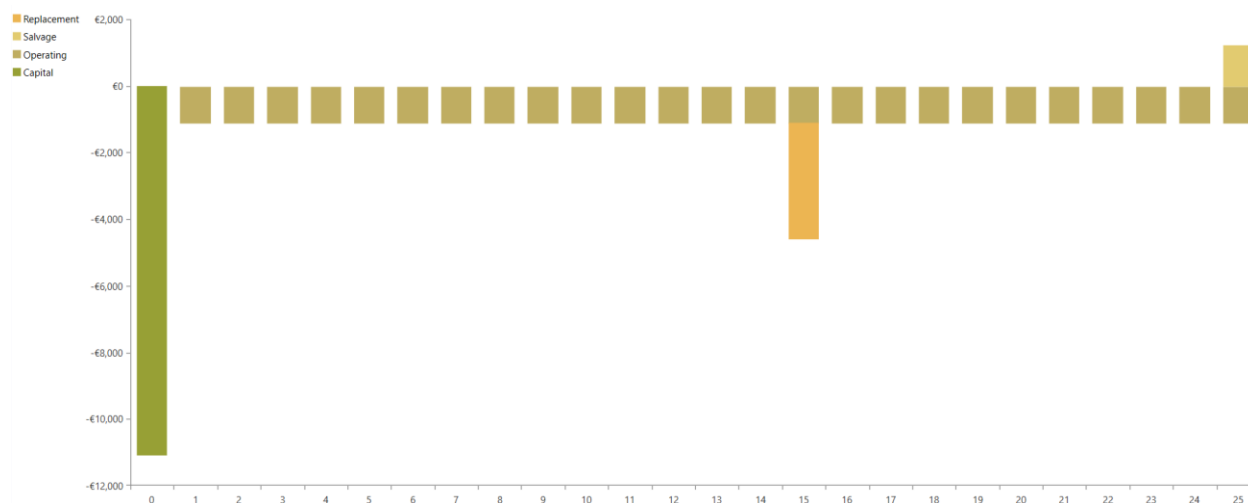
Εικόνα 6.4. 20 Διάγραμμα με βάση το είδος της δαπάνης

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη του εξοπλισμού που απαρτίζει το σύστημα.

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
▷ Generic Electrolyzer	€2,000.00	€848.55	€0.00	€0.00	-€159.71	€2,688.84
▷ Grid	€0.00	€0.00	€14,159.78	€0.00	€0.00	€14,159.78
▷ Horizon 2KW PEM FC	€4,000.00	€0.00	€148.54	€0.00	-€20.36	€4,128.17
▷ Hydrogen Tank	€900.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€900.00
▷ Longi Solar LR5-72HPH 550 W	€2,700.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€2,700.00
▷ System Converter	€1,500.00	€636.41	€0.00	€0.00	-€119.78	€2,016.63
System	€11,100.00	€1,484.96	€14,308.32	€0.00	-€299.85	€26,593.43

Εικόνα 6.4. 21 Αναλυτικό κόστος εξοπλισμού.

Επιπλέον, παρουσιάζονται οι ταμειακές ροές για τη διάρκεια των 25 χρόνων ζωής του συστήματος συναρτήσει του είδους της δαπάνης.



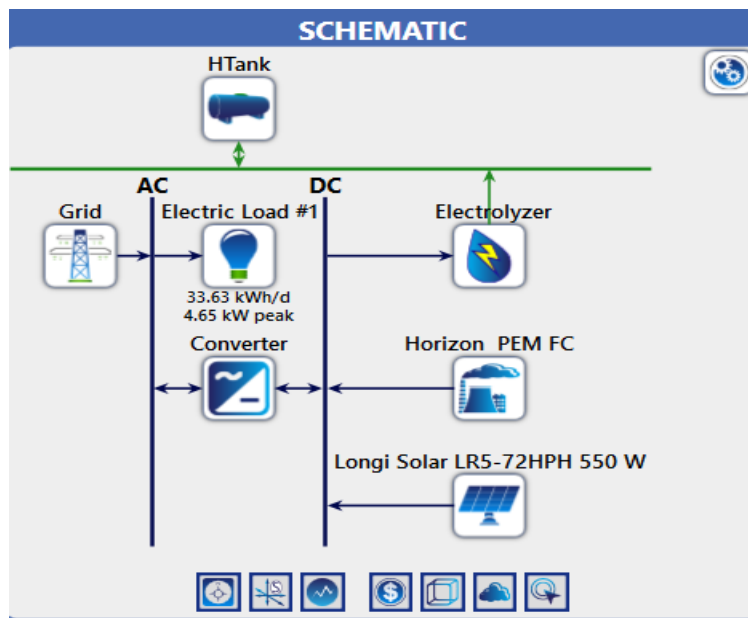
Εικόνα 6.4. 22 Ταμειακές ροές με βάση το είδος της δαπάνης

Τέλος, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αναφορά στα περιβαλλοντικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα στους εκπεμπόμενους ρύπους. Στο σύστημα που εξετάζεται δεν υπάρχουν συμβατικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής επομένως οι εκπεμπόμενοι ρύποι προέρχονται μόνο από το δίκτυο το οποίο συνεισφέρει 6.845 kWh το χρόνο. Στην Ελλάδα μία κιλοβατώρα από το δίκτυο αντιστοιχεί σε 0.632 kg/kWh CO<sub>2</sub>. Επομένως, οι συνολικοί εκπεμπόμενοι ρύποι είναι  $6.845 \text{ kWh} \times 0.632 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 4.326 \frac{\text{kg}}{\text{year}} \text{CO}_2$ .

#### 6.4.2 Δεύτερο σενάριο.

Σε αυτό το σενάριο το σύστημα ενεργειακής παραγωγής που εξετάζεται πρέπει να εξασφαλίζει ότι τουλάχιστον το 80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές. Το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και αποτελείται από φωτοβολταϊκά και κυψέλη υδρογόνου. Κατά τις ηλιόλουστες ημέρες, η ενεργειακή ζήτηση ικανοποιείται άμεσα από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Κατά τη διάρκεια των περιόδων υπερπαραγωγής, η πλεονάζουσα

ενέργεια διοχετεύεται σε μια συσκευή ηλεκτρόλυσης που παράγει υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή. Σε περίπτωση που η δεξαμενή είναι πλήρης και δεν μπορεί να παραχθεί υδρογόνο τότε η περίσσεια ενέργειας πωλείται πίσω στο δίκτυο. Κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας ή κατά τη διάρκεια της νύχτας, το αποθηκευμένο υδρογόνο χρησιμοποιείται από την κυψέλη καυσίμου, η οποία αναλαμβάνει την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Σε περίπτωση που η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή της κυψέλης καυσίμου, το σύστημα απορροφά ενέργεια από το δίκτυο για να διασφαλίσει τη συνεχή προμήθεια ενέργειας και τη σταθερότητα του συστήματος. Σε αυτό το σενάριο όπως γίνεται αντιληπτό η διαφορά που υπάρχει με το σενάριο 1 συναντάται στο ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ για την κάλυψη του φορτίου και κατ' επέκταση την ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης με το δίκτυο. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται το σύστημα που εξετάζεται.



Εικόνα 6.4.1. 1 Υπό εξέταση σύστημα

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο η διαδικασία ξεκινάει με τον καθορισμό του ποσοστού ελάχιστης συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος περιορισμός ο οποίος απαιτείται να είναι 80%.

CONSTRAINTS

Maximum annual capacity shortage (%):

Minimum renewable fraction (%):

Operating Reserve

As a percentage of load

Load in current time step (%):

Annual peak load (%):

As a percentage renewable output

Solar power output (%):













Wind power output (%):

Εικόνα 6.4.1. 2 Ποσοστό ελάχιστης συμμετοχής ΑΠΕ

Έπειτα, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιεγράφηκε αναλυτικά στο σενάριο 1, ορίζονται τα μεγέθη που αφορούν κάθε στοιχείο του εξοπλισμού του συστήματος. Για τα φωτοβολταϊκά εξετάζεται ισχύς από 10 kW έως 15 kW. Για την κυψέλη καυσίμου, εξετάζονται ισχύς από 1 kW έως 5 kW. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης εξετάζεται για ισχύ από 1 kW έως 5 kW, ο μετατροπέας για ισχύ από 5kW έως 10 kW ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης για χωρητικότητα από 1.5 έως 5 kg. Επιπλέον, για κάθε στοιχείο του συστήματος ορίζονται τα κόστη αγοράς, αντικατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τη λειτουργία του. Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων, ξεκινάει η διαδικασία της προσομοίωσης. Το λογισμικό κάνει υπολογισμούς για κάθε μία από τις 8760 ώρες του έτους και εξετάζει κάθε πιθανό συνδυασμό στοιχείων του συστήματος. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης παραθέτει λίστα με όλα τα συστήματα που μπορούν να υλοποιηθούν και πληρούν τους περιορισμούς του χρήστη ταξινομημένα σύμφωνα με το καθαρό παρόν κόστος.

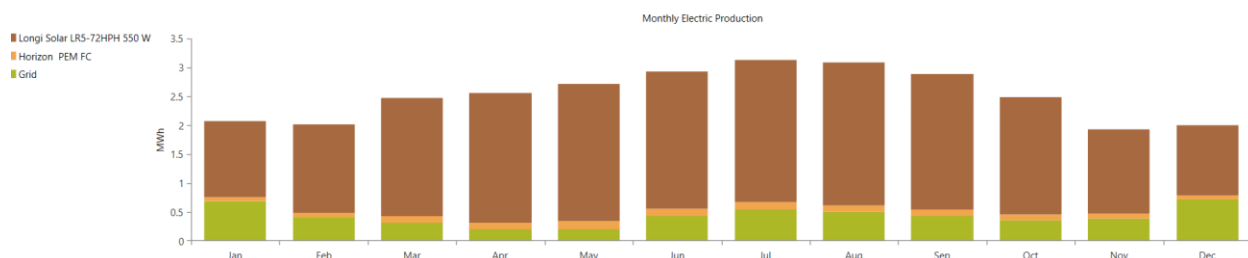
Στην περίπτωση του σεναρίου που εξετάζεται, το λογισμικό έδωσε το σύστημα που απεικονίζεται στην Εικόνα 6.4.10. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ότι το βέλτιστο σύστημα περιλαμβάνει 15kW εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, 1kW κυψέλη καυσίμου, 1 kW μονάδα ηλεκτρόλυσης,

δεξαμενή αποθήκευσης χωρητικότητας 1.5kg και inverter ισχύος 9kW με 80% ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.

Export...		Export Details...		Optimization Results Double click on a system to see its Simulation Details.												Comp	
Architecture												Cost				System	
																	
Longi Solar LRS-72HPH 550 W (kW)	Horizon PEM FC (kW)	Grid (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	NPC (€)	LCOE (€/kWh)	Operating cost (€/yr)	CAPEX (€)	Ren Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)						
15.0	1.00	999,999	1.00	1.50	9.00	€21,343	€0.0639	€246.96	€18,150	80.0	77.2						

Εικόνα 6.4.1. 3 Βέλτιστο σύστημα Σεναρίου 2

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά και οικονομικά αποτελέσματα της προαναφερθείσας προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της εικόνας 6.4.1.4 απεικονίζεται η μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποδίδεται με καφέ χρώμα, η παραγωγή από την κυψέλη καυσίμου με πορτοκαλί, ενώ η συνεισφορά του δικτύου εμφανίζεται με πράσινο χρώμα για κάθε μήνα του έτους. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας παράγεται από τα φωτοβολταϊκά, ακολουθεί το δίκτυο και τέλος τη μικρότερη συνεισφορά έχει η κυψέλη. Συγκριτικά με το πρώτο σενάριο όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη παραγωγή τόσο από τα φωτοβολταϊκά όσο και από την κυψέλη γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστασιολόγηση του συστήματος.



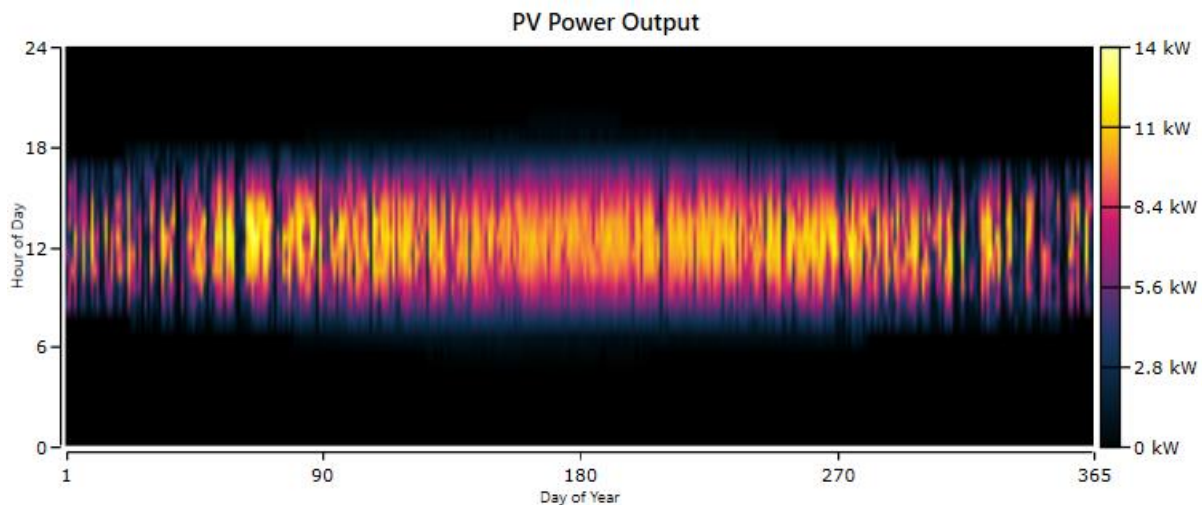
Εικόνα 6.4.1. 4 Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στην εικόνα 6.4.1.5 παρουσιάζονται ποσοτικά οι κιλοβατώρες που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια του έτους. Το 78.7% της παραγωγής προήλθε από τα φωτοβολταϊκά ενώ το 4.2% από την κυψέλη καυσίμου. Τέλος αγοράστηκαν από το δίκτυο 5.160 kWh στη διάρκεια του έτους.

