



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**Βέλτιστη διαχείριση ενεργειακού φορτίου σε σενάρια απόκρισης στη ζήτηση με τη χρήση
υπολογιστικών συστημάτων**

Energy Management System for optimal load handling in Demand-Response scenarios

Υπό

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΛΕΞΙΟΥ

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2024

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής	Δρ. Αλέξιος Λεκίδης (Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Στυλιανός Βαγρόπουλος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Ελπινίκη Παπαγεωργίου Καθηγήτρια, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Το αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΑΛΕΞΙΟΥ
ΟΝΟΜΑ	ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920095
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	19/09/2024
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2024. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΛΕΞΙΟΥ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξιο Λεκίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ευχαριστώ τις αδερφές μου Ιωάννα, Αριάδνη και Δάφνη Αλεξίου για την ηθική υποστήριξή τους. Επίσης, ευχαριστώ την Τριανταφυλλιά Νάνου για την κατανόησή της και την συμπαράστασή της, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Στέργιο Αλεξίου και Αλίκη Καπάταη για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκθετική αύξηση τα τελευταία χρόνια στην τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, παράλληλα με την υψηλή κατανάλωση του σε οικιακά κυρίως επίπεδα, έχουν οδηγήσει σε οικονομικές και περιβαλλοντικές ανησυχίες, όπως και σε προβλήματα ανεπάρκειας ηλεκτρικής ενέργειας. Το φορτίο που πρέπει να καλύπτεται καθημερινά είναι μεταβαλλόμενο και για αυτόν το λόγο γίνεται απαραίτητη η αναζήτηση κάποιων νέων λύσεων, με σκοπό την εξάλειψη των παραπάνω προβλημάτων. Μια πιθανά αποτελεσματική λύση παρατηρείται ότι είναι η κατασκευή και η χρήση των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται και σχεδιάζεται ένα οικιακό σύστημα βέλτιστης διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο ανάλογα με την ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, διαμορφώνει την τροφοδοσία των διασυνδεδεμένων συστημάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση. Το σύστημα αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την τροφοδοσία του σπιτιού, ένα σύστημα συσσωρευτών, με σκοπό την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας, ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο και το κεντρικό σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, όπου λειτουργεί σαν κόμβος των παραπάνω συστημάτων. Με την χρήση του MATLAB Simulink® δημιουργήθηκαν τα στοιχεία (blocks) με τα οποία έγινε η προσομοίωση του συστήματος για ένα εικοσιτετράωρο, με σκοπό την δοκιμή λειτουργίας του μέσα σε μια ημέρα. Η συμπεριφορά του μοντέλου εκδηλώνεται μέσα από τα διαγράμματα που αντλούνται από το πρόγραμμα και συγκρίνεται με την κατανάλωση πριν την εγκατάσταση αυτού.

Λέξεις-κλειδιά: ενέργεια, σύστημα διαχείρισης ενέργειας, φωτοβολταϊκό σύστημα, σύστημα συσσωρευτών, μοντελοποίηση, ηλεκτρικό αυτοκίνητο, MATLAB Simulink®

Abstract

The exponential increase in the price of electricity in recent years, along with its high consumption at mainly domestic level, have led to economic and environmental concerns, as well as problems of electricity shortages. The load that must be covered daily is variable and so it becomes necessary to begin the search for some new solutions, with the aim of eliminating all of the problems above. A potentially effective solution seems to be the creation and use of energy management systems. In this thesis, a household system of optimal electricity management is studied and designed, which, depending on the demand for electricity, configures the supply of the interconnected systems in such a way as to achieve the maximum possible efficiency. The system consists of a photovoltaic system to generate electricity and power the home, an energy storage system to store excess energy, an electric vehicle and the home energy management system, where it functions as a hub for the above systems. With the use of MATLAB Simulink®, the blocks were created, with which the system was simulated for a twenty-four hour period, in order to test its operation within a day. The behavior of the model is monitored through the diagrams drawn from the program and compared to the consumption before its installation.

Key words: energy, energy management system, photovoltaic system, energy storage system, simulation, electric vehicle, MATLAB Simulink®

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	10
Κεφάλαιο 2: Βασικές αρχές	11
2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα	11
2.1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο	11
2.1.2 Διασύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων	13
2.1.3 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος	14
2.2 Βασικές αρχές συσσωρευτών	15
2.2.1 Λειτουργία συσσωρευτών	15
2.2.2 Χωρητικότητα συσσωρευτών	16
2.4 Energy Management System (EMS)	17
2.5 MATLAB Simulink.....	18
Κεφάλαιο 3: Προκλήσεις, στόχοι και συστήματα.....	18
3.1 Προκλήσεις.....	18
3.2 Στόχοι.....	20
3.3 Συστήματα.....	21
3.4 Διαστασιολόγηση συστημάτων	22
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία μοντελοποίησης συστήματος	26
4.1 Στοιχεία φωτοβολταϊκού συστήματος.....	26
4.2 Στοιχεία συστήματος συσσωρευτών.....	29
4.3 Στοιχεία ηλεκτρικού αυτοκινήτου	30
4.4 Συνδεσμολογίες συστημάτων	31
4.5 Υλοποίηση Home Energy Management System (HEMS)	33
4.6 Παρακολούθηση λειτουργίας HEMS	36
Κεφάλαιο 5: Δεδομένα προσομοίωσης και αποτελέσματα.....	37
5.1 Δεδομένα προσομοίωσης	37
5.2 Προσομοίωση και αποτελέσματα	42
5.2.1 Σενάριο σκίασης.....	46

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	48
---------------------------------------	-----------

Βιβλιογραφία	53
---------------------------	-----------

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα σε €/kWh, τα τελευταία έντεκα έτη.	10
Εικόνα 2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.	12
Εικόνα 3. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.	12
Εικόνα 4. Συστήματα φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου με το δίκτυο.	13
Εικόνα 5. Χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου απεικονίζοντας το ΣΜΙ.	15
Εικόνα 6. Τρόπος λειτουργίας κελιού συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση και φόρτιση αντίστοιχα.	16
Εικόνα 7. Οι τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας.	20
Εικόνα 8. Διασύνδεση συστημάτων HEMS.	22
Εικόνα 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μεμονωμένου φωτοβολταϊκού πάνελ.	24
Εικόνα 10. Διαμοιρασμός των τριών συστοιχιών φωτοβολταϊκών.	25
Εικόνα 11. Χαρακτηριστική καμπύλη ενός πάνελ των 400W μοντέλου JKM400M-72L-V της εταιρείας JinkoSolar Holding Co., LTD.	27
Εικόνα 12. Μοντέλο συστοιχίας φωτοβολταϊκών στο Simulink.	28
Εικόνα 13. Συνολικά στοιχεία (blocks) φωτοβολταϊκού συστήματος.	29
Εικόνα 14. Συνολικά στοιχεία (blocks) συστήματος συσσωρευτών.	30
Εικόνα 15. Συνολικά στοιχεία (blocks) ηλεκτρικού αυτοκινήτου.	31
Εικόνα 16. Τροφοδοσία της ζήτησης του σπιτιού από το φωτοβολταϊκό σύστημα, για την εύρεση περίσσειας ή έλλειψης ενέργειας.	32
Εικόνα 17. Συνολική συνδεσμολογία του συστήματος συσσωρευτών και του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.	33
Εικόνα 18. Συνολικό block HEMS με τις εισόδους και τις εξόδους του.	34
Εικόνα 19. Λίστα καταστάσεων του EMS στο εργαλείο Stateflow.	34
Εικόνα 20. Συνολικό διάγραμμα Stateflow, για το HEMS.	36
Εικόνα 21. Παρακολούθηση της λειτουργίας του HEMS.	37
Εικόνα 22. Ωρολόγια κατανάλωση ενέργειας του σπιτιού για τις 24 Αυγούστου.	38
Εικόνα 23. Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία για τις 24 Αυγούστου.	39
Εικόνα 24. Τιμές θερμοκρασίας κελιών για την ημέρα της 24 Αυγούστου.	40
Εικόνα 25. Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή Powerwall της εταιρείας Tesla.	41
Εικόνα 26. Ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικού αυτοκινήτου Tesla Model Y	42
Εικόνα 27. Ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία πάνελ.	43
Εικόνα 28. Ωριαία παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος.	43
Εικόνα 29. Διαχείριση ενέργειας με το HEMS.	44
Εικόνα 30. Ενέργεια προς το σύστημα συσσωρευτών και προς το δίκτυο.	45

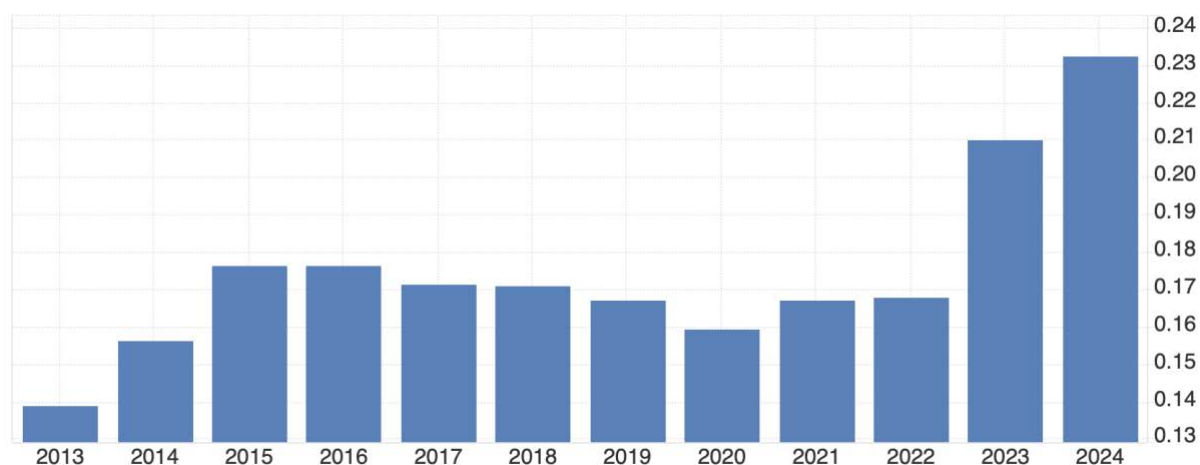
Εικόνα 31. Διαχείριση ενέργειας με το HEMS, σε περίπτωση σκίασης της συστοιχίας φωτοβολταϊκών του μπαλκονιού.	46
Εικόνα 32. Κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την χρήση του HEMS για τις 24 Αυγούστου.	48
Εικόνα 33. Μηνιαίο κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την χρήση του HEMS.	49
Εικόνα 34. Κόστη συστημάτων HEMS.	50
Εικόνα 35. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε kgCO ₂ πριν και μετά την χρήση του HEMS.	51
Εικόνα 36. Μηνιαίες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε kgCO ₂ πριν και μετά την χρήση του HEMS.	51

Κατάλογος Συντομογραφιών

- ο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)
- ο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point) [ΣΜΙ – MMP]
- ο Κατάσταση Φόρτισης (State of Charge) [SoC]
- ο Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System) [ΣΔΕ – EMS]
- ο Οικιακό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Home Energy Management System) [ΟΣΔΕ-HEMS]
- ο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ)
- ο Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX)
- ο Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (Standard Test Conditions) [ΠΣΔ – STC]
- ο Photovoltaic Geographical Informational System (PVGIS)
- ο Comma-Separated Values (CSV)
- ο Κανονική Θερμοκρασία Λειτουργίας Κυψέλης (Nominal Operating Cell Temperature) [ΚΘΛΚ – NOCT]
- ο Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ)

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα κρίσιμο αγαθό για την ανάπτυξη μιας κοινωνίας. Από τα τέλη του 2021 παρατηρήθηκε η τάση της ενεργειακής κρίσης εκτοξεύοντας το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh), κάτι που φαίνεται και στην Εικόνα 1. Επίσης ο ραγδαίος ρυθμός ανάπτυξης της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στην υψηλή ζήτηση και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι με τις νέες τεχνολογίες, πολλά μηχανικά μέρη συσκευών καθημερινής χρήσης μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά, είτε για την πιο εύχρηστη και βέλτιστη λειτουργία τους είτε για τον έλεγχο των ήδη υπάρχοντων μηχανικών μερών. Ωστόσο αυτή η ζήτηση, πέρα από το ογκώδες μέγεθός της, είναι επίσης μεταβαλλόμενη κατά την διάρκεια της ημέρας και διαφορετική από την μία ημέρα στην άλλη [1].



Εικόνα 1. Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα σε €/kWh, τα τελευταία έντεκα έτη.

Παρά τους γοργούς ρυθμούς εγκατάστασης και σύνδεσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) με το δίκτυο, υπάρχει συχνά αδυναμία κάλυψης των αναγκών, διότι η παραγωγή ενέργειας με την χρήση των ΑΠΕ βασίζεται σε έναν μεγάλο βαθμό στις καιρικές συνθήκες (π.χ. ηλιοφάνεια και υψηλές ταχύτητες ανέμου) και έτσι μεταβάλλεται ακόμα πιο συχνά η τιμή της ενέργειας. Η αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί επίσης σε επιπρόσθετες ανησυχίες για τον καταναλωτή αλλά και για τον πάροχο. Ο καταναλωτής επιβαρύνεται με υψηλό κόστος παροχής, όπου παράλληλα με την υψηλή κατανάλωση σε ενέργεια, οδηγεί σε «φουσκωμένους» λογαριασμούς. Για τον πάροχο η υψηλή ζήτηση και κατανάλωση οδηγεί σε ανησυχίες κάλυψης του φορτίου. Σε περιπτώσεις όπου το φορτίο το οποίο πρέπει να καλυφθεί είναι μεγαλύτερο από την ενέργεια που υπάρχει η δυνατότητα να

παρέχεται, υπάρχει κίνδυνος για βλάβη και διακοπή ηλεκτροδότησης και αυτό συνεπάγεται στην μείωση των κερδών και κυρίως στην έλλειψη εμπιστοσύνης από τους καταναλωτές.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εστιάζει στην πλευρά του καταναλωτή και όχι στην πλευρά του παρόχου, εφόσον δημιουργείται και προσομοιώνεται ένα οικιακό σύστημα διαχείρισης ενεργειακού φορτίου. Σκοπός του συστήματος είναι η οικονομικότερη και φιλικότερη προς το περιβάλλον κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται ανάλυση και διαστασιολόγηση των συστημάτων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας του σπιτιού που μελετάται και στην συνέχεια κατασκευάζεται το μοντέλο στο MATLAB Simulink. Προσομοιώνοντας το μοντέλο σε ωριαίο επίπεδο, αντλούνται τα αποτελέσματα με σκοπό την σύγκριση της κατανάλωσης πριν και μετά την χρήση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Τα αποτελέσματα θα κρίνουν εάν θα μειωθούν τα έξοδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή, αν θα έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα με την χρήση του μοντέλου και εάν αξίζουν οικονομικά οι εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την λειτουργία του.

Κεφάλαιο 2: Βασικές αρχές

Για την μέγιστη κατανόηση του αναγνώστη, αποτυπώνονται παρακάτω οι βασικές αρχές των συστημάτων όπου χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

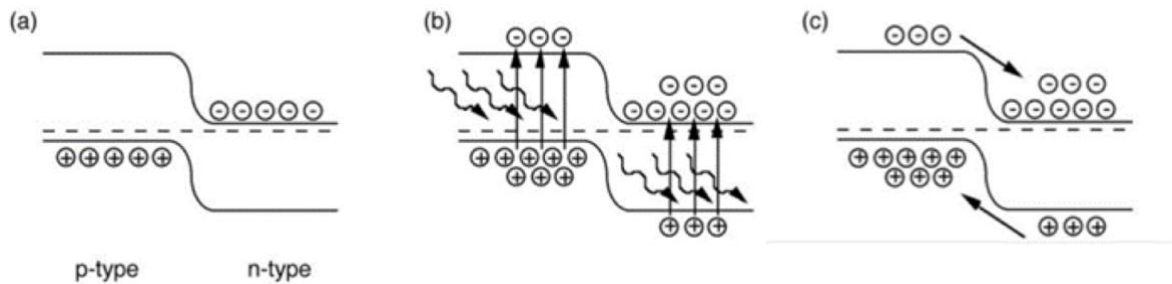
2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των ενεργών ηλιακών συστημάτων, καθώς μετατρέπουν άμεσα την ακτινοβολία του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Εκμεταλλεύονται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, έχοντας παράλληλα μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά την λειτουργία τους, καθιστώντας τα φιλικά προς το περιβάλλον [2].

2.1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο

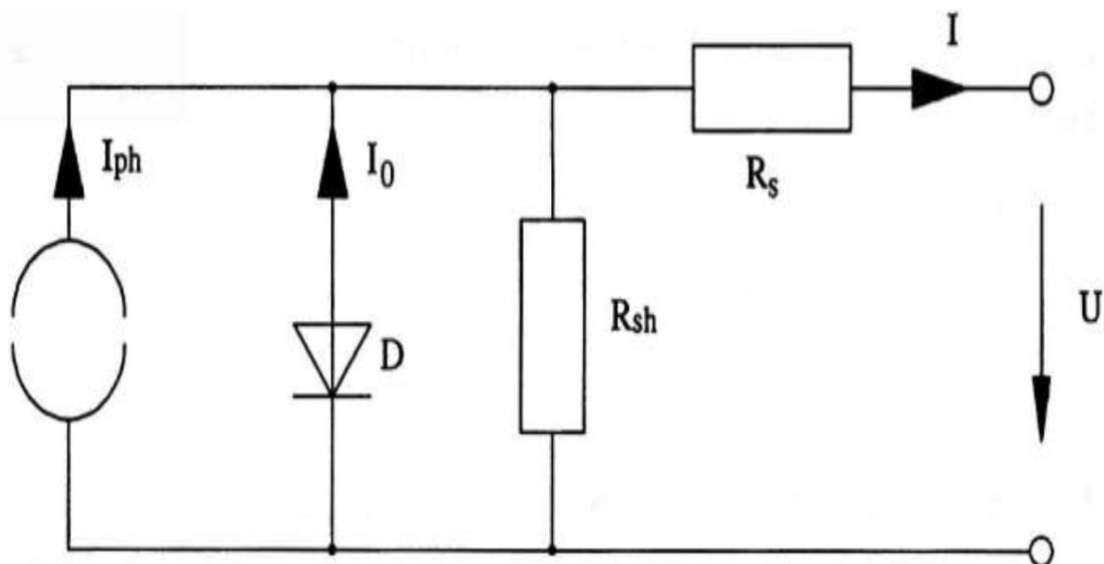
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά τα οποία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς βασισμένους στο πυρίτιο (Si). Με την

βοήθεια του φωτοβολταϊκού φαινομένου, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Παρακάτω, στην Εικόνα 2 αναπαρίσταται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο γραφικά. Στην κατάσταση (a) η επαφή βρίσκεται σε ισορροπία. Στην κατάσταση (b) μετακινούνται ηλεκτρόνια προς την περιοχή p καταλαμβάνοντας τις θέσεις των οπών, ενώ στην κατάσταση (c) η επαφή επανέρχεται σε κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Η κίνηση αυτή οδηγεί στη δημιουργία ενός φωτορεύματος (I_{ph}). Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης αποτελείται από μία δίοδο p-n, και μία πηγή φωτορεύματος, αντιπροσωπεύοντας την ηλιακή ακτινοβολία. Παρακάτω φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (Εικόνα 3) [2].

