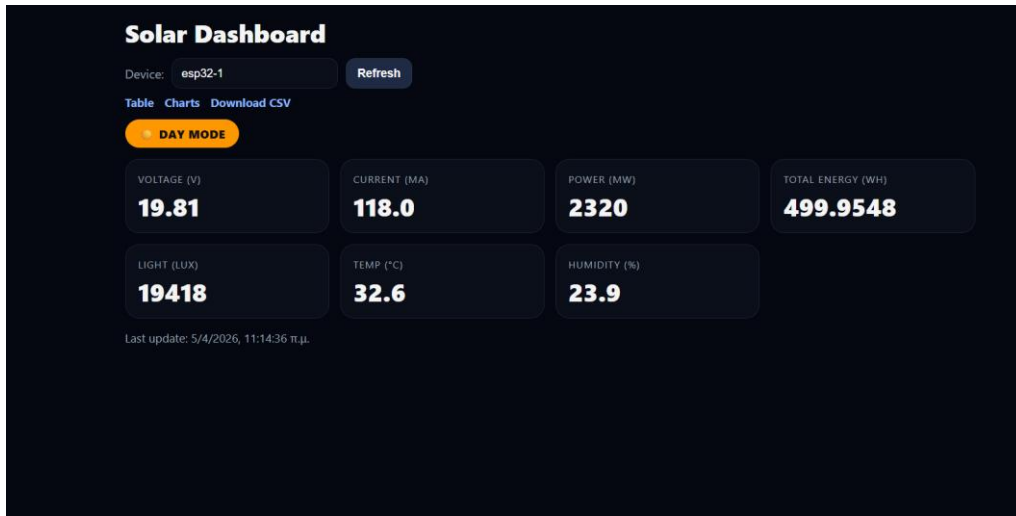


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και Ανάλυση Έξυπνου Συστήματος
Παρακολούθησης και Διαχείρισης Φωτοβολταϊκής
Ενέργειας με ESP32



Φοιτητής
Αλέξανδρος Μαυροθέρης
Αρ. Μητρώου: 2020205

Επιβλέπουσα
Παπαδοπούλου Μαρία
Επίκουρη Καθηγήτρια

Ημερομηνία 4 Ιανουαρίου 2026

Τίτλος Δ.Ε. Σχεδιασμός και Ανάλυση Έξυπνου Συστήματος Παρακολούθησης και Διαχείρισης
Φωτοβολταϊκής Ενέργειας με ESP32

Κωδικός Δ.Ε. 25270

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Αλέξανδρος Μαυροθέρης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Παπαδοπούλου Μαρία

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 05/09/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 31/05/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αλέξανδρου Μαυροθέρη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η επιλογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε από το ενδιαφέρον μου για τους μικροελεγκτές, τις εφαρμογές του Internet of Things και τη σύνδεση διαφορετικών τεχνολογιών με την πληροφορική. Από την αρχή των σπουδών μου, με ενδιέφερε ιδιαίτερα ο τρόπος με τον οποίο το λογισμικό μπορεί να συνεργάζεται με αισθητήρες, ηλεκτρονικά κυκλώματα και διαδικτυακές υπηρεσίες, δημιουργώντας ολοκληρωμένα συστήματα που συλλέγουν, επεξεργάζονται και παρουσιάζουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Παράλληλα, η ενασχόληση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτέλεσε έναν ακόμη σημαντικό λόγο επιλογής του συγκεκριμένου θέματος. Η δυνατότητα παρακολούθησης και αξιοποίησης της φωτοβολταϊκής ενέργειας μέσα από ένα έξυπνο σύστημα χαμηλού κόστους συνδυάζει τόσο το τεχνικό ενδιαφέρον της πληροφορικής όσο και τη σημασία της βιώσιμης ανάπτυξης.

Μέσα από την εργασία αυτή είχα την ευκαιρία να εφαρμόσω γνώσεις που απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, να εξοικειωθώ περισσότερο με μικροελεγκτές, αισθητήρες, βάσεις δεδομένων και web εφαρμογές, καθώς και να κατανοήσω καλύτερα τη διαδικασία ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου IoT συστήματος.

Περίληψη

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, σε συνδυασμό με την ανάγκη για την παραγωγή ενέργειας με βιώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον μέσα καθιστούν την παρακολούθηση και διαχείριση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ζωτικής σημασίας. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός έξυπνου συστήματος καταγραφής και ανάλυσης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ με τη βοήθεια του μικροελεγκτή ESP32. Το σύστημα θα συλλέγει δεδομένα πραγματικού χρόνου από αισθητήρες που μετρούν την τάση, το ρεύμα, τη θερμοκρασία και την ένταση του φωτός, ενώ στη συνέχεια θα τα αποθηκεύει για περαιτέρω επεξεργασία. Για την παρουσίαση των δεδομένων θα σχεδιαστεί διαδραστικό web-interface που επιτρέπει την οπτικοποίηση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης.

Design and Analysis of an Intelligent Photovoltaic Energy Monitoring and Management System Using ESP32

Alexandros Mavrotheris

Abstract

The continuously increasing demand for energy, combined with the need to produce energy through sustainable and environmentally friendly means, makes the monitoring and management of photovoltaic systems vitally important. The aim of this thesis is to develop an intelligent system for recording and analyzing the performance of a photovoltaic panel with the help of the ESP32 microcontroller. The system will collect real-time data from sensors that measure voltage, current, temperature, and light intensity, and will then store these data for further processing. For the presentation of the data, an interactive web interface will be designed to enable the real-time visualization of measurements, thereby facilitating the monitoring of energy performance.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην καθηγήτριά μου, Κ. Παπαδοπούλου Μαρία για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	x
Συνομογραφίες.....	xi
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα	1
1.2 Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα.....	1
1.3 Ανάγκη για παρακολούθηση και ανάλυση απόδοσης.....	1
1.4 Πρόβλημα που επιλύεται και σκοπός της εργασίας	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο	3
2.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου	3
2.2 I–V χαρακτηριστική	3
2.3 P–V καμπύλες & MPP	5
2.4 Επίδραση θερμοκρασίας	6
2.5 Επίδραση ακτινοβολίας.....	7
Κεφάλαιο 3ο: Υλικά και εξοπλισμός.....	8
3.1 Μικροελεγκτής ESP32-S3.....	8
3.2 Μέτρηση τάσης/ρεύματος INA219	10
3.3 Αισθητήρας φωτεινότητας BH1750	11
3.4 Αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας DHT22.....	13
3.5 Solar Panel 10W.....	17
3.6 Solar Power Manager & Battery	19
3.7 Βασικό Σχηματικό Διάγραμμα.....	20
Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση συστήματος.....	23
4.1 Στήσιμο hardware.....	23
4.2 Σύνδεση αισθητήρων.....	24
4.3 Web Interface	26
4.3.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης.....	26

4.3.2	Περιγραφή του Solar Dashboard	28
4.3.3	Λειτουργίες και δυνατότητες της εφαρμογής.....	30
4.4	Κώδικας ESP32 για συλλογή και αποστολή δεδομένων.....	32
4.5	Αποθήκευση δεδομένων.....	34
4.6	Δοκιμές λειτουργίας	36
Κεφάλαιο 5ο:	Πειραματική διαδικασία	38
5.1	Πειραματική διάταξη.....	38
5.2	Τοποθέτηση και προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού πάνελ.....	39
5.3	Διαδικασία λήψης μετρήσεων.....	40
5.4	Σενάρια πειραματικών δοκιμών	41
5.5	Συλλογή και μορφή των δεδομένων.....	43
5.6	Επεξεργασία των δεδομένων για την εξαγωγή γραφημάτων	44
Κεφάλαιο 6ο:	Αποτελέσματα.....	46
6.1	Power vs Time.....	46
6.2	Voltage vs Time	47
6.3	Lux vs Power.....	48
6.4	Temp vs Power.....	49
6.5	Current vs Time.....	50
6.6	Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων	51
6.7	Ανάλυση συμπεριφοράς του πάνελ.....	53
Κεφάλαιο 7ο:	Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.....	54
7.1	Τι πέτυχε στο σύστημα.....	54
7.2	Χρησιμότητα στη πράξη	54
7.3	Περιορισμοί της παρούσας υλοποίησης.....	55
7.4	Προτάσεις βελτίωσης	55
7.5	Πιθανές επεκτάσεις	56
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας ESP32		59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Σύνδεσμοι υλοποίησης		62

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) φωτοβολταϊκού πάνελ [18]	4
Εικόνα 2: Τυπικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) φωτοβολταϊκού πάνελ, με ένδειξη του Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPP) [21].....	6
Εικόνα 3: Μικροελεγκτής ESP32-S3	9
Εικόνα 4: Τμήμα κώδικα ανάγνωσης του αισθητήρα INA 219 και εφαρμογής συντελεστή προσαρμογής x10 στις μετρήσεις ρεύματος και ισχύος.....	10
Εικόνα 5: Αισθητήρας τάσης και ρεύματος Gravity I2C Digital Wattmeter (INA219)	11
Εικόνα 6: Αισθητήρας φωτεινότητας BH1750 μετά από έκθεση σε υγρασία και νερό κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών.....	12
Εικόνα 7: Αισθητήρας φωτεινότητας BH1750 με προστατευτικό περίβλημα (housing) για χρήση σε εξωτερικό περιβάλλον.....	13
Εικόνα 8: Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22.	15
Εικόνα 9: Συγκριτικός έλεγχος θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22, όπως εμφανίζεται στο web dashboard και ανεξάρτητου ψηφιακού θερμομέτρου αναφοράς σε εξωτερικές συνθήκες.	16
Εικόνα 10: Solar panel 10W.....	18
Εικόνα 11: Waveshare Solar Power Manager 6-24V& Xtar Battery 14500 800mAh 3,7V	20
Εικόνα 12: Διάγραμμα συνδεσμολογίας του συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκού πάνελ, σχεδιασμένο από τον συγγραφέα στο περιβάλλον EasyEDA.	21
Εικόνα 13: Πειραματική διάταξη του συστήματος με φωτοβολταϊκό πάνελ, ESP32, Solar Power Manager, αισθητήρες και breadboard κατά τη φάση ανάπτυξης και ελέγχου του hardware.	23
Εικόνα 14: Αρχική δοκιμαστική διαδικτυακή διεπαφή που εκτελούνταν τοπικά από τον ESP32 για την απεικόνιση των μετρήσεων του συστήματος.	26
Εικόνα 15: Απόσπασμα του endpoint /api/data, μέσω του οποίου ο Node.js server λαμβάνει τις μετρήσεις από τον ESP32.....	27
Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκού πάνελ με ESP32.	28
Εικόνα 17: Διαδικτυακή διεπαφή παρακολούθησης (Solar Dashboard) για την απεικόνιση των μετρήσεων του φωτοβολταϊκού συστήματος.....	29
Εικόνα 18: Προβολή της σελίδας πίνακα μετρήσεων (Table) της διαδικτυακής εφαρμογής από κινητό τηλέφωνο.....	31
Εικόνα 19: Σελίδα Charts της διαδικτυακής εφαρμογής παρακολούθησης, στην οποία προβάλλονται γραφήματα των μετρήσεων του φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως η ισχύς και η τάση, σε συνάρτηση με τον χρόνο.	32
Εικόνα 20: Έλεγχος μετρήσεων των αισθητήρων από το terminal στο Arduino IDE	33
Εικόνα 21: Κώδικας αρχικοποίησης της σύνδεσης του server με την Firebase Realtime Database.....	34
Εικόνα 22: Καταγραφή των μετρήσεων του συστήματος (τάση, ρεύμα, ισχύς, θερμοκρασία, υγρασία και φωτεινότητα) σε φύλλο Google Sheets για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.....	35
Εικόνα 23: Αποθήκευση μετρήσεων αισθητήρων στη βάση δεδομένων Firebase Realtime Database.	36
Εικόνα 24: Τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πάνελ σε εξωτερικό χώρο, με σταθερή κλίση και έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.	39
Εικόνα 25: Μεταβολή της μέσης παραγόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας.	47
Εικόνα 26: Μεταβολή της μέσης τάσης εξόδου σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας.	48
Εικόνα 27: Συσχέτιση φωτεινότητας και μέσης παραγόμενης ισχύος	49
Εικόνα 28: Διάγραμμα συσχέτισης θερμοκρασίας και μέσης παραγόμενης ισχύος.....	50

Εικόνα 29: Μεταβολή του μέσου ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας. 51

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συγκριτικές μετρήσεις θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22 και του εξωτερικού αισθητηρίου του ψηφιακού θερμομέτρου αναφοράς.	16
Πίνακας 2: Συνδέσεις των αισθητήρων και των επιμέρους μονάδων με τον μικροελεγκτή ESP32	25
Πίνακας 3: Κατηγορίες συνθηκών πειραματικής αξιολόγησης και σκοπός ανάλυσης.....	43
Πίνακας 4: Βασικά πεδία των καταγεγραμμένων δεδομένων.....	44
Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....	52

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
IoT	Internet of Things
SPM	Solar Power Manager
MPPT	Maximum Power Point Tracking
STC	Standard Test Conditions
Voc	Open-Circuit Voltage
Isc	Short-Circuit Voltage
Vmp	Voltage Maximum Power
Imp	Current at Maximum Power
API	Application Programming Interface
JSON	JavaScript Object Notations
CSV	Comma Separated Values
IC	Inter-Integrated Circuit
SDA	Serial Data Line
SCL	Serial Clock Line
GPIO	General Purpose Input/Output
RTC	Real Time Clock

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών πηγών ενέργειας έχουν καταστήσει αναγκαία τη μετάβαση σε πιο βιώσιμες μορφές παραγωγής ενέργειας [2][3]. Η εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, πέρα από την περιορισμένη διαθεσιμότητα τους, ενισχύει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στην κλιματική αλλαγή, καθιστώντας έτσι αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών μορφών παραγωγής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό η βελτιστοποίηση της παραγωγής, της αξιοποίησης και της παρακολούθησης της ενέργειας αποτελεί το πλέον σημαντικό ζήτημα. Η απόδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επηρεάζεται από πλήθος παραμέτρων, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες και ο τρόπος λειτουργίας τους, με αποτέλεσμα η απλή εγκατάσταση συστημάτων να μην είναι από μόνη της επαρκής. Επομένως η αξιόπιστη παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης, αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση και την βελτίωση τέτοιων συστημάτων [7].

1.2 Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από της πιο αποδοτικές και διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αφού προσφέρει τη δυνατότητα της άμεσης μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων [2]. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ευρέως γνωστά για την αξιοποίηση τους τόσο σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις όσο και σε μικρές αυτόνομες εφαρμογές, καλύπτοντας ανάγκες από βιομηχανικά περιβάλλοντα έως και οικιακές και εκπαιδευτικές χρήσεις. Παρά τη σχετική απλότητα της βασικής τους λειτουργίας, η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται άμεσα από φυσικούς παράγοντες όπως την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία λειτουργίας καθώς και τις συνθήκες εγκατάστασης [9]. Η μελέτη της συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας αποτελεί θεμέλιο για την ορθή αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης .

1.3 Ανάγκη για παρακολούθηση και ανάλυση απόδοσης

Η παρακολούθηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας τα τελευταία χρόνια. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές για προηγμένα συστήματα παρακολούθησης, τα οποία επικεντρώνονται στη διάγνωση βλαβών σε επίπεδο πάνελ, στην ανάλυση χαρακτηριστικών καμπυλών I-V και στη χρήση σύνθετων αλγορίθμων επεξεργασίας δεδομένων [7][10][12]. Παρόλα αυτά τέτοιες λύσεις έρχονται συχνά με αυξημένο κόστος, πολυπλοκότητα υλοποίησης και ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού. Παράλληλα έχουν προταθεί και πιο απλές προσεγγίσεις με τεχνολογίες Internet of Things (IoT), οι οποίες επιτρέπουν τη συλλογή και την απομακρυσμένη παρακολούθηση των βασικών μεγεθών λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος [2][5][9]. Αρκετές από αυτές τις λύσεις, όμως βασίζονται σε μόνιμη τροφοδοσία, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ζήτηματα ενεργειακής αυτονομίας και περιορισμών χαμηλής ισχύος, γεγονός που μειώνει την χρησιμότητα τους σε αυτόνομα ή μικρής κλίμακας συστήματα. Συνεπώς, υπάρχει η ανάγκη για μια ελαφριά, χαμηλού κόστους και αξιόπιστη λύση παρακολούθησης, η οποία επιτρέπει τη συλλογή χρησιμων δεδομένων απόδοσης χωρίς την ανάγκη σύνθετων υποδομών ή υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης [5].

1.4 Πρόβλημα που επιλύεται και σκοπός της εργασίας

Το πρόβλημα που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την ανάγκη για μια οικονομικά προσιτή, ενεργειακά αποδοτική και εύκολα επεκτάσιμη λύση παρακολούθησης της λειτουργίας φωτοβολταϊκών πάνελ μικρής κλίμακας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ως φωτοβολταϊκό σύστημα μικρής κλίμακας θεωρείται η πειραματική και αυτόνομη διάταξη χαμηλής ισχύος που υλοποιήθηκε, η οποία βασίζεται σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, μονάδα διαχείρισης φόρτισης, μπαταρία, αισθητήρες και μικροελεγκτή ESP32 για τη συλλογή και αποστολή δεδομένων. Η χρήση του όρου συνδέεται με τη βιβλιογραφία, όπου τα συστήματα μικρής κλίμακας, αναφέρονται σε οικιακές, αυτόνομες ή χαμηλότερης ισχύος εφαρμογές, όπως solar home systems και μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα φωτισμού [19], [20]. Αντίθετα, οι μεγαλύτερης κλίμακας φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν συστοιχίες ή φωτοβολταϊκά πεδία αυξημένης ισχύος, όπου η παρακολούθηση συνδέεται συχνά με μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, αξιολόγηση απόδοσης, διάγνωση βλαβών και πρόβλεψη παραγωγής ισχύος [7], [10], [12]. Σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός έξυπνου συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκής απόδοσης, βασισμένου σε μικροελεγκτή ESP32 και τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων. Το σύστημα συλλέγει μετρήσεις από αισθητήρες τάσης, ρεύματος, θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινότητας, με στόχο την παρακολούθηση τόσο των ηλεκτρικών όσο και των περιβαλλοντικών παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ. Τα δεδομένα αποστέλλονται ασύρματα σε διαδικτυακή βάση δεδομένων, όπου αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία, οπτικοποίηση και ανάλυση.

Η εργασία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες και όχι μόνο σε θεωρητικό ή εργαστηριακό επίπεδο. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, ώστε να αποτυπωθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς του πάνελ υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασίας και καιρού. Μέσα από την επεξεργασία των δεδομένων διαμορφώνονται γραφήματα και συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τα οποία επιτρέπουν την κατανόηση της σχέσης μεταξύ περιβαλλοντικών συνθηκών και παραγόμενης ισχύος. Επίσης η παρούσα εργασία δεν αποσκοπεί στη διάγνωση βλαβών, ούτε στην πλήρη εργαστηριακή ανάλυση χαρακτηριστικών καμπυλών ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Αντίθετα, επικεντρώνεται στη διερεύνηση της πραγματικής συμπεριφοράς του πάνελ μέσω βασικών μετρήσεων πεδίου και στην αξιολόγηση της δυνατότητας υλοποίησης ενός αξιόπιστου και χαμηλού κόστους συστήματος παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο καταγραφής, επίβλεψης και βασικής ανάλυσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Η χρήση φωτοβολταϊκού πάνελ και συστήματος φόρτισης επιτρέπει στο κύκλωμα να λειτουργεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς συνεχή εξωτερική τροφοδοσία, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές απομακρυσμένης παρακολούθησης. Επιπλέον, η χρήση διαδικτυακού περιβάλλοντος για την απεικόνιση των δεδομένων διευκολύνει τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος και παρέχει στον χρήστη άμεση πρόσβαση στις μετρήσεις.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στηρίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από ημιαγωγικά υλικά, με κυρίαρχο το πυρίτιο. Τα αγώγιμα υλικά έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα έτσι ώστε να δημιουργούν μια εσωτερική ηλεκτρική επαφή τύπου p-n. Η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του στοιχείου, το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία του [18].

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, τα φωτόνια με επαρκή ενέργεια διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο της επαφής p-n προκαλεί τον διαχωρισμό αυτών των φορέων φορτίου, οδηγώντας στη δημιουργία ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του στοιχείου. Εφόσον συνδεθεί εξωτερικό φορτίο, το κύκλωμα κλείνει και επιτρέπεται η ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

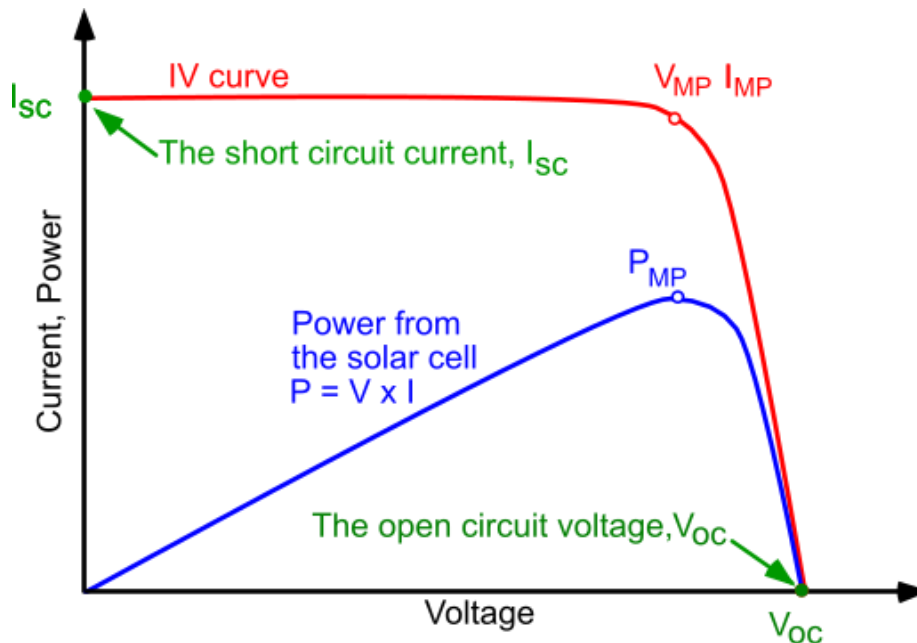
Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνεχούς ρεύματος (DC), γεγονός που το κάνει άμεσα συμβατό με εφαρμογές χαμηλής ισχύος, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και ενσωματωμένα συστήματα μέτρησης και ελέγχου. Στην πράξη, τα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται σε σειρά και παράλληλα, σχηματίζοντας έτσι φωτοβολταϊκά πάνελ, ώστε να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα τάσης και ρεύματος για συγκεκριμένες εφαρμογές [18].

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του. Παράγοντες όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία του στοιχείου επηρεάζουν άμεσα την παραγόμενη τάση, το ρεύμα και, κατ' επέκταση, την ηλεκτρική ισχύ [7], [9], [12]. Για τον λόγο αυτό, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ παρουσιάζει διάφορες μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας και υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου από την οπτική της πρακτικής παρακολούθησης. Δίνεται έμφαση στη μέτρηση των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών όπως η τάση και το ρεύμα εξόδου από το πάνελ, καθώς και τη συσχέτιση τους με περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και η φωτεινότητα [2], [5], [6]. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με σύγχρονες εφαρμογές παρακολούθησης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας, όπου στόχος είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι η πλήρης εργαστηριακή ανάλυση των φυσικών μηχανισμών. Η σωστή καταγραφή των παραπάνω μεγεθών επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων και πρακτικών συμπερασμάτων σχετικά με τη λειτουργική κατάσταση και την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ [7], [9], [12]. Η μέτρηση της θερμοκρασίας και φωτεινότητας επιτρέπει τη διερεύνηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών στη συμπεριφορά του συστήματος, ενώ η συνεχής παρακολούθηση της τάσης και ρεύματος παρέχει τη βάση για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος. Η κατανόηση των παραπάνω σχέσεων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάλυση που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

2.2 I-V χαρακτηριστική

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πάνελ περιγράφεται μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης (I-V χαρακτηριστική), η οποία απεικονίζει τη σχέση

μεταξύ του ρεύματος εξόδου και της τάσης εξόδου υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας [18]. Η καμπύλη αυτή αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς επιτρέπει την ποιοτική και ποσοτική περιγραφή της απόδοσης τους. Η μορφή της I-V χαρακτηριστικής παρουσιάζεται στην εικόνα 1, όπου διακρίνονται βασικά σημεία λειτουργίας, όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοικτού κυκλώματος και το σημείο μέγιστης ισχύος [18].



Εικόνα 1: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) φωτοβολταϊκού πάνελ [18]

Η I-V χαρακτηριστική προκύπτει για δεδομένη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασία λειτουργίας και περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το ρεύμα καθώς μεταβάλλεται η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για τον λόγο αυτό, η καμπύλη δεν αποτελεί σταθερό χαρακτηριστικό του συστήματος, αλλά εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη για την ερμηνεία πειραματικών μετρήσεων υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στην I-V χαρακτηριστική διακρίνονται δύο βασικά σημεία λειτουργίας. Το πρώτο είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Short-Circuit Current, I_{sc}), το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παραχθεί όταν η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μηδενική. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται κυρίως από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς αυξημένη ακτινοβολία οδηγεί στη δημιουργία περισσότερων φορέων φορτίου και, κατ' επέκταση, σε αυξημένο ρεύμα εξόδου.

Το δεύτερο βασικό σημείο είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος (Open-Circuit Voltage, V_{oc}), η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που εμφανίζεται στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν δεν υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο και, συνεπώς, το ρεύμα είναι μηδενικό. Η V_{oc} επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της τάσης εξόδου και, γενικότερα, σε μείωση της συνολικής απόδοσης [18].

Η γενική μορφή της I-V χαρακτηρίζεται από μη γραμμική συμπεριφορά. Για χαμηλές τιμές τάσης, το ρεύμα παραμένει σχεδόν σταθερό και κοντά στην τιμή του I_{sc} , ενώ καθώς η τάση αυξάνεται, παρατηρείται σταδιακή μείωση του ρεύματος έως ότου μηδενιστεί στην περιοχή της V_{oc} . Η καμπύλη

αυτή περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το φωτοβολταϊκό στοιχείο ανταποκρίνεται σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος.