Production	kWh/yr	%
Longi Solar LR5-72HPH 550 W	23,831	78.7
Horizon 2KW PEM FC	1,279	4.22
Grid Purchases	5,160	17.0
Total	30,270	100

Εικόνα 6.4.1. 5 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της παραγωγής από κάθε επιμέρους στοιχείο του συστήματος. Στην εικόνα 6.4.1.6 απεικονίζεται διάγραμμα που παρουσιάζει την παραγωγή των φωτοβολταϊκών σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Όπως και στο σενάριο 1, τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν από περίπου τις 7 το πρωί έως περίπου τις 6 το απόγευμα, δηλαδή κατά τις ώρες ηλιοφάνειας. Η μέγιστη τιμή της παραγωγής τους καταγράφεται, όπως αναμένεται, στο χρονικό διάστημα μεταξύ 13:00 και 17:00, όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία.



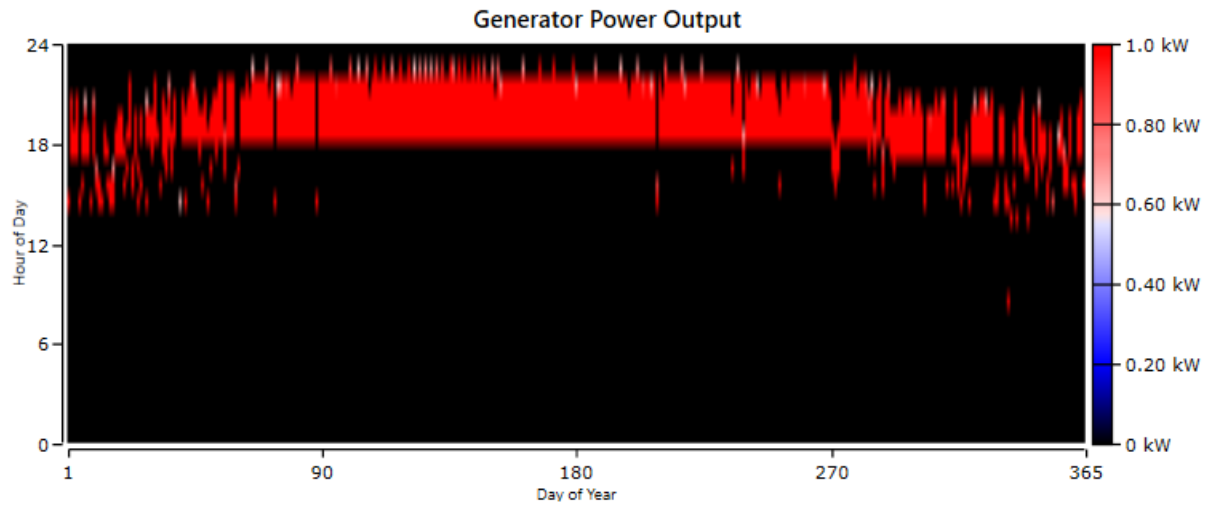
Εικόνα 6.4.1. 6 Παραγωγή φωτοβολταϊκών στη διάρκεια του έτους

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών, η μέση ημερήσια παραγωγή 65.3 kWh καθώς και η ετήσια παραγωγή με 23.831 κιλοβατώρες.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	15.0	kW
Mean Output	2.72	kW
Mean Output	65.3	kWh/d
Capacity Factor	18.1	%
Total Production	23,831	kWh/yr

Εικόνα 6.4.1. 7 Στοιχεία παραγωγής φωτοβολταϊκών

Έπειτα παρουσιάζεται η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Όπως φαίνεται από τις ακόλουθες εικόνες, η κυψέλη, όπως ήταν αναμενόμενο, λειτουργεί κατά κύριο λόγο μετά τις 18:00 το απόγευμα και καλύπτει το φορτίο που αδυνατούν να καλύψουν τα φωτοβολταϊκά λόγω έλλειψης ηλιοφάνειας. Παρατηρείται ότι πάντα λειτουργεί και σχεδόν πάντα αποδίδει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεγονός που οφείλεται στην Load following στρατηγική που περιεγράφηκε παραπάνω. Συγκριτικά με το πρώτο σενάριο, η κυψέλη σε αυτήν την περίπτωση λειτουργεί παραπάνω και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχει γίνει μεγαλύτερη διαστασιολόγηση στο σύστημα και υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο υδρογόνο.



Εικόνα 6.4.1. 8 Έξοδος κυψέλης καυσίμου σε συνάρτηση με τις ώρες της ημέρας

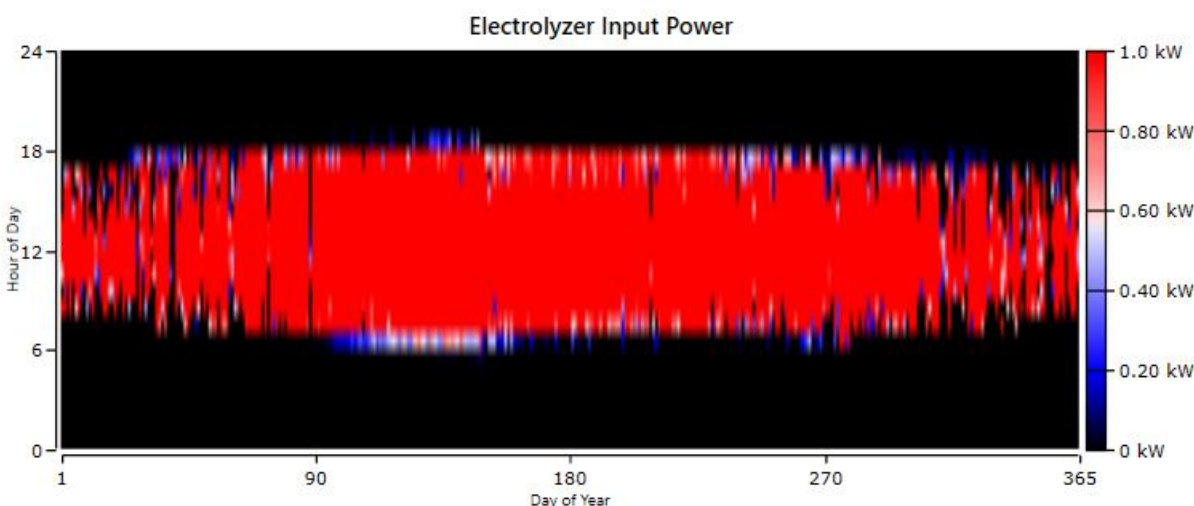
Στους ακόλουθους πίνακες, παρατηρείται ότι η κυψέλη λειτουργεί 1292 ώρες το χρόνο, έχει 378 εκκινήσεις και έχει χρόνο ζωής 15.5 χρόνια. Επιπρόσθετα, η κυψέλη παράγει 1279 kWh το χρόνο και η μέση έξοδος της είναι σχεδόν 1 kW. Συγκριτικά με το πρώτο σενάριο ο χρόνος ζωής της κυψέλης μειώνεται, γεγονός που οφείλεται στις παραπάνω ώρες λειτουργίας στη διάρκεια του έτους.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Hours of Operation	1,292	hrs/yr	Electrical Production	1,279	kWh/yr
Number of Starts	378	starts/yr	Mean Electrical Output	0.990	kW
Operational Life	15.5	yr	Minimum Electrical Output	0.644	kW
Capacity Factor	14.6	%	Maximum Electrical Output	1.00	kW
Fixed Generation Cost	0.115	€/hr			
Marginal Generation Cost	0	€/kWh			

Εικόνα 6.4.1. 9 Χαρακτηριστικά λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Ακολουθεί η παρουσίαση της λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Συγκεκριμένα, όπως ήταν αναμενόμενο η ηλεκτρολυτική μονάδα παρουσιάζει peak λειτουργίας το χρονικό διάστημα από 12:00 έως 17:00. Σε αυτό το χρονικό διάστημα υπάρχει η μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία της

ημέρας και συνεπώς η περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά διοχετεύεται στην ηλεκτρολυτική μονάδα με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου. Όπως φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες, η ηλεκτρολυτική συσκευή λειτουργεί 4180 ώρες τη διάρκεια του χρόνου, καταναλώνει 43.8 kWh για κάθε κιλό υδρογόνου που παράγει, και έχει συνολική παραγωγή 77.2 κιλά το χρόνο.



Εικόνα 6.4.1. 10 Λειτουργία ηλεκτρολυτικής μονάδας σε συνάρτηση με της ώρες της ημέρας

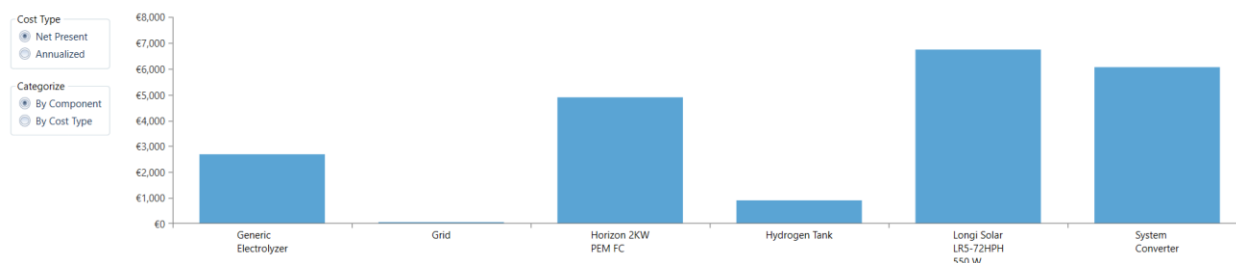
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated capacity	1.00	kW	Mean output	0.00881	kg/hr
Mean input	0.386	kW	Minimum Output	0	kg/hr
Minimum input	0	kW	Maximum Output	0.0228	kg/hr
Maximum input	1.00	kW	Total production	77.2	kg/yr
Total input energy	3,383	kWh/yr	Specific consumption	43.8	kWh/kg
Capacity Factor	38.6	%			
Hours of operation	4,180	hr/yr			

Εικόνα 6.4.1. 11 Χαρακτηριστικά λειτουργίας μονάδας ηλεκτρόλυσης

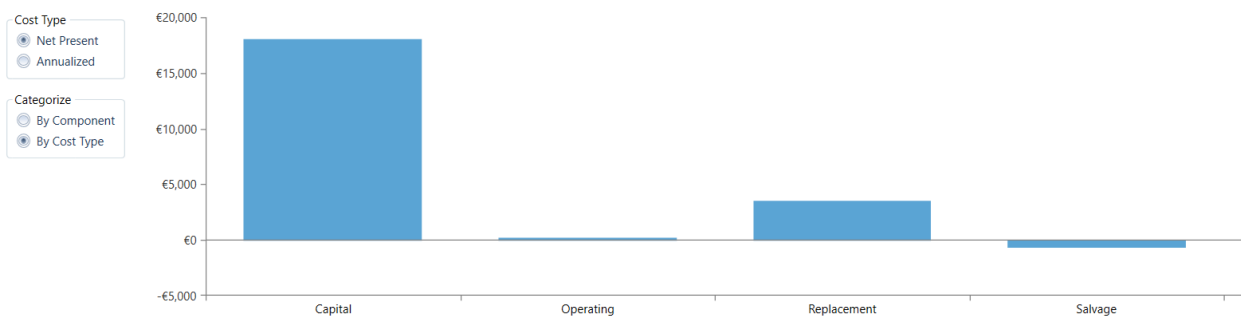
Μετά την παρουσίαση της παραγωγής θα πρέπει να παρουσιαστούν και τα οικονομικά αποτελέσματα τα οποία είναι εξίσου σημαντικά για την σωστή επιλογή του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα όπως έχει αναφερθεί οι δυνατοί συνδυασμοί ταξινομούνται με βάση το καθαρό

παρόν κόστος του συστήματος. Στο συγκεκριμένο σενάριο, το καθαρό παρόν κόστος είναι 21.342,55 € για διάρκεια ζωής 25 χρόνων. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας διαμορφώνεται στα 246,96 € ενώ το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι 0.06 €.

Στην εικόνα 6.4.1.12 απεικονίζεται το κόστος κάθε εξαρτήματος του συστήματος ενώ στο γράφημα της εικόνας 6.4.1.13 παρουσιάζεται το αρχικό κεφάλαιο το οποίο είναι 18.150 €, το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού 3.583,37 €, και το κόστος λειτουργίας του συστήματος 312.68 € για την 25ετία. Επιπλέον απεικονίζεται και η υπολειμματική αξία 703,5 € η οποία είναι η αξία του συστήματος μετά το πέρας των 25 ετών.