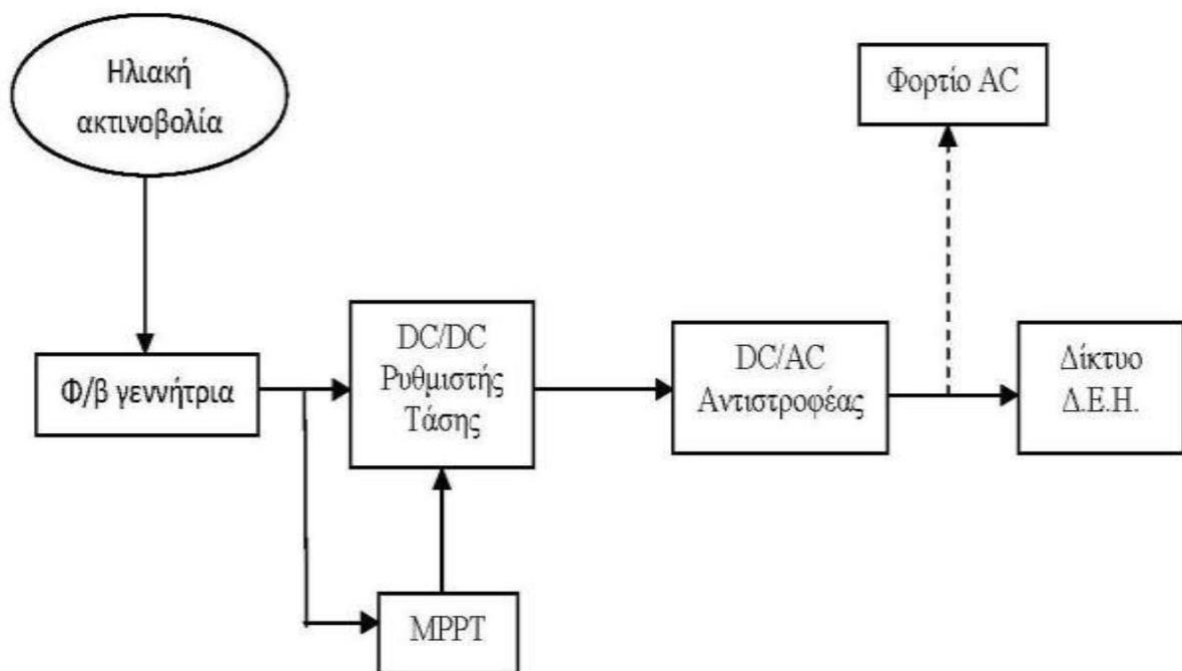


Εικόνα 3. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Με την παράλληλη ή σε σειρά σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων και με την χρήση κεντρικού ηλεκτρολογικού κιβωτίου δημιουργείται μία φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array). Ο βαθμός απόδοσης μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως τα υλικά κατασκευής, την ένταση του φωτισμού και την θερμοκρασία των πλαισίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του φωτισμού τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε αμπέρ (A), ωστόσο όσο αυξάνεται η θερμοκρασία των πλαισίων, μειώνεται η τάση (V) με ρυθμό 2.3 mV για κάθε ένα βαθμό Κελσίου (°C) που ξεπερνάει τους 25 °C, για κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια μετριέται σε βατ. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίζονται στις κατηγορίες των απομονωμένων συστημάτων και σε αυτών που βρίσκονται συνδεδεμένα στο δίκτυο. Στην συνέχεια τα απομονωμένα συστήματα χωρίζονται σε αυτόνομα και υβριδικά με αποθήκευση ή χωρίς αποθήκευση.

2.1.2 Διασύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία συνδέονται στο δίκτυο απαιτούν κάποια συνοδευτικά συστήματα για να μπορούν να εγχέουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο (Εικόνα 4).



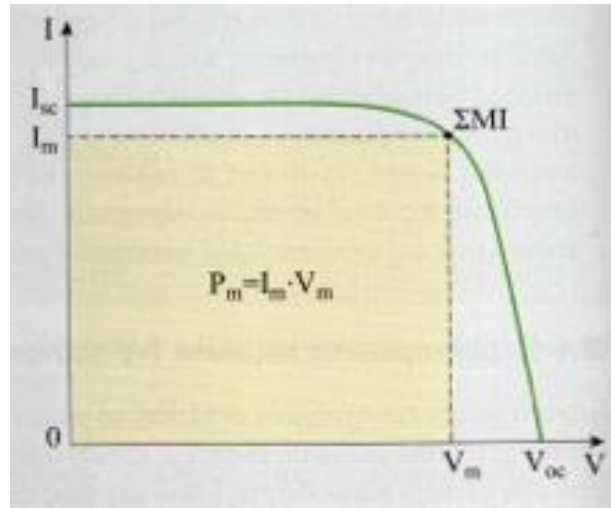
Εικόνα 4. Συστήματα φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου με το δίκτυο.

Αρχικά πρέπει να συνοδεύονται με έναν ρυθμιστή τάσης, ο οποίος θα μετατρέπει τη συνεχή τάση που εισέρχεται σε αυτόν, σε μια σταθερή συνεχή τάση εξόδου, η οποία θα βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα. Επίσης, ο ρυθμιστής τάσης θα ρυθμίζει την λειτουργία των φωτοβολταϊκών στο μέγιστο σημείο απόδοσης, όπως φαίνεται στην επόμενη ενότητα. Έπειτα θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας τάσης, ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης, σε εναλλασσόμενη τάση. Η εναλλασσόμενη τάση θα πρέπει να έχει τα χαρακτηριστικά του δικτύου για να μπορεί να εγχέεται σε αυτό, δηλαδή 220 Volts και 50 Hertz για το μονοφασικό και 380 Volts και 50 Hertz για το τριφασικό [2].

Στα παραπάνω στοιχεία και πιο συγκεκριμένα στην έξοδο του ρυθμιστή τάσης, μπορεί να συνδεθεί κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και να αφαιρεθεί η σύνδεση του συστήματος με το δίκτυο της ΔΕΗ. Με αυτό τον τρόπο το σύστημα μετατρέπεται σε αυτόνομο με αποθήκευση και ανήκει στην κατηγορία των απομονωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτά τα είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πλέον τα πιο διαδεδομένα για οικιακή χρήση, καθώς μπορούν να αποθηκεύσουν την περίσσεια παραγόμενη ενέργεια και να την τροφοδοτήσουν σε άλλη χρονική στιγμή της ημέρας. Έτσι εκμεταλλεύεται πλήρως η παραγόμενη ενέργεια και επιδιώκεται η μέγιστη απόδοση του συστήματος. Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες τοποθετούνται στην οροφή του σπιτιού, ενώ το σύστημα αποθήκευσης τοποθετείται σε εσωτερικό χώρο, έτσι ώστε να μην εκτίθεται σε ακραίες θερμοκρασίες και καιρικά φαινόμενα [2].

2.1.3 Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος

Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτυπώνεται στο διάγραμμα χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-έντασης (I-V). Όταν η τάση που παράγεται είναι μηδενική, τότε η ένταση είναι μέγιστη και το αντίστροφο. Έτσι είναι σημαντικός ο εντοπισμός του σημείου, όπου πολλαπλασιάζοντας τα δύο αυτά μεγέθη, η ισχύς λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή της. Το σημείο αυτό ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος (ΣΜΙ) ή στα αγγλικά Maximum Power Point (MPP) και παρουσιάζεται στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση της έντασης του παραγόμενου ρεύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου απεικονίζοντας το ΣMI .

Συνεπώς, η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου θα πρέπει να βρίσκεται κοντά ή πάνω στο ΣMI , για την βέλτιστη του λειτουργία, κάτι που ρυθμίζεται με την αντίσταση που συνδέεται στα άκρα του. Για τον υπολογισμό αυτής της αντίστασης, χρησιμοποιείται η μέγιστη ένταση και η μέγιστη τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου [2].

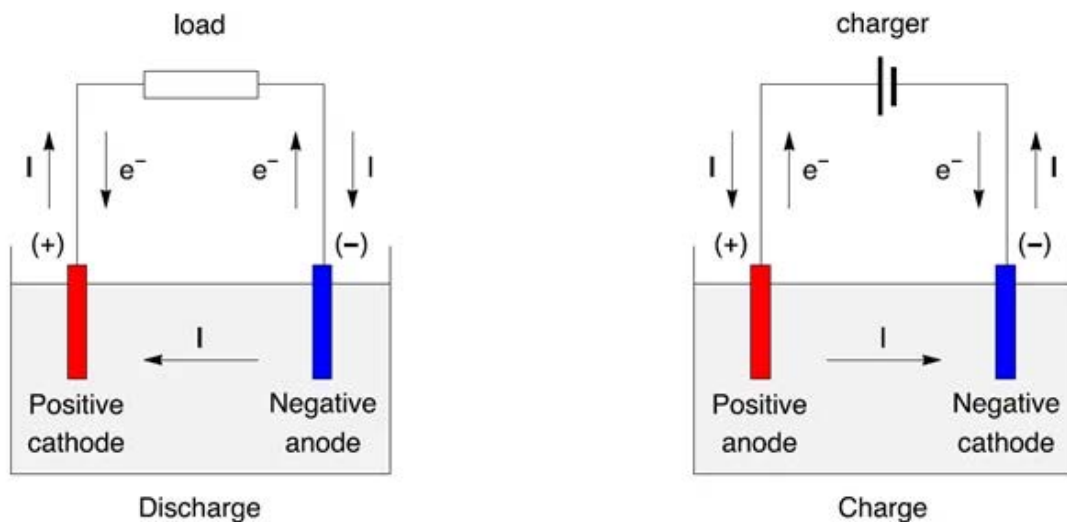
2.2 Βασικές αρχές συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές ή αλλιώς μπαταρίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα γαλβανικά κελιά. Ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτροχημικών συστημάτων και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας [3].

2.2.1 Λειτουργία συσσωρευτών

Ένα κελί αποτελείται από το ηλεκτρόδιο της ανόδου, το ηλεκτρόδιο της καθόδου και τον ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόδια είναι αγώγιμες μεταλλικές πλάκες, όπου λειτουργούν ως τους πόλους ενός συσσωρευτή και ο τρόπος λειτουργίας τους καθορίζεται από το αν ο συσσωρευτής βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Κατά την εκφόρτιση, το ηλεκτρόδιο της ανόδου λειτουργεί ως τον αρνητικό πόλο του συσσωρευτή, αποβάλλοντας ηλεκτρόνια, δηλαδή οξειδώνεται. Το ηλεκτρόδιο της καθόδου λειτουργεί ως το θετικό πόλο, όπου δέχεται τα ηλεκτρόνια, δηλαδή ανάγεται. Ο ηλεκτρολύτης άγει τα ιόντα με σκοπό την μεταφορά τους μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Με την παραπάνω οξειδοαναγωγή δημιουργείται διαφορά δυναμικού και τα ηλεκτρόνια ρέουν από το εξωτερικό

κύκλωμα, με σκοπό την εκμετάλλευση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, η τάση που παράγεται είναι χαμηλή, οπότε κρίνεται απαραίτητη η σύνδεση πολλών όμοιων κελιών σε σειρά ή παράλληλα για την επίτευξη του επιθυμητού ύψους τάσης. Τα παραπάνω στοιχεία, κατά την φόρτιση αντιστρέφονται και έτσι η άνοδος λειτουργεί ως θετικός πόλος του κελιού, ενώ η κάθοδος ως αρνητικός [3].



Εικόνα 6. Τρόπος λειτουργίας κελιού συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση και φόρτιση αντίστοιχα.

2.2.2 Χωρητικότητα συσσωρευτών

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μετριέται σε αμπέρ επί μονάδα χρόνου (Ah). Πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητα με την τάση (V), εκφράζεται η ποσότητα ενέργειας, σε βατώρες (Wh), που έχει την ικανότητα να αποθηκευτεί μέσα στον συσσωρευτή, καθορίζοντας την αποδοτικότητα του. Η χωρητικότητα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την χωρητικότητα είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, δηλαδή η ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος με την οποία εκφορτίζει, όσο πιο αργή είναι η εκφόρτιση τόσο μεγαλύτερη χωρητικότητα αποδίδεται. Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την χωρητικότητα είναι η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, όσο πιο μικρή είναι η θερμοκρασία εκφόρτισης τόσο πιο μικρή είναι η χωρητικότητα που αποδίδεται, με το ιδανικό εύρος να είναι 20 – 40 °C. Η αποτύπωση της τρέχουσας χωρητικότητας της μπαταρίας εκφράζεται με το State of Charge (SoC), δηλαδή με το ποσοστό τοις εκατό (%) υπολειπόμενης ενέργειας του συσσωρευτή για την δεδομένη στιγμή. Το State of Charge στα ελληνικά εκφράζεται ως η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή [3].

2.4 Energy Management System (EMS)

Ο αγγλικός όρος Energy Management System (EMS) αποσκοπεί στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, δηλαδή ο έλεγχος παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των διασυνδεδεμένων συστημάτων, με σκοπό την βέλτιστη επίδοση σε οικιακό, κτηριακό και βιομηχανικό επίπεδο. Ένα EMS αποτελείται από τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα συστήματα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία συνδέονται σε αυτό και λειτουργούν ως είσοδοι και έξοδοι. Παρακολουθώντας την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας των διασυνδεδεμένων συστημάτων, το EMS είναι σε θέση να πάρει τις κατάλληλες αποφάσεις κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Με την χρήση ενός EMS διαχειρίζεται με κατάλληλο τρόπο η ενέργεια, έτσι ώστε να μειώσει τα κόστη παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ή να αποφέρει μέχρι και κέρδη στον χρήστη, μειώνοντας παράλληλα το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα. Η εγκατάσταση ενός EMS μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οικιακό και βιομηχανικό επίπεδο, μέχρι και στην αυτοκινητοβιομηχανία, στα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα.

Τα EMS χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή των EMS που βασίζονται σε κανόνες (Rule-based), τα οποία με την χρήση προκαθορισμένων κανόνων και εντολών, λαμβάνουν τις κατάλληλες αποφάσεις κατανομής ενέργειας, ανάλογα με την παραγωγή και την κατανάλωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων. Έπειτα, υπάρχουν τα EMS που βασίζονται στην μηχανική μάθηση (Machine Learning-based), όπου με την χρήση των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων, έχουν την δυνατότητα να εκπαιδεύονται με σκοπό την εύστοχη πρόβλεψη παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται πιο στοχευμένα οι αποφάσεις κατανομής ενέργειας. Τέλος, υπάρχουν τα EMS που βασίζονται σε αλγόριθμους (Algorithm-based), τα οποία αναλύοντας τα διαθέσιμα δεδομένα και χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, μπορούν να εκτελέσουν αλγορίθμους, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν αποφάσεις κατανομής ενέργειας με πολύ γρήγορους ρυθμούς και με μεγάλη ευστοχία. Τα δεδομένα και η συσκευή του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι εφικτό να βρίσκονται και να αποθηκεύονται σε απομακρυσμένους χώρους και να λειτουργούν με την χρήση του υπολογιστικού «νέφους» (cloud), χωρίς να καταλαμβάνουν χώρο τοπικά στον χρήστη [4].

2.5 MATLAB Simulink

Το Simulink είναι ένα λογισμικό το οποίο εμπεριέχεται μέσα στο MATLAB και η κύρια χρήση του είναι η μοντελοποίηση και η προσομοίωση δυναμικών συστημάτων. Τα συστήματα σχεδιάζονται σε ένα περιβάλλον τύπου διάγραμμα μπλοκ με την χρήση των διαθέσιμων στοιχείων του λογισμικού. Το εύρος των διαθέσιμων στοιχείων είναι μεγάλο και περιλαμβάνει μαθηματικές συναρτήσεις, ελεγκτές, μέχρι και έτοιμα υποσυστήματα όπου μπορεί να ενσωματώσει ο χρήστης σε δικά του μοντέλα. Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με ένα βέλος, με σκοπό την μεταφορά του σήματος από ένα στοιχείο σε ένα άλλο. Έχει την δυνατότητα να παράγει σήματα συνεχούς και διακριτού χρόνου και να τα τροποποιεί ανάλογα με τα διασυνδεδεμένα στοιχεία. Προσομοιώνοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα, μπορούν να αντληθούν αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, πίνακα, αριθμού ή οτιδήποτε άλλο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι μπορεί να γίνει δοκιμή και προσαρμογή του μοντέλου με σκοπό τον αντικατοπτρισμό πραγματικών συνθηκών [5].