Η επίδραση των περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι καθοριστική για τη μορφή και τη θέση της I-V χαρακτηριστικής. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζει την καμπύλη προς υψηλότερες τιμές ρεύματος, αυξάνοντας κυρίως το I_{sc} , ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της V_{oc} και μετατόπιση της καμπύλης προς χαμηλότερες τιμές τάσης. Οι μεταβολές αυτές δικαιολογούν τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στις μετρήσεις τάσης και ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας ή υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

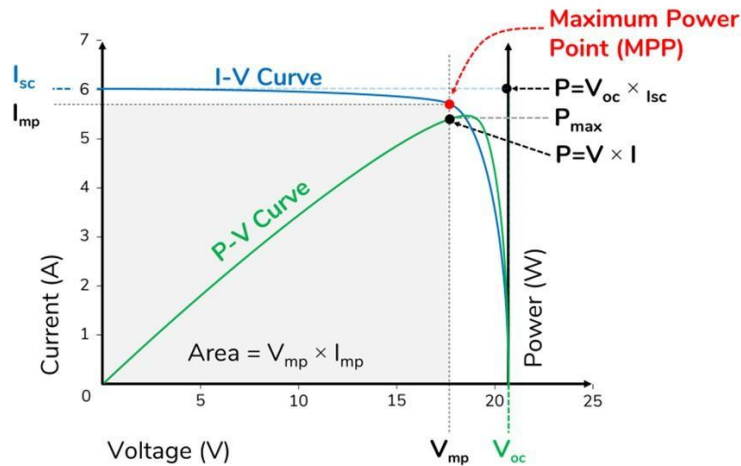
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η I-V χαρακτηριστική δεν χρησιμοποιείται για πλήρη εργαστηριακή ανάλυση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του φωτοβολταϊκού στοιχείου, αλλά ως θεωρητικό εργαλείο ερμηνείας των πειραματικών δεδομένων. Οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος που πραγματοποιούνται μέσω του συστήματος παρακολούθησης επιτρέπουν την κατανόηση της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάνελ υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και τη συσχέτισή της με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που καταγράφονται, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκου εργαστηριακού εξοπλισμού [5], [9].

2.3 P-V καμπύλες & MPP

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ή πάνελ αποτελεί βασικό μέγεθος για την αξιολόγηση της απόδοσης του και προκύπτει από το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος εξόδου. Η απεικόνιση της ισχύος ως συνάρτηση της τάσης οδηγεί στην καμπύλη ισχύος-τάσης (P-V καμπύλη), η οποία παρέχει συμπληρωματική πληροφορία σε σχέση με την I-V χαρακτηριστική και επιτρέπει την αναγνώριση του σημείου λειτουργίας στο οποίο το φωτοβολταϊκό σύστημα αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ισχύ [20].

$$P = V \cdot I$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη βασική εξίσωση υπολογισμού της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Για κάθε σημείο λειτουργίας της I-V χαρακτηριστικής αντιστοιχεί μία συγκεκριμένη τιμή τάσης και μία συγκεκριμένη τιμή ρεύματος. Επομένως, ο πολλαπλασιασμός των δύο αυτών μεγεθών δίνει την παραγόμενη ισχύ στο αντίστοιχο σημείο λειτουργίας. Η P-V καμπύλη προκύπτει άμεσα από την I-V χαρακτηριστική, καθώς για κάθε ξεχωριστή τιμή τάσης αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή ρεύματος και συνεπώς, συγκεκριμένη τιμή ισχύος. Σε αντίθεση με την I-V καμπύλη που περιγράφει τη σχέση ρεύματος-τάσης, η P-V καμπύλη παρουσιάζει ένα σαφώς καθορισμένο μέγιστο σημείο, γνωστό και ως σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP). Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη βέλτιστη συνθήκη λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, βάσει των δεδομένων περιβαλλοντικών συνθηκών [20]. Το σημείο μέγιστης ισχύος χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες τιμές τάσης και ρεύματος, οι οποίες συνήθως συμβολίζονται ως V_{mp} και I_{mp} αντίστοιχα. Στο σημείο αυτό, το γινόμενο $V \cdot I$ μεγιστοποιείται, οδηγώντας στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ P_{max} . Η θέση του MPP δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, το Σημείο Μέγιστης Ισχύος αντιστοιχεί στο σημείο όπου το φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ (MPP) για συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.



Εικόνα 2: Τυπικές καμπύλες ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) φωτοβολταϊκού πάνελ, με ένδειξη του Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPP) [21]

Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της P-V καμπύλης προς υψηλότερες τιμές ισχύος, καθώς αυξάνεται το ρεύμα εξόδου και, κατ' επέκταση, η μέγιστη παραγόμενη ισχύς. Αντίθετα, η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει κυρίως την τάση λειτουργίας του πάνελ, προκαλώντας μείωση της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος και συνολική μείωση της απόδοσης [21]. Οι μεταβολές αυτές εξηγούν τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στην παραγόμενη ισχύ κατά τη διάρκεια της ημέρας ή υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η έννοια της P-V καμπύλης και του Σημείου Μέγιστης Ισχύος χρησιμοποιείται για την ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων και όχι για την υλοποίηση αλγορίθμων παρακολούθησης ή βελτιστοποίησης του MPP. Το σύστημα που αναπτύσσεται δεν περιλαμβάνει μηχανισμούς ενεργού ελέγχου ή προσαρμογής του σημείου λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, αλλά επικεντρώνεται στην καταγραφή και ανάλυση της παραγόμενης ισχύος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας [21].

2.4 Επίδραση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία λειτουργίας αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα όπου επηρεάζει την ηλεκτρική συμπεριφορά αλλά και τη συνολική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ [7], [9]. Κατά τη λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυξάνεται λόγω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που οδηγεί σε μεταβολές στα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη εξόδου. Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει κυρίως την τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου [7]. Συγκεκριμένα, καταγράφεται μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας, ενώ το ρεύμα εξόδου εμφανίζει μικρότερη μεταβολή. Ως αποτέλεσμα, η συνολική παραγόμενη ισχύς του πάνελ μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οδηγώντας σε υποβάθμιση της ενεργειακής απόδοσης. Η επίδραση της θερμοκρασίας αποτυπώνεται και στη μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μετατόπιση της I-V καμπύλης προς τις χαμηλότερες τιμές τάσης, καθώς και αντίστοιχη μετατόπιση της P-V καμπύλης, με το σημείο μέγιστης ισχύος να παρουσιάζεται σε χαμηλότερη τάση, αλλά και μειωμένη ισχύ [20]. Το φαινόμενο αυτό εξηγεί τις διαφοροποιήσεις στην παραγόμενη ισχύ που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ιδιαίτερα σε περιόδους υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και αυξημένης θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καταγράφεται μέσω αισθητήρα και χρησιμοποιείται ως βασική περιβαλλοντική παράμετρος για την ερμηνεία των μετρήσεων τάσης, ρεύματος και ισχύος [8]

2.5 Επίδραση ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα που καθορίζει τη στιγμιαία ηλεκτρική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ [7], [9], [12]. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για τη δημιουργία φορέων φορτίου στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, επηρεάζοντας άμεσα το παραγόμενο ρεύμα και την ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Για τον λόγο αυτό, οι μεταβολές της ακτινοβολίας λόγω των καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της ημέρας αντανακλώνται άμεσα στη συμπεριφορά και στα αποτελέσματα του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η επίδραση της ακτινοβολίας αποτυπώνεται χαρακτηριστικά στη μορφή της καμπύλης ρεύματος-τάσης (I-V). Για αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας, η καμπύλη μετατοπίζεται προς υψηλότερες τιμές ρεύματος, ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος εμφανίζει σαφώς μικρότερη μεταβολή [18], [20]. Αυτή η συμπεριφορά αποδεικνύει ότι το ρεύμα εξόδου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε αλλαγές ακτινοβολίας, σε αντίθεση με την τάση η οποία επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό. Ως αποτέλεσμα, η αύξηση της ακτινοβολίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Επίσης η μεταβολή της ακτινοβολίας επηρεάζει τη θέση του MPP, αφού όσο η ακτινοβολία αυξάνεται, το μέγιστο της καμπύλης ισχύος-τάσης (P-V) μετατοπίζεται προς υψηλότερες τιμές ισχύος, με το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος να παρουσιάζει εντονότερη μεταβολή σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή τάσης. Αντίθετα, η μείωση της ακτινοβολίας οδηγεί σε σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην πράξη, οι συνθήκες ακτινοβολίας αλλάζουν συνεχώς ανάλογα με την κίνηση του ήλιου, τη γωνιά πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πάνελ, καθώς και την παρουσία νεφών ή σκίασης [7] [12]. Λόγω αυτών των μεταβολών η ακτινοβολία κρίνεται ως ένας δυναμικός παράγοντας, που μπορεί να επηρεάσει άμεσα την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η σημασία της ακτινοβολίας αναδεικνύεται και μέσα από τις τυποποιημένες συνθήκες αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση φωτοβολταϊκών πάνελ. Αυτές οι συνθήκες ορίζουν συγκεκριμένο επίπεδο θερμοκρασίας, φασματικής κατανομής και ακτινοβολίας, επιτρέποντας την ονομαστική αξιολόγηση της απόδοσης. Ωστόσο, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, συχνά διαφέρουν από τις συνθήκες αναφοράς, φαινόμενο που εξηγεί τις διαφοροποιήσεις μεταξύ ονομαστικής παραγόμενης ισχύος και ονομαστικής. Η κατανόηση της επίδρασης της ακτινοβολίας κρίνεται απαραίτητη για την ερμηνεία της συνεχούς μεταβολής των ηλεκτρικών μεγεθών ενός φωτοβολταϊκού πάνελ και για τη σωστή ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος σε περιβάλλον πραγματικής λειτουργίας. Η συσχέτιση των μεταβολών της ακτινοβολίας με την παραγόμενη ισχύ επιτρέπει τη δημιουργία συμπερασμάτων σε ό,τι αφορά τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του πάνελ [9], [12].

Κεφάλαιο 3ο: Υλικά και εξοπλισμός

3.1 Μικροελεγκτής ESP32-S3

Ο μικροελεγκτής ESP32-S3 αποτελεί τον κεντρικό υπολογιστικό κόμβο του συστήματος παρακολούθησης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η επιλογή του συγκεκριμένου μικροελεγκτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος, καθώς συγκεντρώνει τις λειτουργίες συλλογής δεδομένων, επεξεργασίας μετρήσεων, διαχείρισης επικοινωνίας αλλά και διάθεσης πληροφοριών μέσω διαδικτυακού περιβάλλοντος. Ο ESP32-S3 ανήκει στην κατηγορία των σύγχρονων μικροελεγκτών που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές Internet of Things (IoT), συνδυάζοντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με επαρκή υπολογιστική ισχύ και ενσωματωμένες δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τον ESP32-S3 κατάλληλο για συστήματα παρακολούθησης ενεργειακών εφαρμογών, όπου χρειάζεται συνεχής καταγραφή δεδομένων, δυνατότητα απομακρυσμένης πρόσβασης και αξιόπιστη λειτουργία. Στο σύστημα της παρούσας εργασίας, ο μικροελεγκτής λειτουργεί ως συσκευή edge διασυνδέοντας το φυσικό κόσμο (αισθητήρες και φωτοβολταϊκό πάνελ) με το επίπεδο εφαρμογής και παρουσίασης που υλοποιείται σε ξεχωριστό web server. Όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται από τους αισθητήρες συλλέγονται, συγχρονίζονται χρονικά και οργανώνονται από τον ESP32-S3, πριν αποθηκευτούν ή παρουσιαστούν στον χρήστη, ενώ η επεξεργασία υψηλότερου επιπέδου και η οπτικοποίηση μεταφέρονται εκτός της συσκευής.

Τεχνικά χαρακτηριστικά και ενσωμάτωση στο σύστημα

Η ενσωμάτωση του ESP32-S3 στο σύστημα βασίζεται στην αξιοποίηση των ψηφιακών διεπαφών επικοινωνίας που διαθέτει. Συγκεκριμένα, ο δίαυλος PC χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των αισθητήρων μέτρησης τάσης και ρεύματος, φωτεινότητας και θερμοκρασίας, επιτρέποντας την ταυτόχρονη επικοινωνία με πολλαπλές συσκευές μέσω κοινών γραμμών δεδομένων και χρονισμού. Η επιλογή αυτή μειώνει την πολυπλοκότητα της συνδεσμολογίας και καθιστά το σύστημα πιο ευέλικτο σε μελλοντικές επεκτάσεις.

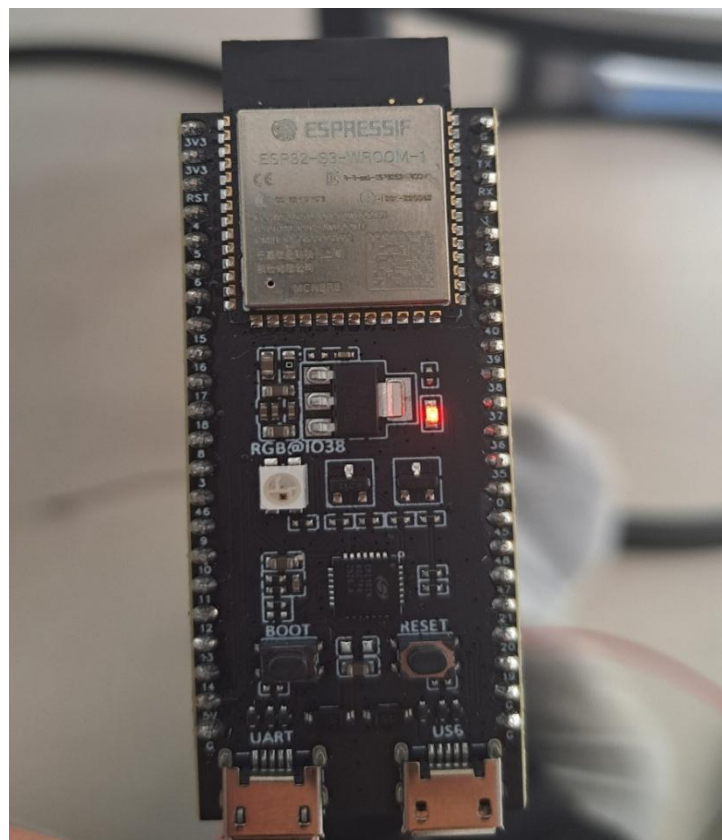
Ο μικροελεγκτής διαθέτει επαρκή μνήμη και υπολογιστικούς πόρους ώστε να εκτελεί ταυτόχρονα την ανάγνωση των αισθητήρων, την εκτέλεση βασικών υπολογισμών και τη διαχείριση της ασύρματης επικοινωνίας. Η τοπική επεξεργασία των δεδομένων επιτρέπει τη μείωση του όγκου των πληροφοριών που αποστέλλονται στον εξυπηρετητή και συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος.

Λογική λειτουργίας και ρόλος του λογισμικού

Το λογισμικό που εκτελείτε στον ESP32-S3 έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη σταθερότητα λειτουργίας και τη σαφή διάκριση των επιμέρους λειτουργικών σταδίων. Η λειτουργία του βασίζεται σε επαναλαμβανόμενο κύκλο, ο οποίος περιλαμβάνει τη συλλογή των μετρήσεων από όλους τους αισθητήρες, την προ επεξεργασία των δεδομένων και την αποστολή τους προς τον εξωτερικό εξυπηρετητή. Αρχικά ο μικροελεγκτής διαβάζει τις τιμές τάσης, ρεύματος, φωτεινότητας και θερμοκρασίας και έπειτα οι πρωτογενείς μετρήσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό δευτερογενών μεγεθών, με κυριότερο την ηλεκτρική ισχύ του φωτοβολταϊκού πάνελ, η οποία προκύπτει από το άθροισμα της τάσης και της έντασης του ρεύματος. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται τοπικά, εξασφαλίζοντας την οργάνωση των δεδομένων όπου αποστέλλονται στον εξυπηρετητή αλλά και την καταλληλότητα τους για αποθήκευση και ανάλυση. Η επικοινωνία με την web πλατφόρμα πραγματοποιείται μέσω HTTP αιτημάτων τύπου POST, τα οποία αποστέλλονται σε

καθορισμένα endpoints του backend. Ο εξυπηρετητής έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον Node.js και φιλοξενείται σε υποδομή cloud (Render), γεγονός που επιτρέπει την απομακρυσμένη πρόσβαση στη διαδικτυακή πλατφόρμα παρακολούθησης, ανεξάρτητα από το τοπικό δίκτυο στο οποίο βρίσκεται η συσκευή. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει το σαφή διαχωρισμό μεταξύ του επιπέδου συλλογής δεδομένων (edge device) και του server, καθιστώντας το σύστημα πιο επεκτάσιμο και ευέλικτο. Μπορούν να πραγματοποιηθούν οποιεσδήποτε αλλαγές στο web interface αλλά και στον τρόπο αποθήκευσης των δεδομένων χωρίς κάποια τροποποίηση στην βασική λογική μέτρησης του μικροελεγκτή.

Κατά την φάση των δοκιμών στην αρχή εξετάστηκε η χρήση εναλλακτικής πλακέτας ESP32 η οποία δεν ήταν γνήσια. Παρατηρήθηκε ότι αυτή η πλακέτα μη πιστοποιημένης προέλευσης, παρουσίαζε αδυναμία στην σύνδεση σε ασύρματο δίκτυο, γεγονός που επηρέαζε την δυνατότητα αποστολής δεδομένων προς τον εξυπηρετητή. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε τελικά γνήσια πλακέτα από την εταιρεία παραγωγής του ESP32, με αξιόπιστη συμπεριφορά δικτύωσης, ώστε να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει τη σημασία αξιοπιστίας του υλικού σε εφαρμογές απομακρυσμένης παρακολούθησης, όπου η σταθερή επικοινωνία αποτελεί βασικό κριτήριο για τη συλλογή και την ανάλυση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Συνολικά, ο ESP32-S3 καλύπτει τις απαιτήσεις του συστήματος ως προς τη συλλογή, την επεξεργασία και τη μετάδοση των μετρήσεων, αποτελώντας κατάλληλη επιλογή για την υλοποίηση ενός συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκού πάνελ. Ο συνδυασμός edge επεξεργασίας και cloud-based παρουσίας δεδομένων προσδίδει στο σύστημα χαρακτηριστικά σύγχρονης IoT εφαρμογής και θέτει τις βάσεις για μελλοντική επέκταση και περαιτέρω ανάλυση των μετρήσεων



Εικόνα 3: Μικροελεγκτής ESP32-S3

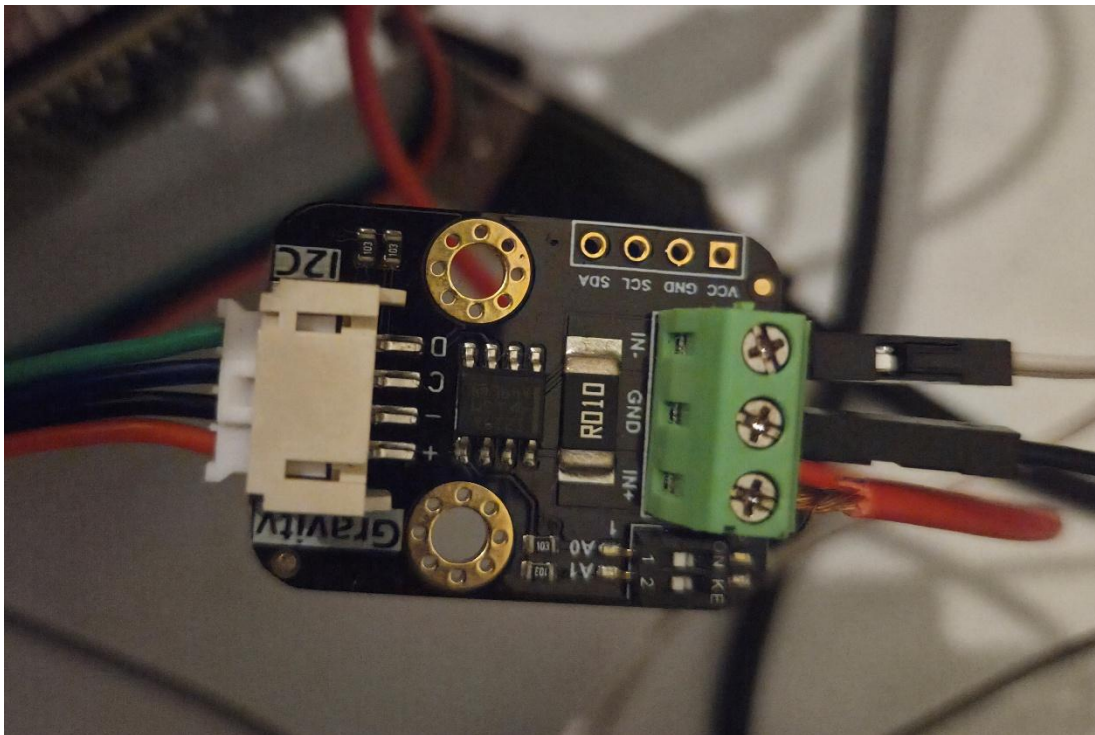
3.2 Μέτρηση τάσης/ρεύματος INA219

Ο αισθητήρας INA219 αξιοποιείται στο παρόν σύστημα για την μέτρηση των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών του φωτοβολταϊκού πάνελ, και συγκεκριμένα της τάσης, του ρεύματος και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Αποτελεί ολοκληρωμένη λύση παρακολούθησης ισχύος, σχεδιασμένη για εφαρμογές ενεργειακής μέτρησης με ιδιαίτερη έμφαση σε συστήματα χαμηλού κόστους και υψηλής ακρίβειας όπως φωτοβολταϊκές διατάξεις. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο INA219 διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο, αφού παρέχει της μέτρησης που απαιτούνται για την πειραματική ανάλυση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάνελ υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού και περιβάλλοντος. Ο INA219 βασίζεται σε τεχνική μέτρησης ρεύματος μέσω αντιστάτη δειγματοληψίας (shunt resistor), ο οποίος τοποθετείται σε σειρά με το κύκλωμα. Η πτώση τάσης που αναπτύσσεται στον αντιστάτη είναι ανάλογη του ρεύματος που διέρχεται από το κύκλωμα και υπολογίζεται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα του αισθητήρα. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιείται ενσωματωμένος αντιστάτης χαμηλής αντίστασης 10 mΩ, γεγονός που εξασφαλίζει την μέτρηση των ρευμάτων με ελάχιστες απώλειες ισχύος. Παράλληλα, ο αισθητήρας μετρά την τάση του κυκλώματος ως προς τη γείωση, επιτρέποντας τον άμεσο υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος. Η μέτρηση πραγματοποιείται στην υψηλή πλευρά (high-side current sensing), γεγονός που καθιστά τον INA219 ιδιαίτερα κατάλληλο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές, όπου η πηγή και το φορτίο δεν βρίσκονται απαραίτητα στο ίδιο δυναμικό αναφοράς. Επίσης ο INA219 υποστηρίζει μετρήσεις τάσης έως 26V και ρεύματος έως ±8 A καλύπτοντας πλήρως το εύρος λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ και του φορτίου πειραματικής διάταξης. Η ανάλυση μέτρησης τάσης ανέρχεται στα 4mV, ενώ η ανάλυση του ρεύματος φτάνει και το 1mA, επιτρέποντας λεπτομερή καταγραφή μικρών μεταβολών απόδοσης. Η διαδικασία βαθμονόμησης του INA219 αφορά κυρίως τη μέτρηση του ρεύματος και βασίζεται σε σύγκριση με εξωτερικό όργανο αναφοράς, όπως πολύμετρο ή ηλεκτρονικό φορτίο. Στο datasheet προτείνεται απλή γραμμική βαθμονόμηση ενός σημείου, κατά την οποία η πραγματική τιμή ρεύματος εισάγεται στο λογισμικό, ώστε να διορθωθούν οι αποκλίσεις της μέτρησης. Αυτή η δυνατότητα καθιστά τον αισθητήρα κατάλληλο για πειραματικές εφαρμογές, όπου απαιτείται συνδυασμός ικανοποιητικής ακρίβειας και χαμηλού κόστους. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η βαθμονόμηση εξασφαλίζει ότι οι μετρήσεις ισχύος που καταγράφονται αντικατοπτρίζουν με επάρκεια την πραγματική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η προσαρμογή των μετρήσεων του INA219 βασίστηκε στην τιμή αντίστασης shunt του χρησιμοποιούμενου module. Συγκεκριμένα ο αισθητήρας Gravity I2C Digital Wattmeter χρησιμοποιεί shunt 10mΩ, ενώ η βασική ρύθμιση της βιβλιοθήκης Adafruit_INA219 βασίζεται σε shunt 0.1 Ω, άρα οι τιμές ρεύματος που επιστρέφονται χρειάστηκε να προσαρμοστούν με συντελεστή 10. Ο ίδιος συντελεστής εφαρμόστηκε και στην ισχύ, καθώς εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα. Η εφαρμογή της βαθμονόμησης στον κώδικα παρουσιάζεται στην εικόνα 4.

```
void readAllSensors() {
  if(ina0k) {
    lastBusV = ina219.getBusVoltage_V();
    lastCurrent_mA = ina219.getCurrent_mA() * 10.0f;
    lastPower_mW = ina219.getPower_mW() * 10.0f;
  }
}
```

Εικόνα 4: Τμήμα κώδικα ανάγνωσης του αισθητήρα INA 219 και εφαρμογής συντελεστή προσαρμογής x10 στις μετρήσεις ρεύματος και ισχύος

Η επικοινωνία του αισθητήρα με τον μικροελεγκτή ESP32-S3 γίνεται μέσω διαύλου I²C γεγονός που επιτρέπει την απλή ενσωμάτωση του στο κύκλωμα χωρίς την ανάγκη πρόσθετων αναλογικών εισόδων. Υποστηρίζονται τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις I²C, οι οποίες επιλέγονται μέσω διακοπών DIP, καθιστώντας δυνατή τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων στο ίδιο σύστημα, εφόσον υπάρχει η ανάγκη. Στο ανεπτυγμένο σύστημα, ο INA219 είναι συνδεδεμένος σε σειρά μεταξύ του φωτοβολταϊκού πάνελ και του φορτίου, επιτρέποντας τη συνεχή καταγραφή της τάσης, του ρεύματος και της παραγόμενης ισχύς σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Οι μετρήσεις αυτές αποστέλλονται κατευθείαν στον μικροελεγκτή, όπου αξιοποιούνται τόσο για άμεση αποστολή προς τον εξυπηρετητή όσο και για τη δημιουργία αρχείων καταγραφής. Ο αισθητήρας INA219 αποτελεί βασικό εργαλείο πειραματικής αξιολόγησης του φωτοβολταϊκού πάνελ. Οι μετρήσεις του, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή καμπυλών ισχύος, τη μελέτη επίδρασης της ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, καθώς και για την σύγκριση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας. Η ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος χωρίς αξιόπιστη μέτρηση τάσης και ρεύματος δεν θα ήταν εφικτή. Η επιλογή του συγκεκριμένου αισθητήρα εξισορροπεί την ανάγκη για ακρίβεια, απλότητα και αξιοπιστία, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές εκπαιδευτικού και ερευνητικού χαρακτήρα.