Εικόνα 6.4.1. 12 Κόστος συναρτήσει του εξοπλισμού



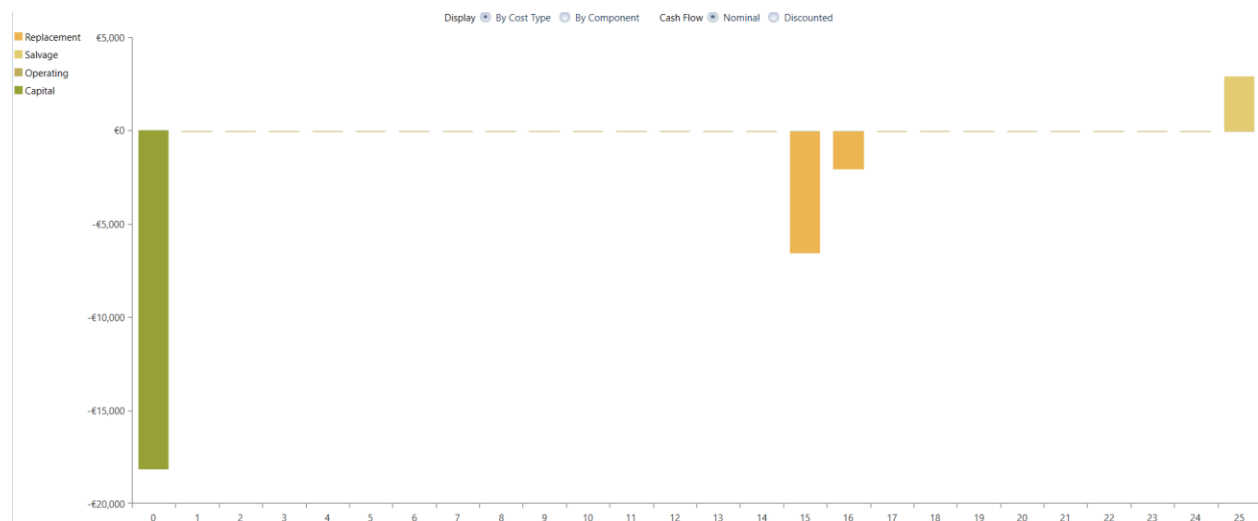
Εικόνα 6.4.1. 13 Διάγραμμα με βάση το είδος της δαπάνης

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη του εξοπλισμού που απαρτίζει το σύστημα.

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
▷ Generic Electrolyzer	€2,000.00	€848.55	€0.00	€0.00	-€159.71	€2,688.84
▷ Grid	€0.00	€0.00	€62.15	€0.00	€0.00	€62.15
▷ Horizon 2KW PEM FC	€4,000.00	€825.59	€250.54	€0.00	-€184.46	€4,891.66
▷ Hydrogen Tank	€900.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€900.00
▷ Longi Solar LR5-72HPH 550 W	€6,750.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€6,750.00
▷ System Converter	€4,500.00	€1,909.23	€0.00	€0.00	-€359.34	€6,049.90
System	€18,150.00	€3,583.37	€312.68	€0.00	-€703.50	€21,342.55

Εικόνα 6.4.1. 14 Αναλυτικό κόστος εξοπλισμού συστήματος

Επιπλέον, παρουσιάζονται οι ταμειακές ροές για τη διάρκεια των 25 χρόνων ζωής του συστήματος συναρτήσει του είδους της δαπάνης.

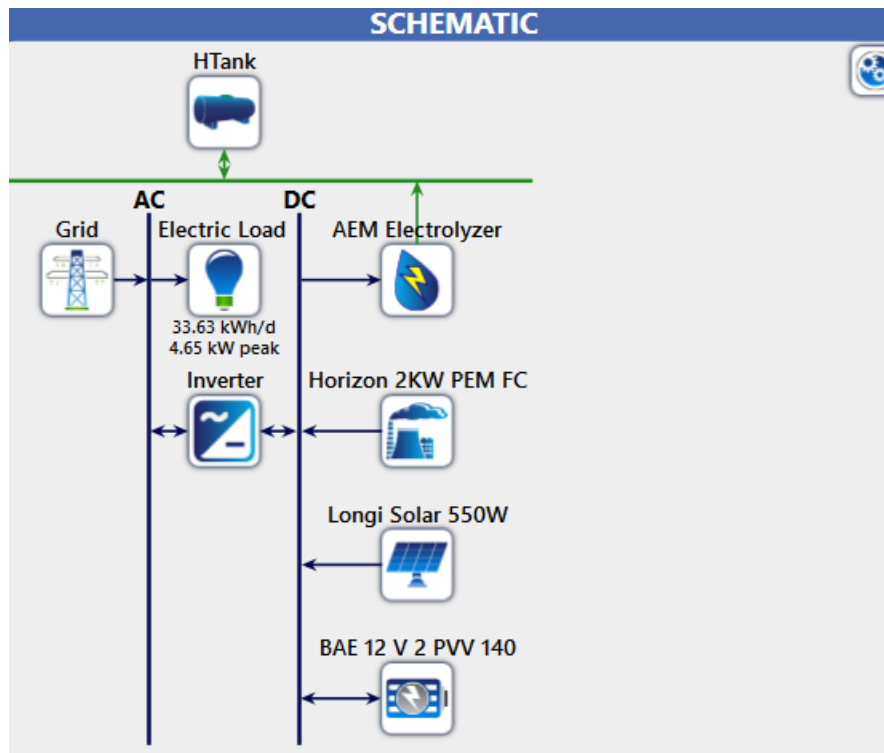


Εικόνα 6.4.1. 15 Ταμειακές ροές με βάση το είδος της δαπάνης

Τέλος, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αναφορά στα περιβαλλοντικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα στους εκπεμπόμενους ρύπους. Στο σύστημα που εξετάζεται δεν υπάρχουν συμβατικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής επομένως οι εκπεμπόμενοι ρύποι προέρχονται μόνο από το δίκτυο το οποίο συνεισφέρει 5.160 kWh το χρόνο. Στην Ελλάδα μία κιλοβατώρα από το δίκτυο αντιστοιχεί σε  $0.632 \text{ kg/kWh CO}_2$ . Επομένως, οι συνολικοί εκπεμπόμενοι ρύποι είναι  $4.160 \text{ kWh} \times 0.632 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 3.261,1 \frac{\text{kg}}{\text{year}} \text{ CO}_2$ .

### 6.4.3 Τρίτο σενάριο.

Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο της παρούσας εργασίας το σύστημα ενεργειακής παραγωγής που εξετάζεται πρέπει να εξασφαλίζει ότι το 100% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές. Το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και αποτελείται από φωτοβολταϊκά και κυψέλη υδρογόνου. Σε αντίθεση με τα δύο προηγούμενα σε αυτό το σύστημα προστίθενται και συσσωρευτές. Κατά τις ηλιόλουστες ημέρες, η ενεργειακή ζήτηση ικανοποιείται άμεσα από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Κατά τη διάρκεια των περιόδων υπερπαραγωγής, η πλεονάζουσα ενέργεια χρησιμοποιείται τόσο για να τροφοδοτήσει την συσκευή ηλεκτρόλυσης που παράγει υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή, όσο και για να φορτίσει τις μπαταρίες του συστήματος. Σε περίπτωση που οι μπαταρίες είναι φορτισμένες και η δεξαμενή αποθήκευσης γεμάτη τότε η περίσσεια ενέργειας πωλείται πίσω στο δίκτυο. Κατά τις περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας ή κατά τη διάρκεια της νύχτας, το αποθηκευμένο υδρογόνο χρησιμοποιείται από την κυψέλη καυσίμου, η οποία αναλαμβάνει την κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου. Σε περίπτωση που η ζήτηση υπερβαίνει την παραγωγή της κυψέλης καυσίμου, το σύστημα απορροφά ενέργεια από τις μπαταρίες για να διασφαλίσει τη συνεχή προμήθεια ενέργειας και τη σταθερότητα του συστήματος. Σε αυτό το σενάριο όπως γίνεται αντιληπτό η διαφορά που υπάρχει με τα προηγούμενα δύο, συναντάται στο ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ και κατ' επέκταση στην μηδενική συμβολή του δικτύου για την κάλυψη του φορτίου. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται το σύστημα που εξετάζεται.



Εικόνα 6.4.3. 1 Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σεναρίου 3

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια η διαδικασία ξεκινάει με τον καθορισμό του ποσοστού ελάχιστης συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος περιορισμός ο οποίος απαιτείται να είναι 100% προκειμένου να υπάρχει ενεργειακή αυτονομία στο σύστημα και να μηδενιστεί η συνεισφορά του δικτύου στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου.

CONSTRAINTS

Maximum annual capacity shortage (%):

Minimum renewable fraction (%):

Operating Reserve

As a percentage of load

Load in current time step (%):

Annual peak load (%):

As a percentage renewable output





Solar power output (%):

Wind power output (%):

Εικόνα 6.4.3. 2 Καθορισμός ηλεκτροπαραγωγής 100% από ΑΠΕ

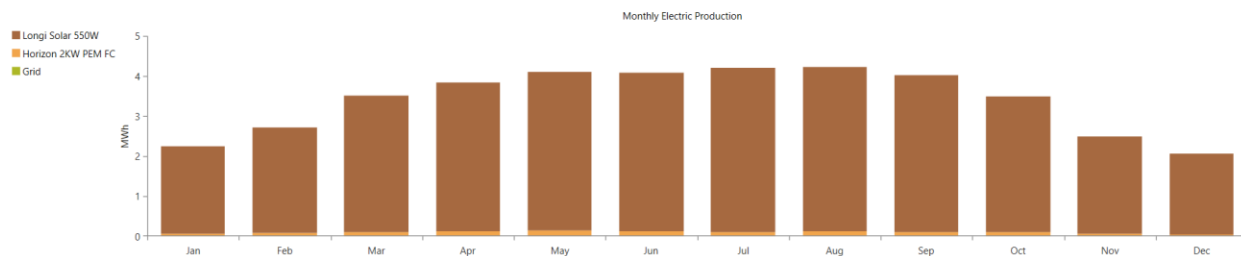
Έπειτα, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιεγράφηκε αναλυτικά στο σενάριο 1, ορίζονται τα μεγέθη που αφορούν κάθε στοιχείο του εξοπλισμού του συστήματος. Για τα φωτοβολταϊκά εξετάζεται ισχύς από 15 kW έως 25 kW. Για την κυψέλη καυσίμου, εξετάζονται ισχύς από 1 kW έως 5 kW. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης εξετάζεται για ισχύ από 1 kW έως 5 kW, ο μετατροπέας για ισχύ από 10kW έως 15 kW ενώ η δεξαμενή αποθήκευσης για χωρητικότητα από 1.5 έως 5 kg. Επιπλέον, για κάθε στοιχείο του συστήματος ορίζονται τα κόστη αγοράς, αντικατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για τη λειτουργία του. Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων, ξεκινάει η διαδικασία της προσομοίωσης. Το λογισμικό κάνει υπολογισμούς για κάθε μία από τις 8760 ώρες του έτους και εξετάζει κάθε πιθανό συνδυασμό στοιχείων του συστήματος. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης παραθέτει λίστα με όλα τα συστήματα που μπορούν να υλοποιηθούν και πληρούν τους περιορισμούς του χρήστη ταξινομημένα σύμφωνα με το καθαρό παρόν κόστος.

Στην περίπτωση του σεναρίου που εξετάζεται, το λογισμικό έδωσε το σύστημα που απεικονίζεται στην Εικόνα 6.4.3.3 Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ότι το βέλτιστο σύστημα περιλαμβάνει 25kW εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, 2kW κυψέλη καυσίμου, 1 kW μονάδα ηλεκτρόλυσης, δεξαμενή αποθήκευσης χωρητικότητας 1.5kg, 78 μπαταρίες και inverter ισχύος 14kW με 100% ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.

Export...		Export Details...		Optimization Results												System Performance	
				Double click on a system to see its Simulation Details.													
				Architecture						Cost						System	
				Longi Solar 550W (kW)	Horizon 2kW PEM FC (kW)	BAE 12 V 2 PVV 140 (#)	Grid (kW)	AEM Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	SolaX X3 Hybrid 5 (kW)	NPC (€)	LCOE (€/kWh)	Operating cost (€/yr)	CAPEX (€)	Ren Frac (%)		
				25.0	2.00	78	999,999	1.00	1.50	14.0	€33,277	€0.0732	-€1,085	€47,310	100		

Εικόνα 6.4.3. 3 Βέλτιστο σύστημα σεναρίου 3

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ηλεκτρικά και οικονομικά αποτελέσματα της προαναφερθείσας προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της εικόνας 6.4.3.4 απεικονίζεται η μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποδίδεται με καφέ χρώμα, η παραγωγή από την κυψέλη καυσίμου με πορτοκαλί για κάθε μήνα του έτους. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας παράγεται όπως είναι αναμενόμενο από τα φωτοβολταϊκά που είναι η κύρια πηγή ενέργειας της κατοικίας και έπειτα ακολουθεί η κυψέλη η οποία ενεργοποιείται όταν δεν μπορούν να καλύψουν τα φωτοβολταϊκά τη ζήτηση. Επιπλέον στη συνέχεια θα παρουσιαστεί και διάγραμμα με την συνεισφορά των συσσωρευτών και τα χρονικά διαστήματα που λειτουργούν. Συγκριτικά με τα προηγούμενα σενάρια όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη παραγωγή τόσο από τα φωτοβολταϊκά όσο και από την κυψέλη γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη διαστασιολόγηση του συστήματος.