Κεφάλαιο 3: Προκλήσεις, στόχοι και συστήματα

3.1 Προκλήσεις

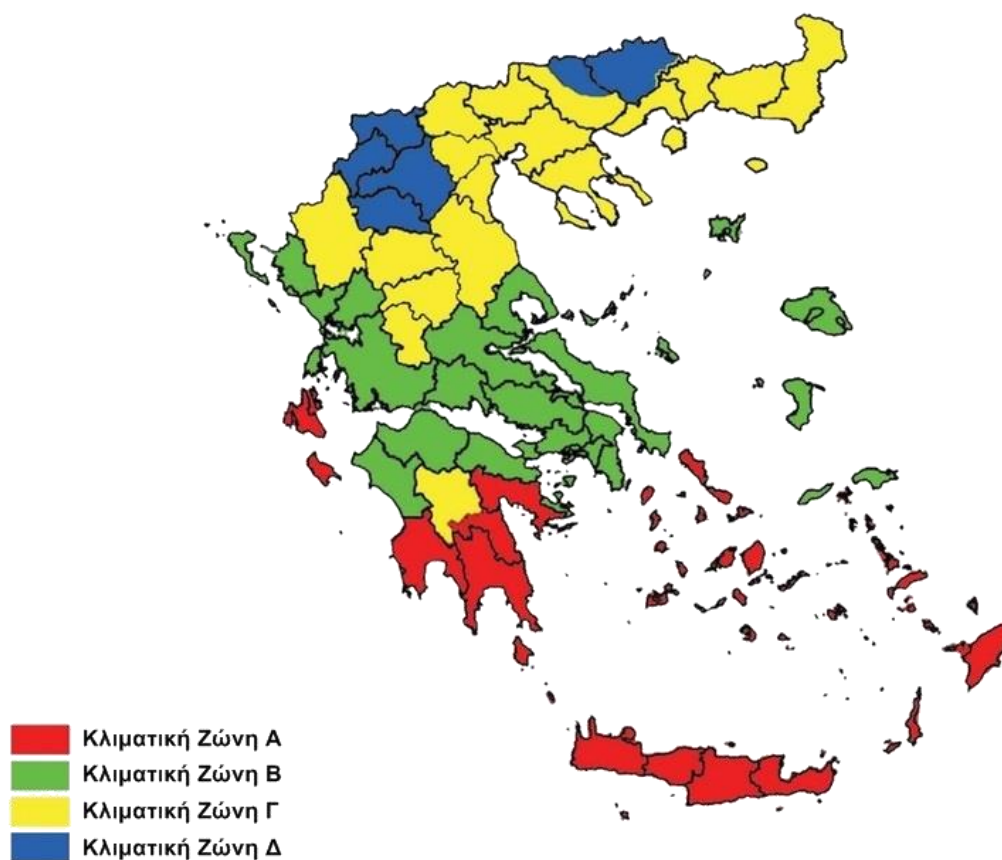
Το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτεί μια οικία για την ομαλή λειτουργία της και την κάλυψη των αναγκών των χρηστών της, είναι διαφορετικό κατά την διάρκεια της ημέρας. Η πλήρης κάλυψη αυτού του ποσού μέσα από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι συχνά πολύ κοστοβόρο και δεν προτιμάται. Επίσης κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ειδικά όταν η παραγωγή δεν πραγματοποιείται από μονάδες ΑΠΕ. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η οποίες μετριοούνται σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα (gCO_2/kWh) μειώνονται αισθητά τα τελευταία χρόνια, ωστόσο δεν παύουν να παράγονται. Η τοποθέτηση συστήματος φωτοβολταϊκών και συσσωρευτών σε ένα σπίτι, είναι δεδομένο ότι θα προσφέρει μια οικονομικά και περιβαλλοντικά αποτελεσματική λύση, ωστόσο για την μέγιστη αξιοποίηση τους είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας ή αλλιώς Energy Management System (EMS). Όταν το σύστημα διαχείρισης ενέργειας τοποθετείται σε μια οικία, αναφέρεται ως Home Energy Management System (HEMS) και αυτό θα είναι το ακρωνύμιο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία [6].

Σε ένα σπίτι το φορτίο μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς. Ενδέχεται κατά τις μεσημβρινές ώρες να λειτουργήσει ο φούρνος ή οι εστίες, με σκοπό το μαγείρεμα ενός φαγητού. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού όπου οι ημέρες είναι πολύ ζεστές, οι κάτοικοι του σπιτιού θα προτιμήσουν να ανοίξουν το κλιματιστικό για να ψύξουν το σπίτι. Είναι πιθανό τις απογευματινές ώρες να παραμείνει ανοιχτή η τηλεόραση ως ψυχαγωγία ή ενημέρωση του χρήστη. Όλες οι παραπάνω μεγάλες και μικρές ηλεκτρικές συσκευές, επηρεάζουν άμεσα το φορτίο ηλεκτρικού ρεύματος που καταναλώνει ένα σπίτι και συνεπώς το μηνιαίο κόστος παροχής. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η διερεύνηση και η αντιμετώπιση των προβλημάτων από την πλευρά του παρόχου αλλά και από την πλευρά του καταναλωτή, με σκοπό την οικονομικότερη και αποδοτικότερη τροφοδοσία του φορτίου καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, με μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων από την πλευρά του παρόχου, θα πρέπει να υπάρχει διαρκής εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικά ΑΠΕ, πράγμα που συμβαίνει ήδη αλλά είναι κοστοβόρο και δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών. Από την πλευρά του καταναλωτή, με στόχο τους χαμηλότερους ,σε κόστος, λογαριασμούς και την ελάχιστη επιβάρυνση του εθνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, θα έπρεπε να υπάρχει πιο ευσυνείδητη κατανάλωση, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας που προτείνει το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Κάποιες από αυτές είναι η τοποθέτηση οικιακών συσκευών μακριά από εστίες θέρμανσης, το σβήσιμο συσκευών κατά την διάρκεια λειτουργίας αναμονής, χαμηλότερη φωτεινότητα στις οθόνες των συσκευών κ.α. Παρά την αποτελεσματικότητα των παραπάνω μεθόδων, συνεχίζει να επικρατεί το πρόβλημα της ενεργειακής κρίσης, καθώς δεν επαρκούν και δεν τηρούνται από όλους τους καταναλωτές. Για αυτό το λόγο αναζητείται μια διαφορετική προσέγγιση, η οποία θα πρέπει να πραγματοποιεί αυτόματα την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς να χρειάζεται να παρεμβαίνει ο καταναλωτής. Έτσι, φθάνει στο επίκεντρο η εικοστή τρίτη μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας του ΥΠΕΝ, αυτή της εγκατάστασης συστήματος διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας ή για την περίπτωση της παρούσας εργασίας, η εγκατάσταση του HEMS [7].

3.2 Στόχοι

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται ένα σπίτι περίπου διακοσίων τετραγωνικών μέτρων (m^2), το οποίο βρίσκεται δέκα χιλιόμετρα (km) έξω από τον οικισμό του Βόλου. Το σπίτι, με βάση τον χάρτη της Εικόνα 7 βρίσκεται στην κλιματική ζώνη Β. Με την χρήση του εγκατεστημένου μετρητή ενέργειας ηλεκτρολογικού πίνακα, διαπιστώνεται ότι το σπίτι έχει μέση ημερήσια κατανάλωση 45 kWh και 35 kWh, το καλοκαίρι και τον χειμώνα αντίστοιχα. Η κατανάλωση βρίσκεται σε αυτή την κλίμακα καθώς διαθέτει μεγάλες ηλεκτρικές συσκευές όπως φούρνος με εστίες, πλυντήριο ρούχων και πιάτων, σίδερο, πέντε κλιματιστικά και μικρές ηλεκτρονικές συσκευές όπως υπολογιστές, κινητά, τηλεόραση, λαμπτήρες κ.α. Επίσης από την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού φορτίζεται ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο Tesla Model Y, με μπαταρία μεγέθους 60 kWh. Το ζεστό νερό χρήσης (ZNX) δεν απαιτεί κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή του, καθώς το σπίτι έχει ενσωματωμένα τρία πάνελ ηλιακού θερμοσίφωνα, συνολικής επιφάνειας έξι τετραγωνικών μέτρων (m^2) [8] [9].



Εικόνα 7. Οι τέσσερις κλιματικές ζώνες της Ελλάδας.

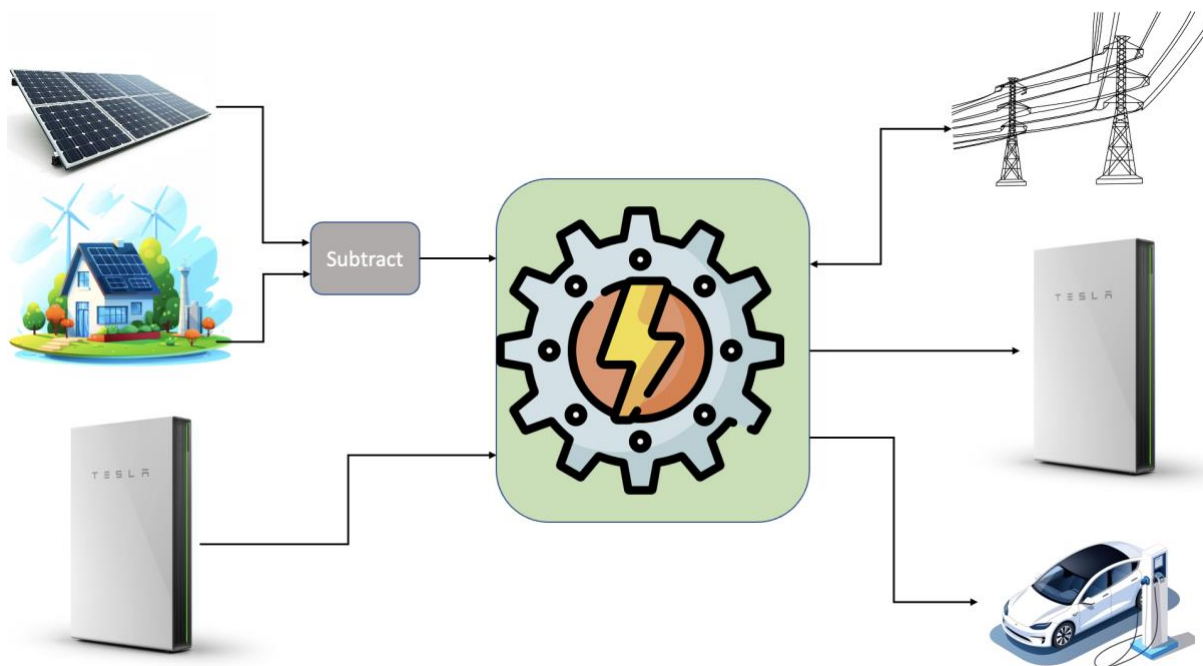
Ο στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η ορθή διαστασιολόγηση των συστημάτων που θα εγκατασταθούν στο σπίτι. Στην συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψιν τα εγκατεστημένα συστήματα, θα δημιουργηθεί το HEMS του σπιτιού με σκοπό την βέλτιστη διαχείριση ενεργειακού φορτίου με απόκριση σε σενάρια ζήτησης. Με αυτό τον τρόπο η κατανάλωση ενέργειας θα πραγματοποιείται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, εξοικονομώντας χρήματα στους κατοίκους, χωρίς να επιβαρύνεται το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα θα παράγονται ελάχιστες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

3.3 Συστήματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία κατασκευάστηκε ένα HEMS, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των EMS που βασίζονται σε κανόνες (Rule-based). Για την κατασκευή του HEMS, λαμβάνονται ως μεταβλητές εισόδου και εξόδου τα παρακάτω συστήματα:

- Φωτοβολταϊκό σύστημα
- Σύστημα συσσωρευτών
- Εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
- Φορτίο σπιτιού
- Ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του σπιτιού και την φόρτιση του συστήματος συσσωρευτών. Το σύστημα συσσωρευτών θεωρείται σύστημα παραγωγής, αλλά και κατανάλωσης ενέργειας, καθώς παρέχει ενέργεια στο σπίτι όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, αλλά καταναλώνει ενέργεια για να φορτίσει όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα υπερκαλύπτει τις ανάγκες του σπιτιού. Το ίδιο χαρακτηριστικό έχει και το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το φορτίο του σπιτιού είναι ένα σύστημα κατανάλωσης ενέργειας καθώς καταναλώνει και δεν μπορεί να αποδώσει ενέργεια, κάτι που ισχύει και για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Ο τρόπος διασύνδεσης των παραπάνω συστημάτων φαίνεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Διασύνδεση συστημάτων HEMS.

3.4 Διαστασιολόγηση συστημάτων

Για την ομαλή λειτουργία των διασυνδεδεμένων συστημάτων και την πλήρη κάλυψη των αναγκών, κρίνεται απαραίτητη η ορθή διαστασιολόγηση. Το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι κρίσιμο να παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του σπιτιού όχι μόνο το καλοκαίρι αλλά και τον χειμώνα, όπου η παραγωγή ενδέχεται να είναι μικρότερη. Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη η ηλιακή ακτινοβολία και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να είναι γνωστός ο μέσος όρος ωρών αιχμής του ηλίου για τους χειμερινούς και καλοκαιρινούς μήνες. Οι ώρες αιχμής του ηλίου θεωρούνται οι ώρες τις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνει τις τιμές των χιλίων βат ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) και για να μετατραπεί η ηλιακή ακτινοβολία (*Irradiance*) σε ώρα αιχμής του ηλίου (*PeakSunHour*) χρησιμοποιείται η εξίσωση (1) [10].

$$PeakSunHour = \frac{Irradiance}{1000} \quad (1)$$

Έχοντας διαθέσιμες τις ώρες αιχμής του ηλίου αλλά και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού (P_{load}), με την χρήση της εξίσωσης (2) υπολογίζεται η απαιτούμενη συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος (P_{pv}) [11].

$$P_{pv} = \frac{P_{load}}{PeakSunHours} \text{ (kW)} \quad (2)$$

Με βάση την κατανάλωση του σπιτιού τους χειμερινούς μήνες και τις ώρες αιχμής του ηλίου τους χειμερινούς μήνες, υπολογίζεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να είναι 18 kW. Έτσι, θα χρησιμοποιηθούν συνολικά σαράντα πέντε φωτοβολταϊκά πάνελ των 400 W της εταιρείας JinkoSolar Holding Co., LTD. Η μέγιστη παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC) ανέρχεται στα 18 kW και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μεμονωμένου πάνελ φαίνονται στην τελευταία στήλη, εντός του κόκκινου πλαισίου στην Εικόνα 9 [12].

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM380M-72		JKM385M-72		JKM390M-72		JKM395M-72		JKM400M-72	
	JKM380M-72-V		JKM385M-72-V		JKM390M-72-V		JKM395M-72-V		JKM400M-72-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	380Wp	286Wp	385Wp	290Wp	390Wp	294Wp	395Wp	298Wp	400Wp	302Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.5V	38.6V	40.8V	38.8V	41.1V	39.1V	41.4V	39.3V	41.7V	39.6V
Maximum Power Current (Imp)	9.39A	7.42A	9.44A	7.48A	9.49A	7.54A	9.55A	7.60A	9.60A	7.66A
Open-circuit Voltage (Voc)	48.9V	47.5V	49.1V	47.7V	49.3V	48.0V	49.5V	48.2V	49.8V	48.5V
Short-circuit Current (Isc)	9.75A	7.88A	9.92A	7.95A	10.12A	8.02A	10.23A	8.09A	10.36A	8.16A
Module Efficiency STC (%)	19.16%		19.42%		19.67%		19.92%		20.17%	
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C									
Maximum System Voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum Series Fuse Rating	20A									
Power Tolerance	0~+3%									
Temperature Coefficients of Pmax	-0.37%/°C									
Temperature Coefficients of Voc	-0.29%/°C									
Temperature Coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C									

STC:  Irradiance 1000W/m²  Cell Temperature 25°C  AM=1.5

NOCT:  Irradiance 800W/m²  Ambient Temperature 20°C  AM=1.5  Wind Speed 1m/s

* Power measurement tolerance: ± 3%

Εικόνα 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μεμονωμένου φωτοβολταϊκού πάνελ.

Κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά πάνελ καταλαμβάνει δύο τετραγωνικά μέτρα (m²) και η συνολική επιφάνεια που απαιτείται για την τοποθέτησή τους είναι τα ενενήντα τετραγωνικά μέτρα (m²). Έτσι θα χωριστούν σε τρεις διαφορετικές συστοιχίες, έξι πάνελ στο υπόστεγο του μπαλκονιού, έντεκα πάνελ στην στέγη του σπιτιού και τα υπόλοιπα είκοσι οκτώ θα τοποθετηθούν στο στέγαστρο PR3 της εταιρείας Sunfer που θα τοποθετηθεί στο οικόπεδο του σπιτιού. Το στέγαστρο PR3 διαθέτει τέσσερις θέσεις στάθμευσης με σκίαση για τα αυτοκίνητα των κατοίκων. Ο διαμοιρασμός των τριών συστοιχιών φαίνεται στην Εικόνα 10. Η κάθε συστοιχία θα έχει το δικό του μετασχηματιστή τάσης (inverter) απόδοσης ενενήντα εφτά τοις εκατό (97%), με σκοπό την αντιμετώπιση του φαινομένου της σκίασης [13].



Εικόνα 10. Διαμοιρασμός των τριών συστοιχιών φωτοβολταϊκών.

Οι ιδιοκτήτες του σπιτιού που μελετάται στην εργασία, έχουν στην κατοχή τους ένα Tesla Model Y. Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο Tesla Model Y, έχει μπαταρία μεγέθους 60 kWh και ο φορτιστής του Tesla Wall Connector φορτίζει το αυτοκίνητο με ισχύ έως 10 kW. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα συσσωρευτών του σπιτιού θα πρέπει να έχει το κατάλληλο μέγεθος, έτσι ώστε να μπορεί, κατά τις ώρες χωρίς ηλιοφάνεια, να καλύψει τις ανάγκες του σπιτιού αλλά να μπορεί να φορτίσει και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Για αυτό επιλέχθηκαν δύο συσσωρευτές Powerwall της εταιρείας Tesla, με συνολική ισχύ 27 kWh. Οι δύο συσσωρευτές θα λειτουργούν ως ένα σύστημα συσσωρευτών και θα έχουν ισχύ φόρτισης και εκφόρτισης 5 kW [14].