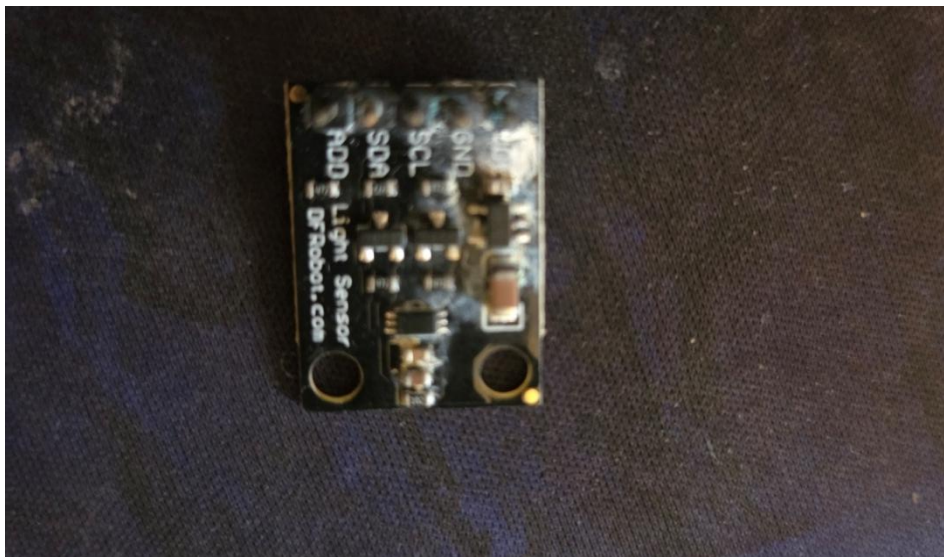


Εικόνα 5: Αισθητήρας τάσης και ρεύματος Gravity I2C Digital Wattmeter (INA219)

3.3 Αισθητήρας φωτεινότητας BH1750

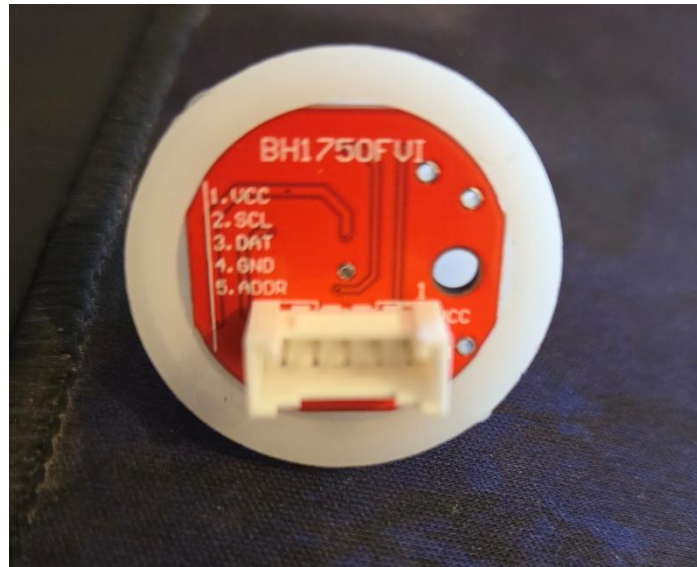
Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, αφού η ηλεκτρική ισχύς όπου παράγεται εξαρτάται άμεσα από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Στο σύστημα όπου αναπτύχθηκε, η μέτρηση της φωτεινότητας πραγματοποιείται μέσω του ψηφιακού αισθητήρα φωτός BH1750, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για τη μέτρηση του επιπέδου φωτισμού σε μονάδες lux μέσω ψηφιακής διεπαφής I²C. Ο BH1750 επιλέχθηκε λόγω της υψηλής ακρίβειας, της σταθερότητας των μετρήσεων του και της φασματικής απόκρισης που

προσεγγίζει την ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού, χαρακτηριστικό όπου βοηθά σε εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης και συσχέτισης φωτεινότητας με ενεργειακή απόδοση. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποτελεί ολοκληρωμένο κύκλωμα μέτρησης φωτεινότητας, το οποίο περιλαμβάνει φωτοδίοδο, ενισχυτή, αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα και ψηφιακή λογική επικοινωνίας. Η φωτοδίοδος που διαθέτει ο αισθητήρας, μετατρέπει την ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα όπου στην συνέχεια ενισχύεται και μετατρέπεται σε ψηφιακή τιμή 16-bit, αντιπροσωπευτική της έντασης φωτισμού. Το εύρος μέτρησης του BH1750 είναι τυπικά από 0,5 έως 65,535 lux, με δυνατότητα επέκτασης του εύρους μέσω ρύθμισης του χρόνου ολοκλήρωσης της μέτρησης (measurement time), γεγονός όπου εξασφαλίζει την καταγραφή τόσο χαμηλών όσο και υψηλών επιπέδων φωτισμού. Παράλληλα, η επίδραση της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι περιορισμένη, μειώνοντας την πιθανότητα αλλοίωσης των μετρήσεων λόγω μη ορατής ακτινοβολίας. Ο αισθητήρας επικοινωνεί με τον μικροελεγκτή ESP32-S3 μέσω διαύλου I²C, επιτρέποντας την απευθείας ανάγνωση της τιμής της μετρούμενης φωτεινότητας σε ψηφιακή μορφή, χωρίς την ανάγκη χρήσης εξωτερικών μετατροπέων η αναλογικών εισόδων. Στο αναπτυγμένο σύστημα, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε ακριβώς πάνω στο φωτοβολταϊκό πάνελ με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να δέχεται την φωτεινή ακτινοβολία παρόμοια με εκείνη που προσπίπτει στο ενεργό υλικό του πάνελ. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την συσχέτιση της μετρούμενης φωτεινότητας με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, καθιστώντας δυνατή την μελέτη της σχέσης μεταξύ ακτινοβολίας και ενεργειακής απόδοσης σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας. Κατά τα αρχικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας BH1750 χωρίς προστατευτικό κάλυμμα, προκειμένου να αξιολογηθεί η βασική του συμπεριφορά και η ακρίβεια των μετρήσεων υπό ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ωστόσο, δεδομένου ότι το σύστημα προορίζεται για λειτουργία σε εξωτερικό χώρο, κρίθηκε αναγκαία η προστασία του αισθητήρα από αντίξοες συνθήκες, όπως βροχή, υγρασία και σκόνη αφού κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών σε χειμερινή περίοδο παρατηρήθηκε ότι ο αισθητήρας φωτεινότητας BH1750, όταν τοποθετήθηκε σε εξωτερικό περιβάλλον χωρίς προστασία, παρουσίασε προβλήματα λειτουργίας λόγω έκθεσης σε υγρασία και νερό. Η μορφή του αισθητήρα BH1750, χωρίς προστατευτικό περίβλημα, μετά από βροχή φαίνεται στην Εικόνα 5. Η άμεση έκθεση των ηλεκτρονικών επαφών στις περιβαλλοντικές συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση και δυσλειτουργία του αισθητήρα.



Εικόνα 6: Αισθητήρας φωτεινότητας BH1750 μετά από έκθεση σε υγρασία και νερό κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών.

Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας BH1750 ενσωματωμένος σε προστατευτικό περίβλημα (housing), το οποίο επιτρέπει τη διέλευση του φωτός, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει το ηλεκτρονικό κύκλωμα από μηχανικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Σύμφωνα με το datasheet του κατασκευαστή, η ύπαρξη οπτικού παραθύρου μπορεί να επηρεάσει τη μετρούμενη φωτεινότητα, ωστόσο η επίδραση αυτή μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω ρύθμισης της ευαισθησίας του αισθητήρα, μεταβάλλοντας τον χρόνο μέτρησης. Η προσέγγιση αυτή καθιστά τον αισθητήρα κατάλληλο για μακροχρόνια εγκατάσταση σε εξωτερικό περιβάλλον, χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα των μετρήσεων, και αντανακλά ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.



Εικόνα 7: Αισθητήρας φωτεινότητας BH1750 με προστατευτικό περίβλημα (housing) για χρήση σε εξωτερικό περιβάλλον.

Οι μετρήσεις φωτεινότητας όπου παρέχει ο αισθητήρας BH1750 αξιοποιούνται για τη μελέτη της επίδρασης της ακτινοβολίας στην απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Μαζί με τις μετρήσεις ρεύματος και τάσης, καθίσταται δυνατή η εξαγωγή συσχετίσεων μεταξύ φωτεινότητας και παραγόμενης ισχύος, καθώς και η ανάλυση των μεταβολών των μετρήσεων λόγω συννεφιάς, σκίασης, γωνιάς πρόσπτωσης ή χρονικής εξέλιξης της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλο που ο αισθητήρας μετρά φωτεινότητα σε μονάδα μέτρησης lux και όχι απευθείας ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 , οι μετρήσεις του παρέχουν επαρκές πληροφορίες για την συγκριτική ανάλυση και πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος, ειδικά όταν η τοποθέτηση του είναι όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτική της επιφάνειας του πάνελ.

3.4 Αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας DHT22

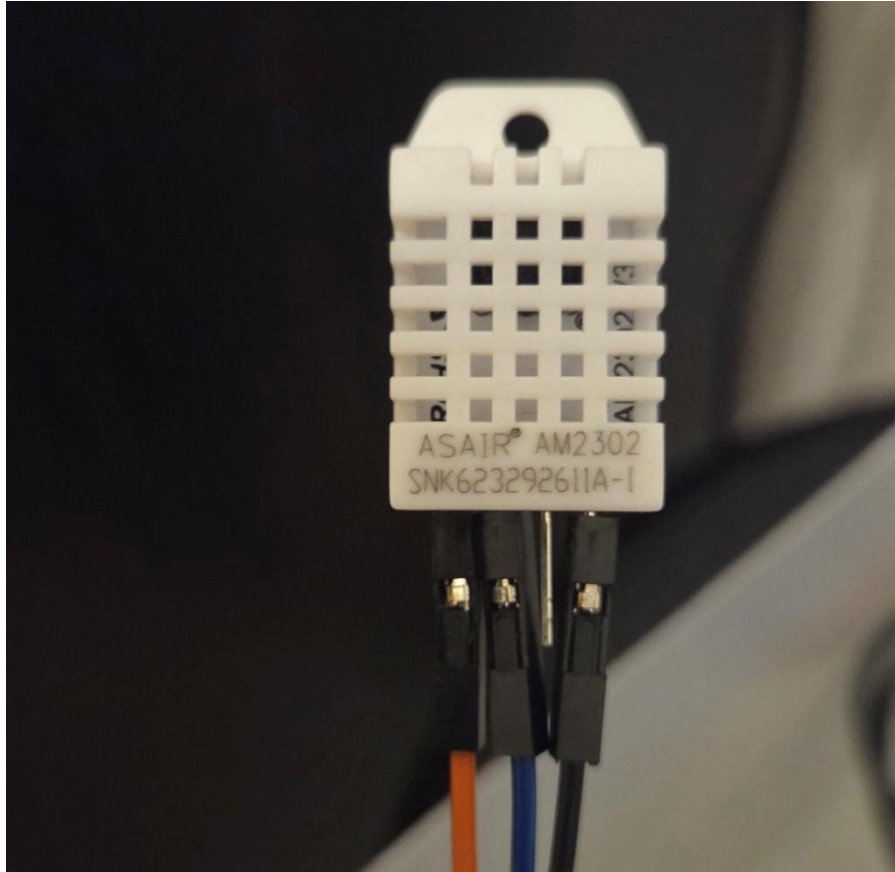
Η θερμοκρασία αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες που παίζουν ρόλο στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, συγκεκριμένα οι μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε μεταβολή της τάσης λειτουργίας και, κατ' επέκταση, της παραγόμενης ισχύος. Στο παρόν πείραμα, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος καταγράφονται με τη χρήση του ψηφιακού αισθητήρα DHT22(AM2302), ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές IoT λόγω του χαμηλού κόστους, την αποδεκτή ακρίβεια και της απλότητας στην ενσωμάτωση με το υπόλοιπο σύστημα. Ο DHT22 επιλέχθηκε ως αισθητήρας περιβαλλοντικής θερμοκρασίας και όχι ως αισθητήρας άμεσης

θερμοκρασίας της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πάνελ, καθώς ο στόχος της μέτρησης είναι η εκτίμηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών στη συμπεριφορά του συστήματος και όχι η ακριβής θερμοκρασιακή χαρτογράφηση του ίδιου του πάνελ. Ο αισθητήρας DHT22 όπως προαναφέρθηκε συνδυάζει μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας, βασισμένος σε πολυμετρικό χωρητικό στοιχείο για την υγρασία. Ένα σημαντικό, πρακτικό πλεονέκτημα του DHT22 είναι ότι παρέχει την δυνατότητα εξόδου των μετρήσεων σε ψηφιακή μορφή, γεγονός που ελαχιστοποιεί την ευαισθησία σε ηλεκτρικό θόρυβο και διευκολύνει τη χρήση του σε ενσωματωμένα συστήματα παρακολούθησης. Στην βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι ο πιο πάνω αισθητήρας εκτείνεται σε εύρος θερμοκρασιών από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου και σχετικής υγρασίας από 0% έως 100%, με τυπική ακρίβεια θερμοκρασίας $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, τιμές που είναι επαρκείς για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης και για ενεργειακές μετρήσεις μικρής κλίμακας.[8]

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο αισθητήρας θερμοκρασίας DHT22 δεν αξιοποιείται για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πάνελ, αλλά για την καταγραφή και την παρακολούθηση των συνθηκών του άμεσου περιβάλλοντος λειτουργίας του συστήματος. Η συγκεκριμένη επιλογή είναι συνειδητή, καθώς ο σκοπός της εργασίας είναι η συσχέτιση των γενικών περιβαλλοντικών συνθηκών με την ηλεκτρική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πάνελ, και όχι στη λεπτομερή θερμική μελέτη του υλικού σε εργαστηριακές συνθήκες. Επιπρόσθετα, σε αρκετές σύγχρονες διατάξεις παρακολούθησης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων χρησιμοποιούν τη θερμοκρασία ως βασική μεταβλητή, μαζί με την τάση, το ρεύμα και την ακτινοβολία, καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο στην ερμηνεία των αλλαγών στην απόδοση [5],[9],[10]. Ο ρόλος της θερμοκρασίας στην λειτουργική παρακολούθηση φωτοβολταϊκών πάνελ είναι ιδιαίτερα σημαντικός και ευρέως αναγνωρισμένος. Στα συστήματα panel-level, η θερμοκρασία μετρείται μαζί με βασικές ηλεκτρικές και περιβαλλοντικές μεταβλητές, όπως η τάση, η ακτινοβολία και το ρεύμα, προκειμένου να εκτιμάται η απόδοση και να εξηγούνται πιθανές αποκλίσεις από την αναμενόμενη λειτουργία. Ειδικότερα, η άνοδος της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της τάσης λειτουργίας και της απόδοσης του πάνελ, ακόμη και υπό έντονη ακτινοβολία. Για τον λόγο αυτό, ο αισθητήρας DHT22 στο σύστημα δεν αποτελεί απλώς μια πρόσθετη πληροφορία, αλλά μια απαραίτητα μεταβλητή για τη ορθή ανάλυση των μετρήσεων ισχύος [10]. Αν και η υγρασία δεν επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, με τον ίδιο τρόπο που την επηρεάζουν η θερμοκρασία και η ακτινοβολία, προσφέρει σημαντική συμπληρωματική πληροφορία για την κατανόηση των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος. Η σχετική υγρασία μπορεί να υποδηλώνει την παρουσία υγρού περιβάλλοντος, πιθανής συμπύκνωσης και μειωμένης καθαρότητας της ατμόσφαιρας ή μεταβολές στο μικρόκλιμα της εγκατάστασης. Σε μια μικρής κλίμακας διάταξης, όπως αυτό της παρούσας εργασίας, η καταγραφή της υγρασίας εμπλουτίζει τα περιβαλλοντικά δεδομένα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερη ανάλυση για την ερμηνεία πιθανών ανώμαλων ή διαφορών στις μετρήσεις [8].

Σε επίπεδο υλοποίησης, ο DHT22 συνδέεται απευθείας με τον μικροελεγκτή ESP32-S3 μέσω μιας ψηφιακής γραμμής δεδομένων. Το χαρακτηριστικό αυτό τον καθιστά ιδιαίτερα πρακτικό στη χρήση, καθώς δεν απαιτείται δίαυλος I²C ούτε αναλογική είσοδος. Ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί περιοδικά τον αισθητήρα, λαμβάνει τις μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, τις μετατρέπει σε αριθμητικά δεδομένα και τις ενσωματώνει στο συνολικό πακέτο μετρήσεων που αποστέλλεται στον διακομιστή. Σε αντίστοιχες IoT εφαρμογές που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, ο DHT22 χρησιμοποιείται μαζί με μικροελεγκτές ή μικροϋπολογιστές για συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας, αποθήκευση των μετρήσεων σε βάσεις δεδομένων και παρουσίαση των δεδομένων μέσω Grafana ή άλλων web εργαλείων, κάτι που αποδεικνύει ότι είναι κατάλληλος για τέτοιου είδους εφαρμογές.[8]. Παρά τα πλεονεκτήματά του, ο DHT22 παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται

υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Μελέτες δείχνουν ότι προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια στη μέτρηση θερμοκρασίας, αλλά έχει πιο αργή απόκριση σε απότομες μεταβολές σε σύγκριση με βιομηχανικούς αισθητήρες αναφοράς. Έτσι, σε περιπτώσεις γρήγορων μεταβολών των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως όταν ένα πάνελ μεταβαίνει από σκίαση σε άμεση ηλιοφάνεια, η μέτρηση του αισθητήρα μπορεί να εμφανίσει μικρή καθυστέρηση. Για τον λόγο αυτό, τα δεδομένα του είναι προτιμότερο να ερμηνεύονται ως ένδειξη της γενικής περιβαλλοντικής τάσης [8].



Εικόνα 8: Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22.

Στο συγκεκριμένο σύστημα, ο DHT22 συμβάλλει στην ολοκληρωμένη παρακολούθηση, συνδυάζοντας τις ηλεκτρικές μετρήσεις του φωτοβολταϊκού πάνελ με περιβαλλοντικές ενδείξεις. Η χρήση δεδομένων θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας, τάσης και ρεύματος επιτρέπει την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων για τη λειτουργία του πάνελ. Έτσι, ο DHT22, παρότι απλός και χαμηλού κόστους, καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες της υλοποίησης και υποστηρίζει την ανάπτυξη ενός οικονομικού συστήματος IoT παρακολούθησης φωτοβολταϊκής απόδοσης [5][8][2]. Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του αισθητήρα DHT22 πραγματοποιήθηκε συγκριτικός έλεγχος των ενδείξεών του με ανεξάρτητο ψηφιακό θερμόμετρο αναφοράς.



Εικόνα 9: Συγκριτικός έλεγχος θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22, όπως εμφανίζεται στο web dashboard και ανεξάρτητου ψηφιακού θερμομέτρου αναφοράς σε εξωτερικές συνθήκες.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, η θερμοκρασία που κατέγραψε ο DHT22 και εμφανίστηκε στο web dashboard ήταν 31,3 °C, ενώ η ένδειξη OUT του ψηφιακού θερμομέτρου αναφοράς ήταν περίπου 31,6 °C. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με βάση την ένδειξη OUT, καθώς αυτή αντιστοιχεί στο εξωτερικό αισθητήριο του θερμομέτρου που τοποθετήθηκε κοντά στον DHT22. Η απόκλιση των δύο ενδείξεων ήταν περίπου 0,3 °C, τιμή που θεωρείται αποδεκτή για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 1: Συγκριτικές μετρήσεις θερμοκρασίας μεταξύ του αισθητήρα DHT22 και του εξωτερικού αισθητηρίου του ψηφιακού θερμομέτρου αναφοράς.

Μέτρηση	Θερμόμετρο αναφοράς OUT (°C)	DHT22/Dashboard (°C)	Απόκλιση (°C)
1	26.8	26.7	0.1
2	29.2	29.8	0.6
3	30.8	31.3	0.5
4	31.3	31.6	0.3
5	32.3	32.8	0.5

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 1 προκύπτει ότι η απόκλιση μεταξύ του DHT22 και του θερμομέτρου αναφοράς παρέμεινε σε χαμηλό επίπεδο. Η τιμή αυτή είναι συμβατή με τη βιβλιογραφία, όπου ο DHT22 αναφέρεται με τυπική ακρίβεια θερμοκρασίας περίπου $\pm 0,5$ °C σε εφαρμογές IoT περιβαλλοντικής παρακολούθησης [8]. Συνεπώς, ο αισθητήρας κρίθηκε κατάλληλος για την παρούσα υλοποίηση, καθώς η εργασία δεν αποσκοπεί σε εργαστηριακή μέτρηση υψηλής ακρίβειας, αλλά στην παρακολούθηση των μεταβολών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που επηρεάζουν τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

3.5 Solar Panel 10W

Το φωτοβολταϊκό πάνελ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το μοντέλο Waveshare Semi Flexible Solar Panel (18V 10W), ημιεύκαμπτου τύπου και τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, η ονομαστική του ισχύς είναι 10 W, ενώ στην έξοδο DC5521 παρουσιάζει τάση λειτουργίας 18 V $\pm 5\%$ και μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 600 mA $\pm 5\%$. Η τάση ανοικτού κυκλώματος του πάνελ δίνεται ως 21.6 V $\pm 5\%$, ενώ οι διαστάσεις του είναι 435 × 200 mm. Επιπλέον, το πάνελ διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα σταθεροποίησης 5 V και δύο θύρες USB, μέσω των οποίων μπορεί να τροφοδοτήσει εξωτερικές συσκευές υπό κατάλληλες συνθήκες ηλιοφάνειας, με συνολικό ρεύμα εξόδου έως 1.5 A. Οι παραπάνω προδιαγραφές δίνονται για πρότυπες συνθήκες δοκιμής, δηλαδή για ακτινοβολία 1000 W/m², θερμοκρασία 25 °C και AM1.5, γεγονός που σημαίνει ότι σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας η αποδιδόμενη ισχύς μπορεί να διαφοροποιείται αισθητά [7][10]

Η επιλογή φωτοβολταϊκού πάνελ 10 W εξυπηρετεί την σωστή ενσωμάτωση του στο σύστημα ενεργειακής διαχείρισης. Το πάνελ χρησιμοποιείται τόσο για την τροφοδοσία ή την φόρτιση ενός μικρού αποθηκευτικού συστήματος μέσω power manager, όσο και ως στοιχείο μέτρησης μέσω του αισθητήρα INA219. Με αυτό τον τρόπο, το πάνελ δεν λειτουργεί μόνο ως πηγή ενέργειας αλλά και ως εργαλείο παρακολούθησης. Η συνεχής καταγραφή δεδομένων επιτρέπει τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος και τη μελέτη των μεταβολών τάσης και ρεύματος σε σχέση με περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η φωτεινότητα, όπως συμβαίνει σε αντίστοιχα IoT συστήματα. Από θεωρητική σκοπιά, το φωτοβολταϊκό πάνελ μπορεί να θεωρηθεί ως μια μεταβαλλόμενη ηλεκτρική πηγή της οποίας η έξοδος δεν παραμένει σταθερή. Η παραγόμενη τάση και το ρεύμα που παράγονται εξαρτώνται τόσο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και από το φορτίο που είναι συνδεδεμένο. Συνεπώς, η αξιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ δεν μπορεί να στηρίζεται αποκλειστικά στην ονομαστική του ισχύ, αλλά προϋποθέτει τη συνεχή παρακολούθηση των βασικών ηλεκτρικών παραμέτρων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η ακριβής μέτρηση της τάσης, του ρεύματος, της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος.

Στο πλαίσιο του panel-level monitoring, προτείνεται η χρήση πολυαισθητήρων κόμβων που καταγράφουν την τάση, ρεύμα, ακτινοβολία και θερμοκρασία στο ίδιο ή κοντινό σημείο του πάνελ, ώστε να εντοπίζονται αιτίες απωλειών απόδοσης. Παρόλο που η παρούσα εργασία δεν εστιάζει σε διάγνωση βλαβών, η ίδια προσέγγιση παρακολούθησης παραμένει ιδιαίτερα χρήσιμη. Η παράλληλη καταγραφή ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων σε επίπεδο πάνελ επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το περιβάλλον επηρεάζει τη λειτουργία του. Με αυτή την προσέγγιση, το πάνελ των 10W δεν θεωρείται απλώς πηγή ενέργειας, αλλά ένα δυναμικό σύστημα, του οποίου η συμπεριφορά ερμηνεύεται βάσει των συνθηκών λειτουργίας. Από πρακτική σκοπιά, στην περιγραφή του πάνελ στη διπλωματική είναι σημαντικό να παρουσιαστούν τα βασικά ονομαστικά χαρακτηριστικά που παρέχει ο κατασκευαστής. Σε αυτά περιλαμβάνονται η μέγιστη ισχύς (P_{max}), η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), καθώς και η τάση (V_{mp}) και το ρεύμα (I_{mp}) στο σημείο μέγιστης ισχύος. Τα μεγέθη αυτά δεν χρησιμεύουν μόνο για την τεχνική περιγραφή του πάνελ, αλλά αποτελούν και βάση σύγκρισης με τα πειραματικά δεδομένα. Στις

περισσότερες εφαρμογές παρακολούθησης φωτοβολταϊκών, χρησιμοποιούνται ως τιμές αναφοράς για την αξιολόγηση της πραγματικής απόδοσης, ιδίως υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και φωτισμού.

Στην παρούσα διάταξη, το πάνελ 10 W τοποθετείται σε εξωτερικό περιβάλλον και εκτίθεται απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία. Η θέση και ο προσανατολισμός του πάνελ επηρεάζουν άμεσα τις μετρήσεις, καθώς μη βέλτιστη γωνία τοποθέτησης, μερική σκίαση ή πρόσκαιρη συννεφιά μπορούν να οδηγήσουν σε αισθητές αποκλίσεις στην ισχύ εξόδου. Στη βιβλιογραφία έχει επισημανθεί ότι πέρα από τις φυσικές απώλειες μετατροπής, η απόδοση ενός πάνελ μπορεί να επηρεαστεί από θερμοκρασία, γωνία πρόσπτωσης, αβεβαιότητα ονομαστικών προδιαγραφών, σκόνη, σκίαση, γήρανση και συνθήκες καλωδίωσης. Ακόμη και αν η παρούσα εργασία δεν εξετάζει αναλυτικά όλες αυτές τις αιτίες, η αναφορά τους είναι σημαντική επειδή δείχνει ότι η συμπεριφορά ενός πραγματικού πάνελ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και συνεπώς η μέτρησή του σε πραγματικό χρόνο έχει ουσιαστική αξία [5][9][10].