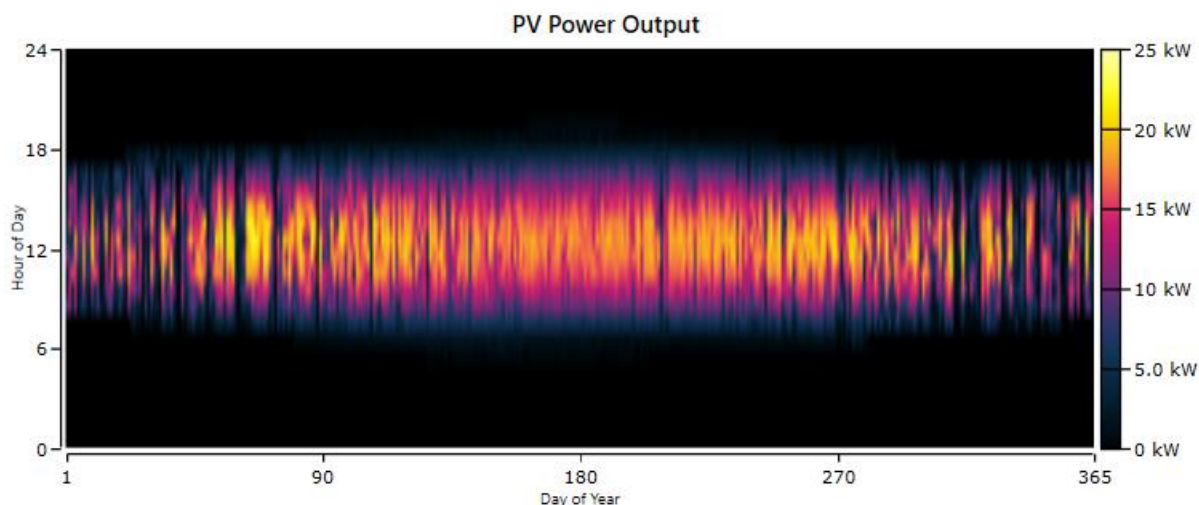
Εικόνα 6.4.3. 4 Μηνιαία ηλεκτροπαραγωγή συστήματος

Στην εικόνα 6.4.3.5 παρουσιάζονται ποσοτικά οι κιλοβατώρες που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια του έτους. Το 97.1% της παραγωγής προήλθε από τα φωτοβολταϊκά ενώ το 2.9% από την κυψέλη καυσίμου. Το δίκτυο είχε μηδενική συνεισφορά και δεν αγοράστηκαν καθόλου κιλοβατώρες.

Production	kWh/yr	%
Longi Solar LR5-72HPH 550 W	39,719	97.1
Horizon 2KW PEM FC	1,167	2.85
Total	40,885	100

Εικόνα 6.4.3. 5 Παραγόμενες κιλοβατώρες σε διάστημα ενός έτους

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της παραγωγής από κάθε επιμέρους στοιχείο του συστήματος. Στην εικόνα 6.4.3.6 απεικονίζεται διάγραμμα που παρουσιάζει την παραγωγή των φωτοβολταϊκών σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Παρατηρείται ότι τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν από περίπου τις 7 το πρωί έως περίπου τις 6 το απόγευμα, δηλαδή κατά τις ώρες ηλιοφάνειας. Η μέγιστη τιμή της παραγωγής τους καταγράφεται, όπως αναμένεται, στο χρονικό διάστημα μεταξύ 13:00 και 17:00, όπου παρατηρείται και η μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά το μεσημέρι η έξοδος των φωτοβολταϊκών πλησιάζει την ονομαστική ισχύ εξόδου, γεγονός που σημαίνει ότι μετά την κάλυψη του φορτίου υπάρχει αρκετά μεγάλη ποσότητα περίσσειας ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει την ηλεκτρολυτική μονάδα και να φορτίσει τις μπαταρίες.



Εικόνα 6.4.3. 6 Έξοδος των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια του έτους σε συνάρτηση με τις ώρες της ημέρας

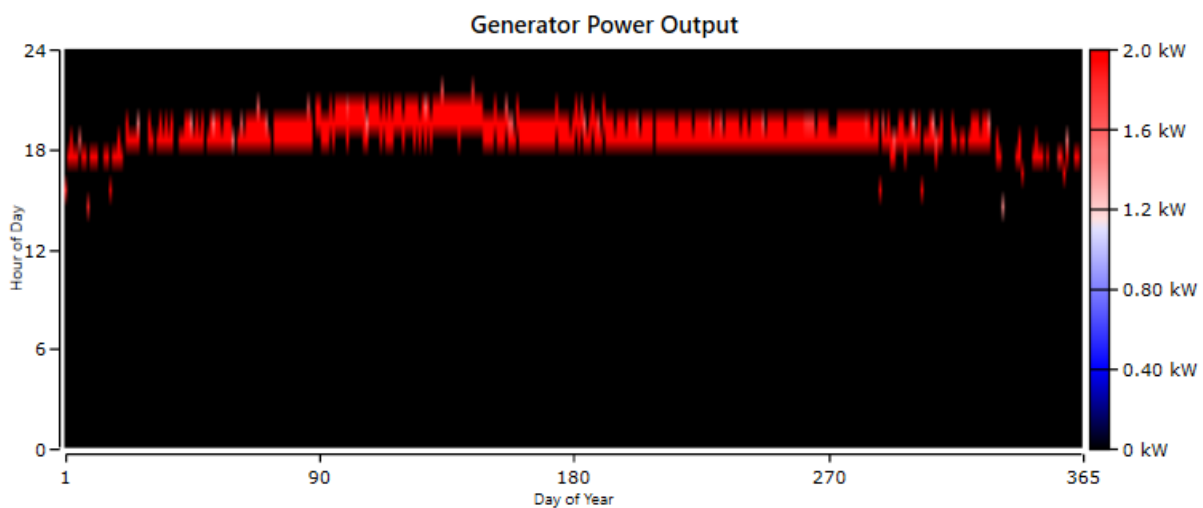
Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών 25kW, η μέση ημερήσια παραγωγή 109 kWh καθώς και η ετήσια παραγωγή με 39.719 κιλοβατώρες.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	25.0	kW
Mean Output	4.53	kW
Mean Output	109	kWh/d
Capacity Factor	18.1	%
Total Production	39,719	kWh/yr

Εικόνα 6.4.3. 7 Παραγωγή φωτοβολταϊκών

Έπειτα παρουσιάζεται η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Όπως φαίνεται από τις ακόλουθες εικόνες, η κυψέλη, όπως ήταν αναμενόμενο, λειτουργεί κατά κύριο λόγο μετά τις 18:00 το απόγευμα και καλύπτει το φορτίο που αδυνατούν να καλύψουν τα φωτοβολταϊκά λόγω έλλειψης ηλιοφάνειας. Παρατηρείται ότι πάντα λειτουργεί και σχεδόν πάντα αποδίδει τη μέγιστη ονομαστική ισχύ της γεγονός που οφείλεται στην Load following στρατηγική που περιεγράφηκε

παραπάνω. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι συγκριτικά με τα προηγούμενα σενάρια, η κυψέλη σε αυτήν την περίπτωση λειτουργεί λιγότερο και καλύπτει φορτίο κατά τη διάρκεια των βραδινών ωρών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πλέον στο σύστημα υπάρχουν και μπαταρίες και ο ελεγκτής αποφασίζει κάθε φορά αν θα καλυφθεί το φορτίο από την κυψέλη ή τις μπαταρίες ανάλογα με το χαμηλότερο δυνατό κόστος ενέργειας.



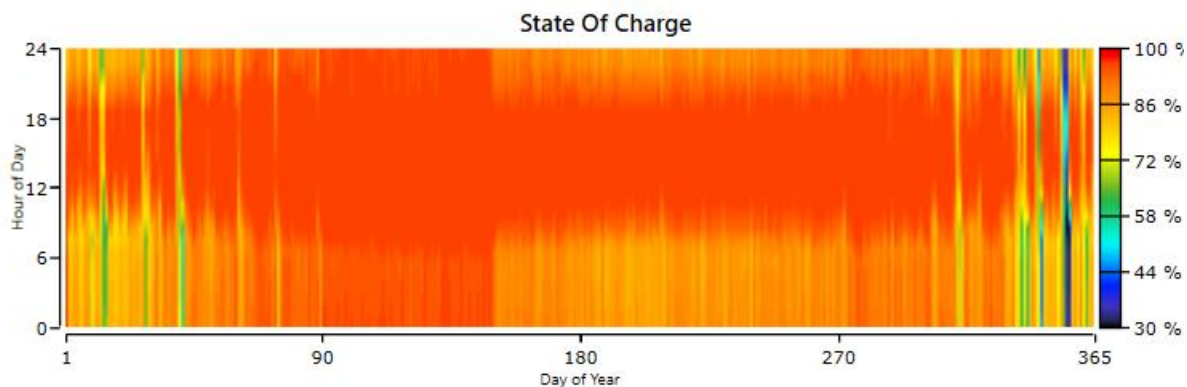
Εικόνα 6.4.3. 8 Έξοδος κυψέλης καυσίμου συναρτήσει των ωρών της ημέρας

Στους ακόλουθους πίνακες, παρατηρείται ότι η κυψέλη λειτουργεί 589 ώρες το χρόνο, έχει 330 εκκινήσεις και έχει χρόνο ζωής 34 χρόνια. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σύγκριση με το δεύτερο σενάριο η κυψέλη λειτουργεί λιγότερες ώρες και έχει λιγότερες ετήσιες εκκινήσεις και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μπαταριών στο σύστημα και στη στρατηγική ελέγχου που αποφασίζει αν η ζήτηση κάθε φορά θα καλυφθεί από τις μπαταρίες ή από την κυψέλη. Επιπρόσθετα, η κυψέλη παράγει 1.167 kWh το χρόνο και η μέση έξοδος της είναι σχεδόν 2 kW.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Hours of Operation	589	hrs/yr	Electrical Production	1,167	kWh/yr
Number of Starts	330	starts/yr	Mean Electrical Output	1.98	kW
Operational Life	34.0	yr	Minimum Electrical Output	1.47	kW
Capacity Factor	6.66	%	Maximum Electrical Output	2.00	kW
Fixed Generation Cost	0.230	€/hr			
Marginal Generation Cost	0	€/kWh			

Εικόνα 6.4.3. 9 Χαρακτηριστικά λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Σε αυτό το σημείο θα γίνει η παρουσίαση της λειτουργίας των συσσωρευτών του συστήματος. Ειδικότερα στην εικόνα 6.4.3.10 απεικονίζεται για κάθε ώρα της ημέρας το στάδιο φόρτισης της μπαταρίας. Συγκεκριμένα, η μπαταρίες για την περισσότερη ώρα της ημέρας βρίσκονται σε υψηλό επίπεδο φόρτισης ενώ παρατηρείται ότι το ποσοστό φόρτισης δεν πέφτει κάτω από 70% στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παρόλο που το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης έχει επιλεγεί να είναι 30%. Αυτό οφείλεται αρχικά στην στρατηγική ελέγχου του συστήματος η οποία επιλέγει κάθε φορά με το βέλτιστο τρόπο αν θα ικανοποιήσει τη ζήτηση κάνοντας χρήση της κυψέλης ή των μπαταριών.



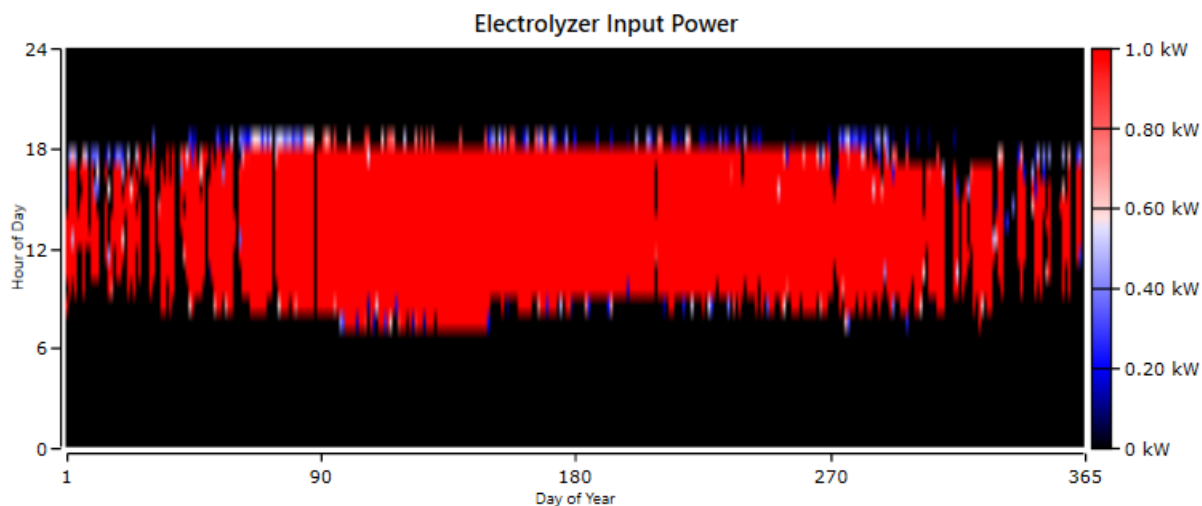
Εικόνα 6.4.3. 10 Στάδιο φόρτισης της μπαταρίας στη διάρκεια της ημέρας

Στους πίνακες που ακολουθούν απεικονίζονται τα ποσοτικά αποτελέσματα και χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών. Συγκεκριμένα, οι μπαταρίες συνεισφέρουν περίπου 5200 kWh ετησίως στο σύστημα, έχουν 123 kWh ονομαστική χωρητικότητα ενώ παρατηρείται ότι έχουν lifetime throughput 97.446 kWh. Τέλος η διάρκεια ζωής τους αναμένεται να είναι 18 έτη και αυτός είναι ο κύριος λόγος που επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο σύστημα όπως έχει αναλυθεί παραπάνω.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Autonomy	61.5	hr	Average Energy Cost	0	€/kWh
Storage Wear Cost	0.158	€/kWh	Energy In	5,528	kWh/yr
Nominal Capacity	123	kWh	Energy Out	5,277	kWh/yr
Usable Nominal Capacity	86.2	kWh	Storage Depletion	25.5	kWh/yr
Lifetime Throughput	97,446	kWh	Losses	277	kWh/yr
Expected Life	18.0	yr	Annual Throughput	5,414	kWh/yr
			Annual EFCs	44.0	1/yr
			Average Daily EFCs	0.120	1/day

Εικόνα 6.4.3. 11 Χαρακτηριστικά λειτουργίας μπαταριών

Ακολουθεί η παρουσίαση της λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Συγκεκριμένα, όπως ήταν αναμενόμενο η ηλεκτρολυτική μονάδα παρουσιάζει peak λειτουργίας το χρονικό διάστημα από 12:00 έως 17:00. Σε αυτό το χρονικό διάστημα υπάρχει η μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία της ημέρας και συνεπώς η περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά διοχετεύεται στην ηλεκτρολυτική μονάδα με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου. Όπως φαίνεται στους ακόλουθους πίνακες, η ηλεκτρολυτική συσκευή λειτουργεί 5.435 ώρες τη διάρκεια του χρόνου, καταναλώνει 43.8 kWh για κάθε κιλό υδρογόνου που παράγει, και έχει συνολική παραγωγή 68.1 κιλά το χρόνο.