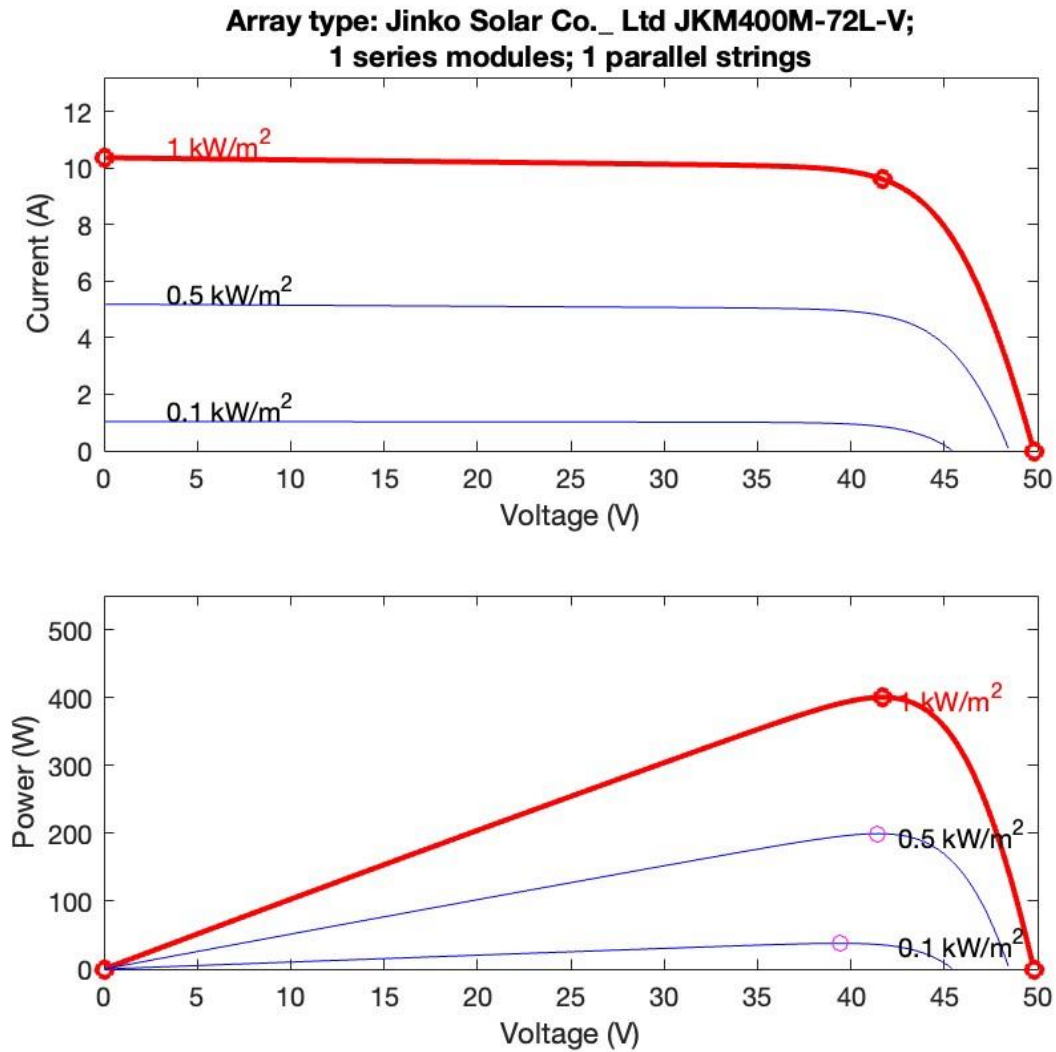
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία μοντελοποίησης συστήματος

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB Simulink για την μοντελοποίηση του συστήματος. Η σχεδίαση και η συνδεσμολογία των συστημάτων φαίνεται στις παρακάτω ενότητες.

4.1 Στοιχεία φωτοβολταϊκού συστήματος

Στην βιβλιοθήκη «Electrical» του Simulink, υπάρχει διαθέσιμο το στοιχείο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με όνομα «PV Array», το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των φωτοβολταϊκών του σπιτιού. Ανοίγοντας τις ρυθμίσεις του στοιχείου, επιλέχθηκε για την προσομοίωση το μοντέλο JKM400M-72L-V της εταιρείας JinkoSolar Holding Co., LTD, όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, μέσα από την βάση δεδομένων του λογισμικού, ορίζονται αυτόματα οι παράμετροι για το φωτοβολταϊκό πάνελ και στο Εικόνα 11 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη του πάνελ. Το στοιχείο δέχεται ως είσοδο την συνολική ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κελιών, ενώ σαν έξοδο έχει ένα θετικό και έναν αρνητικό πόλο, αλλά και ένα σήμα για την άντληση των μετρήσεων του φωτοβολταϊκού, το οποίο στην παρούσα εργασία θα τερματιστεί, καθώς θα αντληθούν σε επόμενο στάδιο οι μετρήσεις του. Στην έξοδο του θετικού πόλου συνδέθηκε ένα αμπερόμετρο με σκοπό την μέτρηση της έντασης του παραγόμενου ρεύματος και έπειτα μια αντίσταση (R). Για την διαστασιολόγηση της αντίστασης χρησιμοποιήθηκε η τάση (V) και η αντίσταση (I) στο ΣΜΙ του φωτοβολταϊκού πάνελ και υπολογίστηκε με τον νόμο του Ωμ (3).

$$R = \frac{V}{I} (\Omega) \quad (3)$$



Εικόνα 11. Χαρακτηριστική καμπύλη ενός πάνελ των 400W μοντέλου JKM400M-72L-V της εταιρείας JinkoSolar Holding Co., LTD.

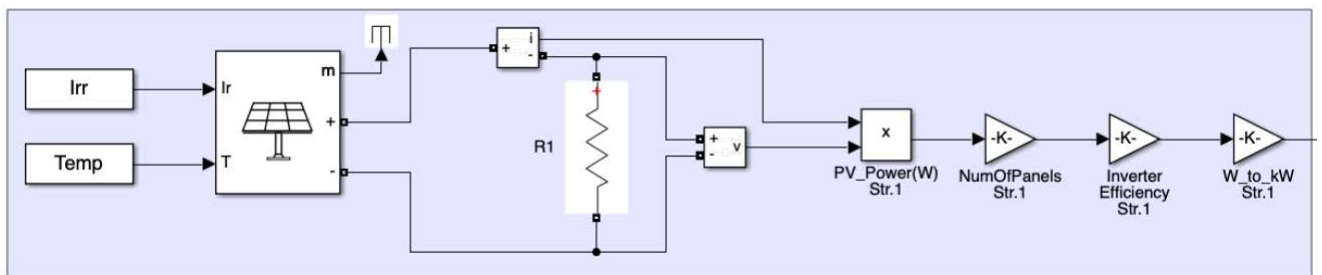
Μετά την αντίσταση συνδέθηκε ένα βολτόμετρο, με σκοπό την μέτρηση της τάσης του παραγόμενου ρεύματος. Έχοντας διαθέσιμη την τάση (V) και την ένταση (I) της εξόδου του φωτοβολταϊκού, με την χρήση ενός στοιχείου πολλαπλασιασμού υπολογίζεται η ενέργεια που παράγει ένα μεμονωμένο φωτοβολταϊκό πάνελ (P_{single}) (4).

$$P_{single} = V \times I \text{ (W)} \quad (4)$$

Πολλαπλασιάζοντας την παραγόμενη ισχύ (P_{single}) με τον αριθμό των πάνελ της συστοιχίας (N_{panels}), έπειτα με τον βαθμό απόδοσης του μετασχηματιστή τάσης (inverter) της συστοιχίας ($n_{inverter}$) και τέλος διαιρώντας με χίλια για την μετατροπή των βατ σε κιλοβάτ, προκύπτει η συνολική παραγόμενη ισχύς της συστοιχίας (P_{total}) (5).

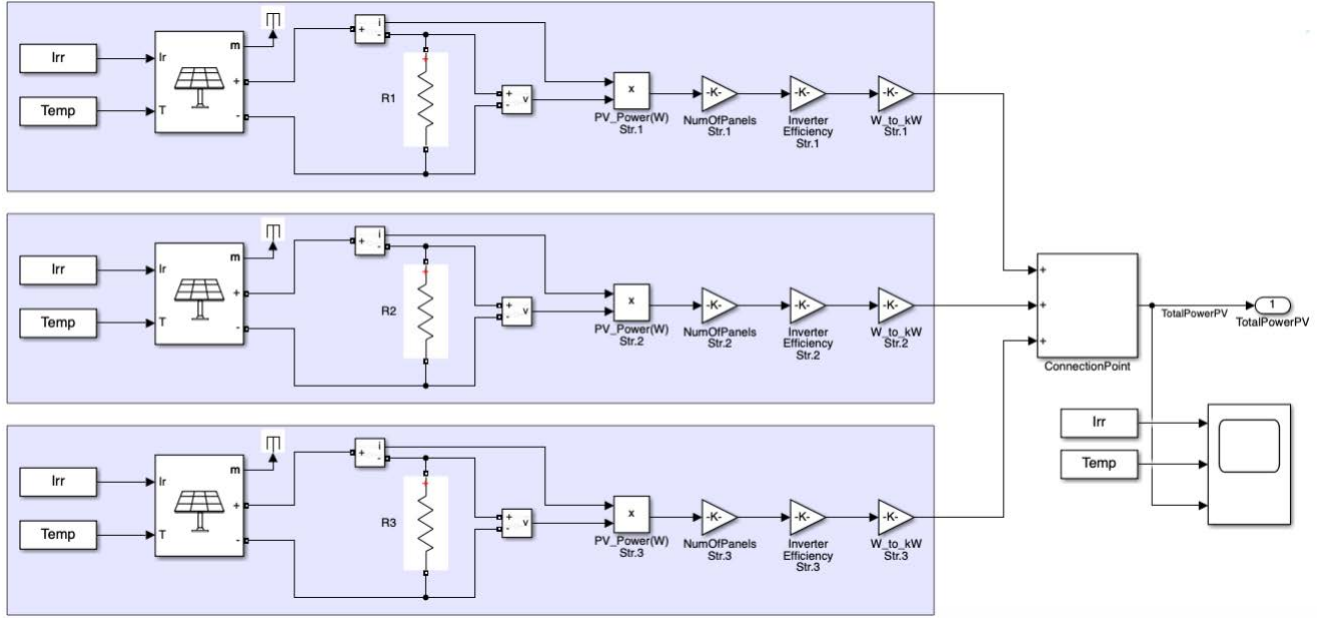
$$P_{total} = \frac{P_{single} \times N_{panels} \times n_{inverter}}{1000} \text{ (kW)} \quad (5)$$

Με αυτό τον τρόπο μοντελοποιείται στο Simulink μία συστοιχία φωτοβολταϊκών και ο τρόπος σύνδεσης των στοιχείων φαίνεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12. Μοντέλο συστοιχίας φωτοβολταϊκών στο Simulink.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρεις συστοιχίες φωτοβολταϊκών για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος του σπιτιού και με το στοιχείο άθροισης υπολογίστηκε η συνολική παραγόμενη ισχύς του συστήματος. Στην έξοδο του συστήματος συνδέεται το στοιχείο του Scope για την απεικόνιση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της συνολικής παραγόμενης ισχύος σε διαγράμματα, ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο τα στοιχεία του φωτοβολταϊκού συστήματος (Εικόνα 13) [15].



Εικόνα 13. Συνολικά στοιχεία (blocks) φωτοβολταϊκού συστήματος.

4.2 Στοιχεία συστήματος συσσωρευτών

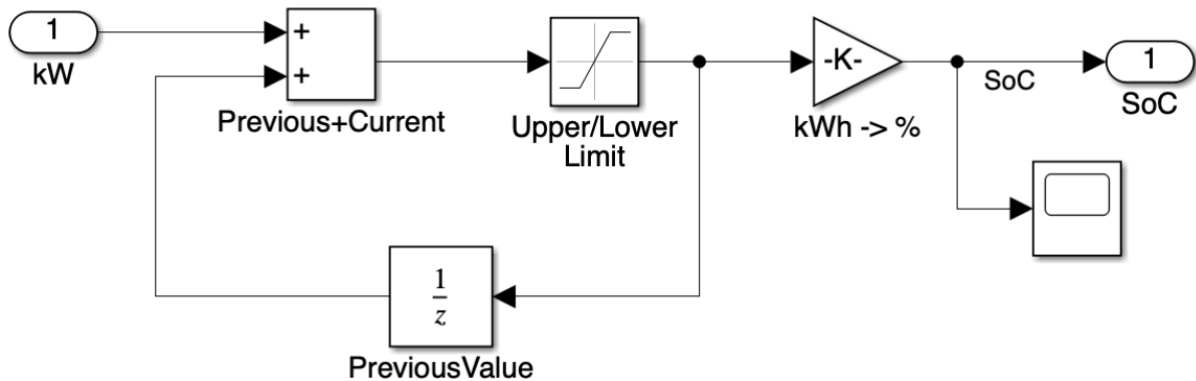
Η προσομοίωση του συστήματος συσσωρευτών έγινε με την χρήση των τεχνικών χαρακτηριστικών του, έχοντας ως είσοδο την ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος σε κιλοβάτ (kW) και ως έξοδο την κατάσταση φόρτισης σε ποσοστιαία μορφή (%). Η ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης ($P_{ch,dis}$) εισάγεται στο σύστημα και φτάνει στο στοιχείο άθροισης όπου αθροίζεται με την τιμή ενέργειας που είχε στο προηγούμενο χρονικό βήμα ($P_{previous}$). Η ενέργεια του προηγούμενο χρονικού βήματος φτάνει στο στοιχείο άθροισης με ανατροφοδότηση, περνώντας από το στοιχείο Unit Delay. Το στοιχείο Unit Delay χρησιμοποιείται για να ανατροφοδοτείται το σήμα μόνο σε κάθε χρονικό βήμα και όχι σε συνεχή ρυθμό. Έτσι λαμβάνοντας ως είσοδο την διαθέσιμη χωρητικότητα, έχει ως έξοδο την ενέργεια της μπαταρίας, καθυστερημένη κατά ένα χρονικό βήμα. Επίσης ορίζει την αρχική χωρητικότητα του συστήματος συσσωρευτών κατά την έναρξη της προσομοίωσης ($C_{initial}$), η οποία κατά την έξοδο της από το στοιχείο Unit Delay, μεταφράζεται ως την αρχική ενέργεια ($P_{initial}$).

$$P_{battery} = P_{ch,dis} + P_{previous} \text{ (or } P_{initial} \text{)} \text{ (kW)} \quad (6)$$

Το σήμα εξόδου του στοιχείου άθροισης ($P_{battery}$) υπολογίζεται από την εξίσωση (6) και στην συνέχεια εισάγεται στο στοιχείο Saturation όπου ορίζονται τα όρια χωρητικότητας του συστήματος συσσωρευτών ($C_{battery}$), δηλαδή η ελάχιστη (C_{min}) και η μέγιστη κατάσταση φόρτισης (C_{max}) σε κιλοβατώρες (kWh) (7). Έπειτα το σήμα φτάνει στο στοιχείο Gain για την μετατροπή της κατάστασης φόρτισης σε ποσοστιαία μονάδα (%), όπως φαίνεται στην εξίσωση (8). Τέλος το σήμα συνδέεται στο στοιχείο Scope με σκοπό την απεικόνιση της κατάστασης φόρτισης σε διάγραμμα, ολοκληρώνοντας έτσι τα στοιχεία του συστήματος συσσωρευτών (Εικόνα 14) [16].

$$C_{min} < C_{battery} < C_{max} (kWh) \quad (7)$$

$$SoC = C_{battery} \times \left(\frac{100}{C_{max}} \right) (\%) \quad (8)$$



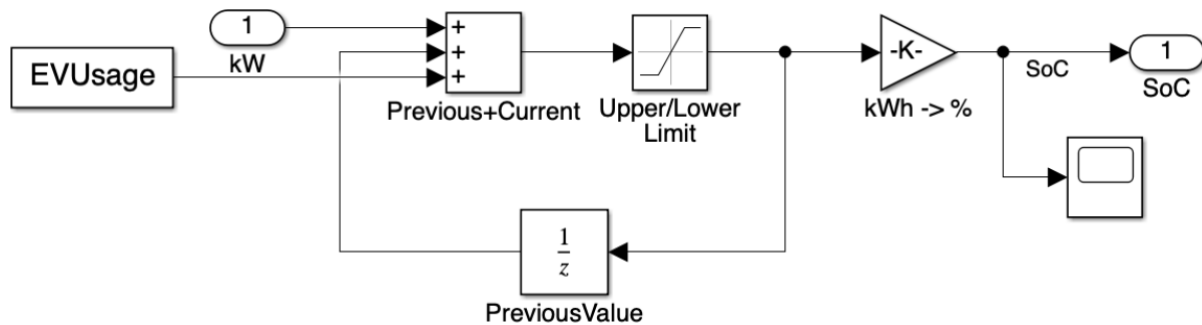
Εικόνα 14. Συνολικά στοιχεία (blocks) συστήματος συσσωρευτών.

4.3 Στοιχεία ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Τα στοιχεία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι πανομοιότυπα με αυτά του συστήματος συσσωρευτών, καθώς μοντελοποιείται η κατάσταση φόρτισης συσσωρευτών και στα δύο συστήματα. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων παρατηρείται στο στοιχείο άθροισης, εφόσον το ηλεκτρικό αυτοκίνητο έχει τρία σήματα που αθροίζονται, σε αντίθεση με το σύστημα συσσωρευτών όπου ήταν δύο τα σήματα που συνδέθηκαν στο στοιχείο άθροισης. Το τρίτο σήμα είναι η ωριαία κατανάλωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου (P_{EV}). Γίνεται άθροιση

του σήματος και όχι αφαίρεση καθώς η κατανάλωση του οχήματος λαμβάνει αρνητικές τιμές. Στην εξίσωση (9) παρατηρείται η πράξη που γίνεται στο στοιχείο άθροισης και στην Εικόνα 15 φαίνονται τα συνολικά στοιχεία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου [16].