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης φωτοβολταϊκών πάνελ μικρής ισχύος είναι η δυνατότητα ασφαλούς πειραματισμού χωρίς αυξημένο κίνδυνο για τον εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, παρέχεται η ευχέρεια διεξαγωγής μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες, όπως σε ποικίλες χρονικές στιγμές της ημέρας, με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ή με εναλλαγή φορτίων. Μέσω αυτής της διαδικασίας καθίσταται δυνατή η παρατήρηση της μεταβολής της καμπύλης ισχύος και η συνολική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Η συγκεκριμένη μεθοδολογική προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με αντίστοιχες πειραματικές εφαρμογές που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία, όπου η συστηματική καταγραφή ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων αποτελεί βασικό εργαλείο για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων και τη βελτιστοποίηση της μελλοντικής λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Εικόνα 10: Solar panel 10W

3.6 Solar Power Manager & Battery

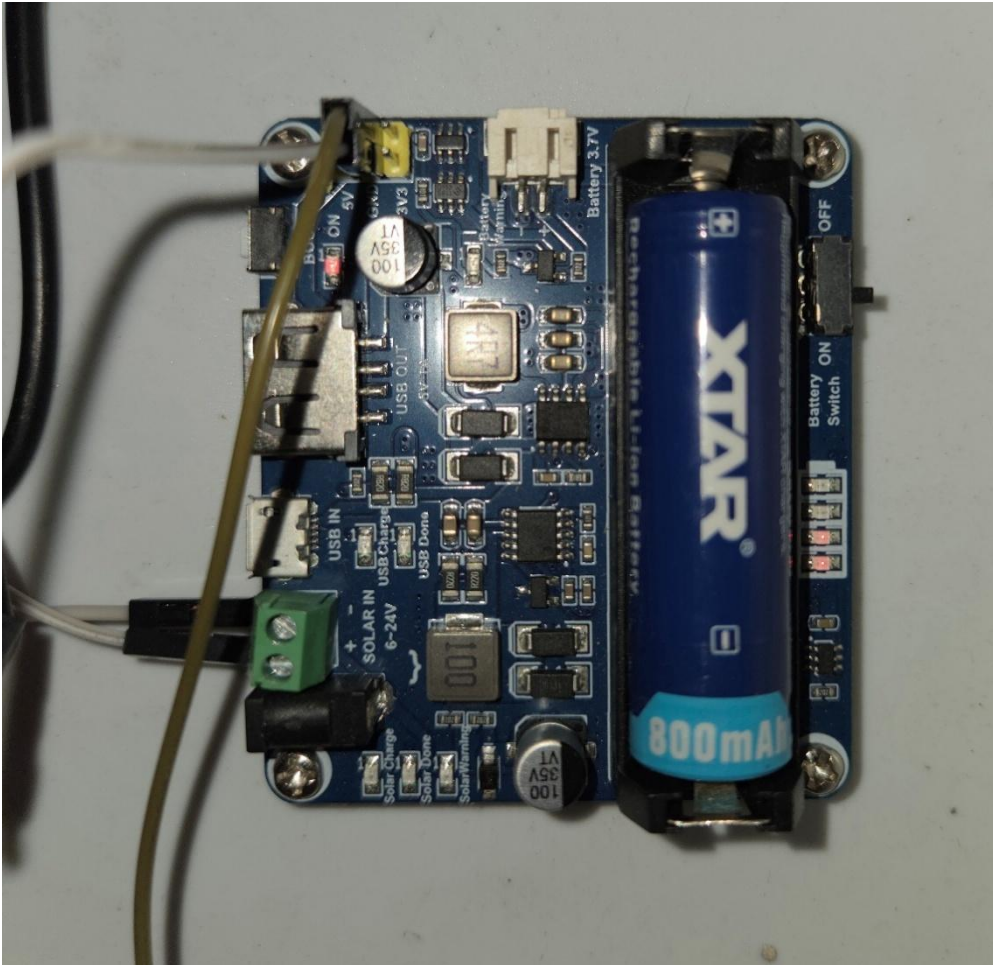
Η ενεργειακή διαχείριση αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι, ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, αφού η στιγμιαία παραγωγή ενέργειας από το πάνελ δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με της περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν. Για αυτό το λόγο σε συστήματα μικρής κλίμακας που είναι φτιαγμένα για συνεχή λειτουργία, πέρα από την ύπαρξη φωτοβολταϊκού πάνελ, απαιτείτε ένα κατάλληλο κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας σε συνδυασμό με ένα ενεργειακό αποθηκευτικό μέσο. έτσι ώστε διασφαλίζεται η σταθερή τροφοδοσία του μικροελεγκτή ESP32, όλων των αισθητήρων και τον υπόλοιπων ηλεκτρονικών μερών της διάταξης [5][6][11]. Στο παρόν πείραμα, ο ρόλος αυτός καλύπτεται πλήρως από το Solar Power Management Module, και από επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου τύπου 14500.

Το Waveshare Solar Power Management module αποτελεί τον πυρήνα της ενεργειακής διαχείρισης της συγκεκριμένης υλοποίησης. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, το συγκεκριμένο module έχει σχεδιαστεί για φωτοβολταϊκά πάνελ εισόδου 6-24 V, και μπορεί να φορτίζει μπαταρία 3.7 V, είτε απευθείας από το Π φωτοβολταϊκό πάνελ είτε μέσω σύνδεσης USB, και παρέχει ρυθμιζόμενη έξοδο 5V/1A ή 3.3V/1A για την τροφοδοσία εξωτερικών κυκλωμάτων. Επιπρόσθετα διαθέτει λειτουργία MPPT (Maximum Power Point Tracking) και πολλαπλά κυκλώματα προστασίας, τα οποία συνεισφέρουν στη σταθερότητα, την ασφάλεια και την ενεργειακή αποδοτικότητα του module. Ο κατασκευαστής αναφέρεται σε διάταξη όπου βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα CN3791, κατάλληλο για φόρτιση μπαταριών λιθίου 3.7 V από φωτοβολταϊκά πάνελ 6–24 V. Η χρήση του αναφερόμενου υποσυστήματος είναι σημαντική σε εφαρμογές IoT όπου τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκή πηγή, αφού λειτουργεί σαν ενδιάμεσος κρίκος ανάμεσα στο πάνελ, την μπαταρία και το φορτίο. Στην πράξη το SPM έχει αρμοδιότητα να προσαρμόζει και να σταθεροποιεί την ενέργεια που λαμβάνεται από το πάνελ, να φορτίζει με ασφαλή τρόπο την μπαταρία και να παρέχει στο υπόλοιπο σύστημα τάση κατάλληλη για τη λειτουργία του. Η παρουσία τέτοιας διάταξης είναι παρόμοια με τη βιβλιογραφία όπου είναι σχετική με μικρής κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα παρακολούθησης, όπου η σωστή διαχείριση ενέργειας μεταξύ φωτοβολταϊκής πηγής, στοιχείου αποθήκευσης και ηλεκτρονικού φορτίου αποτελεί βασικό τμήμα της αρχιτεκτονικής [2], [5], [6].

Σαν αποθηκευτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε μπαταρία XTAR 14500 Li-ion ονομαστικής τάσης 3.7V και χωρητικότητας 800 mah. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, η μπαταρία έχει διαστάσεις $\phi 14.3 \pm 0.2 \text{ mm} \times 50.5 \pm 0.5 \text{ mm}$, καθαρό βάρος 19 g και διαθέτει εσωτερικό κύκλωμα προστασίας που αποτρέπει τη λειτουργία εκτός του εύρους περίπου 2.5–4.25 V. Λόγω του μικρού μεγέθους, και του χαμηλού κόστους της μπαταρίας η συγκεκριμένη επιλογή είναι κατάλληλη για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης αφού διαθέτει στοιχεία που είναι πολύ χρήσιμα σε ενσωματωμένο σύστημα παρακολούθησης όπου πρέπει να παραμένει λειτουργικό το σύστημα ακόμα και όταν η διαθέσιμη ηλιακή ισχύς μεταβάλλεται.

Η συνεργασία μεταξύ του φωτοβολταϊκού πάνελ, του SPM, και της μπαταρίας είναι καθοριστική, αφού το κάθε ένα από αυτά, διαδραματίζει διαφορετικό ρόλο. Το πάνελ παράγει την ενέργεια όταν υπάρχει φυσικά διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, το module διαχείρισης ελέγχει τη μεταφορά αυτής της ενέργειας προς την μπαταρία και το φορτίο, ενώ η μπαταρία λειτουργεί σαν ένας προσωρινός αποθηκευτικός χώρος, εξασφαλίζοντας τη συνεχή λειτουργία του συστήματος ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της παραγωγής [5] [6] [11]. Με τον τρόπο αυτό ο μικροελεγκτής και οι αισθητήρες μπορούν να συνεχίζουν να τροφοδοτούνται όχι μόνο σε περιόδους μειωμένης ηλιοφάνειας ή παροδικής σκίασης, αλλά και το βράδυ όπου ο μικροελεγκτής καλείται κάθε μια ώρα να ξυπνήσει από deep sleep, και να δώσει σήμα με το API request. Από λειτουργική άποψη, η ύπαρξη του συγκεκριμένου

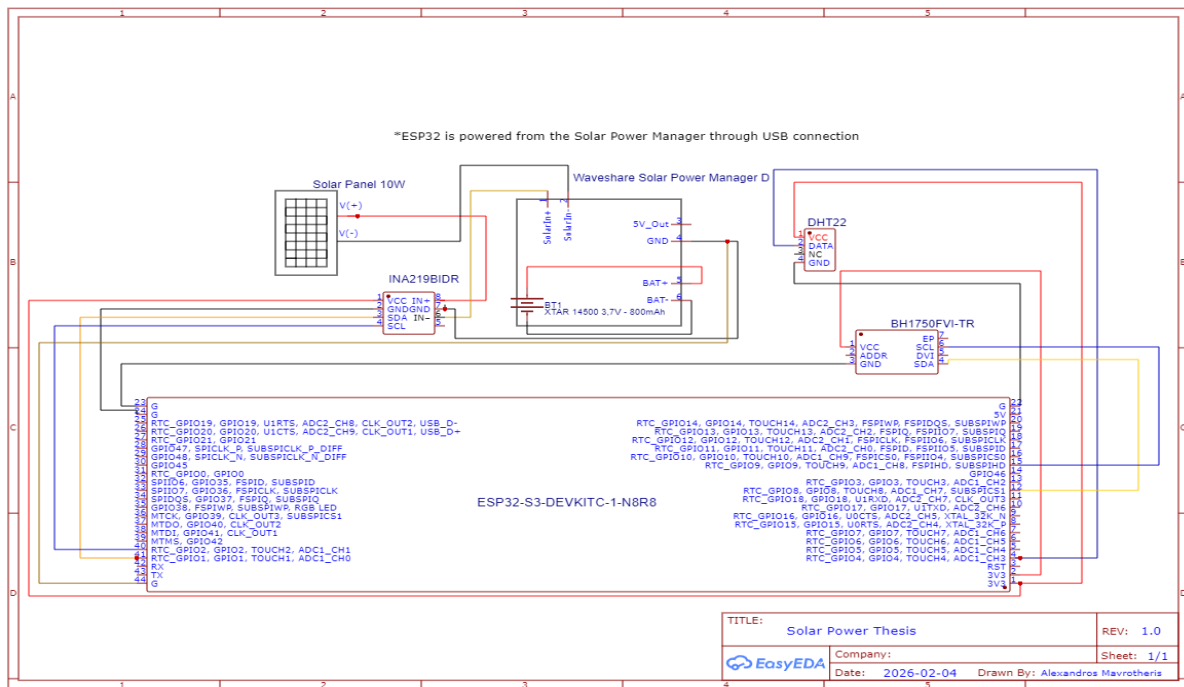
υποσυστήματος διαχείρισης και αποθήκευσης ενέργειας δεν αποσκοπεί στην τροφοδοσία του συστήματος αλλά και στην ποιότητα των μετρήσεων, καθώς ένα σύστημα όπου τροφοδοτείται απευθείας και μόνο από το πάνελ χωρίς κάποια ενδιάμεση εξομάλυνση μπορεί να παρουσιάσει διακοπές, αστάθεια τάσης ή γενικά μη ομαλή λειτουργία όταν οι συνθήκες φωτισμού μεταβάλλονται. Αντίθετα με την παρουσία της μπαταρίας και του κυκλώματος διαχείρισης, μειώνονται οι κίνδυνοι αστάθειας και βελτιώνεται συνεχώς η διαδικασία λήψης και αποστολής των δεδομένων. Ο συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων επιτρέπει τη μετατροπή της διάταξης από μια απλή πειραματική μέτρηση φωτοβολταϊκής τάσης και ρεύματος σε ένα ολοκληρωμένο και ενεργειακά αυτόνομο IoT σύστημα παρακολούθησης.



Εικόνα 11: Waveshare Solar Power Manager 6-24V& Xtar Battery 14500 800mAh 3,7V

3.7 Βασικό Σχηματικό Διάγραμμα

Το διάγραμμα συνδεσμολογίας του συστήματος παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούν όλα τα βασικά υποσυστήματα της πειραματικής διάταξης, δηλαδή το φωτοβολταϊκό πάνελ, το κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας, οι αισθητήρες μέτρησης, η επαναφορτιζόμενη μπαταρία και ο μικροελεγκτής ESP32-S3. Το διάγραμμα το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 12 σχεδιάστηκε από τον συγγραφέα στο περιβάλλον EasyEDA, με στόχο την αποτύπωση της αρχιτεκτονικής του κυκλώματος και την σαφή απεικόνιση των διασυνδέσεων μεταξύ των επιμέρους μονάδων.



Εικόνα 12: Διάγραμμα συνδεσμολογίας του συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκού πάνελ, σχεδιασμένο από τον συγγραφέα στο περιβάλλον EasyEDA.

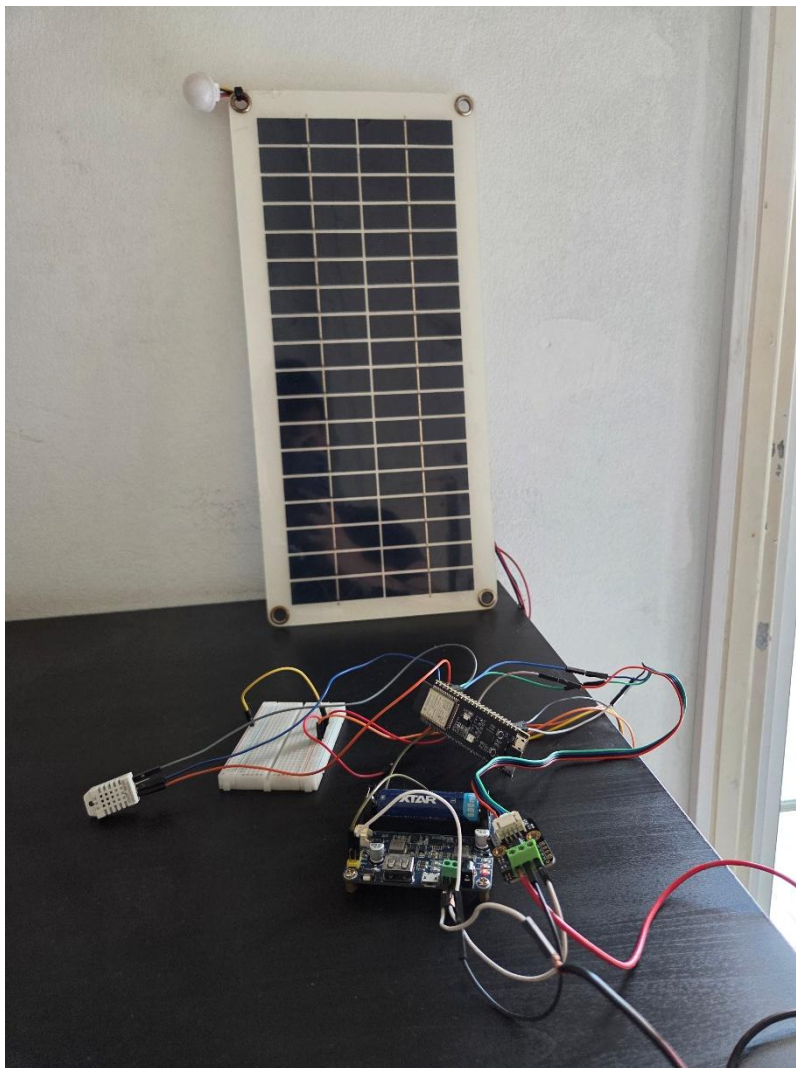
Στο πάνω τμήμα του κυκλώματος βρίσκεται το φωτοβολταϊκό πάνελ των 10W, το οποίο αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας όλου του συστήματος. Οι ακροδέκτες θετικής και αρνητικής τάσης του πάνελ συνδέονται στις αντίστοιχες εισόδους Solar in του Waveshare Solar Power Management Module, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας αλλά και η τροφοδότηση του μικροελεγκτή ESP32-S3 μέσω USB καλωδίου. Το κύκλωμα αυτό αναλαμβάνει την ρύθμιση της τροφοδοσίας, την φόρτιση της μπαταρίας και τη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου προς τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά μέρη του κυκλώματος. Στους ακροδέκτες BAT+ και BAT- του κυκλώματος διαχείρισης ενέργειας συνδέεται η μπαταρία XTAR 14500 3.7V/800mAh, η οποία χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης της ενέργειας. Οι αισθητήρες INA219 και BH1750 συνδέονται με τον ESP32 μέσω του διαύλου I²C, χρησιμοποιώντας κοινές γραμμές SDA και SCL, ενώ τροφοδοτούνται από τις γραμμές VCC και GND του κυκλώματος. Ο αισθητήρας DHT22 συνδέεται ξεχωριστά μέσω μιας ψηφιακής γραμμής δεδομένων, εκτός του διαύλου I²C, και τροφοδοτείται από τις αντίστοιχες γραμμές τάσης και γείωσης. Όλα τα επιμέρους τμήματα της συγκεκριμένης διάταξης έχουν σχεδιαστεί με κοινή γείωση, έτσι ώστε να υπάρχει ενιαίο δυναμικό αναφοράς μεταξύ του πάνελ, του SPM, του μικροελεγκτή ESP32-S3 και των αισθητήρων. Η χρήση κοινής γείωσης κρίνεται απαραίτητη, καθώς διασφαλίζει την ορθή λειτουργία των ψηφιακών και αναλογικών μετρήσεων, αλλά και την αξιόπιστη επικοινωνία των υπομονάδων και αποτρέπει προβλήματα ασυμβατότητας ή εσφαλμένης ανάγνωσης σημάτων. Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία μας επιτρέπει τη σταθερή τροφοδοσία του συστήματος και την ταυτόχρονη συλλογή ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών δεδομένων με σχετικά περιορισμένη πολυπλοκότητα καλωδίωσης. Για όλη την καλωδίωση χρησιμοποιήθηκαν βραχυκυκλωτές (jumpers) σε διάφορα μεγέθη έτσι ώστε να γίνει όσο το δυνατό πιο εύκολη και απλή η καλωδίωση. Η χρήση κοινού διαύλου I²C για δύο αισθητήρες μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων συνδέσεων, ενώ η ύπαρξη ξεχωριστού κυκλώματος διαχείρισης ενέργειας εξασφαλίζει την ορθή συνεργασία μεταξύ

φωτοβολταϊκού πάνελ, μπαταρίας και μικροελεγκτή. Από αρχιτεκτονική άποψη, το κύκλωμα μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικές ενότητες: την ενότητα τροφοδοσίας και διαχείρισης ενέργειας και την ενότητα μέτρησης και επεξεργασίας δεδομένων. Ο διαχωρισμός αυτός είναι σημαντικός, καθώς επιτρέπει να γίνει σαφές ότι το σύστημα δεν περιορίζεται μόνο στη λήψη μετρήσεων, αλλά ενσωματώνει και μηχανισμό ενεργειακής υποστήριξης, στοιχείο απαραίτητο για την αυτόνομη λειτουργία μιας IoT διάταξης. Η σχεδίαση του διαγράμματος σε περιβάλλον EasyEDA συνέβαλε στην οργανωμένη αποτύπωση όλων των διασυνδέσεων πριν την τελική υλοποίηση του κυκλώματος. Μέσα από το σχηματικό διάγραμμα κατέστη δυνατό να ελεγχθεί η ορθότητα των συνδέσεων, να επιβεβαιωθεί η τροφοδοσία κάθε υπομονάδας και να εντοπιστούν εγκαίρως πιθανά προβλήματα καλωδίωσης ή ασυμβατότητας μεταξύ των επιμέρους στοιχείων. Επομένως, το διάγραμμα δεν λειτουργεί μόνο ως γραφική αναπαράσταση του συστήματος, αλλά και ως βασικό εργαλείο τεκμηρίωσης και επαλήθευσης της τεχνικής υλοποίησης.

Κεφάλαιο 4ο: Υλοποίηση συστήματος

4.1 Στήσιμο hardware

Η υλοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με στόχο τη δημιουργία μιας λειτουργικής και αξιόπιστης πειραματικής διάταξης, η οποία θα επιτρέψει την καταγραφή των ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ [2][3]. Το σύνολο του κυκλώματος δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας σαν βασικό άξονα τον μικροελεγκτή ESP32, τους αισθητήρες αλλά και τα απαραίτητα υποστηρικτικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπου παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την σύνδεση των επιμέρους στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν καλώδια τύπου jumper, τα οποία επέτρεψαν την ευέλικτη και απλή σύνδεση μεταξύ των διαφορετικών μονάδων του κυκλώματος. Η χρήση καλωδίων διαφορετικού μεγέθους, απλοποίησε την τοποθέτηση των αισθητήρων και των επιμέρους κυκλωμάτων σε κατάλληλες θέσεις, ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή λειτουργία τους και η αποφυγή ηλεκτρικών παρεμβολών [7]. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια ανάπτυξης και δοκιμών του συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 13:



Εικόνα 13: Πειραματική διάταξη του συστήματος με φωτοβολταϊκό πάνελ, ESP32, Solar Power Manager, αισθητήρες και breadboard κατά τη φάση ανάπτυξης και ελέγχου του hardware.

Κατά την υλοποίηση του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε ένα μικρό breadboard, το οποίο δεν εγκαταστάθηκε στο κύκλωμα για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων αλλά κυρίως για τη διανομή της τάσης τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα τα διαθέσιμα pin τροφοδοσίας 3.3V του ESP32 δεν ήταν επαρκή για την απευθείας τροφοδότηση όλων των αισθητήρων. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκε μια κοινή γραμμή τροφοδοσίας στο breadboard, από την οποία μπορούσαν να τροφοδοτηθούν τα στοιχεία του κυκλώματος. Με αυτή τη μέθοδο διασφαλίστηκε επαρκής διανομή της τάσης 3.3V σε όλα τα απαραίτητα σημεία του κυκλώματος. Το κύκλωμα τοποθετήθηκε σε ένα προστατευτικό κουτί, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των αισθητήρων [8]. Συγκεκριμένα ο αισθητήρας φωτεινότητας τοποθετήθηκε σε εξωτερική θέση, πάνω στο φωτοβολταϊκό πάνελ, έτσι ώστε να εκτίθεται άμεσα με το φως και να καταγράφει με ακρίβεια την ένταση της φωτεινότητας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό πάνελ. Αντίστοιχα ο αισθητήρας θερμοκρασίας DHT22 τοποθετήθηκε επίσης έξω από το κουτί, καθώς η μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας χρειάζεται άμεση επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα για την αποφυγή σφαλμάτων που ενδέχεται να προκύψουν από τη θερμότητα που παράγουν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του κυκλώματος [8]. Τα καλώδια όπου συνδέουν το φωτοβολταϊκό πάνελ με το σύστημα καθώς και τα καλώδια των εξωτερικών αισθητήρων οδηγούνται από το εξωτερικό περιβάλλον προς το εσωτερικό του κουτιού, όπου βρίσκονται όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ένας συνδυασμός προστασίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ταυτόχρονα σωστής έκθεσης των αισθητήρων στις ρεαλιστικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το συγκεκριμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα επιτρέπει την ορθή λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες μέτρησης ενώ παράλληλα διατηρεί τη δομή του κυκλώματος σχετικά απλή και ευέλικτη για πειραματική χρήση.

4.2 Σύνδεση αισθητήρων

Η σύνδεση των αισθητήρων με τον μικροελεγκτή ESP32 πραγματοποιήθηκε με κύριο γνώμονα την αξιόπιστη συλλογή των απαραίτητων ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών δεδομένων που σχετίζονται με την λειτουργία του πάνελ. Για την επικοινωνία των συσκευών αξιοποιήθηκαν τόσο ψηφιακές γραμμές δεδομένων όσο και διάλογοι επικοινωνίας τύπου I²C, οι οποίοι επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ πολλαπλών συσκευών μέσω κοινών γραμμών επικοινωνίας [7]. Κάθε αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε στο κύκλωμα συνδέθηκε στον ESP32 σύμφωνα με της απαιτήσεις επικοινωνίας του. Για την διευκόλυνση της κατανόησης της συνδεσμολογίας, οι βασικές συνδέσεις των αισθητήρων και των επιμέρους μονάδων του κυκλώματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2:

Πίνακας 2: Συνδέσεις των αισθητήρων και των επιμέρους μονάδων με τον μικροελεγκτή ESP32

Υποσύστημα/αισθητήρας	Τύπος επικοινωνίας	Σύνδεση με ESP32	Ρόλος στο σύστημα
INA 219	I ² C	SDA – GPIO1, SCL – GPIO2	Μέτρηση τάσης, ρεύματος και υπολογισμός ισχύος του φωτοβολταϊκού πάνελ
INA219	Ηλεκτρική σύνδεση ισχύος	IN+ από την θετική γραμμή πάνελ, IN- προς την είσοδο IN+ του SPM	Μέτρηση ρεύματος που ρέει από το πάνελ προς το σύστημα
BH1750	I ² C δεύτερος διάυλος	SDA – GPIO 8 SCL – GPIO 9	Μέτρηση φωτεινότητας
DHT22	Ψηφιακή γραμμή δεδομένων	DATA – GPIO4	Μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας
Τροφοδοσία αισθητήρων	Τροφοδοσία	3.3V και GND	Κοινή τροφοδοσία και κοινή γείωση όλων των αισθητήρων
Solar Power Manager	Τροφοδοσία συστήματος	Σύνδεση με πάνελ, μπαταρία και έξοδο προς φορτίο/σύστημα.	Διαχείριση φόρτισης και παροχή ενέργειας στο σύστημα.