Εικόνα 6.4.3. 12 Είσοδος ηλεκτρολυτικής μονάδας για κάθε ώρα της ημέρας

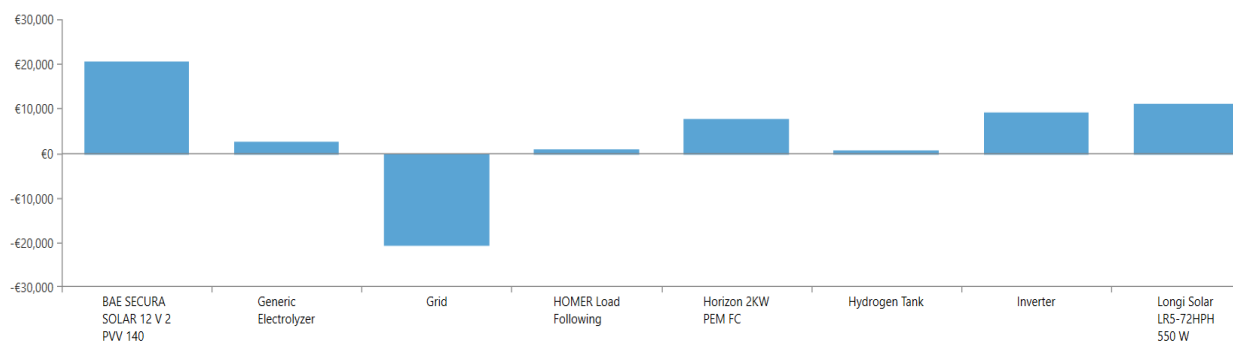
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated capacity	1.00	kW	Mean output	0.00777	kg/hr
Mean input	0.341	kW	Minimum Output	0	kg/hr
Minimum input	0	kW	Maximum Output	0.0228	kg/hr
Maximum input	1.00	kW	Total production	68.1	kg/yr
Total input energy	2,984	kWh/yr	Specific consumption	43.8	kWh/kg
Capacity Factor	34.1	%			
Hours of operation	5,435	hr/yr			

Εικόνα 6.4.3. 13 Χαρακτηριστικά λειτουργίας ηλεκτρολυτικής μονάδας

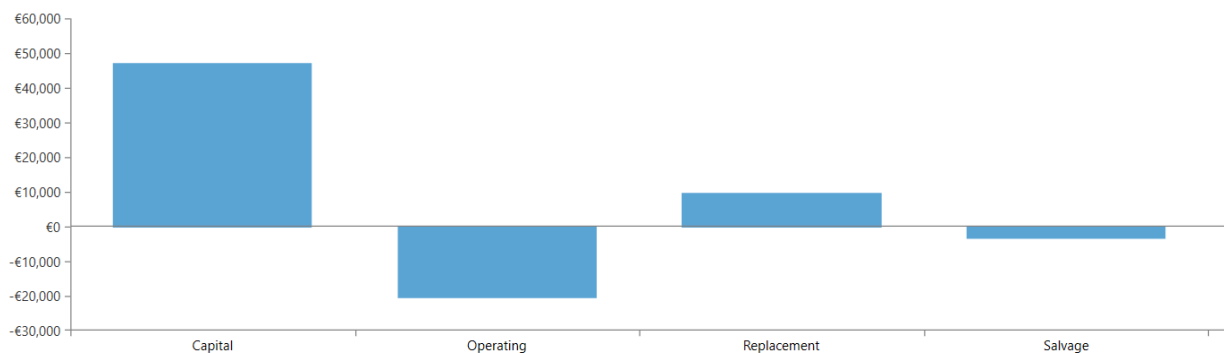
Μετά την παρουσίαση της παραγωγής θα πρέπει να παρουσιαστούν και τα οικονομικά αποτελέσματα τα οποία είναι εξίσου σημαντικά για την σωστή επιλογή του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα όπως έχει αναφερθεί οι δυνατοί συνδυασμοί ταξινομούνται με βάση το καθαρό παρόν κόστος του συστήματος. Στο συγκεκριμένο σενάριο, το καθαρό παρόν κόστος είναι 33.277€ για διάρκεια ζωής 25 χρόνων. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας διαμορφώνεται στα -1.085 € ενώ το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι 0.073 €. Αξίζει να σημειωθεί ότι το λειτουργικό κόστος έχει

αρνητική τιμή διότι το λογισμικό συνυπολογίζει μαζί με τα έξοδα λειτουργίας και τις πωλήσεις της περίσσειας ενέργειας πίσω στο δίκτυο. Επομένως στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή τα έσοδα από τις πωλήσεις είναι περισσότερα από τα έξοδα του συστήματος η τιμή που δίνει για το κόστος έχει αρνητικό πρόσημο, γεγονός που σημαίνει ότι αυτό το ποσό είναι μηνιαίο έσοδο για την κατοικία.

Στην εικόνα 6.4.3.14 απεικονίζεται το κόστος κάθε εξαρτήματος του συστήματος ενώ στο γράφημα της εικόνας 6.4.3.15 παρουσιάζεται το αρχικό κεφάλαιο το οποίο είναι 47.310 €, το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού 9.951 €, και το κόστος λειτουργίας του συστήματος - 20.500.80 € για την 25ετία. Επιπλέον απεικονίζεται και η υπολειμματική αξία 3.483,57 € η οποία είναι η αξία του συστήματος μετά το πέρας των 25 ετών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος λειτουργίας του συστήματος είναι αρνητικό γεγονός που σημαίνει ότι το σύστημα όχι μόνο δεν έχει κόστος για τη λειτουργία του αλλά αντιθέτως παρουσιάζει ετήσιο κέρδος από τις πωλήσεις περίσσειας ενέργειας στο δίκτυο.



Εικόνα 6.4.3. 14 Κόστος με βάση το component του συστήματος



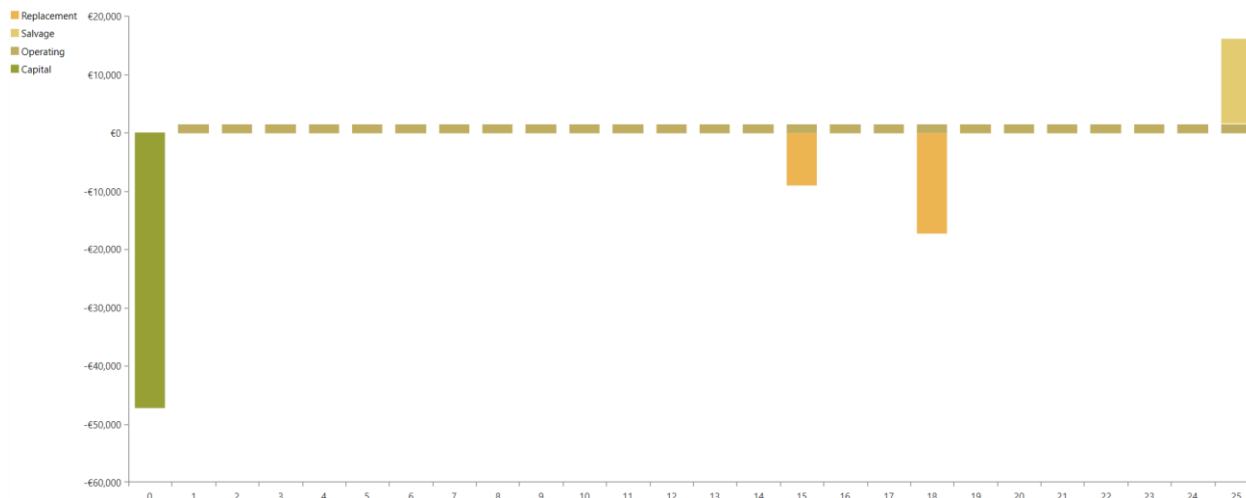
Εικόνα 6.4.3. 15 Κόστος ανάλογα το είδος της δαπάνης

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη του εξοπλισμού που απαρτίζει το σύστημα. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη δαπάνη του εξοπλισμού είναι οι μπαταρίες οι οποίες μαζί με την αντικατάσταση σε βάθος 25ετίας αποτελούν περίπου το μισό κόστος του συστήματος.

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
▷ BAE SECURA SOLAR 12 V 2 PVV 140	€17,160.00	€6,133.28	€0.00	€0.00	-€2,512.16	€20,781.12
▷ Generic Electrolyzer	€2,000.00	€848.55	€0.00	€0.00	-€159.71	€2,688.84
▷ Grid	€0.00	€0.00	-€20,729.23	€0.00	€0.00	-€20,729.23
▷ HOMER Load Following	€1,000.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€1,000.00
▷ Horizon 2KW PEM FC	€8,000.00	€0.00	€228.43	€0.00	-€252.73	€7,975.70
▷ Hydrogen Tank	€900.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€900.00
▷ Inverter	€7,000.00	€2,969.92	€0.00	€0.00	-€558.97	€9,410.95
▷ Longi Solar LR5-72HPH 550 W	€11,250.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€11,250.00
System	€47,310.00	€9,951.74	-€20,500.80	€0.00	-€3,483.57	€33,277.37

Εικόνα 6.4.3. 16 Αναλυτική περιγραφή κόστους εξοπλισμού συστήματος

Επιπλέον, παρουσιάζονται οι ταμειακές ροές για τη διάρκεια των 25 χρόνων ζωής του συστήματος συναρτήσει του είδους της δαπάνης.



Εικόνα 6.4.3. 17 Cash flow με βάση το είδος της δαπάνης

Τέλος, σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αναφορά στα περιβαλλοντικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα στους εκπεμπόμενους ρύπους. Στο σύστημα που εξετάζεται δεν υπάρχουν συμβατικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής επομένως οι εκπεμπόμενοι ρύποι προέρχονται μόνο από το δίκτυο. Παρόλο που το σύστημα είναι συνδεδεμένο έχει επιτευχθεί 100% ανεξαρτησία και δεν υπάρχει καθόλου αγορά ενέργειας από το δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σύστημα να έχει μηδενικές εκπομπές ρύπων μιας και η ενέργεια προέρχεται εξ' ολοκλήρου από ΑΠΕ.

## 6.5 Απόσβεση συστημάτων.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο εξετάζεται το χρονικό διάστημα που θα χρειαστεί προκειμένου να επιτευχθεί απόσβεση στην επένδυση που απαιτείται για το σύστημα κάθε σεναρίου. Για τον λόγο αυτόν δημιουργήθηκε ο πίνακας που παρουσιάζεται παρακάτω, ο οποίος περιέχει τις ετήσιες χρηματοροές για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα συστήματα για 25 χρόνια. Στο έτος 0 απεικονίζεται το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται για την επένδυση. Τα ετήσια έσοδα θεωρούνται τα χρήματα που εξοικονομούνται με το εκάστοτε σύστημα συγκριτικά με το αν η ενέργεια προερχόταν εξ' ολοκλήρου από το δίκτυο. Τέλος για κάθε έτος οι χρηματοροές υπολογίζονται αφαιρώντας από τα ετήσια έσοδα, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης του κάθε συστήματος καθώς και τα κόστη

της αντικατάστασης του εξοπλισμού. Επιπλέον στο τελευταίο έτος υπάρχει ένα ακόμη έσοδο το οποίο είναι το salvage value του συστήματος δηλαδή η αξία του εξοπλισμού στο τέλος ζωής του συστήματος το οποίο υπολογίζεται από το HOMER.

### 6.5.1 Συγκεντρωτικές χρηματοροές

Σε κάθε σενάριο το φορτίο είναι ίδιο στην κατοικία με την κατανάλωση να είναι 12.273 kWh ετησίως. Επομένως αν δεν υπήρχε το σύστημα σε κάθε σενάριο και η ενέργεια προερχόταν από το δίκτυο θα υπήρχε ετήσιο κόστος  $12.273 \text{ kWh} \times 0.185 \frac{\text{Ευρώ}}{\text{kWh}} = 2.270,5 \text{ €}$ . Το συγκεκριμένο κόστος με την ύπαρξη κάθε συστήματος μεταφράζεται σαν ετήσιο έσοδο. Επομένως οι χρηματοροές κάθε σεναρίου υπολογίζονται ως εξής:

Σενάριο 1: Σε αυτή την περίπτωση η ετήσια χρηματοροή υπολογίζεται αφαιρώντας από το ετήσιο έσοδο το κόστος λειτουργίας το οποίο υπολογίζεται από το HOMER στα 1.106,81 €. Επομένως η ετήσια χρηματοροή είναι  $2.270,5 \text{ €} - 1.106,81 \text{ €} = 1.163,7 \text{ €}$ . Επίσης στο 15 έτος υπολογίζεται αντικατάσταση inverter και μονάδας ηλεκτρόλυσης με συνολικό κόστος 3.500 €.