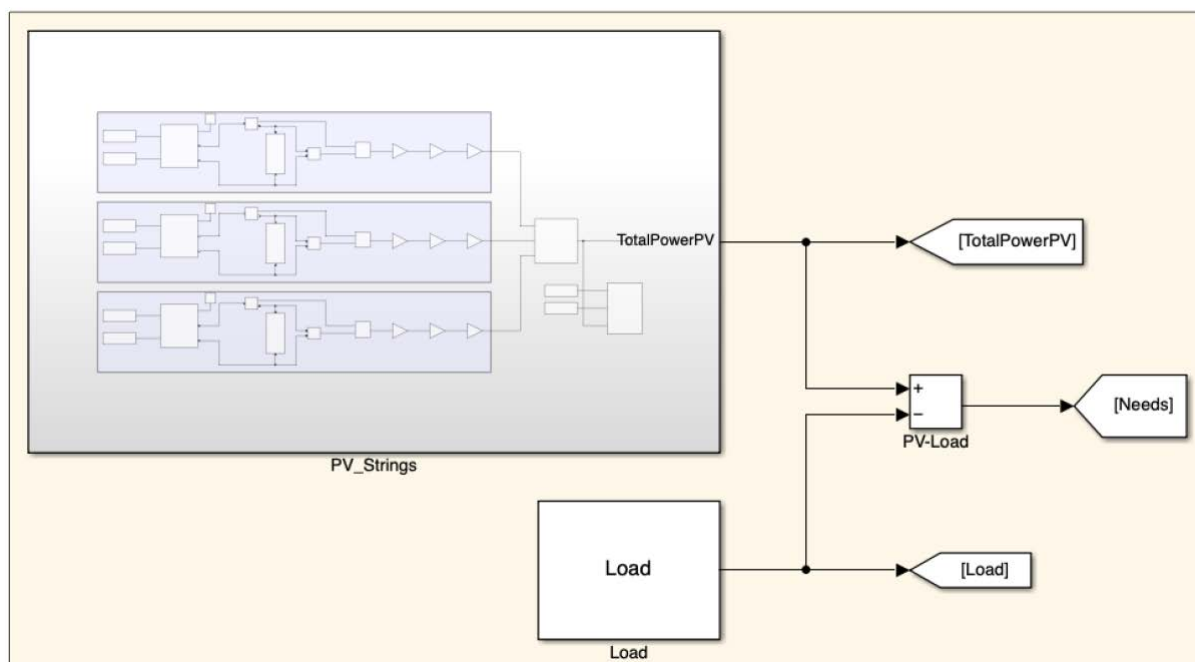
$$P_{battery} = P_{ch,dis} + P_{previous} \text{ (or } P_{initial}) + P_{EV} \text{ (kW)} \quad (9)$$



Εικόνα 15. Συνολικά στοιχεία (blocks) ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

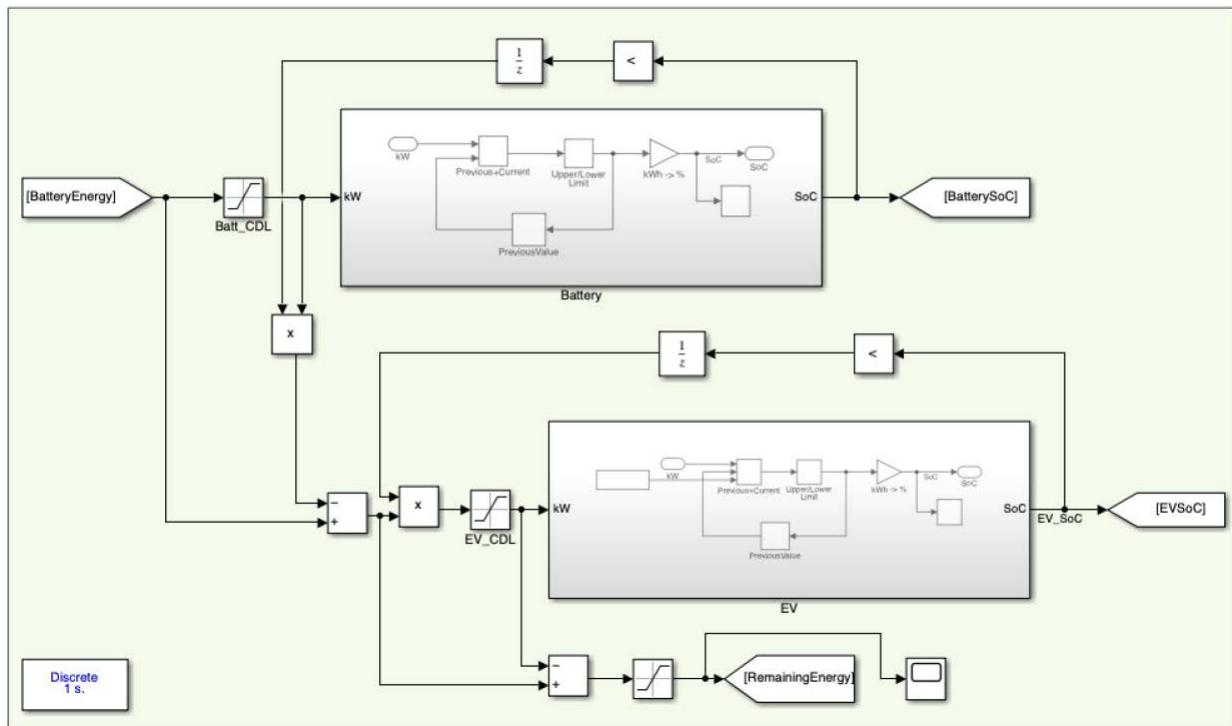
4.4 Συνδεσμολογίες συστημάτων

Η ορθή λειτουργία της προσομοίωσης έχει ως προϋπόθεση την κατάλληλη συνδεσμολογία των παραπάνω συστημάτων. Έχοντας διαθέσιμες τις εισόδους και τις εξόδους των τριών συστημάτων, είναι εφικτή η συνδεσμολογία τους με σκοπό την δημιουργία του HEMS. Η κύρια προτεραιότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η κάλυψη των αναγκών του σπιτιού και σε δεύτερο στάδιο η φόρτιση της μπαταρίας ή η έγχυση περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, από την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος θα αφαιρείται η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού, υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο την έλλειψη ή την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των δύο συστημάτων (Εικόνα 16).



Εικόνα 16. Τροφοδοσία της ζήτησης του σπιτιού από το φωτοβολταϊκό σύστημα, για την εύρεση περίσσειας ή έλλειψης ενέργειας.

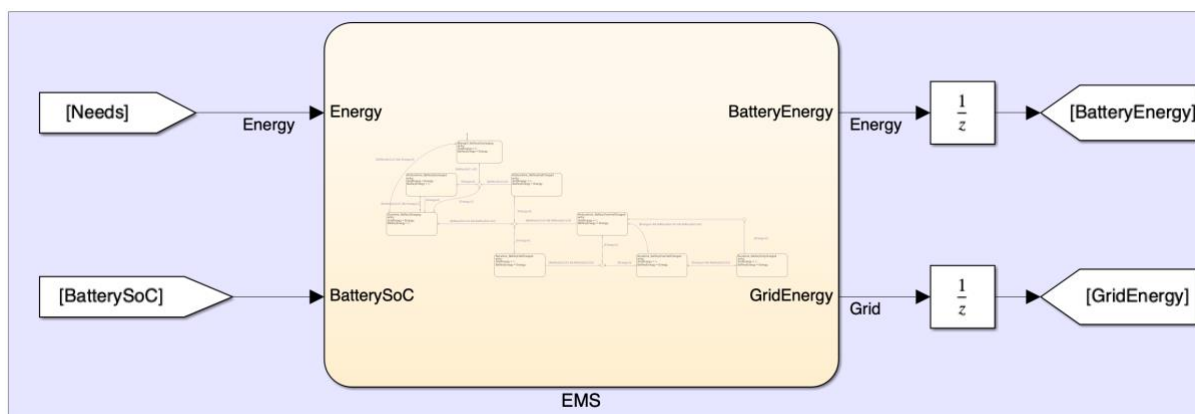
Το σύστημα συσσωρευτών έχει προσχεδιασμένες αντοχές στην ενέργεια φόρτισης και εκφόρτισης, για αυτό πριν από την είσοδο του σήματος στο σύστημα, τοποθετείται ένα στοιχείο Saturation για να περιοριστεί η ενέργεια που δέχεται η μπαταρία στα όρια τα οποία ορίζει ο κατασκευαστής. Επίσης στην έξοδο του συστήματος, τοποθετείται ένα στοιχείο Compare to Constant έτσι ώστε όταν το σύστημα υπερβεί την μέγιστη επιθυμητή κατάσταση φόρτισης να μην δέχεται πλέον άλλη ενέργεια φόρτισης. Εάν η ενέργεια φόρτισης της μπαταρίας ξεπεράσει την ενέργεια φόρτισης που έχει οριστεί στο στοιχείο Compare to Constant, τότε η περίσσεια ενέργεια τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Φτάνοντας στο σύστημα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, παρατηρείται ότι έχουν τοποθετηθεί τα ίδια στοιχεία Saturation και Compare to Constant, για τον ίδιο σκοπό, δηλαδή για τον περιορισμό εγγεόμενης ενέργειας στο σύστημα αλλά και για τον τερματισμό της φόρτισης σε περίπτωση μέγιστης κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Εάν η ενέργεια φόρτισης υπερκαλύπτει το σύστημα συσσωρευτών αλλά και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, τότε η ενέργεια εγχέεται στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την πώληση της ενέργειας. Κάθε σήμα ανατροφοδότησης συνδέεται σε στοιχείο Unit Delay, με σκοπό την αποφυγή του σφάλματος Algebraic Loop που παρουσιάζει το Simulink. Η συνολική συνδεσμολογία μεταξύ του συστήματος συσσωρευτών και του ηλεκτρικού αυτοκινήτου φαίνεται στην Εικόνα 17 [17].



Εικόνα 17. Συνολική συνδεσμολογία του συστήματος συσσωρευτών και του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

4.5 Υλοποίηση Home Energy Management System (HEMS)

Η κατασκευή του HEMS πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εργαλείου Stateflow, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο λογισμικό του Simulink. Είναι ένα εργαλείο όπου δουλεύει με καταστάσεις (states) και μεταβάσεις (transitions). Εκτελεί αλγορίθμους του MATLAB και επηρεάζεται ανάλογα με τις εισόδους του συστήματος. Ο χρήστης θέτει τις καταστάσεις τις οποίες επιθυμεί αλλά και τον τρόπο τον οποίο μεταβιβάζεται το σήμα από την μια κατάσταση σε μια άλλη. Με αυτό τον τρόπο μοντελοποιήθηκε το σύστημα του EMS στην παρούσα εργασία. Οι εισοδοί του συστήματος είναι οι ανάγκες που προκύπτουν από την αφαίρεση της ζήτησης του σπιτιού από την συνολική παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος (Energy) και η κατάσταση φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών (BatterySoC). Οι εξοδοί του συστήματος είναι η ενέργεια από και προς το σύστημα συσσωρευτών (BatteryEnergy) και η ενέργεια από και προς το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (GridEnergy). Στις εξόδους του συστήματος τοποθετήθηκαν στοιχεία Unit Delay, διότι λειτουργούν ως σήματα ανατροφοδότησης και πρέπει να αποφευχθεί το σφάλμα του Algebraic Loop που παρουσιάζει το Simulink (Εικόνα 18) [18].



Εικόνα 18. Συνολικό block HEMS με τις εισόδους και τις εξόδους του.

Το εργαλείο για την έναρξη λειτουργίας του απαιτεί μια αρχική κατάσταση και στο παρόν σύστημα ορίστηκε η κατάσταση του συστήματος τα μεσάνυχτα. Τα μεσάνυχτα, το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παράγει ενέργεια, το σύστημα συσσωρευτών είναι φορτισμένο και τροφοδοτεί τις ανάγκες του σπιτιού και δεν δέχεται καθόλου ενέργεια από το δίκτυο. Για λόγους απλότητας και ευκολότερης κατανόησης οι καταστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα αναγράφονται στην Εικόνα 19.

States	BatteryEnergy	GridEnergy
Midnight_BatteryDischarging	-	0
Sunshine_BatteryCharging	+	0
NoSunshine_BatteryDischarged	0	+
Sunshine_BatteryHalfCharged	+	0
NoSunshine_BatteryHalfCharged	-	0
Sunshine_BatteryOverHalfCharged	+	0
NoSunshine_BatteryOverHalfCharged	-	0
Sunshine_BatteryFullyCharged	+	0

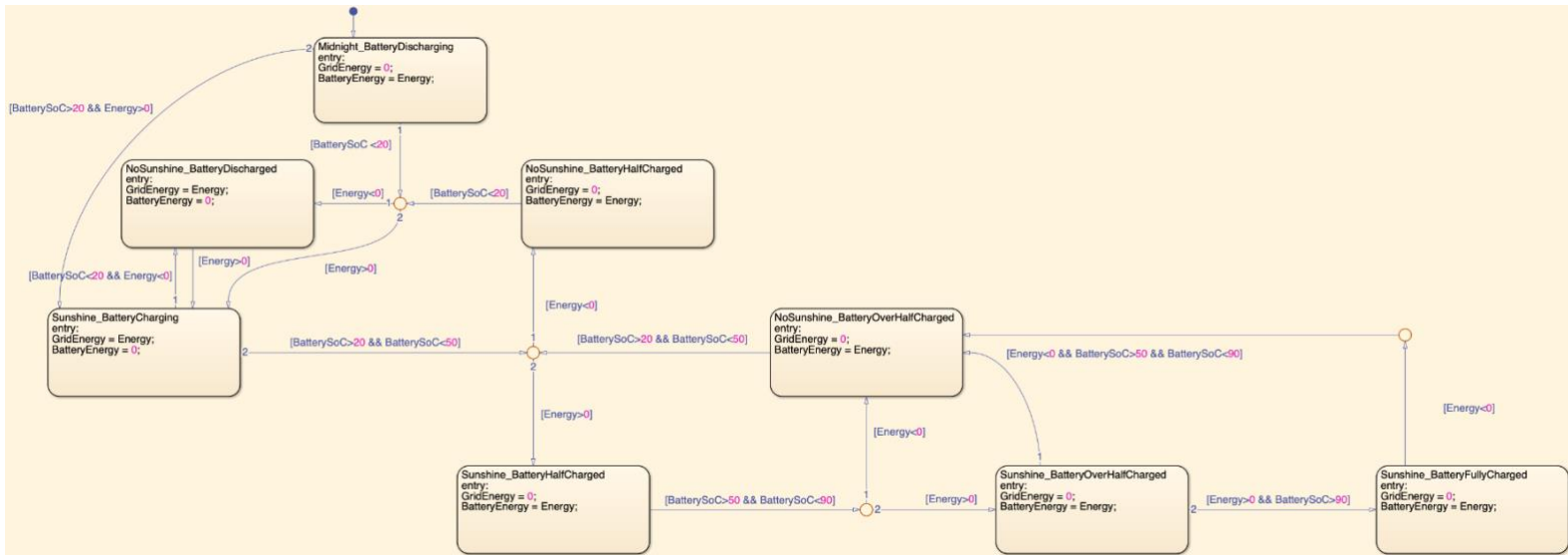
Εικόνα 19. Λίστα καταστάσεων του EMS στο εργαλείο Stateflow.

Με βάση την λίστα των καταστάσεων είναι προφανές ότι με την χρήση όλων των συστημάτων και του EMS, το σπίτι βασίζεται σχεδόν εξολοκλήρου από τα φωτοβολταϊκά και το σύστημα συσσωρευτών και όχι από το δίκτυο. Η τροφοδοσία του σπιτιού από το δίκτυο περιορίζεται σε μια μόνο κατάσταση, αυτή που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια και το σύστημα

συσσωρευτών έχει εκφορτίσει πλήρως. Στην κατάσταση όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα υπερκαλύπτει τις ανάγκες του σπιτιού και το σύστημα συσσωρευτών είναι πλήρως φορτισμένο, η περίσσεια ενέργεια τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο και στην συνέχεια στο δίκτυο εάν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο έχει φορτίσει πλήρως. Οι μεταβάσεις ενεργοποιούνται ανάλογα με την διαθέσιμη ενέργεια και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και οδηγούν στην ανάλογη κατάσταση. Στην Εικόνα 20 του Stateflow απεικονίζονται όλες οι καταστάσεις και οι μεταβάσεις του συστήματος.

Ξεκινώντας από την κατάσταση των μεσάνυχτων, μπορεί να ενεργοποιηθεί η μετάβαση προς την κατάσταση όπου υπάρχει ηλιοφάνεια και η μπαταρία φορτίζει με την περίσσεια ενέργεια (Sunshine_BatteryCharging) ή μπορεί να ενεργοποιηθεί η μετάβαση όπου οδηγεί στον κόμβο της εκφορτισμένης μπαταρίας. Από τον κόμβο της εκφορτισμένης μπαταρίας μπορεί να οδηγηθεί στην κατάσταση χωρίς ηλιοφάνεια και τροφοδοσία του σπιτιού από το δίκτυο (NoSunshine_BatteryDischarged) ή μπορεί να οδηγηθεί και πάλι στην Sunshine_BatteryCharging. Η κατάσταση Sunshine_BatteryCharging συνδέεται αμφίδρομα με την κατάσταση NoSunshine_BatteryDischarged. Στην συνέχεια, από την κατάσταση Sunshine_BatteryCharging, εφόσον η μπαταρία έχει κατάσταση φόρτισης μεγαλύτερη από 20% αλλά μικρότερη από 50%, ενεργοποιείται η μετάβαση που οδηγεί στον επόμενο κόμβο. Από τον κόμβο, ανάλογα με την διαθέσιμη ενέργεια, ενεργοποιείται η μετάβαση προς την κατάσταση χωρίς ηλιοφάνεια και μισοφορτισμένη μπαταρία (NoSunshine_BatteryHalfCharged) ή η μετάβαση προς την κατάσταση με ηλιοφάνεια και μισοφορτισμένη μπαταρία (Sunshine_BatteryHalfCharged). Μόλις εκφορτίσει πλήρως η μπαταρία από την κατάσταση NoSunshine_BatteryHalfCharged, ενεργοποιείται η μετάβαση που οδηγεί ξανά στον κόμβο της εκφορτισμένης μπαταρίας. Από την κατάσταση Sunshine_BatteryHalfCharged, μόλις η μπαταρία ξεπεράσει το 50% της κατάστασης φόρτισης, ενεργοποιείται η μετάβαση προς επόμενο κόμβο. Από τον επόμενο κόμβο, εάν υπάρχει περίσσεια ενέργεια, ενεργοποιείται η μετάβαση προς την κατάσταση με ηλιοφάνεια και πλήρως φορτισμένη μπαταρία (Sunshine_BatteryFullyCharged), ενώ εάν υπάρχει έλλειμα ενέργειας ενεργοποιείται η μετάβαση που οδηγεί στην κατάσταση χωρίς ηλιοφάνεια και μπαταρία φορτισμένη πάνω από το μισό (NoSunshine_BatteryOverHalfCharged). Μόλις δεν υπάρχει πλέον περίσσεια ενέργεια από την κατάσταση Sunshine_BatteryFullyCharged, ενεργοποιείται η μετάβαση που οδηγεί στην κατάσταση NoSunshine_BatteryOverHalfCharged. Τέλος, μόλις η κατάσταση φόρτισης πέσει κάτω από