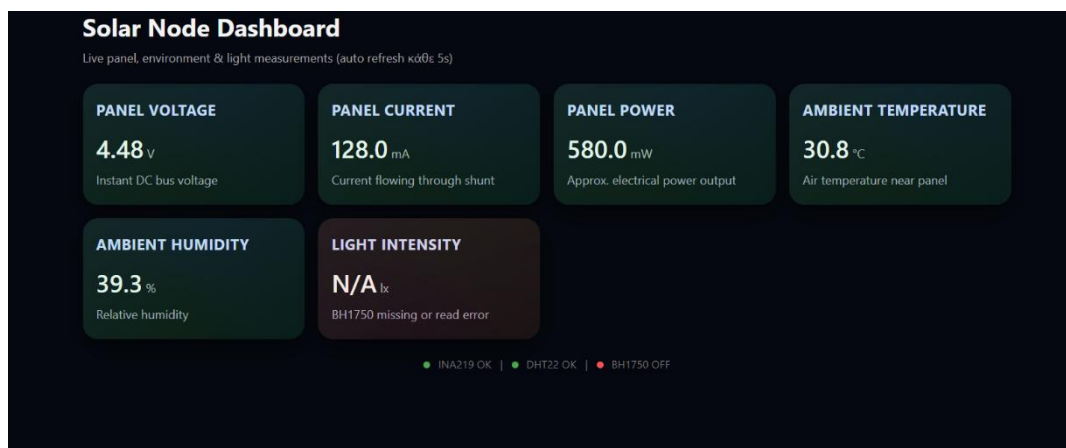
Ο αισθητήρας INA219, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πάνελ, συνδέθηκε στο βασικό διάλυο I²C του ESP32. Συγκεκριμένα, η γραμμή δεδομένων SDA συνδέθηκε στο pin GPIO1, ενώ η γραμμή ρολογιού SCL στο pin GPIO2 του μικροελεγκτή. Ο INA219 τοποθετήθηκε στη θετική γραμμή μεταξύ του φωτοβολταϊκού πάνελ και του Solar Power Manager, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης του ρεύματος που ρέει από το πάνελ προς το σύστημα. Συγκεκριμένα η θετική γραμμή μεταξύ του φωτοβολταϊκού πάνελ συνδέεται στο IN+ του INA219, ενώ το IN- του αισθητήρα συνδέεται στην είσοδο IN+ του SPM. Με αυτό το τρόπο ο αισθητήρας υποστηρίζει τον υπολογισμό του ρεύματος που παράγεται από το πάνελ καθώς και την αντίστοιχη ηλεκτρική ισχύ. Για τον αισθητήρα φωτεινότητας BH1750 χρησιμοποιήθηκε δεύτερος ανεξάρτητος διάυλος I²C, ώστε να διαχωριστεί η επικοινωνία από τον βασικό διάλυο που χρησιμοποιεί ο INA219. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η γραμμή SDA συνδέθηκε στο pin GPIO8 και η γραμμή SCL στο pin GPIO9 του ESP32. Η χρήση ξεχωριστού διαύλου επικοινωνίας μας επιτρέπει την ανεξάρτητη λειτουργία των συσκευών αλλά και την πιο εύκολη διαχείριση των αισθητήρων από το πρόγραμμα του μικροελεγκτή. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας DHT22 επικοινωνεί με τον ESP32 μέσω μίας μοναδικής ψηφιακής γραμμής δεδομένων [9]. Η γραμμή DATA του αισθητήρα συνδέθηκε στο pin GPIO4 του ESP32 και μέσω αυτής της γραμμής μεταφέρονται τα σχετικά δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας προς τον μικροελεγκτή σύμφωνα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας του αισθητήρα. Όλοι οι αισθητήρες του κυκλώματος τροφοδοτούνται με τάση 3.3V, η οποία παρέχεται από τον μικροελεγκτή. Για την ορθή λειτουργία όλων των ηλεκτρονικών μονάδων χρησιμοποιείται κοινή γείωση (common

ground) μεταξύ όλων των συσκευών του συστήματος [1][7]. Με αυτή τη μέθοδο διασφαλίζεται ότι όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία έχουν το ίδιο σημείο αναφοράς τάσης, κάτι που είναι απαραίτητο για την ορθή λειτουργία των ψηφιακών συστημάτων και μετρήσεων. Στην διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος ακολουθήθηκε μια σταδιακή διαδικασία ελέγχου όλων των αισθητήρων. Αρχικά αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε ξεχωριστός κώδικας για κάθε αισθητήρα, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του και για να γίνει κατανοητός ο τρόπος επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή. Στην συνέχεια οι επιμέρους κώδικες ενοποιήθηκαν σε ένα ενιαίο πρόγραμμα το οποίο είναι υπεύθυνο για τη συλλογή όλων των μετρήσεων αλλά και τη μεταφορά των δεδομένων στο σύστημα αποθήκευσης και επεξεργασίας. Η διάταξη των συνδέσεων παρουσιάζεται συνοπτικά στο διάγραμμα συνδεσμολογίας του προηγούμενου κεφαλαίου όπου απεικονίζεται η συνολική αρχιτεκτονική του κυκλώματος και όλη η διασύνδεση.

4.3 Web Interface

4.3.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος παρακολούθησης

Σε αρχικό στάδιο, πριν από την ανάπτυξη της τελικής διαδικτυακής αρχιτεκτονικής, πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό δοκιμαστικό στάδιο στο οποίο η απεικόνιση των μετρήσεων γινόταν τοπικά από τον ίδιο τον μικροελεγκτή ESP32. Στο στάδιο αυτό δημιουργήθηκε μια απλή web διεπαφή, η οποία εκτελούνταν στον ESP32 και επέτρεπε την προβολή βασικών τιμών, όπως τάση, ρεύμα, ισχύς, θερμοκρασία, υγρασία και φωτεινότητα, χωρίς τη χρήση εξωτερικού server. Η αρχική αυτή υλοποίηση παρουσιάζεται στην Εικόνα 14 και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την επιβεβαίωση ότι οι μετρήσεις μπορούν να εμφανίζονται σε πραγματικό χρόνο σε μορφή κατανοητή για τον χρήστη.



Εικόνα 14: Αρχική δοκιμαστική διαδικτυακή διεπαφή που εκτελούνταν τοπικά από τον ESP32 για την απεικόνιση των μετρήσεων του συστήματος.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία, στηρίζεται σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση Internet of Things (IoT), όπου οι συσκευές μέτρησης, μικροελεγκτές, διαδικτυακές υπηρεσίες και εφαρμογές οπτικοποίησης συνεργάζονται για τη συλλογή, την αποθήκευση και την ανάλυση των δεδομένων από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Ο στόχος της αρχιτεκτονικής είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μικρής κλίμακας, το οποίο επιτρέπει την καταγραφή αλλά και την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοσή του. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται από ένα σύνολο αισθητήρων όπου είναι συνδεδεμένοι με τον μικροελεγκτή ESP32S3. Οι αισθητήρες όπου χρησιμοποιήθηκαν επιτρέπουν ταυτόχρονα την

παρακολούθηση των ηλεκτρικών παραμέτρων ρου πάνελ και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επηρεάζουν την λειτουργία του.

Ο μικροελεγκτής ESP32 λειτουργεί σαν κεντρική μονάδα συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων. Μέσω του κατάλληλου λογισμικού όπου χρησιμοποιείται, ο ESP32 διαβάζει περιοδικά τις μετρήσεις των αισθητήρων και δημιουργεί πακέτα δεδομένων τα οποία αποστέλλονται μέσω ασύρματης σύνδεσης Wi-Fi προς έναν διαδικτυακό εξυπηρετητή. Η αποστολή των δεδομένων εκτελείται μέσω HTTP αιτημάτων προς ένα API που έχει αναπτυχθεί ειδικά για τη παρούσα εφαρμογή. Ο server της εφαρμογής έχει υλοποιηθεί με την χρήση της πλατφόρμας Node.js η οποία επιτρέπει τη δημιουργία διαδικτυακών υπηρεσιών και API για την λήψη αλλά και την επεξεργασία των δεδομένων σε ζωντανό χρόνο. Ο server φιλοξενείται σε περιβάλλον cloud μέσω τις υπηρεσίας Render, που εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία του συστήματος και την άμεση πρόσβαση σε αυτό από οποιοδήποτε σημείο μέσω διαδικτύου. Με αυτό το τρόπο ο ESP32 στέλνει δεδομένα από το φωτοβολταϊκό σύστημα προς τον εξυπηρετητή χωρίς να απαιτείται τοπική υποδομή φιλοξενίας.

```

89  app.post("/api/data", async (req, res) => {
90    try {
91      const key = req.headers["x-ingest-key"];
92      if (key !== INGEST_KEY) {
93        return res.status(401).json({ error: "unauthorized" });
94      }
95
96      const body = req.body || {};
97      const deviceId = (body.deviceId || "esp32-1").toString();
98      const now = Date.now();
99
100     const lastSnap = await db
101       .ref(`readings/${deviceId}`)
102       .limitToLast(1)
103       .once("value");
104
105     const lastData = lastSnap.val() ? Object.values(lastSnap.val())[0] : null;

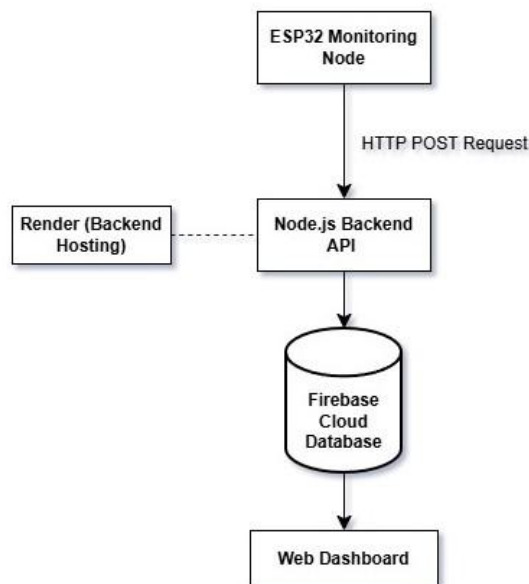
```

Εικόνα 15: Απόσπασμα του endpoint /api/data, μέσω του οποίου ο Node.js server λαμβάνει τις μετρήσεις από τον ESP32.

Το συγκεκριμένο endpoint αποτελεί το βασικό σημείο εισόδου των δεδομένων στο σύστημα. Μέσω του ελέγχου x-ingest-key περιορίζεται η αποστολή δεδομένων μόνο από εξουσιοδοτημένη συσκευή, ενώ το deviceId επιτρέπει την οργάνωση των μετρήσεων ανά συσκευή.

Μετά την λήψη των δεδομένων, ο server επεξεργάζεται τα δεδομένα και τα αποθηκεύει σε διαδικτυακή βάση δεδομένων. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων firebase, όπου παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης και διαχείρισης των δεδομένων σε περιβάλλον cloud. Με αυτό το τρόπο διασφαλίζεται η ασφαλής αποθήκευση των μετρήσεων και η δυνατότητα πρόσβασης σε αυτές από την εφαρμογή οπτικοποίησης. Τα δεδομένα τα οποία αποθηκεύονται στη βάση χρησιμοποιούνται από μια διαδικτυακή διεπαφή χρήστη (Web dashboard), η οποία έχει δημιουργηθεί για την παρουσίαση και την άμεση πρόσβαση των μετρήσεων του συστήματος. Μέσω του dashboard ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει σε πραγματικό χρόνο τις τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος του φωτοβολταϊκού πάνελ. Επιπλέον το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε υπολογιστικά φύλλα μέσω της υπηρεσίας Google Sheets σε πραγματικό χρόνο. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός επιπλέον αντιγράφου των μετρήσεων, καθώς και η δυνατότητα

περαιτέρω επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων εκτός της διαδικτυακής εφαρμογής. Η αποθήκευση σε εξωτερική υπηρεσία λειτουργεί και σαν μηχανισμός εφεδρικής αποθήκευσης των δεδομένων. Κατά την ανάπτυξη του λογισμικού του οποίου αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Github για τον έλεγχο των εκδόσεων και την διαχείριση του κώδικα. Μέσω του Github οργανώθηκαν οι διαφορετικές εκδόσεις του λογισμικού του ESP32, του backend server και της διαδικτυακής εφαρμογής, επιτρέποντας την παρακολούθηση των αλλαγών στον κώδικα και τη διατήρηση αντιγράφων ασφαλείας κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του έργου. Συνολικά, η αρχιτεκτονική του συστήματος συνδυάζει σύγχρονες τεχνολογίες ενσωματωμένων συστημάτων, ασύρματης επικοινωνίας και υποδομών cloud, δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον συλλογής και ανάλυσης δεδομένων για φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ και την αξιολόγηση της απόδοσης του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος παρακολούθησης φωτοβολταϊκού πάνελ με ESP32.

4.3.2 Περιγραφή του Solar Dashboard

Η διαδικτυακή διεπαφή χρήστη (web dashboard) του συστήματος αναπτύχθηκε με σκοπό την οπτικοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και την εύκολη παρακολούθηση της λειτουργίας του σε πραγματικό χρόνο. Για την ανάπτυξη του frontend χρησιμοποιήθηκαν τεχνολογίες ανάπτυξης ιστοσελίδων, όπως HTML για τη δομή της σελίδας, CSS για τη μορφοποίηση και την εμφάνιση των στοιχείων και JavaScript για την υλοποίηση της δυναμικής λειτουργίας και της επικοινωνίας με τον backend server.

Το dashboard επικοινωνεί με τον backend server μέσω του API που έχει υλοποιηθεί στην πλατφόρμα Node.js. Ο server παρέχει τα δεδομένα που αποστέλλονται από τον μικροελεγκτή ESP32 και έχουν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό η διεπαφή μπορεί να εμφανίζει τις πιο πρόσφατες μετρήσεις του συστήματος καθώς και ιστορικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί κατά τη λειτουργία του.

Κεφάλαιο 4

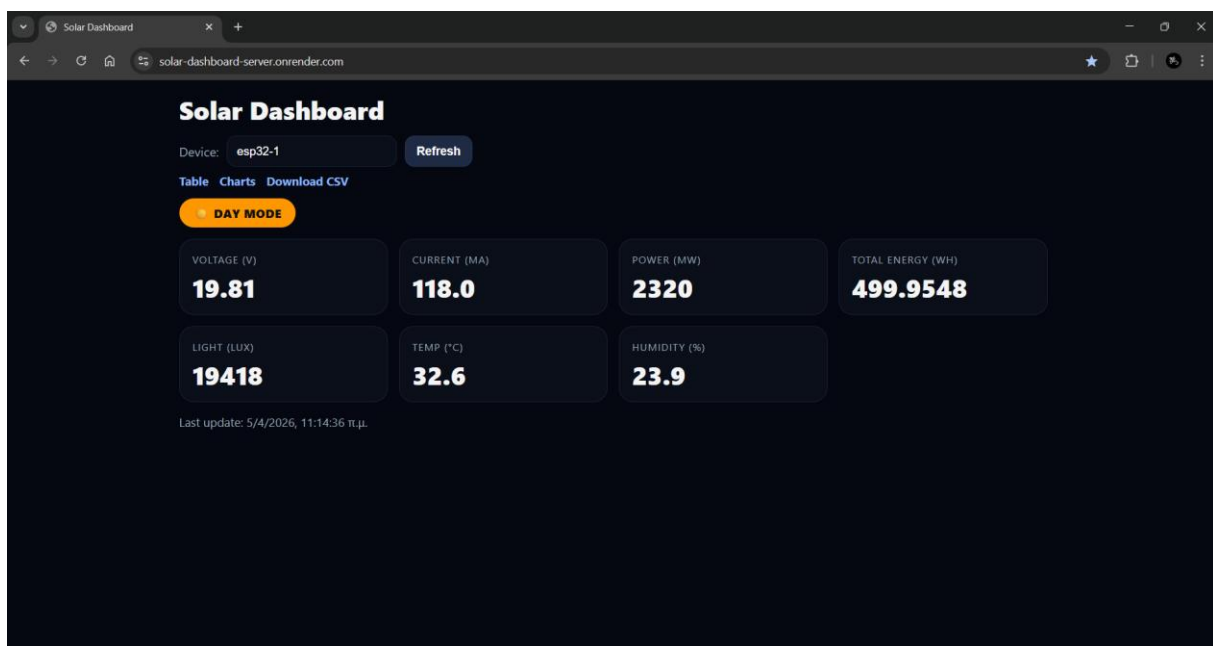
Η αρχική σελίδα του dashboard παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις βασικές μετρήσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος. Συγκεκριμένα εμφανίζονται οι τιμές της τάσης (Voltage), του ρεύματος (Current) και της ηλεκτρικής ισχύος (Power) που παράγει το φωτοβολταϊκό πάνελ, όπως αυτές μετρούνται από τον αισθητήρα INA219. Παράλληλα εμφανίζεται και η συνολική παραγόμενη ενέργεια (Total Energy), η οποία υπολογίζεται από το σύστημα με βάση τα δεδομένα ισχύος που καταγράφονται με την πάροδο του χρόνου.

Επιπλέον, το dashboard παρουσιάζει τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν την ένταση φωτισμού (Light) που μετράτε από τον αισθητήρα BH1750, καθώς και τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος που μετρείται από τον αισθητήρα DHT22.

Η διεπαφή παρέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, όπως η ένδειξη λειτουργίας ημέρας ή νύχτας (Day/Night Mode). Η λειτουργία αυτή βασίζεται σε αλγόριθμο που εκτελείται στον μικροελεγκτή ESP32 και λαμβάνει υπόψη την ένταση φωτεινότητας που μετρείται από τον αισθητήρα BH1750 προκειμένου να προσαρμόζει τη συχνότητα αποστολής των δεδομένων και να μειώνει την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στη συνέχεια, το dashboard λαμβάνει την τελευταία καταγραφή από το endpoint /api/last και εμφανίζει την αντίστοιχη ένδειξη λειτουργίας, ώστε ο χρήστης να γνωρίζει αν το σύστημα βρίσκεται σε Day Mode ή Night Mode.

Στο επάνω μέρος της εφαρμογής υπάρχει επίσης δυνατότητα επιλογής της συσκευής από την οποία προέρχονται τα δεδομένα, καθώς και κουμπί ανανέωσης για την άμεση ενημέρωση των μετρήσεων. Επιπλέον, παρέχονται επιλογές για την εμφάνιση των δεδομένων σε μορφή πίνακα ή γραφημάτων, καθώς και δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε αρχείο CSV για περαιτέρω ανάλυση.

Η σχεδίαση του dashboard έχει πραγματοποιηθεί με στόχο την απλή και άμεση κατανόηση της κατάστασης λειτουργίας του συστήματος. Οι βασικές μετρήσεις εμφανίζονται σε μορφή καρτών, ώστε ο χρήστης να μπορεί να αντιλαμβάνεται γρήγορα τις σημαντικότερες παραμέτρους της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ.



Εικόνα 17: Διαδικτυακή διεπαφή παρακολούθησης (Solar Dashboard) για την απεικόνιση των μετρήσεων του φωτοβολταϊκού συστήματος.

4.3.3 Λειτουργίες και δυνατότητες της εφαρμογής

Η διαδικτυακή εφαρμογή παρακολούθησης του φωτοβολταϊκού συστήματος παρέχει στον χρήστη μια σειρά από λειτουργίες που επιτρέπουν την εύκολη πρόσβαση, ανάλυση και εξαγωγή των δεδομένων που συλλέγονται από το σύστημα. Μέσω του web dashboard ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί όχι μόνο τις τρέχουσες μετρήσεις όσο και το ιστορικό των δεδομένων που έχουν καταγραφεί από το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Μία από τις βασικές λειτουργίες της εφαρμογής είναι η προβολή των καταγεγραμμένων δεδομένων σε μορφή πίνακα (Table view). Στη συγκεκριμένη σελίδα εμφανίζονται όλες οι μετρήσεις που έχουν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων της χρονικής στιγμής καταγραφής (timestamp), της τάσης του πάνελ, του ρεύματος, της παραγόμενης ισχύος, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της έντασης φωτεινότητας. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει τον αριθμό των εγγραφών που θα εμφανιστούν στον πίνακα μέσω ενός πεδίου επιλογής, επιτρέποντας την εύκολη φόρτωση των πιο πρόσφατων ή μεγαλύτερου πλήθους δεδομένων. Επίσης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει της ημερομηνίες όπου επιθυμεί να δει της μετρήσεις για πιο στενευμένο έλεγχο των μετρήσεων. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την αναλυτική εξέταση των μετρήσεων του συστήματος και τη σύγκριση των τιμών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής των ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Time	Voltage	Current	Power	Tem
3/28/2026, 12:26:57 PM	5.02	348	1760	28.9
3/28/2026, 12:26:23 PM	5.08	344	1740	28.1
3/28/2026, 12:25:44 PM	4.996	329	1640	28.4
3/28/2026, 12:25:10 PM	5.064	329	1680	29.8
3/28/2026, 12:24:36 PM	5.044	328	1680	30.5
3/28/2026, 12:24:03 PM	5.04	304	1540	0
3/28/2026, 12:23:29 PM	4.932	305	1500	0
3/28/2026, 12:22:54 PM	4.992	307	1540	0
3/28/2026, 12:22:10 PM	4.924	304	1500	24.2
3/28/2026, 12:21:36 PM	4.604	140	660	23.8
3/28/2026, 12:21:02 PM	4.412	57	260	23.9
3/28/2026, 12:19:48 PM	19.792	163	3240	24.5
3/28/2026, 12:19:05 PM	19.4	193	3760	24.3
3/28/2026, 12:18:31 PM	5.132	328	1680	23.8
3/28/2026, 12:17:57 PM	5.156	359	1800	23
3/28/2026, 12:17:21 PM	5.368	457	2460	22.1

Εικόνα 18: Προβολή της σελίδας πίνακα μετρήσεων (Table) της διαδικτυακής εφαρμογής από κινητό τηλέφωνο

Επιπλέον, η εφαρμογή παρέχει δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε αρχείο μορφής CSV (Comma Separated Values). Η λειτουργία αυτή επιτρέπει στον χρήστη να κατεβάσει τις μετρήσεις που εμφανίζονται στον πίνακα και να τις επεξεργαστεί περαιτέρω σε εργαλεία ανάλυσης δεδομένων, όπως υπολογιστικά φύλλα ή εφαρμογές επεξεργασίας δεδομένων. Η εξαγωγή σε μορφή CSV αποτελεί μια πρακτική λύση για την αποθήκευση αντιγράφων των δεδομένων και για την πραγματοποίηση περαιτέρω στατιστικής ανάλυσης εκτός της διαδικτυακής εφαρμογής.

Μια ακόμη σημαντική λειτουργία της εφαρμογής είναι η οπτικοποίηση των δεδομένων μέσω γραφημάτων (Charts view). Στη συγκεκριμένη σελίδα παρουσιάζονται γραφήματα που απεικονίζουν τη μεταβολή των μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου. Κάθε φυσική παράμετρος του συστήματος εμφανίζεται σε ξεχωριστό γράφημα, όπως για παράδειγμα το ρεύμα, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ένταση φωτεινότητας. Τα γραφήματα αυτά επιτρέπουν στον χρήστη να εντοπίσει εύκολα τάσεις και μεταβολές στις μετρήσεις, καθώς και να αξιολογήσει τη συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.



Εικόνα 19: Σελίδα Charts της διαδικτυακής εφαρμογής παρακολούθησης, στην οποία προβάλλονται γραφήματα των μετρήσεων του φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως η ισχύς και η τάση, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Η χρήση γραφικών παραστάσεων διευκολύνει σημαντικά την κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, καθώς η εξέλιξη των μετρήσεων μπορεί να παρατηρηθεί με οπτικό τρόπο. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης μπορεί να αναγνωρίσει μεταβολές που σχετίζονται με αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία, στις περιβαλλοντικές συνθήκες ή στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Συνολικά, το web dashboard αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο παρακολούθησης και ανάλυσης των δεδομένων του φωτοβολταϊκού συστήματος. Μέσω των λειτουργιών προβολής δεδομένων, εξαγωγής αρχείων και οπτικοποίησης μέσω γραφημάτων, ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει πλήρη εικόνα της λειτουργίας του συστήματος και να αξιολογήσει την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

4.4 Κώδικας ESP32 για συλλογή και αποστολή δεδομένων

Το λογισμικό του μικροελεγκτή ESP32 αποτελεί το βασικό πυρήνα λειτουργίας του συστήματος, αφού είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των μετρήσεων από τους αισθητήρες και την αποστολή των σχετικών δεδομένων προς τον κεντρικό server. Ο κώδικας υλοποιήθηκε στο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE και αξιοποιεί τις βιβλιοθήκες των αντίστοιχων αισθητήρων για την ανάγνωση των φυσικών μεγεθών. Στο σύστημα χρησιμοποιούνται οι τρεις βασικοί αισθητήρες. Ο αισθητήρας INA219 καταγράφει την μέτρηση τάσης, ρεύματος και την ηλεκτρική ισχύ του φωτοβολταϊκού πάνελ. Ο αισθητήρας DHT22 καταγράφει τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος, ενώ ο αισθητήρας BH1750 μετρά την ένταση της φωτεινότητας σε lux. Η μέτρηση της φωτεινότητας αξιοποιείται στο σύστημα και για τον καθορισμό της λειτουργικής κατάστασης του, δηλαδή εάν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ημέρας ή νύχτας.

Κατά την εκκίνηση της συσκευής πραγματοποιείται αρχικά η σύνδεση του ESP32 στο διαθέσιμο δίκτυο Wi-Fi. Στην συνέχεια εκτελείται η διαδικασία ανάγνωσης των αισθητήρων. Η πρώτη μέτρηση που γίνεται είναι η ένταση της φωτεινότητας από τον αισθητήρα BH1750, καθώς αυτή η τιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κατάστασης της λειτουργίας του συστήματος. Με βάση αυτή την τιμή καθορίζεται εάν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ημέρας ή νύχτας (day/night mode). Αφού καθοριστεί η κατάσταση λειτουργίας πραγματοποιούνται οι μετρήσεις από τους υπόλοιπους αισθητήρες του συστήματος. Για την αποφυγή συνεχών εναλλαγών μεταξύ των δύο καταστάσεων χρησιμοποιείται

Κεφάλαιο 4

μηχανισμός υστέρησης (hysteresis). Συγκεκριμένα, όταν η φωτεινότητα υπερβεί την τιμή $L_{day} = 15 \text{ lux}$, το σύστημα μεταβαίνει ή παραμένει σε λειτουργία ημέρας. Αντίστοιχα, όταν η φωτεινότητα πέσει κάτω από την τιμή $L_{night} = 8 \text{ lux}$, το σύστημα μεταβαίνει ή παραμένει σε λειτουργία νύχτας. Για τιμές φωτεινότητας μεταξύ των δύο αυτών ορίων, διατηρείται η προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα κατώφλια φωτεινότητας που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του μηχανισμού υστέρησης.