Σενάριο 2: Σε αυτή την περίπτωση η ετήσια χρηματοροή υπολογίζεται αφαιρώντας από το ετήσιο έσοδο το κόστος λειτουργίας το οποίο υπολογίζεται από το HOMER στα 24.19 €. Επομένως η ετήσια χρηματοροή είναι  $2.270,5 \text{ €} - 24.19 \text{ €} = 2.246,31 \text{ €}$ . Επίσης στο 15 έτος υπολογίζεται αντικατάσταση inverter και μονάδας ηλεκτρόλυσης με συνολικό κόστος 6.500 € ενώ στο 16 έτος υπάρχει κόστος 2000 € για την αντικατάσταση της κυψέλης καυσίμου.

Σενάριο 3: Σε αυτή την περίπτωση η ετήσια χρηματοροή υπολογίζεται προσθέτοντας στο ετήσιο έσοδο το κόστος λειτουργίας το οποίο υπολογίζεται από το HOMER στα 1.585,83 €. Επομένως η ετήσια χρηματοροή είναι  $2.270,5 \text{ €} + 1.585,83 \text{ €} = 3.856,3 \text{ €}$ . Επίσης στο 15 έτος υπολογίζεται αντικατάσταση inverter και μονάδας ηλεκτρόλυσης με συνολικό κόστος 9000 € ενώ στο 18 έτος υπάρχει κόστος 17.160 € για την αντικατάσταση των μπαταριών. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα έξοδα ενώ με πράσινο απεικονίζεται η απόσβεση σε κάθε σύστημα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.5.1, και τα τρία εξεταζόμενα συστήματα είναι βιώσιμα και παρουσιάζουν απόσβεση αρκετά πριν το πέρας της ζωής τους. Συγκεκριμένα το σύστημα που παρουσιάζει την

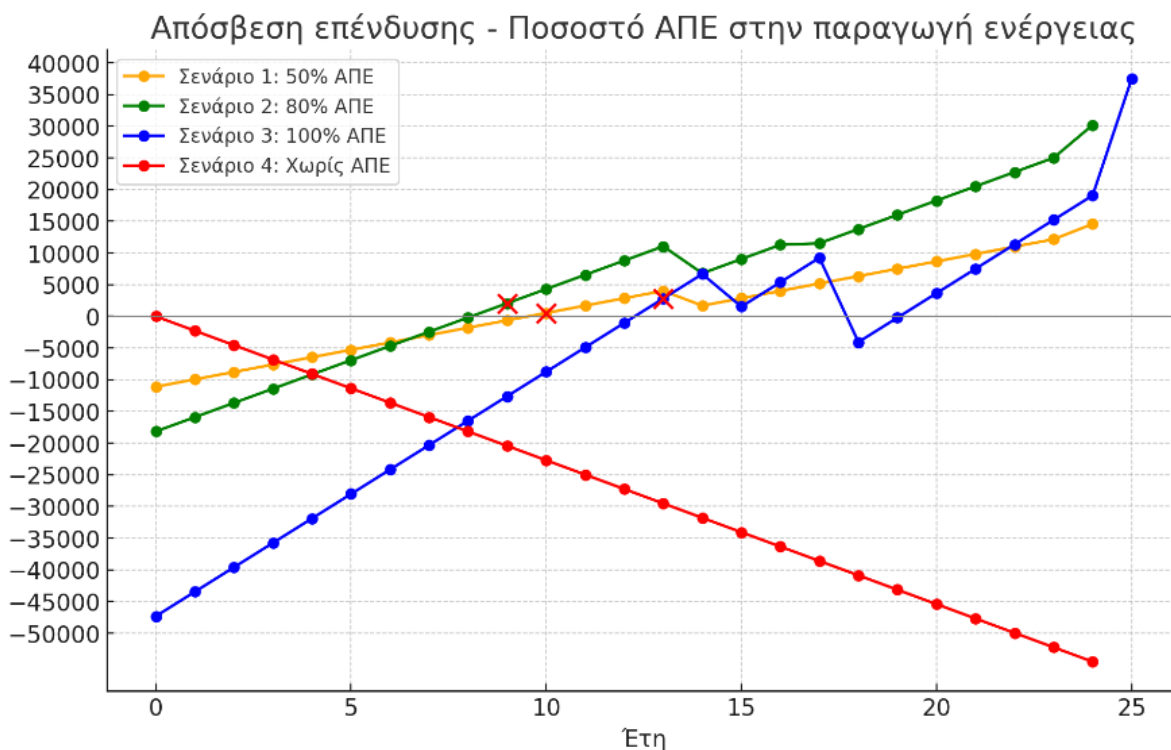
γρηγορότερη απόσβεση είναι αυτό του δεύτερου σεναρίου στα 9 έτη, ακολουθεί το σύστημα του πρώτου σεναρίου που έχει απόσβεση στα 10 έτη ενώ τέλος η απόσβεση του κεφαλαίου του τρίτου συστήματος γίνεται στα 13 έτη.

Έτος	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3	
	Cash Flow	Σύνολο	Cash Flow	Σύνολο	Cash Flow	Σύνολο
0	-11100	-11100	-18150	-18150	-47310	-47310
1	1163.7	-9936.3	2246.31	-15903.69	3856.3	-43453.7
2	1163.7	-8772.6	2246.31	-13657.38	3856.3	-39597.4
3	1163.7	-7608.9	2246.31	-11411.07	3856.3	-35741.1
4	1163.7	-6445.2	2246.31	-9164.76	3856.3	-31884.8
5	1163.7	-5281.5	2246.31	-6918.45	3856.3	-28028.5
6	1163.7	-4117.8	2246.31	-4672.14	3856.3	-24172.2
7	1163.7	-2954.1	2246.31	-2425.83	3856.3	-20315.9
8	1163.7	-1790.4	2246.31	-179.52	3856.3	-16459.6
9	1163.7	-626.7	2246.31	2066.79	3856.3	-12603.3
10	1163.7	537	2246.31	4313.1	3856.3	-8747
11	1163.7	1700.7	2246.31	6559.41	3856.3	-4890.7
12	1163.7	2864.4	2246.31	8805.72	3856.3	-1034.4
13	1163.7	4028.1	2246.31	11052.03	3856.3	2821.9
14	1163.7	5191.8	2246.31	13298.34	3856.3	6678.2
15	-2336.3	2855.5	-4253.69	9044.65	-5143.7	1534.5
16	1163.7	4019.2	246.31	9290.96	3856.3	5390.8
17	1163.7	5182.9	2246.31	11537.27	3856.3	9247.1
18	1163.7	6346.6	2246.31	13783.58	-13303.7	-4056.6
19	1163.7	7510.3	2246.31	16029.89	3856.3	-200.3
20	1163.7	8674	2246.31	18276.2	3856.3	3656
21	1163.7	9837.7	2246.31	20522.51	3856.3	7512.3
22	1163.7	11001.4	2246.31	22768.82	3856.3	11368.6
23	1163.7	12165.1	2246.31	25015.13	3856.3	15224.9
24	1163.7	13328.8	2246.31	27261.44	3856.3	19081.2
25	2415.37	15744.17	5182.98	32444.42	18397.97	37479.17

Πίνακας 6.5. 1 Αναλυτικές χρηματοροές κάθε έτους. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα έξοδα ενώ με πράσινο απεικονίζεται η απόσβεση για κάθε σύστημα.

Στη συνέχεια με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης matplotlib της python δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που ακολουθούν τα οποία απεικονίζουν τις ετήσιες χρηματοροές για κάθε σύστημα ξεκινώντας από τις αρνητικές τιμές το έτος 0 έως και το έτος 25 που είναι και το τέλος της ζωής

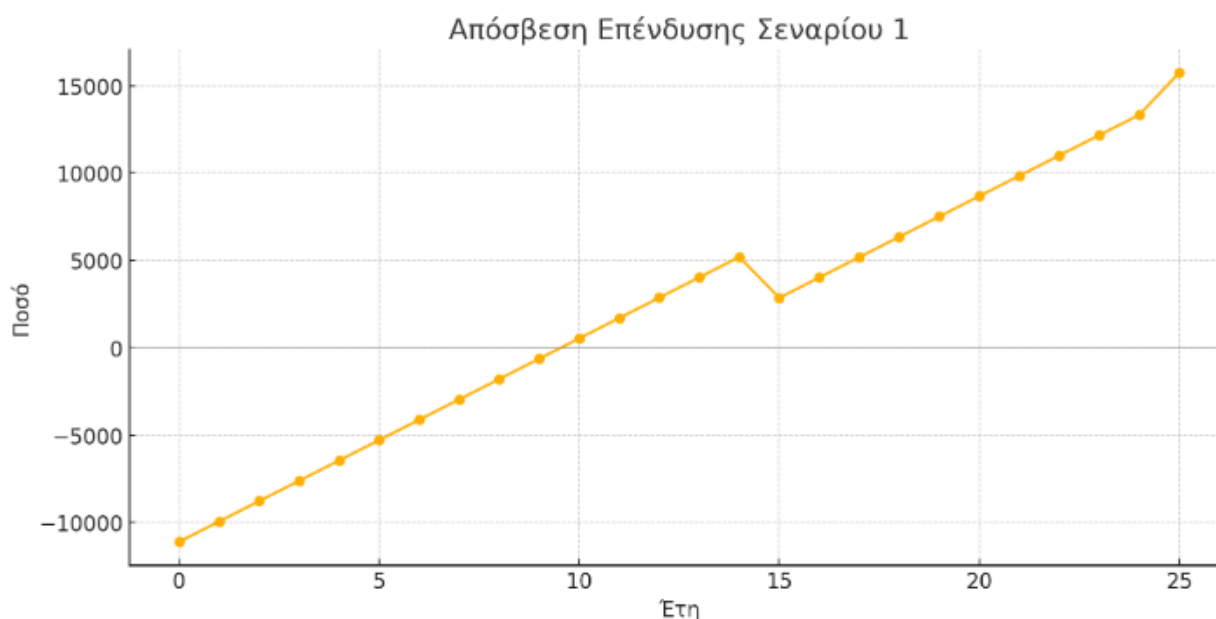
των συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα ακολουθεί ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα το οποίο απεικονίζει τις χρηματοροές για κάθε ένα από τα τρία σενάρια από το πρώτο έτος έως το 25<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας τους. Επίσης έχει προστεθεί και το συνολικό κόστος της ενέργειας που καταναλώνει η κατοικία αν υποθεθεί ότι δεν γίνεται καθόλου χρήση ΑΠΕ. Στη συνέχεια ακολουθούν και σχολιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν την απόσβεση κάθε σεναρίου ξεχωριστά.



Εικόνα 6.5 Απόσβεση συστήματος για κάθε σενάριο . Το διάγραμμα ξεκινάει από το αρχικό κόστος επένδυσης και κάθε χρόνο προστίθενται τα έσοδα έως ότου γίνει απόσβεση.

Σε αυτό το διάγραμμα απεικονίζονται από κοινού οι χρηματοροές για κάθε ένα από τα συστήματα των τριών σεναρίων από το πρώτο έως και το τελευταίο έτος λειτουργίας τους. Επίσης απεικονίζεται το συνολικό κόστος αγοράς ενέργειας για το βάθος της 25ετίας αν αυτή προέρχεται εξολοκλήρου από το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα με πορτοκαλί απεικονίζεται το σύστημα του πρώτου σεναρίου, με πράσινο το σύστημα του δεύτερου, με μπλέ το σύστημα του τρίτου σεναρίου ενώ με κόκκινο απεικονίζεται το κόστος αγοράς από το δίκτυο. Κάθε ένα από αυτά ξεκινάει από

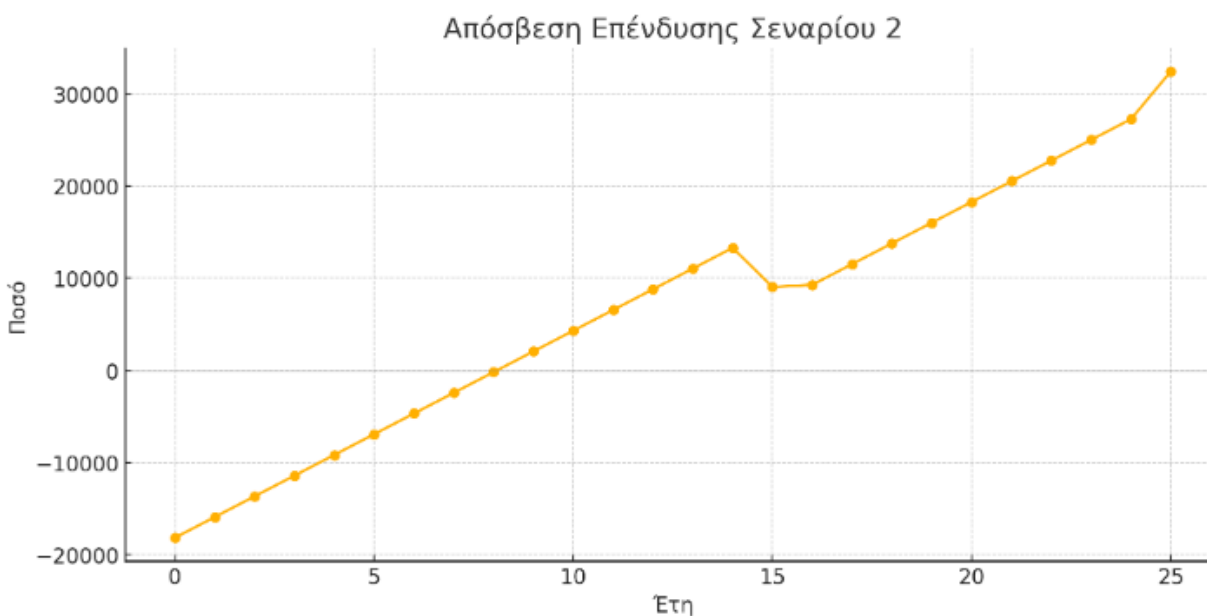
τις αρνητικές τιμές ανάλογα με το αρχικό κόστος επένδυσης. Σε κάθε ένα από αυτά προστίθενται τα ετήσια έσοδα και έξοδα και για κάθε ένα από αυτά παρουσιάζεται απόσβεση σε διαφορετικό έτος λειτουργίας η οποία απεικονίζεται με κόκκινο σταυρό πάνω στο διάγραμμα. Στα ακόλουθα διαγράμματα γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή για τις χρηματοροές και την απόσβεση κάθε σεναρίου.