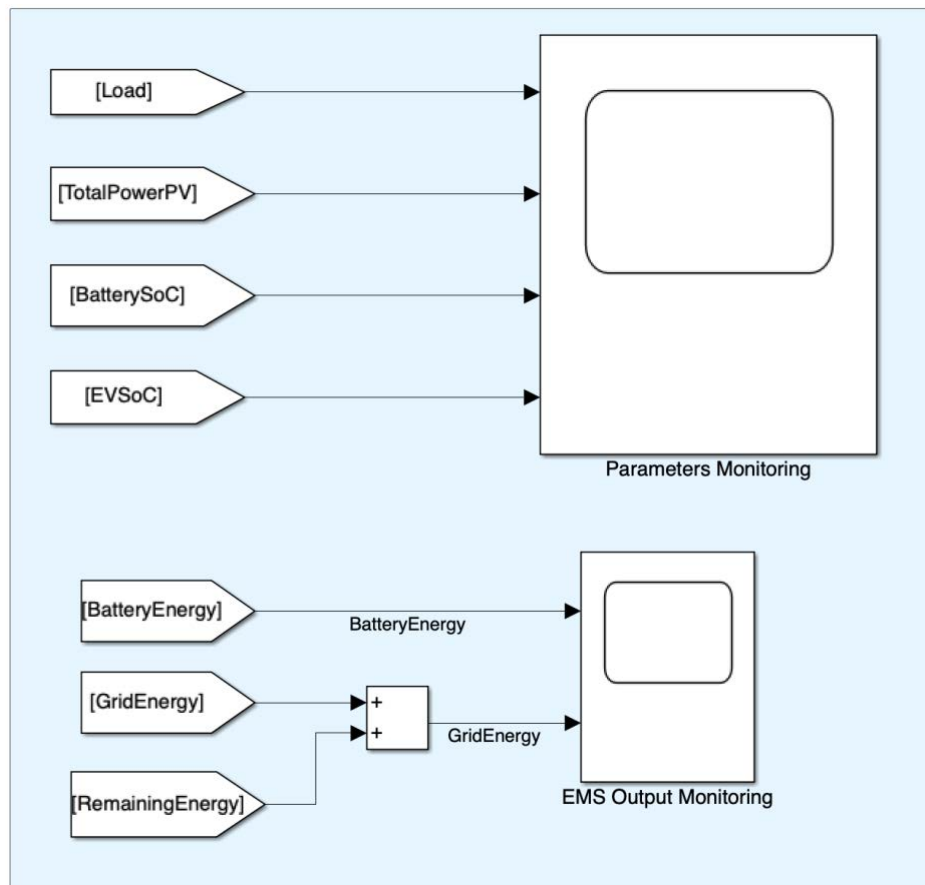
το 50% από την κατάσταση NoSunshine_BatteryOverHalfCharged ενεργοποιείται η μετάβαση που οδηγεί στον κόμβο της μισοφοροτισμένης μπαταρίας. Με όλες τις παραπάνω μεταβάσεις, ενεργοποιούνται όλες οι κατάλληλες καταστάσεις κατανομής ενέργειας, ανάλογα με τις ανάγκες του σπιτιού και των διασυνδεδεμένων συστημάτων [19].



Εικόνα 20. Συνολικό διάγραμμα Stateflow, για το HEMS.

4.6 Παρακολούθηση λειτουργίας HEMS

Το λογισμικό του Simulink εκτελώντας την προσομοίωση, δεν εξάγει τα αποτελέσματα εάν ο χρήστης δεν προβεί στις κατάλληλες ενέργειες. Ωστόσο, είναι κρίσιμη η παρακολούθηση λειτουργίας του συστήματος προσομοίωσης, όχι μόνο για τον έλεγχο της ορθής του λειτουργίας αλλά για την εύκολη εύρεση σφαλμάτων. Για την δημιουργία διαγραμμάτων θα πρέπει να τοποθετηθούν τα στοιχεία Scope και να συνδεθούν σε αυτά, τα σήματα των μεταβλητών που χρήζουν απεικόνιση. Στην παρούσα εργασία γίνεται η παρακολούθηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από το σπίτι (Load), η συνολική παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος (TotalPowerPV), η κατάσταση φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών (BatterySoC) και του ηλεκτρικού αυτοκινήτου (EVSoC), καθώς και οι έξοδοι του EMS, δηλαδή η ενέργεια από και προς το σύστημα συσσωρευτών (BatteryEnergy) και η ενέργεια από και προς το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (GridEnergy). Στην Εικόνα 21 φαίνεται η συνδεσμολογία των παραπάνω σημάτων.



Εικόνα 21. Παρακολούθηση της λειτουργίας του HEMS.

Κεφάλαιο 5: Δεδομένα προσομοίωσης και αποτελέσματα

Μια προσομοίωση πέρα από την μοντελοποίηση των συστημάτων της, χρειάζεται πραγματικά δεδομένα, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει πραγματικές συνθήκες. Για αυτό χρησιμοποιήθηκαν διάφορες πηγές δεδομένων για την προσομοίωση του HEMS, οι οποίες αναλύονται στις επόμενες ενότητες. Επίσης, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η προσομοίωση του HEMS και απεικονίζονται τα αποτελέσματα.

5.1 Δεδομένα προσομοίωσης

Για να γίνει μια προσομοίωση στο Simulink είναι απαραίτητο να οριστεί ο χρόνος προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η λειτουργία του HEMS στο διάστημα μιας ημέρας με ωριαίο χρονικό βήμα. Δηλαδή ο χρόνος προσομοίωσης λαμβάνει την τιμή είκοσι τέσσερα και ένα βήμα γίνεται κάθε μία μονάδα του χρόνου. Οι τιμές ανάγκης ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού έχουν αντληθεί κατευθείαν από τον κεντρικό πίνακα του σπιτιού με την

βοήθεια της συσκευής Pro 3EM της εταιρείας Shelly, για την ημέρα της 24 Αυγούστου [20]. Έχει επιλεχθεί η συγκεκριμένη ημερομηνία, καθώς εκείνη την ημέρα λειτουργήσαν σχεδόν όλες οι ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού και η κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει πραγματικά μια ημέρα του καλοκαιριού. Η συσκευή αυτή τοποθετείται στον κεντρικό πίνακα του σπιτιού, μετράει την κατανάλωση ενέργειας σε κάθε φάση, ενώ παράλληλα είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο του σπιτιού, ώστε ο χρήστης να έχει διαθέσιμες τις καταναλώσεις του σε πραγματικό χρόνο. Η ωριαία κατανάλωση ενέργειας του σπιτιού για την ημέρα της 24 Αυγούστου, μετριέται σε κιλοβατώρες και φαίνεται στην Εικόνα 22. Η συνολική ημερήσια κατανάλωση ενέργειας φτάνει τις 43.176 kWh. Οι συσκευές που οδήγησαν σε αυτή την κατανάλωση είναι η λειτουργία των πλυντηρίων ρούχων και πιάτων, η χρήση της ηλεκτρικής κουζίνας, η ψύξη του σπιτιού με την χρήση των πέντε κλιματιστικών, το σιδέρωμα των ρούχων και η χρήση μικρότερων συσκευών, όπως οι λαμπτήρες, υπολογιστές, καφετιέρα κ.λπ.

Date	Load (kWh)	Date	Load (kWh)
24/8 00:00	0.833	24/8 12:00	2.670
24/8 01:00	1.052	24/8 13:00	4.085
24/8 02:00	1.087	24/8 14:00	2.905
24/8 03:00	1.137	24/8 15:00	3.272
24/8 04:00	0.858	24/8 16:00	3.371
24/8 05:00	0.729	24/8 17:00	2.841
24/8 06:00	0.703	24/8 18:00	2.787
24/8 07:00	0.726	24/8 19:00	2.035
24/8 08:00	0.701	24/8 20:00	1.371
24/8 09:00	1.308	24/8 21:00	3.831
24/8 10:00	0.995	24/8 22:00	1.454
24/8 11:00	1.398	24/8 23:00	1.028

Εικόνα 22. Ωρολόγια κατανάλωση ενέργειας του σπιτιού για τις 24 Αυγούστου.

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, για να λειτουργήσει το φωτοβολταϊκό σύστημα απαιτεί δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για να τα δεχτεί ως είσοδο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση πάρθηκαν από το εργαλείο Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Το εργαλείο PVGIS είναι μια ανοιχτή διαδικτυακή πλατφόρμα φωτοβολταϊκού δυναμικού. Ο τρόπος με τον οποίο το εργαλείο υπολογίζει την ηλιακή ακτινοβολία είναι με δορυφορικά δεδομένα, ωστόσο η ακρίβεια του στις τιμές είναι μεγάλη και οι αστοχίες μεταξύ της

πραγματικής και υπολογισμένης ακτινοβολίας είναι μικρές, δηλαδή της τάξεως 1 – 10 βατ ανά τετραγωνικό μέτρο. Εισάγοντας την ακριβή γεωγραφική τοποθεσία του σπιτιού στο εργαλείο PVGIS, δίνεται η επιλογή εξαγωγής των δεδομένων σε αρχείο CSV (Comma-Separated Values). Μέσα στο αρχείο CSV βρίσκεται η ωριαία άμεση, διάχυτη και διάχυτα «ανακλώμενη» ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία αέρος για τις 24 Αυγούστου. Προσθέτοντας τα τρία είδη ηλιακής ακτινοβολίας προκύπτει η συνολική ωριαία ακτινοβολία της ημέρας σε βατ ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) και φαίνεται στην Εικόνα 23 [21].

Date	Irradiance (W/m^2)	Date	Irradiance (W/m^2)
24/8 00:00	0	24/8 12:00	867.51
24/8 01:00	0	24/8 13:00	683.25
24/8 02:00	0	24/8 14:00	497.44
24/8 03:00	0	24/8 15:00	285.9
24/8 04:00	7.24	24/8 16:00	76.43
24/8 05:00	129.49	24/8 17:00	0
24/8 06:00	345.09	24/8 18:00	0
24/8 07:00	571.36	24/8 19:00	0
24/8 08:00	791.85	24/8 20:00	0
24/8 09:00	918.98	24/8 21:00	0
24/8 10:00	949.74	24/8 22:00	0
24/8 11:00	994.64	24/8 23:00	0

Εικόνα 23. Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία για τις 24 Αυγούστου.

Η θερμοκρασία αέρος δεν αρκεί για την λειτουργία του στοιχείου PV Array του Simulink, καθώς απαιτείται η θερμοκρασία που αναπτύσσουν τα κελιά του φωτοβολταϊκού πάνελ. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των κελιών (T_m) θα πρέπει να είναι διαθέσιμη η θερμοκρασία αέρα (T_{amb}), η συνολική ηλιακή ακτινοβολία (E), και η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης ($NOCT$) που ορίζει ο κατασκευαστής [22].

$$T_m = T_{amb} + (NOCT - 20) \times \frac{E}{800} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (10)$$

Οι τιμές των θερμοκρασιών που προκύπτουν από την εξίσωση (10) για την ημέρα της 25 Αυγούστου αποτυπώνονται στην Εικόνα 24. Οι συστοιχίες των φωτοβολταϊκών είναι

συνολικά τρεις με συνολικό αριθμό των 45 πάνελ, και χωρίζονται στο υπόστεγο του μπαλκονιού, στην στέγη του σπιτιού και στο στέγαστρο PR3, με 6, 11 και 28 πάνελ αντίστοιχα.

Date	T_m (°C)	Date	T_m (°C)
24/8 00:00	23.22	24/8 12:00	53.14
24/8 01:00	22.82	24/8 13:00	47.11
24/8 02:00	22.00	24/8 14:00	40.94
24/8 03:00	21.65	24/8 15:00	34.01
24/8 04:00	21.25	24/8 16:00	27.10
24/8 05:00	26.72	24/8 17:00	24.30
24/8 06:00	34.87	24/8 18:00	24.01
24/8 07:00	42.57	24/8 19:00	23.84
24/8 08:00	49.96	24/8 20:00	23.80
24/8 09:00	54.37	24/8 21:00	23.80
24/8 10:00	55.64	24/8 22:00	23.73
24/8 11:00	57.14	24/8 23:00	23.21

Εικόνα 24. Τιμές θερμοκρασίας κελιών για την ημέρα της 24 Αυγούστου.

Το σύστημα συσσωρευτών, όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, αποτελείται από δύο συσσωρευτές Powerwall της εταιρείας Tesla. Κάθε ένας από τους δύο συσσωρευτές έχει πραγματική χωρητικότητα 13.5 kWh και η ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης είναι 5 kW. Τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά αναγράφονται στην Εικόνα 25. Στο στοιχείο Saturation πριν την είσοδο του σήματος στο σύστημα συσσωρευτών, ορίζεται η μέγιστη ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης, δηλαδή 10 kW και -10 kW αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι κύκλοι ζωής μιας μπαταρίας αυξάνονται όταν αυτή δεν φορτίζει και εκφορτίζει πλήρως, το μέγιστο ποσοστό της κατάστασης φόρτισης του συστήματος ορίζεται το 90%, ενώ το ελάχιστο επιτρεπτό όριο εκφόρτισης του συστήματος ορίζεται το 15%. Με αυτό τον τρόπο εκμεταλλεύεται ένα μεγάλο μέρος της διαθέσιμης ενέργειας, διατηρώντας υψηλούς τους κύκλους ζωής που αποδίδονται από τις μπαταρίες. Η αρχική κατάσταση φόρτισης για την προσομοίωση, δηλαδή τα μεσάνυχτα, έπειτα από δοκιμές υπολογίστηκε ότι είναι 40%.

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

AC Voltage (Nominal)	230 V
Feed-In Type	Single Phase
Grid Frequency	50 Hz
Total Energy¹	14 kWh
Usable Energy¹	13.5 kWh
Real Power, max continuous²	5 kW (charge and discharge)
Apparent Power, max continuous	5 kVA (charge and discharge)
Maximum Supply Fault Current	10 kA
Maximum Output Fault Current	32 A
Power Factor Output Range	+/- 1.0 adjustable
Internal Battery DC Voltage	50 V
Round Trip Efficiency^{1,3}	90%
Warranty	10 years

¹Values provided for 25°C, 3.3 kW charge/discharge power.

²In Backup mode, grid charge power is limited to 3.3 kW.

³AC to battery to AC, at beginning of life.

Εικόνα 25. Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή Powerwall της εταιρείας Tesla.

Τα δεδομένα του ηλεκτρικού οχήματος είναι επίσης πραγματικά και αντλήθηκαν από το λογισμικό του Tesla Model Y το οποίο ανήκει στους κατόχους του σπιτιού. Το αυτοκίνητο κατά μέσο όρο διανύει τρεις διαδρομές κάθε ημέρα, δύο διαδρομές από και προς το Βόλο διανύοντας 25 km την φορά και μια μικρότερη απόσταση στα κοντινά χωριά, όπου διανύει 10 km συνολικά. Η μέση καταγεγραμμένη κατανάλωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου διανύοντας αυτές τις αποστάσεις είναι 128 Wh/km. Έτσι για να διανύσει την απόσταση των 25 km, το αυτοκίνητο θα καταναλώσει 3.2 kWh, ενώ για την μικρότερη απόσταση θα καταναλώσει 1.28 kWh. Εφόσον η προσομοίωση γίνεται σε ωριαίο επίπεδο και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο δεν διανύει τις αποστάσεις στιγμιαία, χωρίζεται η κάθε κατανάλωση σε δύο ώρες έκαστος και φαίνονται στην Εικόνα 26. Στο στοιχείο Saturation πριν την είσοδο του σήματος στο σύστημα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, ορίζεται η μέγιστη ισχύς φόρτισης, δηλαδή τα 10 kW και εφόσον δεν μπορεί να εκφορτίσει το ελάχιστο όριο είναι τα 0 kW, δηλαδή όταν το αυτοκίνητο δεν φορτίζει πλέον. Όπως για το σύστημα συσσωρευτών έτσι και για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, θα

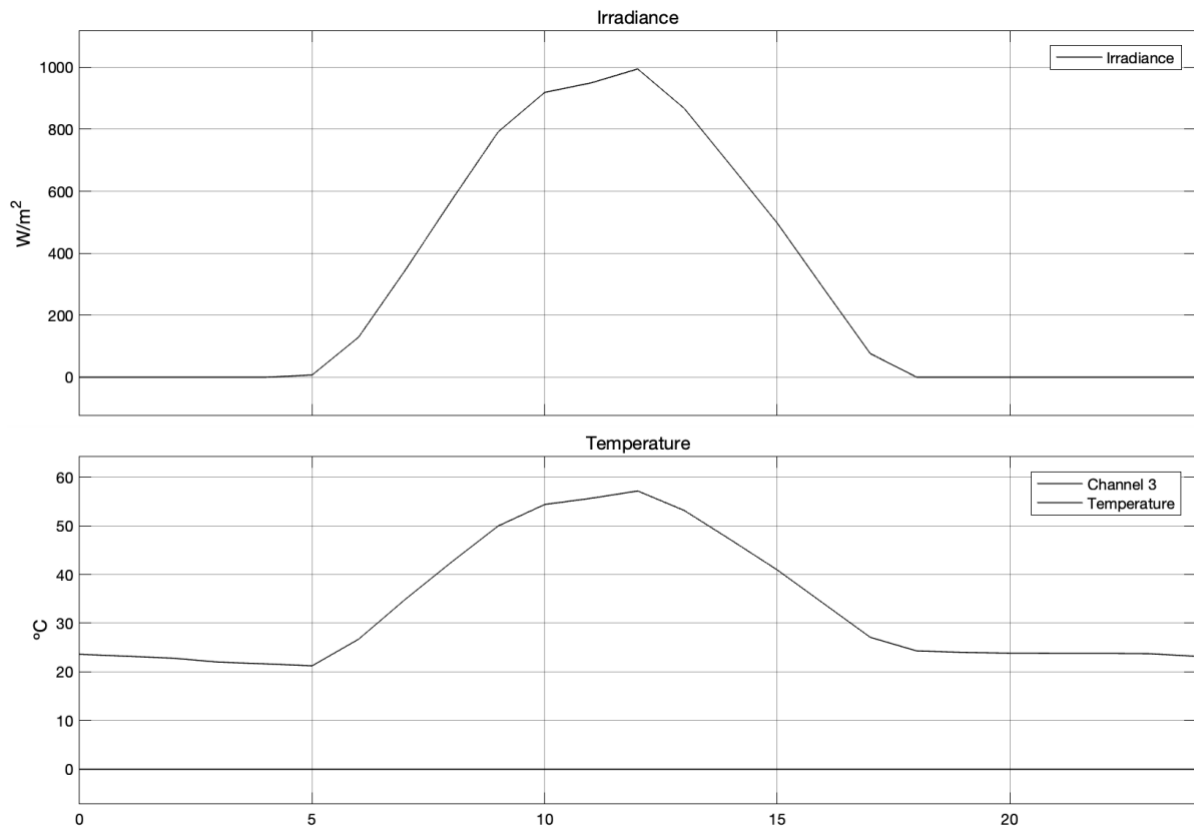
πρέπει να προστατευτεί η μπαταρία, για να αποδοθεί ο μέγιστος αριθμός κύκλων ζωής. Έτσι, το μέγιστο ποσοστό της κατάστασης φόρτισης του συστήματος με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή, ορίζεται το 80%, ενώ το ελάχιστο επιτρεπτό όριο εκφόρτισης του συστήματος ορίζεται το 20%. Η αρχική κατάσταση φόρτισης για την προσομοίωση, δηλαδή τα μεσάνυχτα, με βάση τα δεδομένα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι 60%.