Day mode, $L > 15 \text{ lux}$

Night mode, $L < 8 \text{ lux}$

Keep previous state, $8 \text{ lux} \leq L \leq 15 \text{ lux}$

Όπου L είναι η τιμή της φωτεινότητας που μετράται από τον αισθητήρα BH1750, εκφρασμένη σε lux. Η κατάσταση λειτουργίας αποθηκεύεται σε μνήμη RTC του ESP32 ώστε να διατηρείται ακόμη και μετά την ενεργοποίηση της λειτουργίας deep sleep. Αφού καθοριστεί η κατάσταση λειτουργίας, πραγματοποιούνται όλες οι μετρήσεις από τους αισθητήρες του συστήματος. Οι μετρήσεις αυτές συνδυάζονται μεταξύ τους έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα πλήρες σύνολο δεδομένων για τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στην συνέχεια τα δεδομένα μετατρέπονται σε μορφή JSON και αποστέλλονται μέσω HTTP POST αιτήματος στον server της εφαρμογής. Ο server λαμβάνει τις μετρήσεις και τις επεξεργάζεται κατάλληλα, ενώ η διαδικασία αποθήκευσης των δεδομένων περιγράφεται πλήρως σε επόμενο υποκεφάλαιο. Για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του ESP32, αξιοποιείται η λειτουργία deep sleep του ESP32. Μετά την αποστολή των δεδομένων ο μικροελεγκτής εισέρχεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και ενεργοποιείται ξανά μετά από προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του συστήματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διαφορετικές συχνότητες λήψης μετρήσεων. Στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης οι μετρήσεις των αισθητήρων ελέγχθηκαν τοπικά μέσω του Serial Monitor του Arduino IDE. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 ο ESP32 εμφάνιζε τοπικά τις τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος από τον αισθητήρα INA219, επιτρέποντας τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας πριν από την αποστολή των δεδομένων στο διαδικτυακό σύστημα.

```
Μέτρηση από INA219
Τάση Panel: 4.51 V
Ρεύμα: 8.63 mA
Ισχύς: 38.92 mW
Shunt Voltage: 0.86 mV
⚡ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: CHARGING (το panel τροφοδοτεί το κύκλωμα)

Μέτρηση από INA219
Τάση Panel: 4.51 V
Ρεύμα: 8.63 mA
Ισχύς: 38.91 mW
Shunt Voltage: 0.86 mV
⚡ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: CHARGING (το panel τροφοδοτεί το κύκλωμα)

Μέτρηση από INA219
Τάση Panel: 4.51 V
Ρεύμα: 8.51 mA
Ισχύς: 38.37 mW
Shunt Voltage: 0.85 mV
⚡ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ: CHARGING (το panel τροφοδοτεί το κύκλωμα)
```

Εικόνα 20: Έλεγχος μετρήσεων των αισθητήρων από το terminal στο Arduino IDE

Αρχικά οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν κάθε 15 δευτερόλεπτα τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας, προκειμένου να αξιολογηθεί η λειτουργία του συστήματος με υψηλή

χρονική ανάλυση. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η συνεχής λειτουργία με τόσο υψηλή συχνότητα μετρήσεων οδηγούσε σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου το φωτοβολταϊκό πάνελ δεν παράγει ενέργεια. Για τον λόγο αυτό υιοθετήθηκε διαφορετική στρατηγική δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ημέρας οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κάθε 1 λεπτό, ώστε να υπάρχει επαρκής ανάλυση των δεδομένων παραγωγής ενέργειας. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της νύχτας το χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων αυξάνεται σε περίπου μία ώρα αφού οι μετρήσεις την νύχτα είναι συνέχεια οι ίδιες και σχεδόν μηδενικές αφού το φωτοβολταϊκό πάνελ εκείνη την ώρα δεν παράγει κάτι και ο SPM τροφοδοτεί τον ESP32 με την ενέργεια που έχει η μπαταρία. Η προσέγγιση αυτή μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος και επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία του κατά τη διάρκεια της νύχτας χωρίς να εξαντλείται η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας. Ο πλήρης κώδικας του μικροελεγκτή ESP32 παρατίθεται στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας.

4.5 Αποθήκευση δεδομένων

Όπως παρουσιάστηκε και στην αρχιτεκτονική του συστήματος τα δεδομένα που συλλέγονται από τον μικροελεγκτή ESP32 αποστέλλονται στον Node.js server μέσω HTTP αιτημάτων. Έπειτα ο server αναλαμβάνει την αποθήκευση και τη διαχείριση των μετρήσεων χρησιμοποιώντας υπηρεσίες cloud. Η συνολική ροή των δεδομένων αρχίζει από τον μικροελεγκτή ESP32, ο οποίος αποστέλλει τις μετρήσεις των αισθητήρων προς τον server της εφαρμογής μέσω των HTTP αιτημάτων. Ο server που έχει υλοποιηθεί σε περιβάλλον Node.js λειτουργεί σαν ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ της συσκευής πεδίου και των υπηρεσιών αποθήκευσης και οπτικοποίησης. Για την δωρεάν φιλοξενία του backend χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Render όπου παρέχει cloud hosting για εφαρμογές Node.js. Με τον τρόπο αυτό ο server είναι συνεχώς διαθέσιμος στο διαδίκτυο και δέχεται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από τον ESP32 χωρίς να απαιτείται η τοπική εγκατάσταση ή διαρκής λειτουργία του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η χρήση του render ευκολύνει σημαντικά την απομακρυσμένη λειτουργία του συστήματος και την πρόσβαση στο API από διαφορετικές συσκευές. Η βασική αποθήκευση των δεδομένων πραγματοποιείται στην Firebase Realtime Database της Google. Η συγκεκριμένη υπηρεσία επιλέχθηκε για την έτοιμη cloud υποδομή, την δυνατότητα αποθήκευσης δομημένων δεδομένων και την άνετη διασύνδεση με διαδικτυακές εφαρμογές.

```

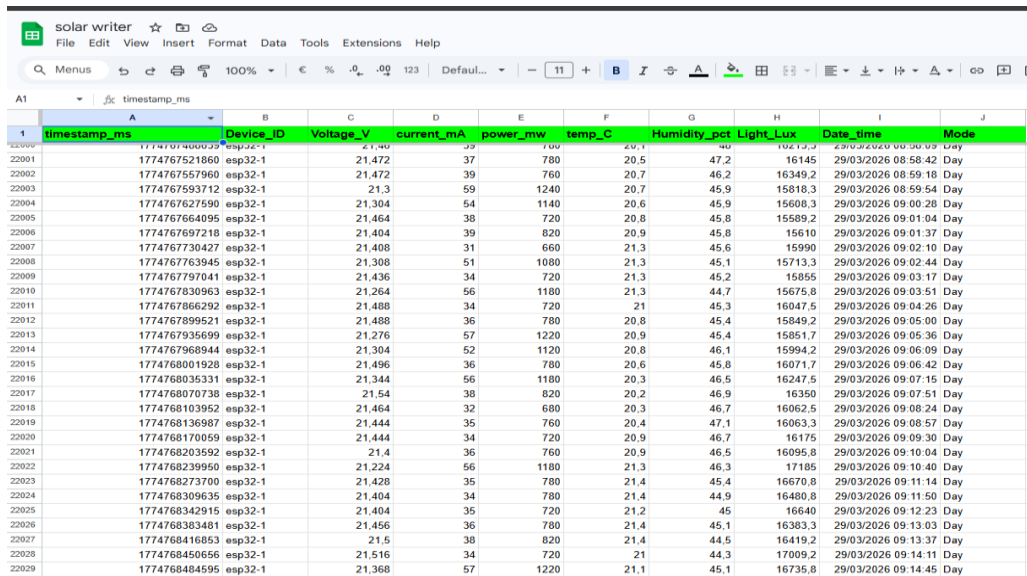
29 const serviceAccount = process.env.FIREBASE_SERVICE_ACCOUNT
30   ? JSON.parse(process.env.FIREBASE_SERVICE_ACCOUNT)
31   : require("./serviceAccountKey.json");
32
33 if (!admin.apps.length) {
34   admin.initializeApp({
35     credential: admin.credential.cert(serviceAccount),
36     databaseURL:
37       "https://panel-database-47f43-default-rtdb.europe-west1.firebaseio.app",
38   });
39 }

```

Εικόνα 21: Κώδικας αρχικοποίησης της σύνδεσης του server με την Firebase Realtime Database.

Κεφάλαιο 4

Κάθε εγγραφή που αποστέλλεται από το σύστημα περιλαμβάνει της ηλεκτρικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, όπως η τάση, το ρεύμα, η ισχύς, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η φωτεινότητα καθώς και η χρονική στιγμή καταγραφής της μέτρησης. Η χρήση της Firebase Realtime Database επιτρέπει την αποθήκευση και ανάκτηση των δεδομένων με τρόπο που είναι κατάλληλος για εφαρμογές παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο [17]. Το web dashboard ανακτά τις εγγραφές από το backend και τις παρουσιάζει στον χρήστη είτε ως αριθμητικές τιμές, είτε σε μορφή πίνακα, είτε με τη βοήθεια γραφημάτων.

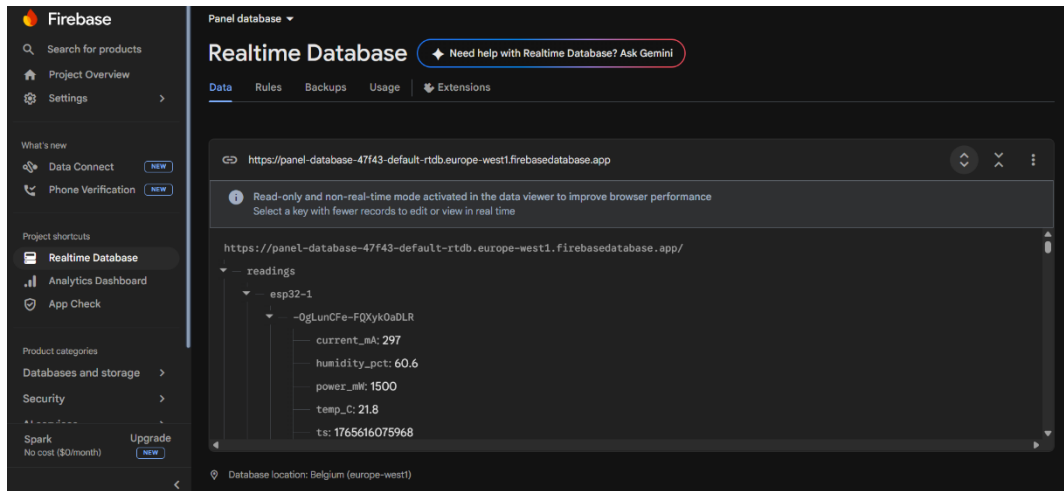


timestamp_ms	Device_ID	Voltage_V	current_mA	power_mw	temp_C	Humidity_pct	Light_Lux	Date_time	Mode
1774767400039	esp32-1	21,40	39	760	20,1	40	16213,3	29/03/2026 09:00:09	Day
1774767521860	esp32-1	21,472	37	780	20,5	47,2	16145	29/03/2026 08:56:42	Day
1774767579960	esp32-1	21,472	39	760	20,7	46,2	16349,2	29/03/2026 09:05:18	Day
1774767593712	esp32-1	21,3	59	1240	20,7	45,9	15818,3	29/03/2026 08:59:54	Day
1774767627590	esp32-1	21,304	54	1140	20,6	45,9	15608,3	29/03/2026 09:00:28	Day
1774767664095	esp32-1	21,464	38	720	20,8	45,8	15589,2	29/03/2026 09:01:04	Day
1774767697218	esp32-1	21,404	39	820	20,9	45,8	15610	29/03/2026 09:01:37	Day
1774767730427	esp32-1	21,408	31	660	21,3	45,6	15990	29/03/2026 09:02:10	Day
1774767763945	esp32-1	21,308	51	1080	21,3	45,1	15713,3	29/03/2026 09:02:44	Day
1774767797041	esp32-1	21,436	34	720	21,3	45,2	15855	29/03/2026 09:03:17	Day
1774767830963	esp32-1	21,264	56	1180	21,3	44,7	15675,8	29/03/2026 09:03:51	Day
1774767866292	esp32-1	21,488	34	720	21	45,3	16047,5	29/03/2026 09:04:26	Day
1774767899521	esp32-1	21,488	36	780	20,8	45,4	15849,2	29/03/2026 09:05:00	Day
1774767935699	esp32-1	21,276	57	1220	20,9	45,4	15851,7	29/03/2026 09:05:36	Day
1774767968944	esp32-1	21,304	52	1120	20,8	46,1	15994,2	29/03/2026 09:06:09	Day
1774768001928	esp32-1	21,496	36	780	20,6	45,8	16071,7	29/03/2026 09:06:42	Day
1774768035331	esp32-1	21,344	56	1180	20,3	46,5	16247,5	29/03/2026 09:07:15	Day
1774768070738	esp32-1	21,54	38	820	20,2	46,9	16350	29/03/2026 09:07:51	Day
1774768103952	esp32-1	21,464	32	680	20,3	46,7	16062,5	29/03/2026 09:08:24	Day
1774768136987	esp32-1	21,444	35	760	20,4	47,1	16063,3	29/03/2026 09:08:57	Day
1774768170059	esp32-1	21,444	34	720	20,9	46,7	16175	29/03/2026 09:09:30	Day
1774768203592	esp32-1	21,4	36	760	20,9	46,5	16095,8	29/03/2026 09:10:04	Day
1774768239950	esp32-1	21,224	56	1180	21,3	46,3	17185	29/03/2026 09:10:40	Day
1774768273700	esp32-1	21,428	35	780	21,4	45,4	16670,8	29/03/2026 09:11:14	Day
1774768309636	esp32-1	21,404	34	780	21,4	44,9	16480,8	29/03/2026 09:11:50	Day
1774768342915	esp32-1	21,404	35	720	21,2	45	16640	29/03/2026 09:12:23	Day
1774768383481	esp32-1	21,456	36	780	21,4	45,1	16383,3	29/03/2026 09:13:03	Day
1774768416853	esp32-1	21,5	38	820	21,4	44,5	16419,2	29/03/2026 09:13:37	Day
1774768450656	esp32-1	21,516	34	720	21	44,3	17009,2	29/03/2026 09:14:11	Day
1774768484595	esp32-1	21,368	57	1220	21,1	45,1	16735,8	29/03/2026 09:14:45	Day

Εικόνα 22: Καταγραφή των μετρήσεων του συστήματος (τάση, ρεύμα, ισχύς, θερμοκρασία, υγρασία και φωτεινότητα) σε φύλλο Google Sheets για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια ενιαία ροή δεδομένων από το επίπεδο των αισθητήρων μέχρι το επίπεδο της τελικής οπτικοποίησης. Εκτός από τη βασική αποθήκευση στο firebase, το σύστημα καταγράφει τα δεδομένα και σε Google sheets. Η δυνατότητα αυτή προστέθηκε για να παρέχεται ένα δεύτερο επίπεδο διατήρησης των εγγράφων προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία. Η καταγραφή των δεδομένων σε Google Sheets λειτουργεί πρακτικά σαν ένα συμπληρωματικό μέσο αποθήκευσης και διευκολύνει τη χρήση των δεδομένων σε μορφή πίνακα, ιδιαίτερα σε στάδια πειραματικής επεξεργασίας και δημιουργίας γραφημάτων.

Παράλληλα, η διαδικτυακή εφαρμογή παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής των καταγεγραμμένων δεδομένων σε μορφή αρχείου CSV, επιτρέποντας στον χρήστη να κατεβάζει το πλήθος εγγραφών που έχει επιλέξει και να τις επεξεργάζεται περαιτέρω εκτός της πλατφόρμας. Η δυνατότητα αυτή ενισχύει τη χρηστικότητα του συστήματος, καθώς τα δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο για άμεση παρακολούθηση όσο και για μεταγενέστερη ανάλυση. Συνολικά, η υποδομή αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων του συστήματος βασίζεται σε μια πολυεπίπεδη προσέγγιση. Ο Node.js server αναλαμβάνει την παραλαβή και διαχείριση των δεδομένων, το Render εξασφαλίζει τη διαδικτυακή διαθεσιμότητα του backend, η Firebase Realtime Database λειτουργεί ως βασική cloud βάση δεδομένων και το Google Sheets παρέχει ένα επιπλέον επίπεδο αποθήκευσης και εξαγωγής. Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση αυξάνει την αξιοπιστία, την ευελιξία και τη χρηστικότητα της συνολικής εφαρμογής.



Εικόνα 23: Αποθήκευση μετρήσεων αισθητήρων στη βάση δεδομένων Firebase Realtime Database.

4.6 Δοκιμές λειτουργίας

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης του συστήματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές λειτουργίας με στόχο την επιβεβαίωση της σωστής συνεργασίας όλων των επιμέρους υποσυστημάτων. Οι δοκιμές αυτές περιλάμβαναν τον έλεγχο της συλλογής δεδομένων από τους αισθητήρες, της μετάδοσης των δεδομένων μέσω του μικροελεγκτή ESP32, της αποθήκευσής τους στη βάση δεδομένων και της οπτικοποίησής τους στο web dashboard. Ο έλεγχος όλου του συστήματος από άκρη σε άκρη κρίνεται απαραίτητος για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος.

Αρχικά ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία του μικροελεγκτή ESP32 ως κεντρικής μονάδας συλλογής δεδομένων. Ο ESP32 λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες του συστήματος και τα επεξεργάζεται πριν την αποστολή τους στον εξυπηρετητή. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την επιβεβαίωση της σωστής μετάδοσης των δεδομένων μέσω της ασύρματης σύνδεσης Wi-Fi. Ο μικροελεγκτής αποστέλλει τις μετρήσεις στον εξυπηρετητή μέσω HTTP αιτημάτων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα μεταδίδονταν επιτυχώς χωρίς σημαντικές καθυστερήσεις ή απώλειες. Ακολούθησε ο έλεγχος της αποθήκευσης των δεδομένων στη βάση δεδομένων Firebase Realtime Database. Οι μετρήσεις καταγράφονταν κανονικά μαζί με τη χρονική σήμανση (timestamp), επιτρέποντας την αποθήκευση ιστορικών δεδομένων και την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Στη συνέχεια ελέγχθηκε η σωστή λειτουργία της διαδικτυακής εφαρμογής παρακολούθησης (web dashboard). Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων ανακτώνται από τον server και εμφανίζονται στον χρήστη μέσω γραφημάτων και πινάκων. Η εφαρμογή επιτρέπει την παρακολούθηση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την προβολή ιστορικών δεδομένων. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα εξαγωγής των μετρήσεων σε μορφή αρχείου CSV, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση.

Τέλος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία deep sleep του ESP32, η οποία μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας όταν το σύστημα δεν πραγματοποιεί μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το σύστημα μπορεί να λαμβάνει μετρήσεις σε μικρότερα χρονικά διαστήματα, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας το διάστημα μεταξύ των μετρήσεων αυξάνεται σημαντικά. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας και εξασφαλίζεται ότι το σύστημα μπορεί να συνεχίσει να

Κεφάλαιο 4

λειτουργεί χρησιμοποιώντας την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στη μπαταρία μέχρι την επόμενη περίοδο ηλιοφάνειας. Συνολικά, οι δοκιμές λειτουργίας έδειξαν ότι όλα τα επιμέρους τμήματα του συστήματος συνεργάζονται σωστά και ότι το σύστημα μπορεί να συλλέγει, να αποθηκεύει και να παρουσιάζει αξιόπιστα τις μετρήσεις που σχετίζονται με την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Κεφάλαιο 5ο: Πειραματική διαδικασία

5.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είχε ως κύριο στόχο τη συστηματική καταγραφή και παρακολούθηση της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πάνελ μικρής ισχύος υπό πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Το σύστημα περιλαμβάνει το φωτοβολταϊκό πάνελ, τον μικροελεγκτή ESP32-S3, τους επιμέρους αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών μεγεθών, καθώς και το απαραίτητο κύκλωμα τροφοδοσίας και διαχείρισης ενέργειας. Ο στόχος της διάταξης ήταν η καταγραφή αξιόπιστων δεδομένων που σχετίζονται με βασικές παραμέτρους, όπως η τάση, το ρεύμα, η παραγόμενη ισχύς, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ένταση φωτισμού, ώστε να καταστεί εφικτή η συνολική αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.

Η ανάπτυξη της πειραματικής διάταξης δεν υλοποιήθηκε εξ αρχής, ως μία ενιαία κατασκευή αλλά οργανώθηκε σε διακριτά στάδια ελέγχου και προοδευτικής ολοκλήρωσης. Συγκεκριμένα, στο αρχικό στάδιο πραγματοποιήθηκε αυτόνομος έλεγχος της λειτουργίας κάθε επιμέρους υποσυστήματος, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλα τα εξαρτήματα λειτουργούσαν ορθά πριν ενσωματωθούν στην τελική διάταξη. Η προσέγγιση αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς συνέβαλε στη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης σύνθετων σφαλμάτων κατά τη φάση της ολοκλήρωσης και διευκόλυνε τον πιο σαφή εντοπισμό πιθανών προβλημάτων σε επίπεδο αισθητήρων, τροφοδοσίας ή επικοινωνίας. Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της λειτουργίας του μικροελεγκτή ESP32-S3 ως βασικής μονάδας ελέγχου, δίνοντας έμφαση στην ορθή εκτέλεση του προγράμματος, στην επικοινωνία μέσω των αντίστοιχων διαύλων και στη δυνατότητα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ξεχωριστή δοκιμή κάθε αισθητήρα: ο INA219 ελέγχθηκε ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων τάσης και ρεύματος, ο BH1750 ως προς τη συμπεριφορά του σε μεταβολές της έντασης φωτισμού, ενώ ο DHT22 αξιολογήθηκε για τη καταγραφή θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Παράλληλα, εξετάστηκε και το κύκλωμα τροφοδοσίας, ώστε να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία και συνεργασία του φωτοβολταϊκού πάνελ με το σύστημα διαχείρισης ισχύος και τη μονάδα αποθήκευσης ενέργειας.

Μετά την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας όλων των επιμέρους στοιχείων, ακολούθησε το στάδιο της ενσωμάτωσής τους σε μία ενιαία πειραματική πλατφόρμα. Κατά τη φάση αυτή, πραγματοποιήθηκε η διασύνδεση όλων των υποσυστημάτων, ώστε ο ESP32-S3 να συλλέγει ταυτόχρονα δεδομένα από τους αισθητήρες, να τα επεξεργάζεται και να τα μεταδίδει για αποθήκευση και απεικόνιση. Η ολοκληρωμένη αυτή διάταξη λειτούργησε ως ένα ενιαίο σύστημα παρακολούθησης φωτοβολταϊκού πάνελ, ικανό να καταγράφει σε πραγματικό χρόνο δεδομένα τόσο για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πάνελ όσο και για τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν την απόδοσή του.

Η ανάπτυξη της διάταξης πραγματοποιήθηκε σταδιακά και όχι ως μία ενιαία κατασκευή. Αρχικά, κάθε επιμέρους υποσύστημα ελέγχθηκε ανεξάρτητα, ώστε να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία του πριν την τελική ενσωμάτωση. Η μεθοδολογία αυτή συνέβαλε στη μείωση πιθανών σφαλμάτων κατά τη φάση ολοκλήρωσης και διευκόλυνε τον εντοπισμό προβλημάτων σε επίπεδο μεμονωμένων εξαρτημάτων.

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην Κύπρο, μια περιοχή με υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας στο μεγαλύτερο μέρος του έτους, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τη μελέτη φωτοβολταϊκών εφαρμογών. Παρ' όλα αυτά, για την αποφυγή συμπερασμάτων που θα βασίζονταν μόνο σε ιδανικές συνθήκες, τα δεδομένα δεν περιορίστηκαν σε ηλιόλουστες ημέρες. Αντίθετα, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από διαφορετικές ημέρες στο χρονικό διάστημα Δεκεμβρίου–Απριλίου,

ώστε να καλύπτονται τόσο συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας όσο και περίοδοι μειωμένης ακτινοβολίας ή αυξημένης νεφοκάλυψης. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψε ένα πιο αντιπροσωπευτικό σύνολο δεδομένων, το οποίο συμβάλλει σε πιο αξιόπιστη εκτίμηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Η τελική διάταξη προσεγγίζει μια ρεαλιστική υλοποίηση συστήματος έξυπνης παρακολούθησης φωτοβολταϊκού, προσφέροντας δυνατότητες καταγραφής, μετάδοσης και αποθήκευσης δεδομένων. Η συστηματική αυτή προσέγγιση αποτέλεσε το υπόβαθρο για τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

5.2 Τοποθέτηση και προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Η σωστή τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πάνελ αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αξιοπιστία των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επηρεάζει άμεσα την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και, κατ' επέκταση, την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Για τον λόγο αυτό, κατά την εγκατάσταση του συστήματος δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της θέσης και του προσανατολισμού του πάνελ, ώστε τα δεδομένα που συλλέγονται να αποτυπώνουν με ρεαλισμό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Το φωτοβολταϊκό πάνελ εγκαταστάθηκε σε εξωτερικό χώρο στην Κύπρο, και συγκεκριμένα στην πόλη Λευκωσία διασφαλίζοντας τη παρατεταμένη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η επιλογή της συγκεκριμένης τοποθεσίας στηρίχθηκε στα υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας που παρουσιάζει, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τη μελέτη φωτοβολταϊκών εφαρμογών μικρής κλίμακας. Το περιβάλλον επέτρεψε τη συλλογή δεδομένων χωρίς τεχνητή ρύθμιση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το πάνελ τοποθετήθηκε σε σταθερή θέση καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, ώστε οι μεταβολές στις μετρήσεις να αποδίδονται κυρίως στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών και όχι σε διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας της εγκατάστασης. Ο προσανατολισμός του επιλέχθηκε με γνώμονα τη μέγιστη δυνατή έκθεσή του στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ η γωνία κλίσης διατηρήθηκε σταθερή, περίπου 40 μοίρες ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πάνελ στον εξωτερικό χώρο όπου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 24:



Εικόνα 24: Τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πάνελ σε εξωτερικό χώρο, με σταθερή κλίση και έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, το πάνελ τοποθετήθηκε σε σημείο με άμεση πρόσβαση στην ηλιακή ακτινοβολία, χωρίς χρήση τεχνητού φωτισμού ή ελεγχόμενων εργαστηριακών συνθηκών. Κατά την εγκατάσταση καταβλήθηκε προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σκιάσεις ή έντονες ανακλάσεις στην επιφάνεια του πάνελ. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες, είναι πιθανό να σημειώθηκαν κατά διαστήματα μικρές μεταβολές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, λόγω νεφοκάλυψης, μετακίνησης του ήλιου ή παροδικών σκιάσεων. Το στοιχείο αυτό θεωρείται χρήσιμο για την παρούσα εργασία, καθώς επιτρέπει τη μελέτη του συστήματος σε πιο ρεαλιστικό περιβάλλον λειτουργίας. Επιπρόσθετα, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη θέση τοποθέτησης των αισθητήρων σε σχέση με το πάνελ. Ο αισθητήρας φωτεινότητας εγκαταστάθηκε σε σημείο που επέτρεπε την καταγραφή συνθηκών φωτισμού αντιπροσωπευτικών της έκθεσης του φωτοβολταϊκού, ενώ ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας τοποθετήθηκε έτσι ώστε να αποτυπώνει τις περιβαλλοντικές συνθήκες χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά από τοπική υπερθέρμανση ή άμεση επαφή με θερμές επιφάνειες. Η διάταξη αυτή συνέβαλε στη συλλογή πιο αξιόπιστων και χρήσιμων δεδομένων. Συνολικά, η τοποθέτηση και ο προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού πάνελ επιλέχθηκαν ώστε να εξασφαλίζεται μια ισορροπία μεταξύ της μέγιστης δυνατής ηλιακής έκθεσης, της σταθερότητας της εγκατάστασης και της αξιόπιστης καταγραφής δεδομένων υπό πραγματικές εξωτερικές συνθήκες. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επέτρεψε τη συλλογή μετρήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος όσο και για την ανάλυση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων στην απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ.