Εικόνα 6.5.1 Απόσβεση συστήματος σεναρίου 1. Το διάγραμμα ξεκινάει από το αρχικό κόστος επένδυσης και κάθε χρόνο προστίθενται τα έσοδα έως ότου γίνει απόσβεση το 10<sup>ο</sup> έτος.

Στο πρώτο σενάριο όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, υπάρχει ομαλή μετάβαση από τις αρνητικές τιμές προς τις θετικές και αυτό οφείλεται στο σταθερό κέρδος που παρουσιάζεται κάθε χρόνο. Όπως είναι εμφανές υπάρχει στο 15<sup>ο</sup> και στο 25<sup>ο</sup> έτος υπάρχουν απότομες μεταβάσεις οι οποίες οφείλονται στο κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού και την προσθήκη της υπολειμματικής αξίας του συστήματος αντίστοιχα. Επίσης παρατηρείται ότι η απόσβεση του συστήματος γίνεται στο 10 έτος λειτουργίας καθώς τότε εμφανίζεται η πρώτη θετική τιμή στις χρηματοροές.

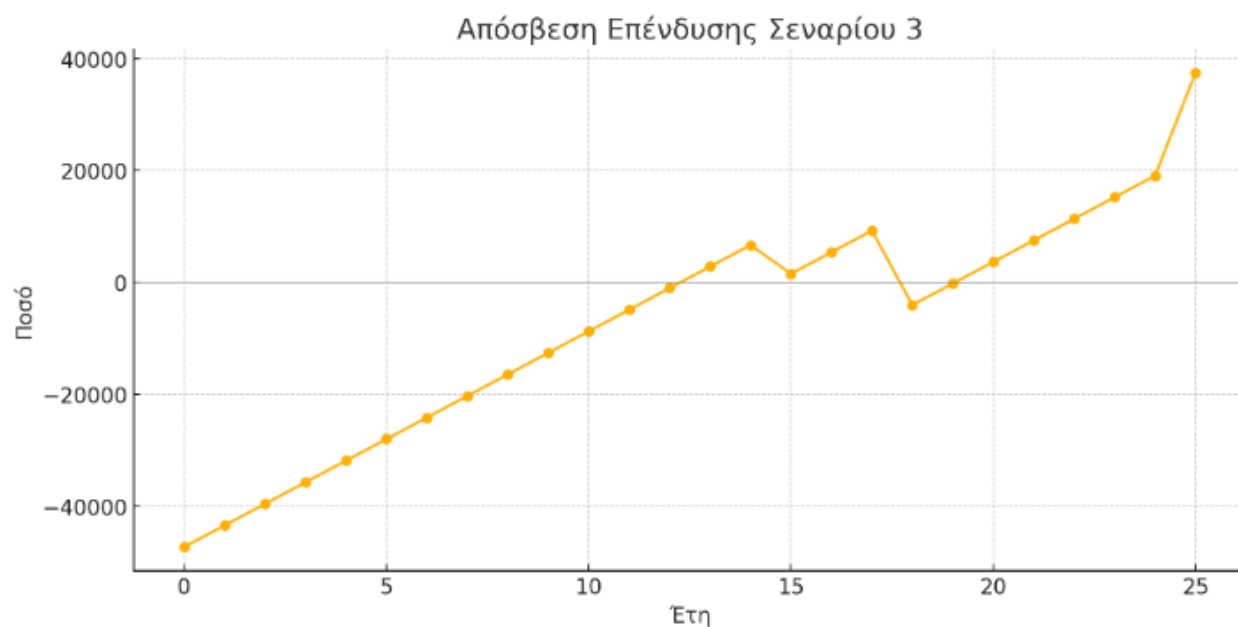
Στο δεύτερο σενάριο υπάρχει αντιστοιχία με το πρώτο καθώς όπως και προηγουμένως οι μεταβάσεις από τις αρνητικές στις θετικές τιμές συμβαίνουν ομαλά. Οι εξαιρέσεις σε αυτό το σενάριο παρουσιάζονται στο 15<sup>ο</sup> και 18<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας όπου υπάρχει πρόσθετο κόστος για την αντικατάσταση του εξοπλισμού και στο 25<sup>ο</sup> έτος όπου προστίθεται στην ετήσια χρηματοροή και η υπολειμματική αξία του συστήματος. Τέλος η πρώτη θετική τιμή στις χρηματοροές παρουσιάζεται στα 9 έτη λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 6.5.2 Απόσβεση συστήματος σεναρίου 2. Το διάγραμμα ξεκινάει από το αρχικό κόστος επένδυσης και κάθε χρόνο προστίθενται τα έσοδα έως ότου γίνει απόσβεση το 9<sup>ο</sup> έτος.

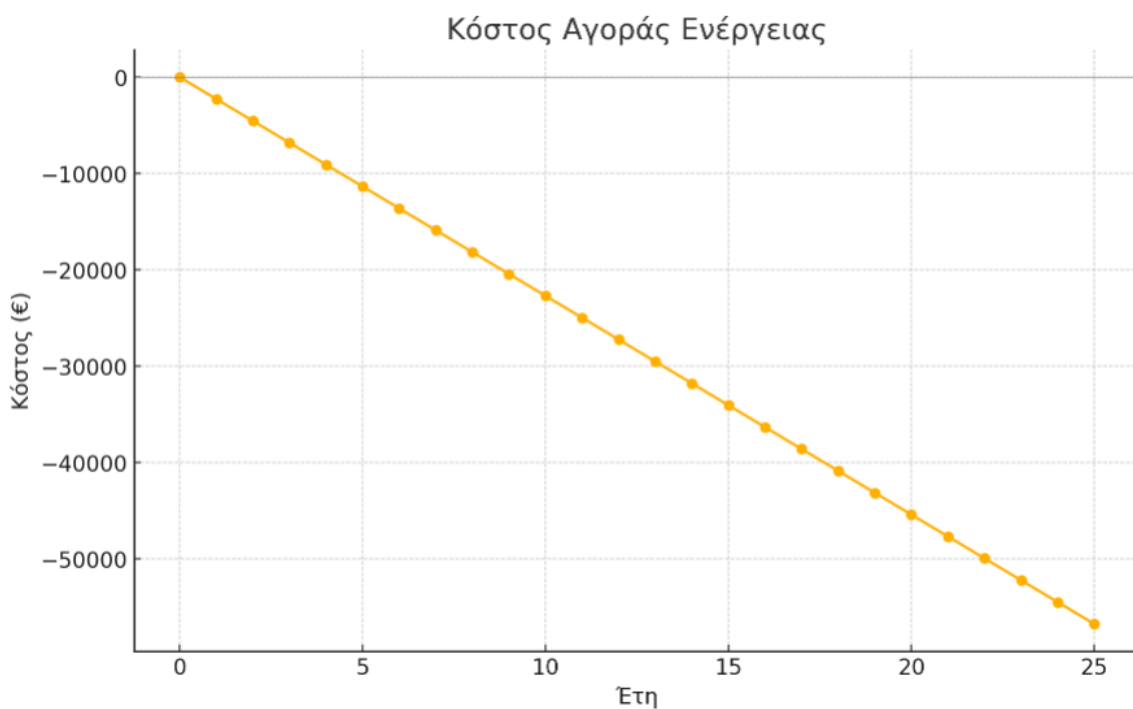
Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο παρατηρείται το μεγαλύτερο κόστος από τα εξεταζόμενα συστήματα. Συγκεκριμένα το έτος 0 ξεκινάει από σχεδόν -50.000 € και σταδιακά αυξάνεται μέχρι και το 13 έτος όπου παρατηρείται η πρώτη θετική τιμή και κατά συνέπεια η απόσβεση του συστήματος. Όπως και στα δύο προηγούμενα σενάρια η μετάβαση από τον ένα χρόνο στον άλλο είναι ομαλή και αυτό οφείλεται στο σταθερό κέρδος που έχει η κατοικία ετησίως. Στο 15<sup>ο</sup> και 18<sup>ο</sup> έτος υπάρχει αντικατάσταση εξοπλισμού με αποτέλεσμα να υπάρχει πτώση στο γράφημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο 18<sup>ο</sup> έτος η χρηματοροή αγγίζει ξανά αρνητικές τιμές καθώς το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού και συγκεκριμένα των μπαταριών είναι πολύ υψηλό. Παρόλα

αυτά υπάρχει ξανά απόσβεση μέσα σε δύο χρόνια και το υπό εξέταση σύστημα αποτελεί μία βιώσιμη λύση.



Εικόνα 6.5.3 Απόσβεση συστήματος σεναρίου 3. Το διάγραμμα ξεκινάει από το αρχικό κόστος επένδυσης και κάθε χρόνο προστίθενται τα έσοδα έως ότου γίνει απόσβεση το 13<sup>ο</sup> έτος.

Τέλος στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το κόστος της αγοράς ενέργειας από το δίκτυο για όλη τη διάρκεια των 25 ετών που εξετάζονται τα συστήματα. Το παραπάνω διάγραμμα όπως φαίνεται δείχνει τα έξοδα που έχει η κατοικία αν καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της εξ' ολοκλήρου από το δίκτυο. Όπως είναι εμφανές, στο βάθος της 25ετίας το συνολικό κόστος που έχει δαπανηθεί για αγορά ενέργειας από το δίκτυο είναι μεγαλύτερο ακόμη και από το αρχικό κόστος του συστήματος του τρίτου σεναρίου.



Εικόνα 6.5.4 Κόστος αγοράς ενέργειας εξ' ολοκλήρου από το δίκτυο σε βάθος 25ετίας. Το διάγραμμα ξεκινάει από το πρώτο έτος και κάθε χρόνο προστίθεται το ετήσιο κόστος ενέργειας από το δίκτυο.

Στον πίνακα που ακολουθεί υπάρχουν συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα βασικά μεγέθη κάθε συστήματος των υπό εξέταση σεναρίων προκειμένου να γίνει συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων και να εξεταστούν οι διαφορές τους με βάση την ενεργειακή απόδοση, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνοντας τα συστήματα με βάση την ενεργειακή απόδοση εξετάζεται ο τρόπος που κάθε σενάριο ανταποκρίνεται στις ενεργειακές ανάγκες τις κατοικίας, ενώ συγκρίνοντας το κόστος εξετάζεται η αρχική επένδυση και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την απόσβεση του εκάστοτε συστήματος. Τέλος για να είναι ακόμη πιο ακριβής η σύγκριση έχει προστεθεί μια στήλη η οποία εξετάζει το κόστος που θα επιβαρύνει την κατοικία, αν καλύπτει για 25 έτη τις ενεργειακές της ανάγκες εξολοκλήρου από το δίκτυο χωρίς να χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

### Σενάριο 1

Το σύστημα του σεναρίου σχεδιάστηκε ώστε να καλύπτει το 50% των ενεργειακών αναγκών με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Περιλαμβάνει σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου καθώς και φωτοβολταϊκά με σχετικά μικρή εγκατεστημένη ισχύ. Έχει το μικρότερο απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται απόσβεση στα 10 έτη.

### Σενάριο 2

Σε αυτό το σενάριο υπάρχει μεγαλύτερη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ και περισσότερη παραγωγή υδρογόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας και κατά συνέπεια την σημαντική μείωση της εξάρτησης από το δίκτυο καθώς το 80% των ενεργειακών αναγκών καλύπτονται από τις ΑΠΕ. Επίσης λόγω της αυξημένης παραγωγής υπάρχει και μεγαλύτερη πώληση περίσσειας ενέργειας πίσω στο δίκτυο. Το αρχικό κεφάλαιο είναι μεγαλύτερο από το πρώτο σενάριο αλλά παρόλα αυτά η απόσβεση του γίνεται νωρίτερα στα 9 έτη. Τέλος λόγω της μειωμένης εξάρτησης από το δίκτυο παρουσιάζει σημαντικά λιγότερες εκπομπές ρύπων

### Σενάριο 3

Αυτό το σύστημα στοχεύει στην πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της κατοικίας και στη μηδενική αλληλεπίδραση με το δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτό υπάρχει πολύ μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συγκριτικά με τα άλλα δύο σενάρια καθώς επίσης έχουν προστεθεί και συσσωρευτές για την αποθήκευση της απαιτούμενης ενέργειας. Το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται χωρίς όμως αυτό να το καθιστά μη βιώσιμο μιας και σημειώνεται απόσβεση στα 13 έτη ζωής. Όπως είναι αντιληπτό υπάρχει πολύ μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από το εν λόγω σύστημα με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικά έσοδα από τις πωλήσεις της περίσσειας ενέργειας στο δίκτυο. Επιπρόσθετα επειδή το σύστημα χρησιμοποιεί μόνο ΑΠΕ και όχι συμβατικές πηγές παραγωγής, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, είναι απόλυτα φιλικό προς το περιβάλλον και έχει μηδενικές εκπομπές ρύπων.

### Χωρίς χρήση ΑΠΕ

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της κατοικίας εξολοκλήρου από συμβατικές πηγές έχει περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο.