Date	Consumption (kWh)	Date	Consumption (kWh)
24/8 00:00	0	24/8 12:00	0
24/8 01:00	0	24/8 13:00	0
24/8 02:00	0	24/8 14:00	0
24/8 03:00	0	24/8 15:00	-1.6
24/8 04:00	0	24/8 16:00	-1.6
24/8 05:00	0	24/8 17:00	0
24/8 06:00	0	24/8 18:00	-0.64
24/8 07:00	-1.6	24/8 19:00	-0.64
24/8 08:00	-1.6	24/8 20:00	0
24/8 09:00	0	24/8 21:00	0
24/8 10:00	0	24/8 22:00	0
24/8 11:00	0	24/8 23:00	0

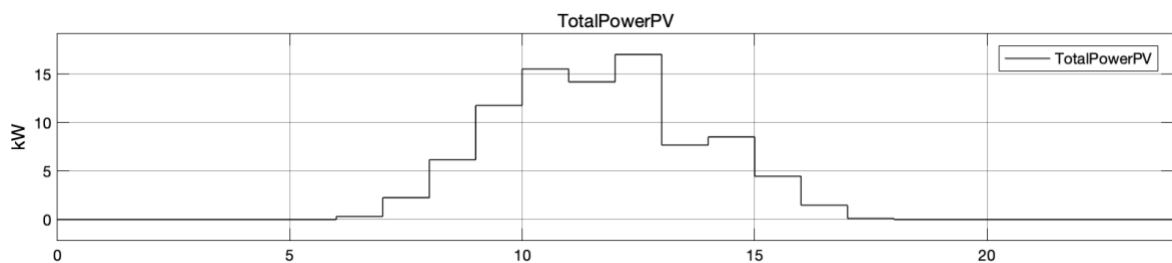
Εικόνα 26. Ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικού αυτοκινήτου Tesla Model Y

5.2 Προσομοίωση και αποτελέσματα

Με τα διαθέσιμα δεδομένα από την προηγούμενη ενότητα, το μοντέλο προσομοίωσης HEMS είναι έτοιμο να τρέξει σε εικοσιτετράωρο επίπεδο. Ξεκινώντας την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος, παρατηρείται ότι οι τιμές της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας αναγνωρίζονται σωστά από το Simulink και αποτυπώνονται στην Εικόνα 27. Επίσης, με βάση την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία, παρατηρείται μέσα από την Εικόνα 28 ότι η συνολική παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος διαμορφώνεται σωστά, καθώς όσο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας, το φωτοβολταϊκό σύστημα φτάνει στην μέγιστή παραγωγή ενέργειας, ενώ όσο δύει ο ήλιος και η θερμοκρασία μειώνεται, μειώνεται και η παραγωγή.



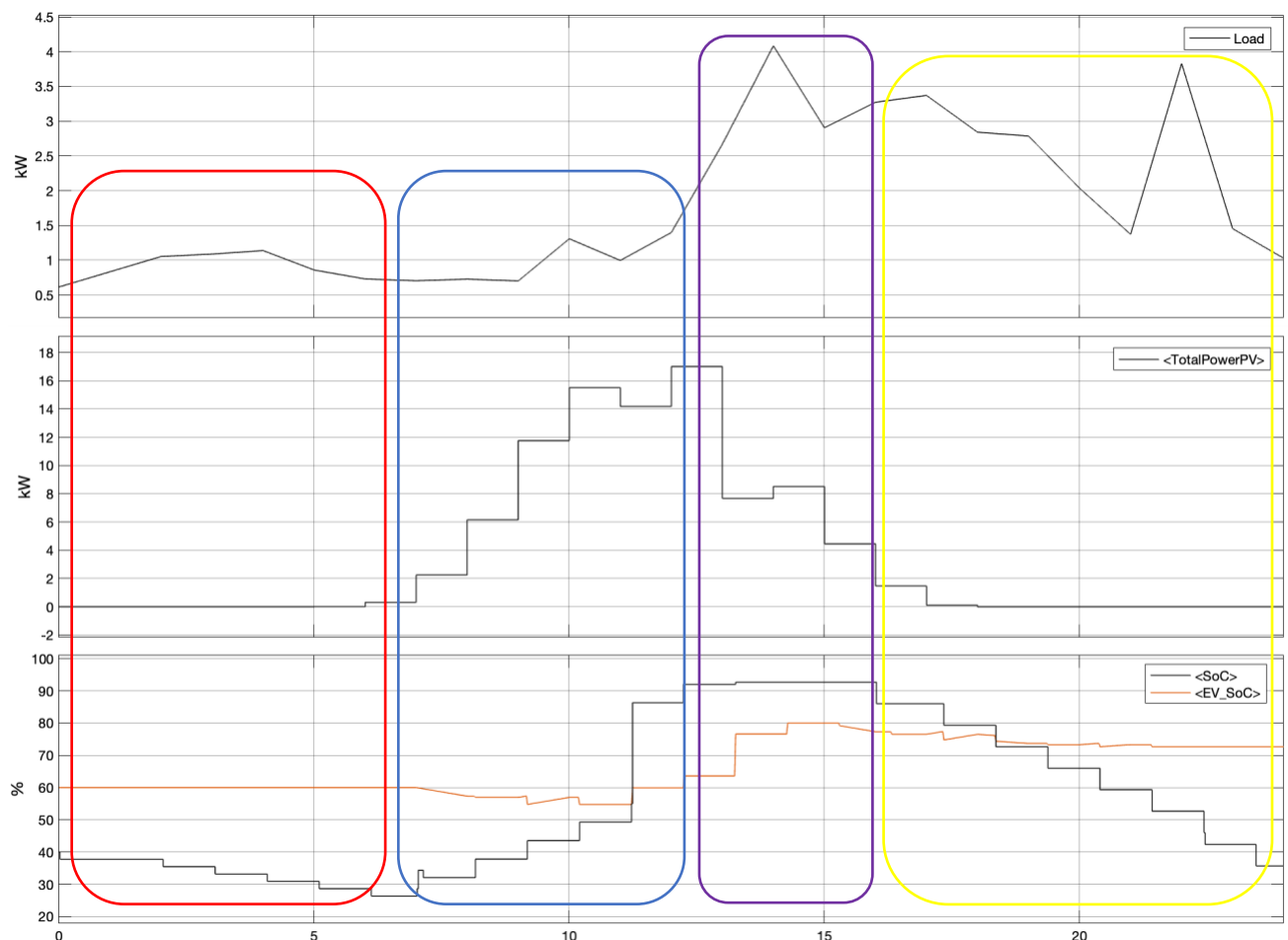
Εικόνα 27. Ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία πάνελ.



Εικόνα 28. Ωριαία παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η διαθέσιμη ενέργεια του σπιτιού παρατηρείται ότι διαχειρίζεται σωστά από το HEMS και η τροφοδοσία στα συστήματα μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες του σπιτιού, την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος και την κατάσταση φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών (Εικόνα 29). Στο κόκκινο πλαίσιο του διαγράμματος απεικονίζεται η εκκίνηση της προσομοίωσης, όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παράγει ενέργεια καθώς είναι νύχτα και το σπίτι έχει χαμηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία καλύπτει το σύστημα συσσωρευτών το οποίο είναι φορτισμένο στο 40% από την προηγούμενη ημέρα. Εντός του μπλε πλαισίου παρατηρείται ότι η ηλιοφάνεια έχει ξεκινήσει και το φωτοβολταϊκό σύστημα

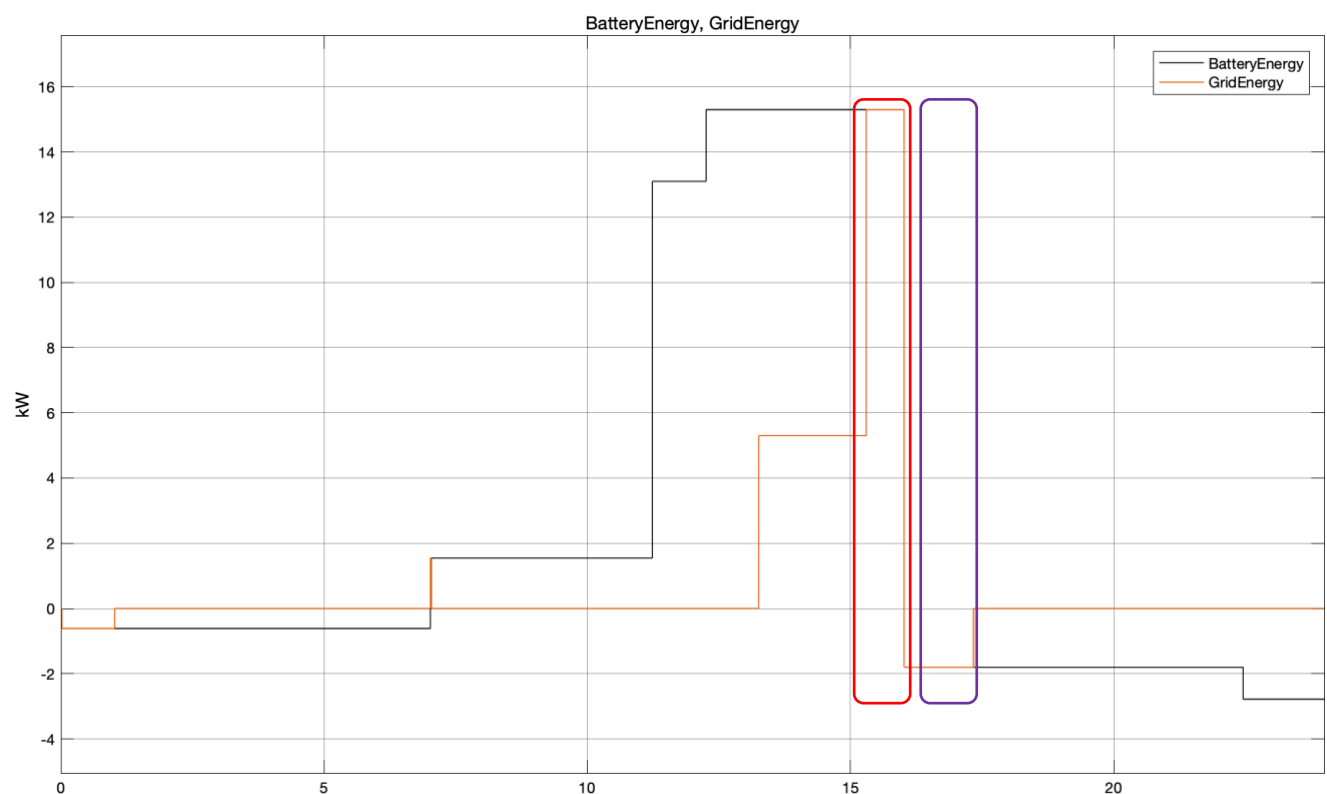
ξεκινάει να παράγει ενέργεια, η οποία καλύπτει πλήρως τις ανάγκες του σπιτιού και φορτίζει το σύστημα συσσωρευτών, ανεβάζοντας την κατάσταση φόρτισης. Η κατάσταση φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου μειώνεται καθώς διανύει τις δύο μεγάλες αποστάσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, κατά τις μεσημβρινές ώρες όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα φτάνει στην μέγιστη παραγωγή, πέρα από το σύστημα συσσωρευτών, φορτίζει και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Επίσης, παρατηρείται ότι κατά την μέγιστη παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος, οι ανάγκες του σπιτιού είναι ακόμα χαμηλές και έτσι το σύστημα συσσωρευτών φορτίζει με την μέγιστη δυνατή ισχύ, ανεβάζοντας με μεγάλο ρυθμό την κατάσταση φόρτισης.



Εικόνα 29. Διαχείριση ενέργειας με το HEMS.

Στο μωβ πλαίσιο φαίνεται ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού είναι μέγιστη για την ημέρα. Παρά την μειωμένη πλέον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το

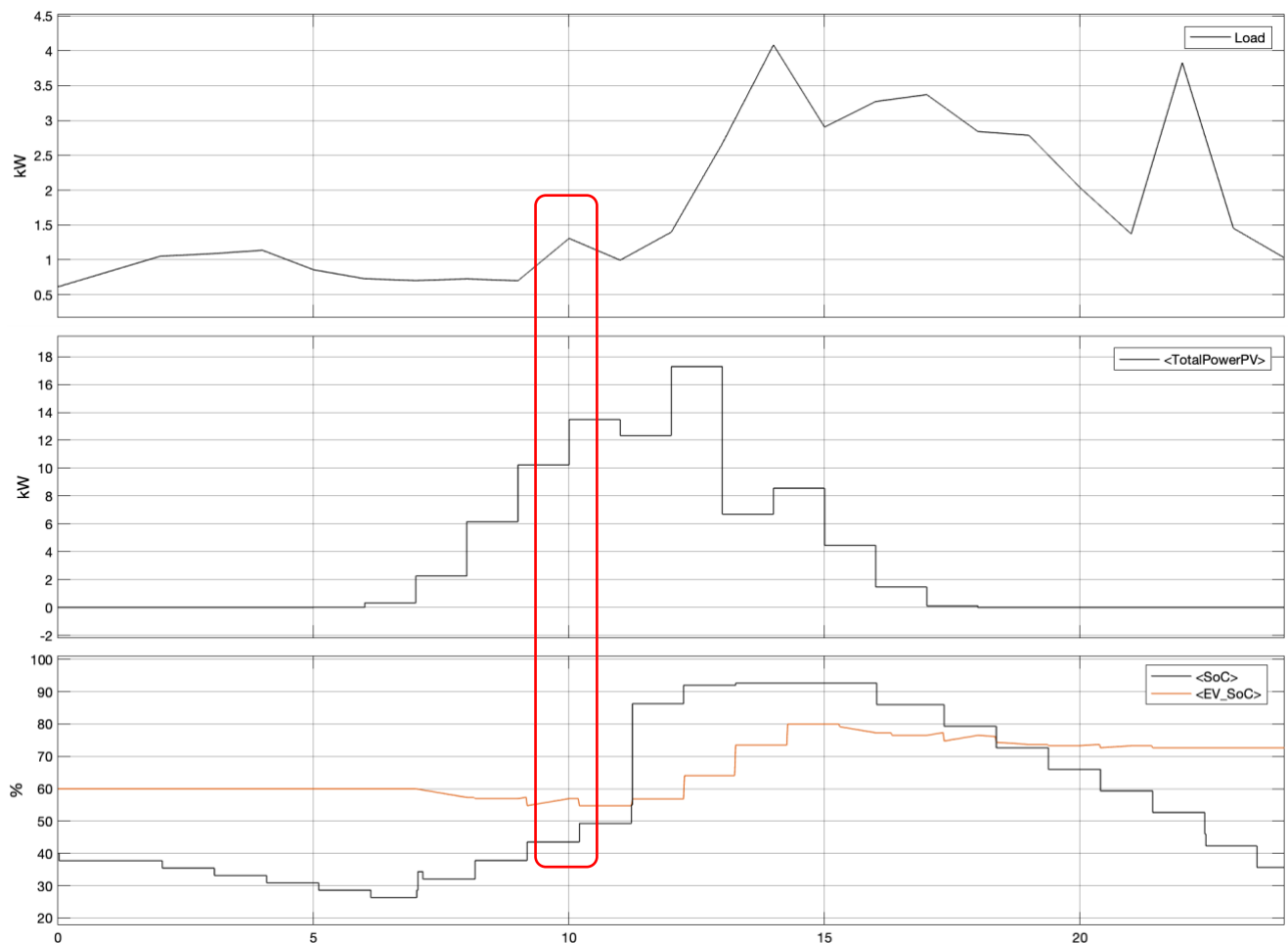
φωτοβολταϊκό σύστημα, παραμένει υψηλότερη από τις ανάγκες του σπιτιού και για αυτό συνεχίζει η διοχέτευση της ενέργειας στο σύστημα συσσωρευτών. Έτσι η κατάσταση φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών φτάνει στο μέγιστο όριο κατάστασης φόρτισης και η περίσσεια ενέργεια πλέον τροφοδοτεί μόνο στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο, όπου κοντά στην δέκατη πέμπτη ώρα της ημέρας φορτίζει πλήρως και η περίσσεια ενέργεια εγχέεται στο δίκτυο όπως φαίνεται στο κόκκινο πλαίσιο της Εικόνα 30. Μετά την δέκατη πέμπτη ώρα της ημέρας παρατηρείται μια μεγάλη μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα, χωρίς όμως να μειώνεται η ζήτηση του σπιτιού και έτσι μέχρι να ξεκινήσει η εκφόρτιση της μπαταρίας, το δίκτυο τροφοδοτεί ενέργεια στο σπίτι όπως φαίνεται στο μωβ πλαίσιο της Εικόνα 30. Στο κίτρινο πλαίσιο της Εικόνα 29 παρατηρείται ότι πλέον το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν παράγει ενέργεια καθώς νυχτώνει και έτσι το σύστημα συσσωρευτών εκφορτίζει για να τροφοδοτήσει τις ανάγκες του σπιτιού.



Εικόνα 30. Ενέργεια προς το σύστημα συσσωρευτών και προς το δίκτυο.