5.3 Διαδικασία λήψης μετρήσεων

Η διαδικασία λήψης μετρήσεων οργανώθηκε με τρόπο ώστε να προκύψει ένα όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικό σύνολο δεδομένων για τη μελέτη της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ. Για τον λόγο αυτό, οι μετρήσεις δεν περιορίστηκαν σε μικρό χρονικό διάστημα, αλλά πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικούς μήνες, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη καταγραφή και συνολικότερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Η επιλογή αυτή επέτρεψε τη συλλογή δεδομένων από ημέρες με διαφορετικό επίπεδο ηλιοφάνειας, συμβάλλοντας έτσι στη διαμόρφωση ενός πιο ολοκληρωμένου δείγματος.

Η λειτουργία του συστήματος ήταν σχεδιασμένη έτσι ώστε να καλύπτει, κατά το δυνατόν, ολόκληρο το εικοσιτετράωρο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου υπήρχε ουσιαστικό ενδιαφέρον για την καταγραφή της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάνελ και της μεταβολής των μετρούμενων παραμέτρων, το σύστημα πραγματοποιούσε συχνότερες λήψεις. Αντίθετα, κατά τις νυχτερινές ώρες, όταν η ηλιακή ακτινοβολία ήταν μηδενική και δεν υπήρχε πρακτική ανάγκη για πυκνή καταγραφή, η αποστολή μετρήσεων περιοριζόταν σε μία καταγραφή ανά ώρα. Με αυτή τη λογική επιτυγχανόταν αφενός η διατήρηση της συνολικής εποπτείας του συστήματος σε 24ωρη βάση και αφετέρου η αποφυγή περιττής επιβάρυνσης της κατανάλωσης ενέργειας και του όγκου των δεδομένων.

Η παραπάνω διαδικασία λήψης επέτρεψε τη συγκέντρωση μετρήσεων τόσο από τις ώρες ενεργού παραγωγής του φωτοβολταϊκού πάνελ όσο και από τις περιόδους χαμηλής ή μηδενικής παραγωγής. Έτσι, κατέστη δυνατή η πληρέστερη αποτύπωση του ημερήσιου κύκλου λειτουργίας του συστήματος και η καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ περιβαλλοντικών συνθηκών και ηλεκτρικής απόδοσης. Παράλληλα, η συλλογή δεδομένων σε βάθος χρόνου διευκόλυνε τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ημερών και περιόδων, ενισχύοντας την αξιοπιστία της πειραματικής αξιολόγησης.

Επιπλέον, η διαδικασία παρακολούθησης των μετρήσεων διευκολύνθηκε σημαντικά από τη χρήση του web dashboard, μέσω του οποίου οι καταγεγραμμένες τιμές προβάλλονταν άμεσα και με οργανωμένο τρόπο. Η δυνατότητα αυτή επέτρεπε τον ευκολότερο έλεγχο της ορθότητας και της συνέχειας των μετρήσεων, καθώς και τον ταχύτερο εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων ή προβλημάτων στη λειτουργία του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία συλλογής δεδομένων έγινε πιο άμεση, πιο πρακτική και πιο ελεγχόμενη κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου.

Συνολικά, η διαδικασία λήψης μετρήσεων σχεδιάστηκε με γνώμονα την ισορροπία ανάμεσα στη συχνή και χρήσιμη συλλογή δεδομένων κατά τις ώρες ενδιαφέροντος και στην πιο αραιή καταγραφή κατά τις ώρες περιορισμένης πληροφορίας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε ένα επαρκές και οργανωμένο σύνολο μετρήσεων, κατάλληλο για την ανάλυση που παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

5.4 Σενάρια πειραματικών δοκιμών

Η πειραματική αξιολόγηση του συστήματος δεν βασίστηκε μόνο σε απομονωμένες και αυστηρά ελεγχόμενες εργαστηριακές δοκιμές αλλά στη συνεχή λειτουργία της εγκατάστασης σε ρεαλιστικές περιβαλλοντικές συνθήκες για συνεχόμενες μέρες και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, το σύστημα λειτουργήσε σχεδόν αδιάλειπτα με εξαίρεση ορισμένα διαστήματα κατά τα οποία οι καιρικές συνθήκες ήταν ιδιαίτερα δυσμενείς και δεν επέτρεπαν την ομαλή καταγραφή των μετρήσεων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιλέχθηκε έτσι ώστε η αξιολόγηση του συστήματος να βασιστεί σε πραγματικά δεδομένα και όχι σε τεχνητά διαμορφωμένες συνθήκες. Μέσα από τη συνεχή αυτή καταγραφή προέκυψε ένα σύνολο δεδομένων όπου αντικατόπτριζε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του πάνελ. Τα δεδομένα αυτά δεν αντιμετωπίστηκαν σαν ένα ενιαίο σύνολο, αλλά οργανώθηκαν σε επιμέρους κατηγορίες συνθηκών, οι οποίες αξιοποιήθηκαν σαν βάση για την πειραματική ανάλυση. Με αυτόν τον τρόπο, τα «σενάρια» της παρούσας εργασίας δεν αντιστοιχούν σε ξεχωριστά τεχνητά πειράματα, αλλά σε διαφορετικού τύπου πραγματικές συνθήκες που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

Μια πρώτη βασική κατηγορία αφορούσε ημέρες με αυξημένη ηλιοφάνεια, όπου το φωτοβολταϊκό πάνελ δεχόταν μεγάλη ηλιακή ακτινοβολία για μεγάλο μέρος της ημέρας. Οι περιπτώσεις αυτές κρίνονται ιδιαίτερα χρήσιμες για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε πιο ομαλές συνθήκες λειτουργίας και για την αποτύπωση των υψηλότερων επιπέδων παραγωγής που μπορούσαν να επιτευχθούν. Οι μετρήσεις από αυτές τις ημέρες παρείχαν σαφή εικόνα της εξέλιξης της παραγωγής μέχρι της μεσημβρινές ώρες καθώς και της σταδιακής μείωσης της ισχύος προς το τέλος της ημέρας.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά ημέρες με ελάχιστη ηλιοφάνεια και αυξημένη νεφοκάλυψη. Η ένταξη τέτοιων περιπτώσεων στην ανάλυση είναι σημαντική γιατί επιτρέπει τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σε λιγότερο ευνοϊκές και περισσότερο μεταβαλλόμενες συνθήκες. Μέσω από αυτές της καταγραφές κατέστη δυνατό να διαπιστωθεί πως επηρεάζονται οι βασικές μετρούμενες παράμετροι όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή ή είναι αισθητά μειωμένη. Με αυτή τη κατηγορία η αξιολόγηση δεν περιορίστηκε μόνο σε ιδανικές ημέρες αλλά περιέλαβε και συνθήκες που ανταποκρίνονται περισσότερο στη φυσική μεταβλητότητα του πραγματικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κάλυψαν διαφορετικούς μήνες, από τον Δεκέμβριο έως και τον Απρίλιο, γεγονός που επέτρεψε την αποτύπωση της λειτουργίας του συστήματος σε μεγαλύτερο χρονικό εύρος. Η κατανομή των μετρήσεων σε διαφορετικές χρονικές περιόδους προσέφερε τη δυνατότητα σύγκρισης ημερών που δεν ανήκαν στο ίδιο στενό χρονικό πλαίσιο, αλλά αντανακλούσαν μεταβολές σχετικές με τη διάρκεια της ημέρας, τη συχνότητα ηλιοφάνειας και τις καιρικές συνθήκες κάθε περιόδου. Με τον

τρόπο αυτό ενισχύθηκε η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος και περιορίστηκε η πιθανότητα εξαγωγής συμπερασμάτων από πολύ στενό ή χρονικά περιορισμένο σύνολο δεδομένων.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο της πειραματικής αξιολόγησης ήταν η 24ωρη λειτουργία του συστήματος. Παρότι η ουσιαστική ενεργειακή παραγωγή του φωτοβολταϊκού πάνελ περιορίζεται στις ώρες ύπαρξης ηλιακής ακτινοβολίας, η συνεχής εποπτεία της λειτουργίας του συστήματος κρίθηκε χρήσιμη για την πληρέστερη παρακολούθησή του. Για τον λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια της ημέρας η λήψη και αποστολή μετρήσεων πραγματοποιούνταν συχνότερα, ενώ κατά τις νυχτερινές ώρες η καταγραφή αραιωνόταν και περιοριζόταν σε μία μέτρηση ανά ώρα. Η διαφοροποίηση αυτή δεν αλλοίωσε τον συνολικό χαρακτήρα της 24ωρης παρακολούθησης, αλλά επέτρεπε αποτελεσματικότερη διαχείριση της κατανάλωσης και του όγκου των παραγόμενων δεδομένων.

Η διαδικασία αναγνώρισης και αξιολόγησης των παραπάνω κατηγοριών συνθηκών διευκολύνθηκε σημαντικά από τη χρήση του web dashboard. Μέσω αυτού ήταν δυνατή η άμεση προβολή των μετρήσεων και η εποπτεία της συνέχειας της καταγραφής, γεγονός που διευκόλυνε τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Παράλληλα, η οργανωμένη προβολή των δεδομένων έκανε ευκολότερη την επιλογή ενδεικτικών περιπτώσεων προς ανάλυση, όπως ημέρες με αυξημένη ή μειωμένη ηλιοφάνεια, καθώς και τη σύγκριση μετρήσεων από διαφορετικές ώρες ή μήνες.

Συνολικά, τα σενάρια πειραματικών δοκιμών της παρούσας εργασίας προέκυψαν από τη συνεχή και μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες και όχι από τεχνητά διαμορφωμένες πειραματικές παρεμβάσεις. Η ομαδοποίηση των δεδομένων σε κατηγορίες, όπως ημέρες με υψηλή ή χαμηλή ηλιοφάνεια, διαφορετικές χρονικές στιγμές της ημέρας και διαφορετικοί μήνες καταγραφής, επέτρεψε μια πιο ουσιαστική και ρεαλιστική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάνελ και της συνολικής πλατφόρμας παρακολούθησης. Η προσέγγιση αυτή δημιούργησε το κατάλληλο υπόβαθρο για τη συλλογή, οργάνωση και επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

Πίνακας 3: Κατηγορίες συνθηκών πειραματικής αξιολόγησης και σκοπός ανάλυσης

Κατηγορία συνθηκών	Χαρακτηριστικά	Σκοπός ανάλυσης
Ημέρες με υψηλή ηλιοφάνεια	Υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για μεγάλο μέρος της ημέρας	Μελέτη της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάνελ σε ευνοϊκές συνθήκες λειτουργίας και καταγραφή υψηλών τιμών παραγωγής
Ημέρες με μειωμένη ηλιοφάνεια	Παρουσία νεφοκάλυψης η χαμηλότερης έντασης φωτισμού	Αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος σε μη ιδανικές συνθήκες και σύγκριση με ημέρες υψηλής ηλιοφάνειας
Διαφορετικές ώρες της ημέρας	Πρωινές, μεσημβρινές και απογευματινές μετρήσεις	Παρακολούθηση της ημερήσιας μεταβολής της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος
Διαφορετικοί μήνες καταγραφής	Μετρήσεις από Δεκέμβριο μέχρι Απρίλιο	Εξαγωγή αντιπροσωπευτικής εικόνας της λειτουργίας του συστήματος σε βάθος χρόνου
Νυχτερινή λειτουργία	Περιοδική καταγραφή ανά μία ώρα, χωρίς ουσιαστική ηλιακή παραγωγή	Έλεγχος της 24ωρης εποπτείας του συστήματος καταγραφής

5.5 Συλλογή και μορφή των δεδομένων

Τα δεδομένα που προέκυψαν από τη λειτουργία του συστήματος οργανώθηκαν σε μορφή διαδοχικών χρονικών εγγραφών, έτσι ώστε κάθε καταγραφή να αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η λογική αυτή επέτρεψε τη δημιουργία ενός συνεκτικού συνόλου μετρήσεων, κατάλληλου για μεταγενέστερη ταξινόμηση, φιλτράρισμα και επεξεργασία.

Κάθε εγγραφή περιλάμβανε τα βασικά ηλεκτρικά και περιβαλλοντικά μεγέθη που κρίθηκαν απαραίτητα για την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφονταν η τάση του φωτοβολταϊκού πάνελ, το ρεύμα εξόδου, η υπολογιζόμενη ηλεκτρική ισχύς, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία. Παράλληλα, κάθε εγγραφή συνοδευόταν από χρονική σήμανση, ώστε να είναι δυνατή η ακριβής τοποθέτηση της μέτρησης μέσα στον χρόνο και η σύνδεσή της με τη χρονική στιγμή λήψης.

Η μορφή αποθήκευσης των δεδομένων ήταν δομημένη, με τρόπο ώστε κάθε εγγραφή να εμφανίζεται ως ανεξάρτητη μονάδα πληροφορίας με επιμέρους πεδία. Ενδεικτικά, μία τυπική καταγραφή περιλάμβανε πεδία όπως `voltage_V`, `current_mA`, `power_mW`, `temp_C`, `humidity_pct`, `light_lux` και `ts`, όπου το τελευταίο αντιστοιχούσε στη χρονική σήμανση της μέτρησης. Η συγκεκριμένη μορφή ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς επέτρεπε την άμεση αναγνώριση του περιεχομένου κάθε εγγραφής και τη διευκόλυνση της επεξεργασίας της σε επόμενο στάδιο.

Η ύπαρξη οργανωμένων πεδίων για κάθε μέγεθος βοήθησε σημαντικά τόσο στον έλεγχο της συνέπειας των δεδομένων όσο και στη μεταγενέστερη εξαγωγή τους σε μορφές κατάλληλες για ανάλυση. Με τον

τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η μεταφορά των καταγραφών σε περιβάλλοντα όπως υπολογιστικά φύλλα, όπου οι εγγραφές μπορούσαν να ταξινομηθούν χρονικά, να συγκριθούν μεταξύ τους και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή γραφημάτων.

Ιδιαίτερα σημαντική ήταν και η παρουσία της χρονικής σήμανσης σε κάθε εγγραφή, καθώς αυτή αποτέλεσε το βασικό στοιχείο σύνδεσης των μετρήσεων με τον ημερήσιο και μηνιαίο κύκλο λειτουργίας του συστήματος. Χωρίς τη χρονική πληροφορία δεν θα ήταν δυνατή ούτε η παρακολούθηση της εξέλιξης των μεγεθών μέσα στην ημέρα ούτε η σύγκριση διαφορετικών ημερών και περιόδων καταγραφής.

Συνολικά, η μορφή των δεδομένων που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία ήταν απλή, σαφής και κατάλληλη για περαιτέρω ανάλυση. Η οργάνωση των μετρήσεων σε ξεχωριστές χρονικές εγγραφές με συγκεκριμένα πεδία επέτρεψε την αποτελεσματική διαχείριση του συνόλου δεδομένων και αποτέλεσε τη βάση για την επόμενη φάση της εργασίας, δηλαδή την επεξεργασία των τιμών και την εξαγωγή των αντίστοιχων γραφημάτων.

Πίνακας 4: Βασικά πεδία των καταγεγραμμένων δεδομένων

Πεδίο	Περιγραφή	Μονάδα Μέτρησης
Voltage_v	Τάση εξόδου φωτοβολταϊκού πάνελ	V
Current_mA	Ρεύμα εξόδου φωτοβολταϊκού πάνελ	mA
Power_mW	Υπολογιζόμενη ηλεκτρική ισχύς	mW
Temp_C	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C
Humidity_pct	Υγρασία περιβάλλοντος	%
Light_lux	Ένταση φωτεινότητας	Lux
Ts	Χρονική σήμανση καταγραφής	-

5.6 Επεξεργασία των δεδομένων για την εξαγωγή γραφημάτων

Μετά τη συλλογή και αποθήκευση των μετρήσεων, ακολούθησε στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων με στόχο την προετοιμασία τους για γραφική αναπαράσταση και συγκριτική ανάλυση. Η επεξεργασία αυτή ήταν απαραίτητη, καθώς το αρχικό σύνολο μετρήσεων περιείχε μεγάλο αριθμό εγγραφών από διαφορετικές χρονικές στιγμές, γεγονός που δυσχέραινε την άμεση εξαγωγή ευανάγνωστων και αντιπροσωπευτικών γραφημάτων.

Αρχικά, τα δεδομένα εξήχθησαν από το περιβάλλον καταγραφής σε μορφή πίνακα και οργανώθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο. Κάθε γραμμή αντιστοιχούσε σε μία χρονική εγγραφή και περιλάμβανε τα καταγεγραμμένα μεγέθη του συστήματος, όπως τάση, ρεύμα, ισχύ, θερμοκρασία, σχετική υγρασία,

φωτεινότητα και χρονική σήμανση. Στη συνέχεια έγινε έλεγχος των εγγραφών, ώστε να απομακρυνθούν μη έγκυρες ή μη χρήσιμες τιμές, όπως κενά πεδία ή μετρήσεις που δεν μπορούσαν να αξιοποιηθούν στη γραφική ανάλυση.

Σε επόμενο στάδιο εφαρμόστηκε φιλτράρισμα των δεδομένων, ώστε να διαχωριστούν οι μετρήσεις που αντιστοιχούσαν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό περιορίστηκε η επίδραση νυχτερινών ή μηδενικών τιμών, οι οποίες δεν προσέφεραν ουσιαστική πληροφορία για τη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην επιλογή των χρονικών διαστημάτων που αντανακλούσαν πραγματική παραγωγή ισχύος, ώστε τα τελικά γραφήματα να αποτυπώνουν τη λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος με πιο καθαρό και αντιπροσωπευτικό τρόπο.

Για τη δημιουργία συγκεντρωτικών γραφημάτων δεν χρησιμοποιήθηκαν απευθείας όλες οι ακατέργαστες μετρήσεις, αλλά πραγματοποιήθηκε ομαδοποίηση των δεδομένων με βάση τη χρονική πληροφορία. Πιο συγκεκριμένα, από τη χρονική σήμανση εξήχθη η ώρα της ημέρας και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών για κάθε ώρα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε κυρίως στα γραφήματα χρονοσειράς, όπως το διάγραμμα ισχύος ως προς τον χρόνο και το διάγραμμα τάσης ως προς τον χρόνο, ώστε να προκύψει μία πιο ομαλή και αντιπροσωπευτική καμπύλη της μέσης ημερήσιας συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Η επιλογή χρήσης μέσων όρων κρίθηκε καταλληλότερη από την απευθείας απεικόνιση όλων των επιμέρους εγγραφών, επειδή το πλήθος των μετρήσεων ήταν μεγάλο και η άμεση σχεδίαση όλων των σημείων θα οδηγούσε σε δυσανάγνωστα γραφήματα. Με την ομαδοποίηση ανά ώρα και τον υπολογισμό του μέσου όρου, κατέστη δυνατό να αποτυπωθεί πιο καθαρά η γενική τάση της παραγωγής και της μεταβολής των βασικών μεγεθών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η γενική σχέση υπολογισμού της μέσης τιμής είναι:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Όπου x_i είναι η τιμή κάθε μέτρησης και n το συνολικό πλήθος των μετρήσεων.

Για τα γραφήματα συσχέτισης, όπως το διάγραμμα φωτεινότητας-ισχύος και το διάγραμμα θερμοκρασίας-ισχύος, χρησιμοποιήθηκαν τα αντίστοιχα ζεύγη μετρήσεων μετά από βασικό καθαρισμό των δεδομένων. Στις περιπτώσεις αυτές δόθηκε έμφαση στη διατήρηση των πραγματικών καταγεγραμμένων τιμών, ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση της σχέσης μεταξύ περιβαλλοντικών παραμέτρων και παραγόμενης ισχύος. Αντίστοιχα, για τα διαγράμματα τάσης-ρεύματος και τάσης-ισχύος χρησιμοποιήθηκαν επιλεγμένα σύνολα μετρήσεων, έτσι ώστε να απεικονιστούν τα λειτουργικά σημεία του φωτοβολταϊκού πάνελ υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

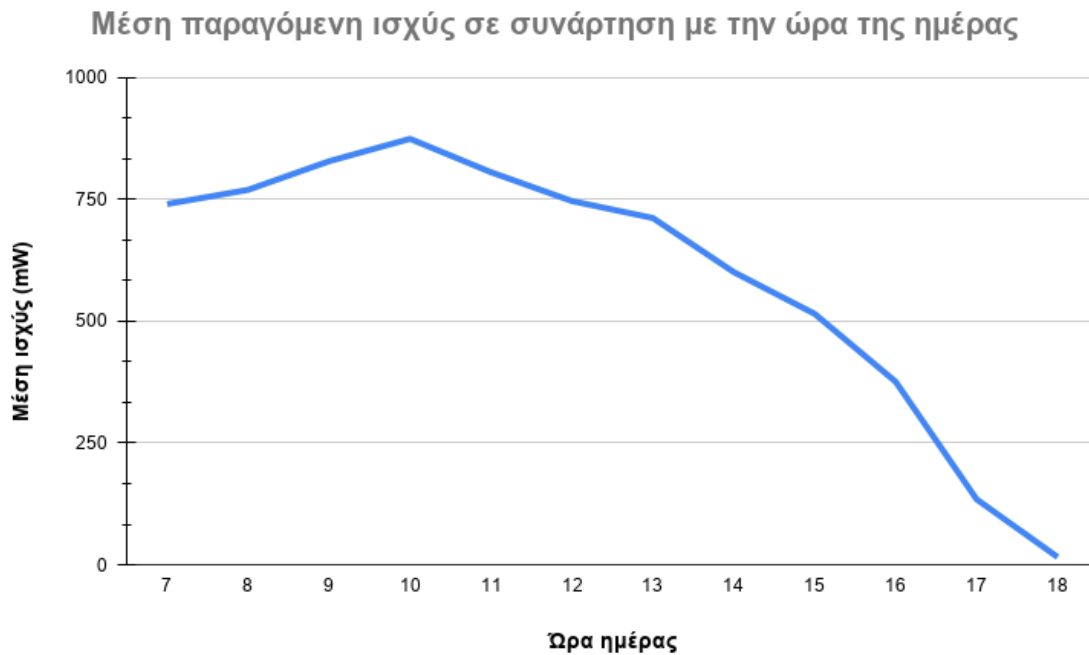
Συνολικά, η επεξεργασία των δεδομένων περιλάμβανε εξαγωγή, καθαρισμό, φιλτράρισμα, χρονική ομαδοποίηση και υπολογισμό μέσων όρων, όπου αυτό ήταν απαραίτητο. Η διαδικασία αυτή αποτέλεσε το απαραίτητο ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ της απλής καταγραφής των μετρήσεων και της τελικής εξαγωγής των γραφημάτων του επόμενου κεφαλαίου, εξασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι σαφή, συγκρίσιμα και κατάλληλα για ανάλυση.

Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα

6.1 Power vs Time

Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης παραγόμενης ισχύς του φωτοβολταϊκού πάνελ σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας. Για την κατασκευή του γραφήματος, χρησιμοποιήθηκαν οι καταγεγραμμένες τιμές ισχύος και υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους για κάθε ώρα, ώστε να εξαχθεί μια συγκεντρωτική και καθαρή εικόνα της ημερήσιας λειτουργίας του συστήματος. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η μέση παραγόμενη ισχύς αυξάνεται από τις πρωινές ώρες, καθώς ενισχύεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και βελτιώνονται οι συνθήκες φωτισμού του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η άνοδος αυτή συνεχίζεται και τις πρωινές προς μεσημβρινές ώρες, όπου παρατηρούνται και οι υψηλότερες μέσες τιμές ισχύος. Στη συνέχεια η καμπύλη παρουσιάζει σταδιακή πτώση, όπου γίνεται εντονότερη κατά τις απογευματινές ώρες, μέχρι η παραγόμενη ισχύς να προσεγγίσει πολύ χαμηλές τιμές. Αξίζει να σημειωθεί πως το συγκεκριμένο γράφημα αποτυπώνει τη μέση ισχύ ανά ώρα και όχι τις μέγιστες στιγμιαίες τιμές που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Για αυτό το λόγο η χρονική θέση της κορύφωσης στο διάγραμμα δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στη μέγιστη στιγμιαία ισχύ, αλλά στη μεγαλύτερη μέση τιμή μεταξύ των ωριαίων διαστημάτων. Επομένως σε επιμέρους χρονικές στιγμές έχουν καταγραφεί υψηλότερες τιμές ισχύος χωρίς αυτό να μεταβάλλει αναγκαστικά τη θέση της μέγιστης ωριαίας μέσης τιμής. Η μορφή της καμπύλης είναι συμβατή με την αναμενόμενη συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς η παραγωγή ακολουθεί τον ημερήσιο κύκλο της ηλιακής έκθεσης. Παράλληλα η ελαφρά μείωση της μέσης ισχύος μετά το χρονικό διάστημα των υψηλότερων τιμών, συνδέεται με πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, όπως μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη ίδια ώρα, παροδικές διαφοροποιήσεις φωτισμού, ή και αύξηση θερμοκρασίας του πάνελ. Βάση της βιβλιογραφίας η θερμική επιβάρυνση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, με αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να μην ακολουθεί κατά κανόνα τη θεωρητική ηλιακή καμπύλη.

Συνολικά το γράφημα επιβεβαιώνει ότι το σύστημα καταγραφής αποτύπωσε με σαφήνεια τη γενική ημερήσια τάση της παραγόμενης ισχύς και του φωτοβολταϊκού πάνελ. Επιπρόσθετα παρέχει μια αντιπροσωπευτική εικόνα της μέσης λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποτελεί χρήσιμη βάση για τη συσχέτιση της ισχύος με τις υπόλοιπες παραμέτρους όπου παρουσιάζονται στις επόμενες υποενότητες όπως η τάση, η φωτεινότητα και η θερμοκρασία.



Εικόνα 25: Μεταβολή της μέσης παραγόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας.