Συγκεκριμένα η πλήρης εξάρτηση από το δίκτυο έχει πολύ υψηλό κόστος τόσο ετήσια όσο και σε βάθος 25ετίας. Επιπλέον έχει πολύ μεγάλο αριθμό εκπομπής ρύπων με αποτέλεσμα να καθιστά την περίπτωση μη φιλική προς το περιβάλλον.

Συνοψίζοντας, όπως φαίνεται από τα τρία εξεταζόμενα συστήματα η ενεργειακή κάλυψη αυξάνεται από το 50% έως το 100% από το πρώτο στο τρίτο σενάριο. Με την αύξηση της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά αυξάνεται η ενεργειακή αυτονομία αλλά παράλληλα αυξάνεται και το αρχικό κεφάλαιο.

Αποτελέσματα Προσωμοίωσης				
Ετήσια Κατανάλωση: 12.273 (kWh/year)	Σενάριο 1 50% ΑΠΕ	Σενάριο 2 80% ΑΠΕ	Σενάριο 3 100% ΑΠΕ	Χωρίς ΑΠΕ
Παραγωγή Ενέργειας (kWh/year)	10282	25110	40886	0
Αγορά Ενέργειας από δίκτυο (kWh/year)	6845	5160	0	12273
Πώληση Ενέργειας στο δίκτυο (kWh/year)	2443	13569	22907	0
Τιμή Παραγόμενης kWh (Ευρώ)	0.14	0.064	0.073	0
Ποσοστό συμμετοχής ΑΠΕ(%)	50	80	100	0
Εκπομπές Ρύπων (kg/year)	4326	3261	0	7756,5
Αρχικό κεφάλαιο (Ευρώ)	11100	18150	47310	-
Καθαρό παρόν κόστος (Ευρώ)	26593	21343	33277	-
Έτη Απόσβεσης	10	9	13	-
Κόστος αγοράς ενέργειας ετησίως (Ευρώ)	1266,3	954,6	0	2270,5
Κόστος αγοράς ενέργειας 25ετίας (Ευρώ)	31657,5	23865	0	56762,6

Πίνακας 6.5. 2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης

## 7.Συμπεράσματα- Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο βέλτιστος σχεδιασμός τριών υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών μιας κατοικίας. Συγκεκριμένα, η φιλοσοφία των συστημάτων ήταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και κυψέλη υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά καλύπτουν σε πραγματικό χρόνο την ενεργειακή ζήτηση της κατοικίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά δίνεται σε μια μονάδα ηλεκτρόλυσης, η οποία παράγει υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή. Στις περιόδους με χαμηλή ηλιοφάνεια ή κατά τη διάρκεια της νύχτας, το αποθηκευμένο υδρογόνο, μέσω κυψέλης καυσίμου, καλύπτει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα που εξετάστηκαν διαφοροποιούνται με βάση το ελάχιστο ποσοστό συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κάλυψη του φορτίου της κατοικίας. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τρία σενάρια, όπου υπήρξε 50% συμμετοχή, 80% συμμετοχή και 100% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.

Ο σχεδιασμός κάθε συστήματος περιλαμβάνει την ανάλυση και βελτιστοποίηση των επιμέρους συνιστωσών, όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ, η μονάδα ηλεκτρόλυσης, η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και η κυψέλη καυσίμου. Στόχος είναι η επίτευξη ενός ισορροπημένου και αποδοτικού συστήματος που να διασφαλίζει την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η εργασία καταλήγει σε συγκεκριμένες προτάσεις και λύσεις για την υλοποίηση κάθε υβριδικού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνικές όσο και τις οικονομικές παραμέτρους, προκειμένου να καταστεί βιώσιμη η εφαρμογή του σε πραγματικές συνθήκες.

Μετά την προσομοίωση των τριών σεναρίων με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Η αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας συνεπάγεται αύξηση του κεφαλαίου, του συνολικού κόστους, της απαιτούμενης τεχνολογίας και της πολυπλοκότητας του συστήματος.
- Όλα τα συστήματα που εξετάστηκαν είναι οικονομικά βιώσιμα και παρουσιάζουν απόσβεση της επένδυσης το αργότερο έως τα μέσα της ζωής τους.
- Όλα τα συστήματα συνεισφέρουν στη μείωση των εκπομπών ρύπων συγκριτικά με τα παραδοσιακά συστήματα ενέργειας.
- Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα μετατροπής υδρογόνου μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη στην ενεργειακή αυτονομία και με κατάλληλη διαστασιολόγηση μπορούν να μηδενίσουν τη συνεισφορά του δικτύου.
- Το σύστημα του σεναρίου 3 είναι το πιο φιλικό προς το περιβάλλον καθώς έχει μηδενικές εκπομπές ρύπων αλλά είναι και το πιο ακριβό.

- Το σύστημα του σεναρίου 1 έχει το χαμηλότερο απαιτούμενο κεφάλαιο αλλά έχει τα λιγότερα περιβαλλοντικά οφέλη καθώς υπάρχει μεγάλη εξάρτηση από το δίκτυο.
- Το σύστημα του σεναρίου 2 προσφέρει αρκετά μεγάλη αυτονομία καθώς το ελάχιστο ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην παραγωγή είναι 80% και παρουσιάζει την γρηγορότερη απόσβεση της επένδυσης στα 9 έτη.
- Η επιλογή του κατάλληλου επιπέδου αυτονομίας εξαρτάται από τις ανάγκες και τις προτεραιότητες του χρήστη.
- Σημαντική είναι η προσαρμογή του συστήματος στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες και στην κατανάλωση ενέργειας του εκάστοτε κτιρίου.

Γίνεται αντιληπτό ότι η ενεργειακή αυτονομία μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προς τη βιωσιμότητα και την προστασία του περιβάλλοντος. Παρά τα θετικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των τριών σεναρίων φωτοβολταϊκών και υδρογόνου, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών και των μεθόδων μπορεί να προσφέρει περαιτέρω βελτιώσεις και δυνατότητες. Ως εκ τούτου, η προοπτική ανάπτυξης και η υλοποίηση νέων ιδεών είναι απαραίτητες για την ενίσχυση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της οικονομικής βιωσιμότητας των ενεργειακών συστημάτων. Οι παρακάτω προτάσεις στοχεύουν στην περαιτέρω ενίσχυση της υλοποίησης των συστημάτων αυτών, προάγοντας την καινοτομία και την εφαρμογή πιο ολοκληρωμένων λύσεων στον τομέα της ανανεώσιμης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστούν τα ακόλουθα:

- Προσθήκη ανεμογεννήτριας στο υβριδικό σύστημα για την αύξηση της παραγωγής ενέργειας. Θα αποτελούσε καλή λύση ιδιαίτερα σε περιοχές με δυνατούς ανέμους.
- Εξέταση της συμπεριφοράς των παραπάνω συστημάτων για μεγαλύτερα κτίρια και κατά συνέπεια για μεγαλύτερα φορτία.
- Βελτιστοποίηση τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και καύσης του υδρογόνου.
- Ανάπτυξη συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης ενέργειας (EMS- Energy Management System), το οποίο θα εξασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος εξετάζοντας σε πραγματικό χρόνο την παραγωγή και τη ζήτηση του φορτίου και αποφασίζοντας αν η κάλυψη θα γίνει από τις κυψέλες καυσίμου, τις μπαταρίες ή τα φωτοβολταϊκά.
- Επίσης θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος για την εξυπηρέτηση διαφορετικών ειδών φορτίου όπως για παράδειγμα η κάλυψη φορτίων βιομηχανικών εγκαταστάσεων ή δημόσιων κτιρίων.

## 8.Βιβλιογραφία.

- [1] Paolo Giuseppe Mura, Roberto Baccoli, Roberto Innamorati, Stefano Mariotti. « An energy autonomous house equipped with a solar PV hydrogen conversion system», University of Cagliari, 2015.
- [2] Chukwuma Ogbonnaya , Chamil Abeykoon , Adel Nasser, Ali Turan and Cyril Sunday Ume, «Prospects of Integrated Photovoltaic-Fuel Cell Systems in a Hydrogen Economy: A Comprehensive Review», 2021
- [3] Alexandros Arsalis, George E. Georghiou and Panos Papanastasiou « Recent Research Progress in Hybrid Photovoltaic–Regenerative Hydrogen Fuel Cell Microgrid Systems», University of Cyprus, 2022.
- [4] Rania M. Ghoniem , Ali Alahmer , Hegazy Rezk and Samer As’ad,«Optimal Design and Sizing of Hybrid Photovoltaic/Fuel Cell Electrical Power System», Princess Nourah bint Abdulrahman University, Riyadh , Saudi Arabia, 2023
- [5] Flavio Odoi-Yorke & Atchou Woenagnon «Techno-economic assessment of solar PV/fuel cell hybrid power system for telecom base stations in Ghana», 2020
- [6] Ahmad I. Abbas, Hassan D. Qandil, Muhannad R. Al-Haddad, Ryoichi S. Amano « A Stand-Alone Hybrid Photovoltaic, Fuel Cell and Battery System: Case Studies in Jordan», University of Wisconsin-Milwaukee, 2022
- [7] PARVATHI MAYA THAMPI Master of Science Thesis «Feasibility analysis of a PV-H2-Battery system for a data center in Luleå » 2023
- [8] Δινοπούλου Βαΐα. «Σχεδιασμός και Προσομοίωση Λειτουργίας Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση ΑΠΕ και Κυψελών Υδρογόνου.» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016.
- [9] Φιορέντζη Γεωργία. «Βέλτιστος Ενεργειακός Σχεδιασμός για Ασφαλή Κάλυψη των Ενεργειακών Αναγκών Πλωτής Πλατφόρμας - Επιστημονικού Εργαστηρίου» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2019.

- [10] Abolfazl Shiroudi, Seyed Reza Hosseini Taklimi « Demonstration project of the solar hydrogen energy system located on Taleghan-Iran: Technical-economic assessments» 2011
- [11] Sophia Alayan, Master Level Thesis, «Design of a PV-Diesel Hybrid System with Unreliable Grid Connection in Lebanon» , European Solar Engineering School, 2016
- [12] Κολοκύθας Οδυσσέας. «Επισκόπηση της λειτουργίας και της διαχείρισης μικροδικτύου μέσης τάσης με αποθήκευση ενέργειας.» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017.
- [13] Κωνσταντινίδης Γεώργιος. «Οικονομοτεχνική Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Ηλεκτρικής Ενέργειας ενός Κτιρίου» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017.
- [14] Ξεπαπαδάκης Μιχαήλ, «Σχεδιασμός ενεργειακά αυτόνομης νεανικής κατασκήνωσης με χρήση αποκεντρωμένων υβριδικών ενεργειακών συστημάτων», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2020
- [15] Γεώργιος Πληγορόπουλος, «Μελέτη προσομοίωσης και βελτιστοποίηση της λειτουργίας υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος με αποθήκευση ενέργειας σε κυψέλες καυσίμου», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006
- [16] Κατσίγιαννης Ιωάννης. «Μοντελοποίηση Υβριδικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Μικρής Κλίμακας με το Λογισμικό HOMER.»
- [17] Τσικαλάκης Αντώνιος. «Εισαγωγή στο λογισμικό HOMER.»
- [18] Θ. Ζαχαρίας: «Ηπιες Μορφές Ενέργειας II», Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα 1986.
- [19] Σημειώσεις μαθήματος Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [20] HOMER, the micropower optimization model. <http://www.homerenergy.com/>
- [21] PVSYST <http://www.pvsyst.com/>
- [22] Διακόπουλος Χρυσοβαλάντης. «Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής και Αποθήκευσης Ενέργειας στην Κάρπαθο.» Διπλωματική εργασία , ΑΠΘ 2020

- [23] Ηλιόπουλος Θεόδωρος «Προσομοίωση και Αξιολόγηση Υβριδικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας μικρής κλίμακας που εμπεριέχουν τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας» Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης 2014
- [24] Κωνσταντινίδης Δημήτρης, « Παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού από φωτοβολταϊκό. Μελέτη κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου του παραρτήματος Χανίων του ΤΕΙ Κρήτης με σύστημα φωτοβολταϊκή γεννήτρια-υδρογόνο- κυψέλες καυσίμου» Πτυχιακή εργασία ,ΤΕΙ Κρήτης, 2005
- [25] Στυλιανός Φουρλής «Υβριδικά Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής» Διπλωματική εργασία Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας 2018
- [26] Andrew Burke, Joan Ogden, Lewis Fulton «Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Cost». Institute of Transportation Studies, UC Davis, 2024
- [27] Αγγελάκης Φώτιος « Βελτιστοποίηση αυτόνομου συστήματος παραγωγής ισχύος με αποθήκευση ενέργειας υποκείμενου σε πιθανολογικούς περιορισμούς Επίδραση της μεθόδου παραγωγής σεναρίων.» ΑΠΘ 2022
- [28] Παπακωνσταντίνου Χ. Κωνσταντίνος « Μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων υπό τον θεσμό της ιδιοκατανάλωσης» Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2015
- [29] Δημήτριος Παπαιωάννου «Βελτιστοποίηση Και Ανάλυση Ευαισθησίας Μικροδικτύου Χρησιμοποιώντας Το Λογισμικό Homer-Μια Μελέτη Περίπτωσης» Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 2015
- [30] Λεοντόπουλος Παναγιώτης, «Προσομοίωση και Διαχείριση ενός Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Ενέργειας, με χρήση Γραφικών Εργαλείων Υπολογισμού», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012.
- [31] Αθανάσιος Στεφανίδης, «Ανάλυση Βιωσιμότητας Συσσωρευτών, Σε Συνδυασμό Με Ευέλικτα Φορτία Και Φ/Β Παραγωγή Σε Περιβάλλον Οικιακού Καταναλωτή, Υπό Καθεστώς Δυναμικής Τιμολογησης» ΑΠΘ, 2013