5.2.1 Σενάριο σκίασης

Η συστοιχία φωτοβολταϊκών η οποία βρίσκεται στο μπαλκόνι, είναι πιθανό να αντιμετωπίσει σκίαση, λόγω της βλάστησης γύρω από αυτή. Στην περίπτωση αυτή, δεν σταματάει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν συνδέεται με τις υπόλοιπες συστοιχίες φωτοβολταϊκών. Είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του συστήματος, καθώς η τροφοδοσία του σπιτιού συνεχίζει και δεν απαιτείται τροφοδοσία από το δίκτυο. Το φαινόμενο σκίασης στο μπαλκόνι του σπιτιού μπορεί να αποφευχθεί με την συντήρηση ενός προκαθορισμένου ύψους της βλάστησης. Ωστόσο σε περίπτωση σκίασης το HEMS λειτουργεί κανονικά και η λειτουργία του φαίνεται στην Εικόνα 31.

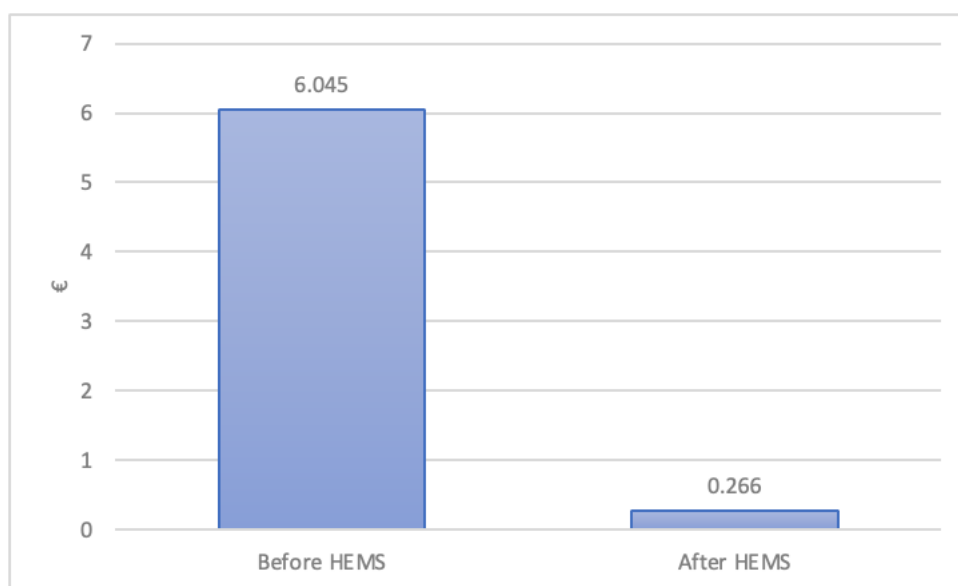


Εικόνα 31. Διαχείριση ενέργειας με το HEMS, σε περίπτωση σκίασης της συστοιχίας φωτοβολταϊκών του μπαλκονιού.

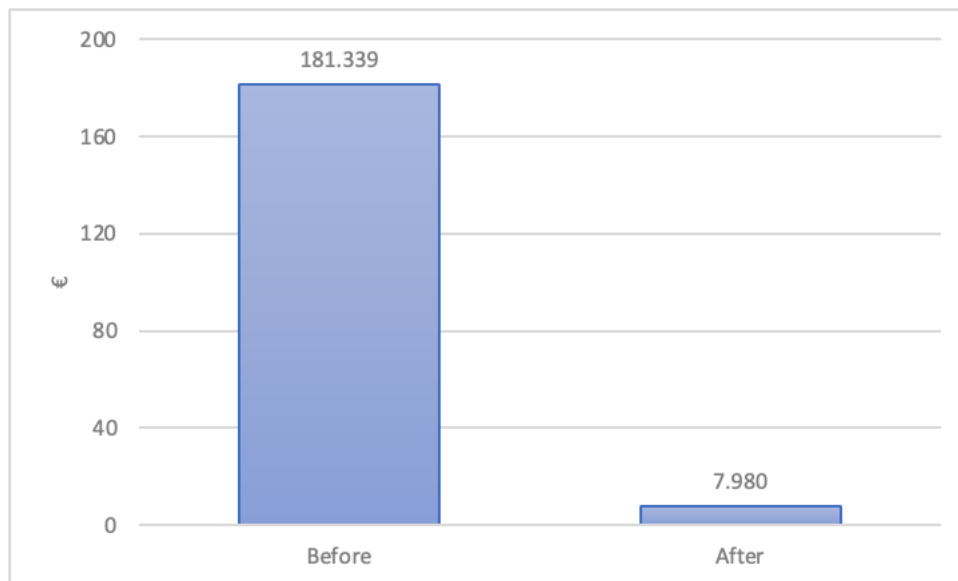
Στο κόκκινο πλαίσιο της Εικόνα 31 φαίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος με την συστοιχία του μπαλκονιού να αντιμετωπίζει σκίαση. Η λειτουργία του συστήματος δεν διακόπτεται, οι ανάγκες ενέργειας του σπιτιού καλύπτονται και το σύστημα συσσωρευτών φορτίζει. Η διαφορά παρατηρείται στην συνολική παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος, όπου είναι μειωμένη περίπου κατά 2 kW, κάτι που επαληθεύει την σωστή λειτουργία του συστήματος καθώς η συστοιχία αποτελείται από έξι πάνελ των 400 W.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρείται η ορθή λειτουργία του HEMS. Η κατάσταση φόρτισης του συστήματος συσσωρευτών στην έναρξη της προσομοίωσης βρίσκεται στο 40% και στην ολοκλήρωση της προσομοίωσης η κατάσταση φόρτισης βρίσκεται και πάλι στο ίδιο επίπεδο, ενώ έχει μεσολαβήσει η πλήρης τροφοδότηση των αναγκών του σπιτιού. Αυτό σημαίνει ότι τις ημέρες με παρόμοια ηλιοφάνεια και θερμοκρασία σαν αυτή της 24 Αυγούστου, το σπίτι μπορεί να θεωρηθεί ως πλήρως αυτόνομο, αφού καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες με τα εγκατεστημένα συστήματά του, εξαιρώντας την μια ώρα της ημέρας όπου ήταν αναγκαία η ηλεκτροδότηση από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τον πιο πρόσφατο εκκαθαριστικό λογαριασμό ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού από την ΔΕΗ, το κόστος σε ευρώ (€) ανά κιλοβατώρα (kWh) ανέρχεται στα 0.14, ενώ τα γραμμάρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (gCO₂) ανά κιλοβατώρα (kWh) ανέρχονται στις 404.25. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα μπορεί να υπολογιστεί το κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την εγκατάσταση του HEMS, όπως και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στην Εικόνα 32 απεικονίζεται το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την εγκατάσταση και χρήση του HEMS για τις 24 Αυγούστου, ενώ στο Εικόνα 33 φαίνεται η διαφορά του κόστους σε μηνιαίο επίπεδο.



Εικόνα 32. Κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την χρήση του HEMS για τις 24 Αυγούστου.



Εικόνα 33. Μηνιαίο κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την χρήση του HEMS.

Το κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση του HEMS, μπορεί να εκμηδενιστεί εάν υπάρξει συμφωνία πώλησης της περίσσειας ενέργειας. Όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα, υπάρχουν στιγμές όπου η ενέργεια υπερκαλύπτει όλα τα συστήματα του σπιτιού και η περίσσεια ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο. Αυτή η ενέργεια μπορεί να πουληθεί στον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας σε μια συμφωνημένη τιμή, δηλαδή net billing ή μπορεί να συμψηφιστεί με την ενέργεια που καταναλώνει το σπίτι από το δίκτυο, δηλαδή net metering. Ο όρος net metering αναφέρεται στον ενεργειακό συμψηφισμό. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ότι η ενέργεια η οποία παρέχεται στο σπίτι από το δίκτυο, συμψηφίζεται με την παραγόμενη ενέργεια την οποία εγχέει το σπίτι στο δίκτυο. Έτσι καταγράφεται η κατανάλωση του σπιτιού από τον μετρητή και εάν είναι ίση με την εγχέομενη προς το δίκτυο ενέργεια, τότε ο λογαριασμός της ΔΕΗ είναι μηδενικός, εξαιρώντας τις πάγιες χρεώσεις. Ο τρόπος λειτουργίας του net billing είναι λίγο διαφορετικός. Αντί να συμψηφίζεται η εγχέομενη ενέργεια με την καταναλισκόμενη, πωλείται σε μια συμφωνημένη τιμή. Έπειτα από συμφωνία με κάποιον προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας, ορίζεται η τιμή πώλησης της ενέργειας. Τα χρήματα της πουλημένης ενέργειας δεν πιστώνονται στον καταναλωτή, αλλά συμψηφίζονται με το κόστος της ενέργειας που αντλείται από το δίκτυο [23].

Τα κόστη των συστημάτων του μοντέλου αναλύονται στην Εικόνα 34. Το συνολικό κόστος των σαράντα πέντε πάνελ μαζί με τους τρεις μετασχηματιστές τάσης (inverter) και τις καλωδιώσεις, ανέρχεται στα 17000€. Το μεγαλύτερο κόστος από όλα τα συστήματα, το έχει

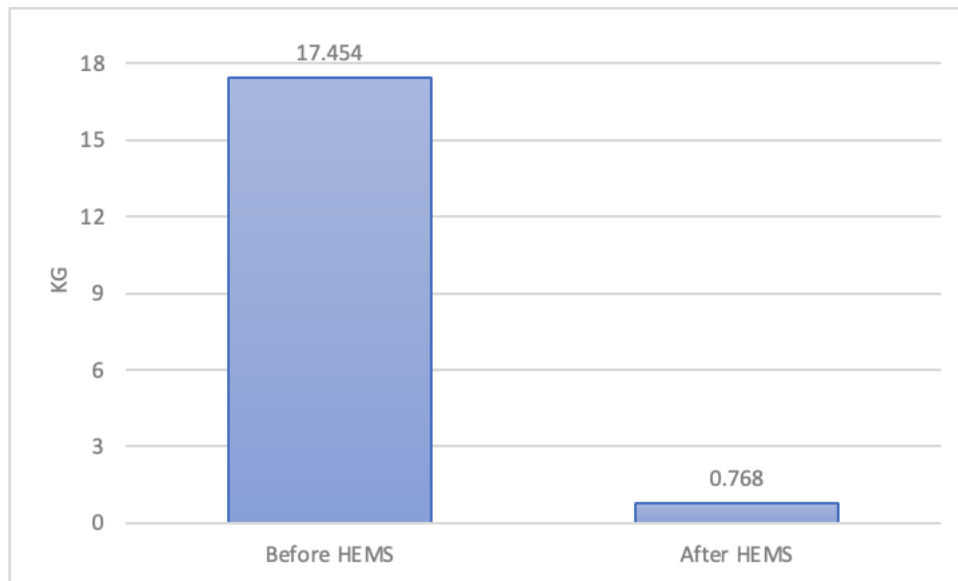
το σύστημα συσσωρευτών, το οποίο ανέρχεται στα 18000€. Ωστόσο με το πρόγραμμα επιδότησης «Φωτοβολταϊκά στην στέγη» του κράτους, καλύπτεται πλήρως η αξία των συσσωρευτών. Έτσι το τελικό κόστος εγκατάστασης είναι 17000€.

System	Cost (€)
PV System	17000
Powerwalls (2)	18000
Total	35000

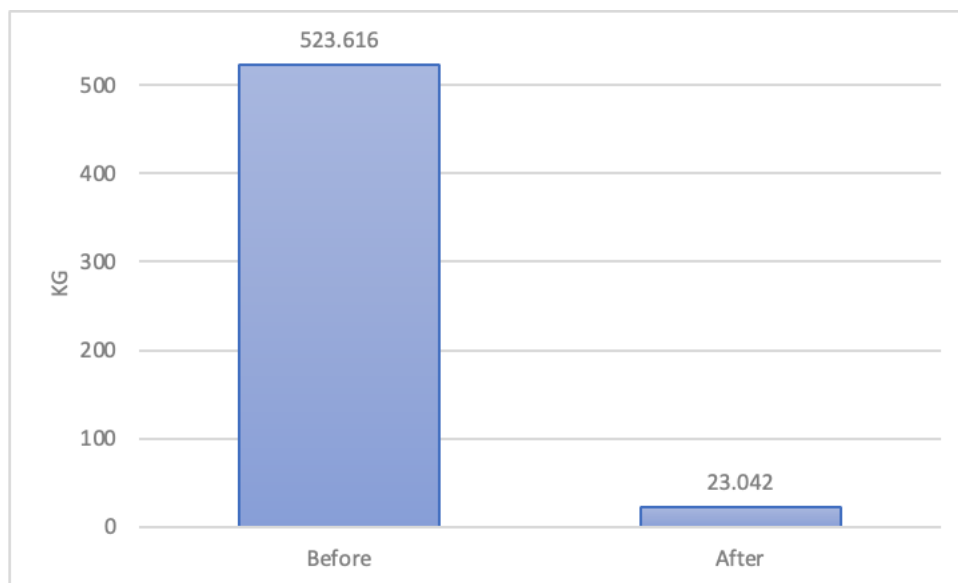
Εικόνα 34. Κόστη συστημάτων HEMS.

Συνεπώς, υπολογίζεται ότι με την εξοικονόμηση χρημάτων στους λογαριασμούς παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του σπιτιού με την χρήση του HEMS, τα συστήματα θα έχουν κάνει πλήρη απόσβεση σε οκτώ έτη και τέσσερις μήνες. Εάν ληφθεί υπόψιν η πώληση της περίσσειας ενέργειας, η απόσβεση των συστημάτων θα είναι ακόμη πιο σύντομη.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι το ίδιο κρίσιμες με το κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, για αυτό στην Εικόνα 35 απεικονίζονται τα κιλά εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα πριν και μετά την χρήση του HEMS, ενώ στην Εικόνα 36 φαίνεται η αισθητά μεγάλη διαφορά στα κιλά εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά μήνα.



Εικόνα 35. Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε kgCO2 πριν και μετά την χρήση του HEMS.



Εικόνα 36. Μηνιαίες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε kgCO2 πριν και μετά την χρήση του HEMS.

Ο στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η δημιουργία και προσομοίωση ενός HEMS στο λογισμικό Simulink και το παρόν μοντέλο έχει αυτή την δυνατότητα προσομοίωσης του συστήματος. Έπειτα από την σωστή διαστασιολόγηση και ρύθμιση των συστημάτων, το μοντέλο μπορεί να διαχειριστεί την ενέργεια σε οποιοδήποτε σύστημα συνδεθεί, είτε οικιακού είτε βιομηχανικού επιπέδου. Αλλάζοντας τις καταστάσεις και τις μεταβάσεις του EMS μπορεί να τροποποιηθεί ο τρόπος διαχείρισης της ενέργειας με βάση τις ανάγκες του χρήστη και την εποχή του χρόνου. Μελετώντας τα αποτελέσματα και

συγκρίνοντας την διαχείριση της ενέργειας πριν και μετά την χρήση του HEMS, είναι αντιληπτό ότι η εγκατάσταση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας επωφελεί οικονομικά σε μεγάλο βαθμό τον χρήστη, αλλά και το περιβάλλον. Το κόστος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση του HEMS είναι πολύ μικρό σε σχέση με πριν, όπου έφτανε τις τιμές των εκατοντάδων ευρώ μηνιαία. Επίσης οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μειώθηκαν στα είκοσι τρία κιλά, ενώ πριν ξεπερνούσε τον μισό τόνο, κάτι που βοηθάει στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του σπιτιού.

Χρησιμοποιώντας το παρόν μοντέλο είναι εφικτή η δημιουργία μεγαλύτερων και πολυπλοκότερων μοντέλων, προσθέτοντας περισσότερα συστήματα, είτε επιπρόσθετων ηλεκτρικών οχημάτων, είτε διαφορετικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ΑΠΕ κ.λπ. Έτσι ο χρήστης του HEMS θα μειώσει τα μηνιαία του κόστη παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας παράλληλα τους υψηλούς ρύπους διοξειδίου του άνθρακα.

Βιβλιογραφία

- [1] Greece - Electricity prices: Medium size households Data Forecast 2010-2024 Historical, 2024 tradingeconomics.com
- [2] Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Φραγκιαδάκης Ιωάννης Ε, 2019
- [3] Ηλεκτροχημικές Πηγές Ενέργειας, Bagotsky Vladimir, Skundin Alexander, Volfkovich Yury, Αργυρούσης Χρήστος, Καραντώνης Αντώνης (επιμέλεια), 2020
- [4] What is an EMS? - Energy Management System explained, 2024 gridx.ai
- [5] Εργαστήριο 1ο: Διαμόρφωση Εισαγωγή στο Simulink-Σήματα ημιτόνου-AWGN - UOP eClass, Μπατιστάτος Μιχάλης
- [6] ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ 2023, 2024 dapeep.gr
- [7] 23 τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας, 2023 ypen.gov.gr
- [8] Energy - European Commission, Εφημερίδα της κυβερνήσεως, τεύχος δεύτερο, Αρ. Φύλλου 974, 2021 energy.ec.europa.eu
- [9] Κατανάλωση ρεύματος: Πόσο καίνε πραγματικά οι ηλεκτρικές συσκευές;, 2021 volton.gr
- [10] Peak Sun Hours, 2022 afsiasolar.com
- [11] How to Size a Solar System: Step-by-Step, 2021 unboundsolar.com
- [12] Jinko JKM400M-72HL-V (400W) Solar Panel, 2021 jinkosolar.com
- [13] PR3 Sunfer Energy, sunferenergy.com
- [14] Tesla Powerwall 2 Datasheet, 2019 tesla.com
- [15] Rodney Tan (2024). Home Battery Energy Management System (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/127044-home-battery-energy-management-system>), MATLAB Central File Exchange.
- [16] Rodney Tan (2024). Battery Energy Storage System Model (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/69512-battery-energy-storage-system-model>), MATLAB Central File Exchange. 2024.
- [17] Algebraic Loop Concepts, Help Center, 2024 mathworks.com
- [18] Stateflow, MathWorks mathworks.com
- [19] Stand-Alone Solar PV AC Power System with Battery Backup, Help Center, 2024 mathworks.com
- [20] Shelly Pro 3EM, 2024, shelly.com

- [21] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) joint-research-centre.ec.europa.eu
- [22] Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations, M.C. Alonso García, 2004 sciencedirect.com
- [23] Net Metering ή Net Billing? Διαφορές και Οφέλη, 2023 mgd-energy.gr