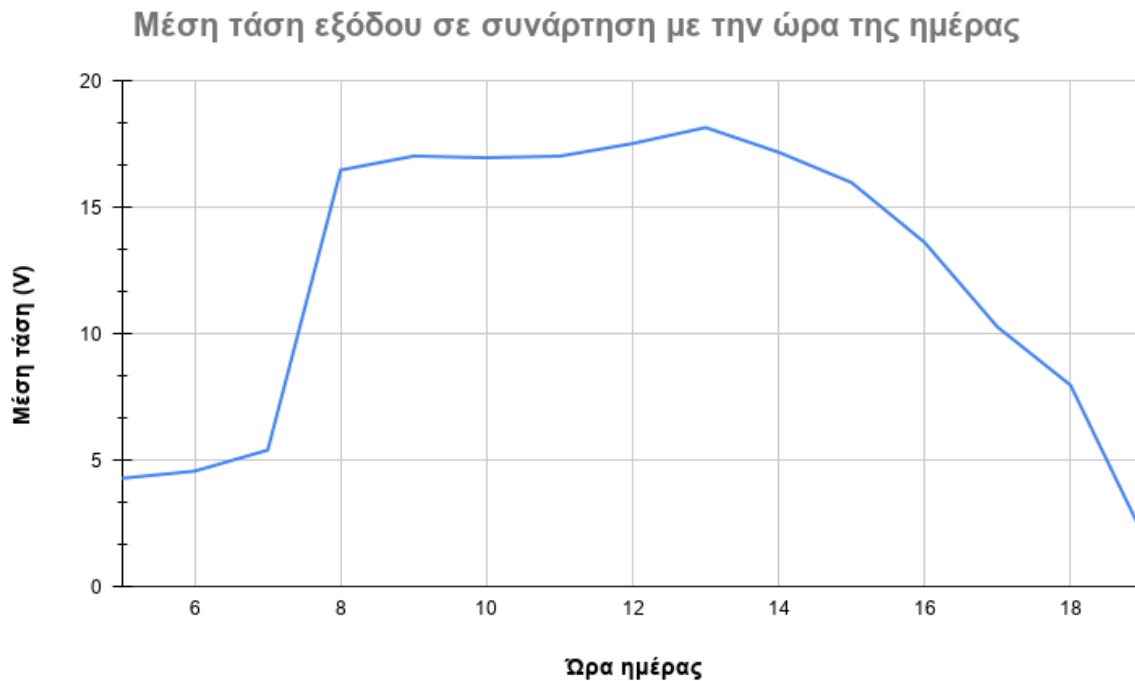
6.2 Voltage vs Time

Στην εικόνα 26 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού πάνελ σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας. Για την κατασκευή του γραφήματος χρησιμοποιήθηκαν οι καταγεγραμμένες τιμές τάσης και υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους για κάθε ώρα, έτσι ώστε να αποτυπωθεί η γενική ημερήσια τάση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του συστήματος. Στο διάγραμμα, απεικονίζεται η τάση εξόδου χαμηλότερη κατά τις πολύ πρωινές ώρες όπου η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι ακόμη περιορισμένη. Στη συνέχεια παρατηρείται απότομη αύξηση της μέσης τάσης, καθώς το φωτοβολταϊκό πάνελ δέχεται ισχυρότερη ηλιακή ακτινοβολία και εισέρχεται σε πιο σταθερό καθεστώς λειτουργίας. Στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της ημέρας η τάση διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα, με μικρές μεταβολές, γεγονός που υποδηλώνει πιο ομαλή ηλεκτρική λειτουργία του συστήματος. Η μέγιστη μέση τιμή τάσης παρατηρείται κατά τις πρωινές προς μεσημβρινές ώρες, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί σταδιακή πτώση. Η πτώση αυτή γίνεται εντονότερη προς τις απογευματινές ώρες, καθώς μειώνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και το φωτοβολταϊκό πάνελ εξέρχεται από τη ζώνη βέλτιστης λειτουργίας του. Οι πολύ χαμηλές τιμές που εμφανίζονται στην αρχή και στο τέλος της ημέρας είναι αναμενόμενες, καθώς αντιστοιχούν σε χρονικά διαστήματα περιορισμένου φωτισμού, κατά τα οποία η παραγωγική ικανότητα του πάνελ μειώνεται αισθητά.

Σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα ισχύος, παρατηρείται ότι η τάση εμφανίζει πιο ομαλή συμπεριφορά στο κύριο διάστημα λειτουργίας του συστήματος. Η εξέλιξη αυτή είναι λογική, καθώς η ισχύς επηρεάζεται άμεσα και από το ρεύμα, το οποίο μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις μέσα στη διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, η τάση τείνει να παραμένει πιο σταθερή όσο το πάνελ λειτουργεί υπό επαρκή ακτινοβολία, παρουσιάζοντας σημαντική μεταβολή κυρίως στις μεταβατικές ώρες χαμηλού φωτισμού.

Το γράφημα της τάσης επιβεβαιώνει ότι το σύστημα μέτρησης κατέγραψε με σαφήνεια τη μεταβολή της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παράλληλα, το

διάγραμμα αυτό αποτελεί χρήσιμο σημείο αναφοράς για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος και για τη συσχέτιση της τάσης με τα άλλα μεγέθη,



Εικόνα 26: Μεταβολή της μέσης τάσης εξόδου σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας.

6.3 Lux vs Power

Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται η συσχέτιση της φωτεινότητας με την παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού πάνελ. Για τη δημιουργία του γραφήματος δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες οι ακατέργαστες μετρήσεις ως μεμονωμένα σημεία, καθώς το πλήθος τους οδηγούσε σε ιδιαίτερα πυκνή και δυσανάγνωστη απεικόνιση. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές της φωτεινότητας ομαδοποιήθηκαν σε εύρη των 5000 lux και για κάθε εύρος υπολογίστηκε η αντίστοιχη μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατή η αποτύπωση της γενικής τάσης της σχέσης μεταξύ φωτεινότητας και ισχύος με πιο καθαρό και ευανάγνωστο τρόπο.

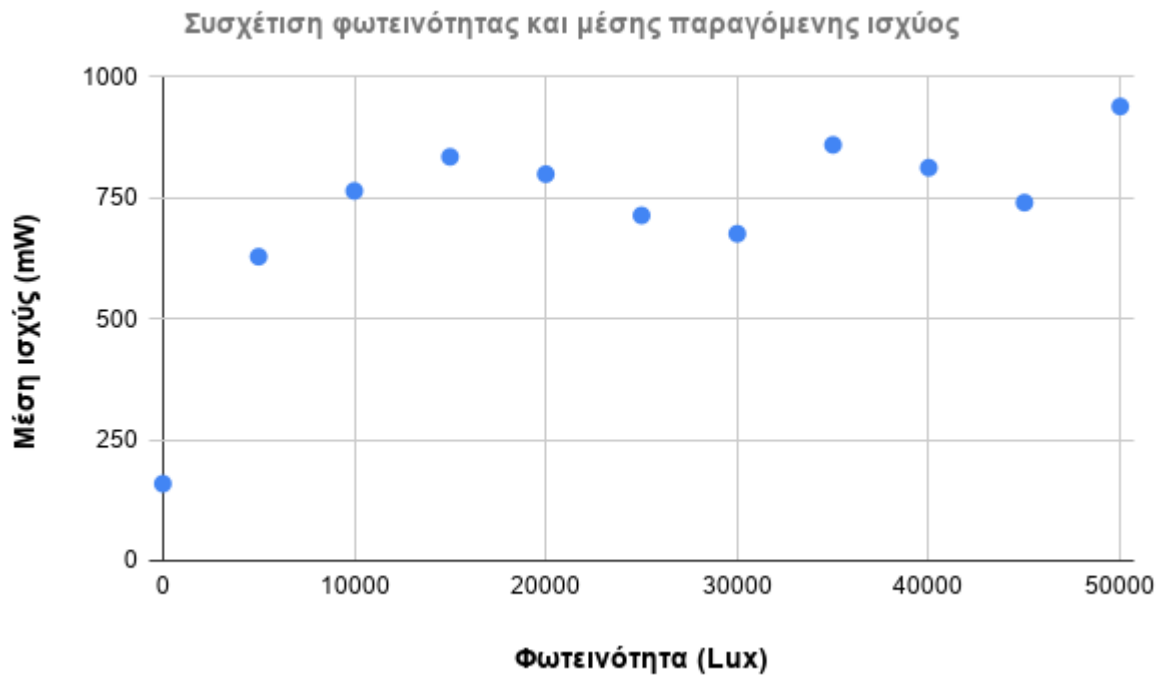
Η φωτεινότητα εκφράζεται σε lux, μονάδα μέτρησης του φωτισμού που χρησιμοποιείται για να περιγράψει πόσο έντονο φως προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Στο συγκεκριμένο σύστημα, οι μετρήσεις φωτεινότητας μεταβάλλονταν από πολύ χαμηλές τιμές στις ώρες περιορισμένου φωτισμού έως αρκετά υψηλές τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας, φτάνοντας σε επίπεδα δεκάδων χιλιάδων lux, όπως είναι αναμενόμενο σε εξωτερικό περιβάλλον με έντονη ηλιακή ακτινοβολία.

Από το γράφημα παρατηρείται γενικά ότι όσο αυξάνεται η φωτεινότητα, αυξάνεται και η μέση παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η τάση αυτή είναι λογική, καθώς μεγαλύτερη ένταση φωτός σημαίνει αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία πάνω στην ενεργή επιφάνεια του πάνελ, γεγονός που ευνοεί την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Ωστόσο, η σχέση αυτή δεν εμφανίζεται απολύτως γραμμική σε όλα τα εύρη τιμών. Σε ορισμένες περιοχές του γραφήματος παρατηρούνται μικρές αυξομειώσεις της μέσης ισχύος, γεγονός που δείχνει ότι η ισχύς δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη φωτεινότητα.

Η απόκλιση από μια ιδανικά γραμμική συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία λειτουργίας του πάνελ, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, οι μεταβολές στις πραγματικές συνθήκες φωτισμού μέσα στο ίδιο εύρος τιμών, αλλά και η συνολική

λειτουργική κατάσταση του συστήματος κατά τη στιγμή της μέτρησης. Επομένως, η φωτεινότητα αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την παραγόμενη ισχύ, χωρίς όμως να είναι ο μοναδικός.

Το διάγραμμα επιβεβαιώνει ότι υπάρχει γενική θετική συσχέτιση μεταξύ φωτεινότητας και παραγόμενης ισχύος. Δηλαδή, σε μεγαλύτερα επίπεδα φωτισμού το φωτοβολταϊκό πάνελ τείνει να αποδίδει υψηλότερη ισχύ, παρόλο που η πραγματική συμπεριφορά του επηρεάζεται και από πρόσθετες παραμέτρους. Η ανάλυση αυτή είναι χρήσιμη, καθώς επιτρέπει να φανεί πιο καθαρά ο ρόλος του φωτισμού στην απόδοση του συστήματος και να υποστηριχθεί η ερμηνεία των υπολοίπων γραφημάτων που ακολουθούν.



Εικόνα 27: Συσχέτιση φωτεινότητας και μέσης παραγόμενης ισχύς

6.4 Temp vs Power

Στην εικόνα 28 παρουσιάζεται η συσχέτιση της θερμοκρασίας με τη μέση παραγόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού πάνελ. Για την δημιουργία του διαγράμματος, οι τιμές της θερμοκρασίας ομαδοποιήθηκαν κατά 1 °C και για κάθε θερμοκρασιακή τιμή υπολογίστηκε η αντίστοιχη τιμή ισχύος. Με αυτή τη μέθοδο προκύπτει μια πιο καθαρή εικόνα της σχέσης θερμοκρασίας και παραγωγής, χωρίς να επηρεάζεται υπερβολικά από μεμονωμένες στιγμιαίες μετρήσεις. Από το διάγραμμα, φαίνεται ότι στις χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου από 5 °C μέχρι 15 °C, η μέση παραγόμενη ισχύς παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Η συμπεριφορά αυτή δεν σημαίνει απαραίτητα ότι οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν την απόδοση του πάνελ. Αντίθετα οι χαμηλές θερμοκρασίες στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων αντιστοιχούν κυρίως σε ημέρες και ώρες με περιορισμένη ηλιακή ακτινοβολία, όπου η φωτεινότητα ήταν μειωμένη και επομένως η παραγόμενη ισχύς χαμηλότερη. Στο εύρος τιμών θερμοκρασίας από περίπου 16 °C μέχρι 23 °C, καταγράφεται από το σύστημα οι μεγαλύτερες μέσες τιμές ισχύος, με την καμπύλη να κορυφώνεται γύρω στους 23 °C. Το σημείο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως το εύρος το οποίο με βάση τα δεδομένα όπου συλλέχθηκαν το σύστημα παρουσίασε την πιο αποδοτική μέση λειτουργία. Μετά το εύρος των 23°C έως 29°C, η ισχύς παραμένει σχετικά υψηλή, αλλά δεν αυξάνεται περαιτέρω με ανάλογο τρόπο. Αντίθετα, από θερμοκρασίες άνω των περίπου 30°C παρατηρείται σταδιακή μείωση της μέσης παραγόμενης ισχύος. Η πτώση αυτή είναι σημαντική, καθώς συμφωνεί με τη γενική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων, στα οποία η αύξηση της

θερμοκρασίας λειτουργίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ηλεκτρική τους απόδοση. Επομένως, παρότι η υψηλότερη θερμοκρασία μπορεί να συνδέεται με αυξημένη ηλιοφάνεια, από ένα σημείο και μετά η θερμική επιβάρυνση του πάνελ ενδέχεται να λειτουργεί αρνητικά ως προς την παραγόμενη ισχύ. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η σχέση θερμοκρασίας και ισχύος δεν πρέπει να ερμηνευθεί ως απλή γραμμική σχέση αιτίας και αποτελέσματος. Η θερμοκρασία επηρεάζει την απόδοση του πάνελ, όμως ταυτόχρονα σχετίζεται και με άλλους παράγοντες, όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η φωτεινότητα, η ώρα της ημέρας και οι καιρικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, το διάγραμμα πρέπει να ερμηνευθεί ως ένδειξη γενικής συσχέτισης και όχι ως απόλυτη απόδειξη ότι η θερμοκρασία από μόνη της καθορίζει την παραγόμενη ισχύ.

Συνολικά, το διάγραμμα της εικόνας 28 δείχνει ότι η μέση ισχύς αυξάνεται σημαντικά σε μέτριες θερμοκρασιακές συνθήκες, φτάνει σε υψηλές τιμές γύρω στους 23°C και στη συνέχεια παρουσιάζει σταδιακή μείωση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την αξιολόγηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς αναδεικνύει ότι η θερμοκρασία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την παρακολούθηση και ανάλυση της απόδοσης.



Εικόνα 28: Διάγραμμα συσχέτισης θερμοκρασίας και μέσης παραγόμενης ισχύος

6.5 Current vs Time

Στην εικόνα 29, παρουσιάζεται το η μεταβολή του μέσου ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού πάνελ σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας. Το ρεύμα αποτελεί ένα από τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη για την αξιολόγηση της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς εκφράζει τη ροή ηλεκτρικού φορτίου που παράγεται από το πάνελ και μπορεί να διατεθεί στο συνδεδεμένο κύκλωμα ή φορτίο. Για αυτό το λόγο η παρακολούθηση του ρεύματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει την κατανόηση της πραγματικής παραγωγικής ικανότητας του φωτοβολταϊκού πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για την κατασκευή του διαγράμματος υπολογίστηκε η μέση τιμή του ρεύματος για κάθε ώρα, από όλες τις μετρήσεις όπου συλλέχθηκαν με σκοπό να αποτυπωθεί η γενική ημερήσια συμπεριφορά του συστήματος. Όπως φαίνεται από το γράφημα, κατά τις πρώτες πρωινές ώρες το μέσο ρεύμα βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, καθώς η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είναι μειωμένη. Από τις 6:00 και μετά παρατηρείται σταδιακή αύξηση, ενώ η άνοδος γίνεται πιο έντονη μεταξύ 7:00 και 10:00, χρονικό διάστημα κατά το οποίο το πάνελ αρχίζει να δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα φωτεινής ενέργειας. Η

μέγιστη μέση τιμή του ρεύματος εμφανίζεται περίπου στις 10:00, όπου το ρεύμα προσεγγίζει τα 80-85 mA. Η αύξηση αυτή δείχνει ότι το πάνελ εκείνη την περίοδο λειτουργεί σε πιο αποδοτικές συνθήκες παραγωγής. Στη συνέχεια, μετά το μέγιστο σημείο, το μέσο ρεύμα αρχίζει να μειώνεται σταδιακά. Η μείωση αυτή συνεχίζεται κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες, μέχρι να πλησιάσει εκ νέου σε πολύ χαμηλά επίπεδα προς το τέλος της ημέρας.

Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς το παραγόμενο ρεύμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πάνελ. Όταν η ακτινοβολία αυξάνεται, αυξάνεται και ο αριθμός των φορέων φορτίου που δημιουργούνται στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ρεύματος. Αντίθετα, όταν η ακτινοβολία μειώνεται, το ρεύμα περιορίζεται, ακόμη και αν η τάση μπορεί να διατηρείται σε σχετικά υψηλότερα επίπεδα για κάποιο χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση του ρεύματος βοηθά στην καλύτερη ερμηνεία της μεταβολής της ισχύος που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι προς το τέλος της ημέρας το ρεύμα προσεγγίζει το μηδέν και εμφανίζει οριακά αρνητικές τιμές. Οι τιμές αυτές είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις μέγιστες ημερήσιες τιμές και μπορούν να αποδοθούν είτε σε μικρή αντίστροφη ροή ρεύματος είτε σε αβεβαιότητα των μετρήσεων όταν η παραγωγή του πάνελ είναι πρακτικά μηδενική. Το φαινόμενο αυτό δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη συνολική εικόνα της λειτουργίας, αλλά είναι χρήσιμο να καταγράφεται, καθώς δείχνει ότι το σύστημα μπορεί να εντοπίζει ακόμη και πολύ μικρές μεταβολές κοντά στο μηδενικό επίπεδο.



Εικόνα 29: Μεταβολή του μέσου ρεύματος εξόδου σε συνάρτηση με την ώρα της ημέρας.

6.6 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την εξαγωγή των γραφημάτων που παρουσιάστηκαν, αλλά και των συμπερασμάτων που θα

Κεφάλαιο 6

αναφερθούν, κρίθηκε απαραίτητη η σύγκριση των πραγματικών επιδόσεων του κυκλώματος με τις ονομαστικές προδιαγραφές του κατασκευαστή. Οι ονομαστικές τιμές (Standard Test Conditions – STC) είναι οι εργαστηριακές συνθήκες με ηλιακή ακτινοβολία 1000 και θερμοκρασία 25 °C . Σε ρεαλιστικές συνθήκες όμως στην Λευκωσία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διαφοροποιούνταν σημαντικά, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της γωνιάς πρόσπτωσης του ήλιου. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκε διαδικασία καθαρισμού των δεδομένων ώστε να απομονωθούν στιγμιαίες αιχμές θορύβου και να αναδειχθούν οι πραγματικές μέγιστες και μέσες τιμές λειτουργίας. Ο παρακάτω πίνακας αναδεικνύει της σημαντικές μετρήσεις, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος.

Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Παράμετρος	Ονομαστική Τιμή (STC)	Πειραματική μέγιστη	Πειραματική Μέση τιμή
Ισχύς (Pmax)	10 W	3,86 W	0,88 W
Τάση (Voc/Vmp)	21,6V/18V	22,04 V	20,37 V
Ρεύμα (Imax)	600 mA	503mA	165 mA
Θερμοκρασία	25 °C (Πρότυπη)	41,4 °C	22,2 °C
Φωτεινότητα	-	54.612,5 Lux	16758,43 Lux

Από τον πίνακα 5 παρατηρείται ότι η ονομαστική μέγιστη ισχύς του πάνελ είναι 10W, ενώ η μέγιστη πειραματική ισχύς που καταγράφηκε ήταν 3,86W. Η μέση τιμή ισχύος που υπολογίστηκε είναι 0,88 W.

Η διαφορά μεταξύ ονομαστικής και πειραματικής ισχύος είναι αναμενόμενη, αφού το πάνελ δεν λειτουργήσει σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες αλλά σε πραγματικό περιβάλλον με αυξημένες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Για την ποσοτική αξιολόγηση της διαφοράς μεταξύ της ονομαστικής και της πειραματικά μετρούμενης ισχύος, υπολογίστηκε η ποσοστιαία απόκλιση σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Απόκλιση (\%)} = \frac{P_{nom} - P_{exp}}{P_{exp}} \cdot 100$$

όπου P_{nom} είναι η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού πάνελ και P_{exp} η πειραματικά μετρούμενη ισχύς. Για την παρούσα πειραματική διάταξη, θεωρώντας ως μέγιστη πειραματική ισχύ την τιμή $P_{exp} = 3.86W$, προκύπτει:

$$\text{Απόκλιση (\%)} = \frac{10 - 3.86}{10} \cdot 100 = 61.4 \%$$

Αντίστοιχα, το ποσοστό αξιοποίησης της ονομαστικής ισχύος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Αξιοποίηση (\%)} = \frac{P_{exp}}{P_{nom}} \cdot 100$$

Και για την ίδια μέγιστη πειραματική τιμή:

$$\text{Αξιοποίηση (\%)} = \frac{3.86}{10} \cdot 100 = 38.6 \%$$

Επίσης, η μέση τιμή επηρεάζεται από το γεγονός ότι το σύνολο των μετρήσεων όπου καταγράφηκαν περιλαμβάνονται διαφορετικές ώρες της ημέρας και συνθήκες φωτισμού. Όσον αφορά την τάση, η ονομαστική τιμή του πάνελ δίνεται ως 21,6 V για την τάση ανοιχτού κυκλώματος και 18 V για την τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η μέγιστη πειραματική τιμή τάσης που καταγράφηκε ήταν 22,04 V, ενώ η μέση τιμή ανήλθε στα 20,37 V. Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η τάση του πάνελ διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα κατά τη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, η τάση από μόνη της δεν αρκεί για την αξιολόγηση της πραγματικής παραγωγής, καθώς η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται και από το ρεύμα που παρέχεται στο φορτίο.

Στην περίπτωση του ρεύματος, το ονομαστικό μέγιστο ρεύμα του πάνελ είναι 600 mA, ενώ η μέγιστη πειραματική τιμή που καταγράφηκε ήταν 503 mA. Η μέση τιμή ρεύματος ήταν 165 mA. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι, σε ορισμένες χρονικές στιγμές, το πάνελ προσέγγισε σημαντικό ποσοστό της ονομαστικής του ικανότητας ως προς το ρεύμα, ενώ η μέση τιμή ήταν χαμηλότερη λόγω της μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη διάρκεια των μετρήσεων.

Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια των μετρήσεων παρουσίασε μέγιστη τιμή 41,4°C και μέση τιμή 22,2°C. Η τιμή των 25°C που εμφανίζεται στον πίνακα αντιστοιχεί στην πρότυπη θερμοκρασία αναφοράς των STC και όχι σε πραγματικά σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας. Η καταγραφή μεγαλύτερων θερμοκρασιών είναι αναμενόμενη σε εξωτερικό περιβάλλον, ειδικά σε ημέρες με έντονη ηλιοφάνεια. Για την φωτεινότητα δεν δίνεται ονομαστική τιμή στον πίνακα καθώς δεν αποτελεί ηλεκτρικό χαρακτηριστικό του φωτοβολταϊκού πάνελ. Οι ονομαστικές συνθήκες δοκιμής από τον κατασκευαστή εκφράζεται σε W/m^2 , ενώ στην παρούσα εργασία η φωτεινότητα καταγράφηκε από τον αισθητήρα σε lux. Κατά συνέπεια οι τιμές lux χρησιμοποιούνται ως περιβαλλοντική ένδειξη φωτισμού και όχι ως άμεση ισοδύναμη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 . Η φωτεινότητα έφτασε σε μέγιστη τιμή 54.612,5 lux, ενώ η μέση τιμή ήταν 16758,43 lux.

6.7 Ανάλυση συμπεριφοράς του πάνελ

Η ανάλυση των συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λειτουργική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ρεαλιστικές συνθήκες. Είναι αξιοσημείωτη η σταθερότητα της τάσης σχέση με την έντονη μεταβλητότητα του ρεύματος. Συγκεκριμένη η μέση τάση λειτουργίας διαμορφώθηκε στα 20,04 V, πλησιάζοντας πολύ στην μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή των 22,04V. Αυτή η συμπεριφορά υποδηλώνει ότι το πάνελ διατηρεί υψηλή διαφορά δυναμικού κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα να λειτουργεί σαν μια έτοιμη πηγή ενέργειας, ακόμη και σε περιόδους μέτριας ηλιοφάνειας. Η ταύτιση της τάσης με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή ($V_{oc} = 21.6 V \pm 5\%$), δείχνει την ακρίβεια του αισθητήρα ρεύματος, τάσης INA219 και την ελαχιστοποίηση των απωλειών στο κύκλωμα. Αντίθετα η παραγόμενη ισχύς παρουσίασε άμεση εξάρτηση από την ροή του ρεύματος, το οποίο με την σειρά του επηρεαζόταν άμεσα από την ένταση της φωτεινότητας. Η μέγιστη ισχύς καταγράφηκε σε αιχμή της ηλιοφάνειας με το ρεύμα να προσεγγίζει τα 200 mA. Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της μέσης ισχύος αναδεικνύει τη φύση της ηλιακής ενέργειας όπου η παραγωγή κορυφώνεται για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ τις υπόλοιπες ώρες το πάνελ λειτουργεί σε χαμηλότερα επίπεδα απόδοσης. Συνοψίζοντας το φωτοβολταϊκό πάνελ συμπεριφέρθηκε σαν μεταβαλλόμενη πηγή ρεύματος υπό σταθερή τάση. Ο Solar Power Manager διαχειρίστηκε αποτελεσματικά τη μεταφορά της ενέργειας, φορτίζοντας την μπαταρία και ταυτόχρονα τροφοδοτώντας τον μικροελεγκτή ESP32, αποδεικνύοντας την ορθότητα του αρχικού σχεδιασμού ενός ενεργειακά αυτόνομου συστήματος.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

7.1 Τι πέτυχε στο σύστημα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σαν στόχο τον σχεδιασμό και την ανάλυση ενός έξυπνου συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης φωτοβολταϊκής ενέργειας μικρής κλίμακας με τον μικροελεγκτή ESP32. Το τελικό σύστημα πέτυχε να συνδυάσει υλικά χαμηλά σε κόστος, όπως αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, ασύρματη αποστολή δεδομένων, διαδικτυακή αποθήκευση και συνεχής απομακρυσμένη παρακολούθηση μέσω από web dashboard. Μέσω αυτού του τρόπου τηρήθηκε μια ολοκληρωμένη ροή δεδομένων, όπου η πληροφορία ξεκινά από το φωτοβολταϊκό πάνελ και καταλήγει στον τελικό χρήστη μέσω διαδικτυακής εφαρμογής. Αυτή η προσέγγιση συμφωνεί με την κατεύθυνση της βιβλιογραφίας όπου αναφέρεται ότι τα IoT συστήματα μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την παρακολούθηση φωτοβολταϊκών συστημάτων επιτρέποντας την αποστολή, την καταγραφή και την περεταίρω ανάλυση των δεδομένων από απόσταση [2],[6].

Πιο συγκεκριμένα το σύστημα κατέγραψε τα βασικά μεγέθη λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ όπως τάση, ρεύμα και ισχύς καθώς και περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ένταση της φωτεινότητας. Το σύνολο των μετρήσεων εξασφάλισε τη σωστή συσχέτιση της παραγόμενης ενέργειας με εξωτερικές συνθήκες, δίνοντας στον χρήστη πλήρη έλεγχο της συμπεριφοράς του πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η καταγραφή των συγκεκριμένων παραμέτρων θεωρείται βασικό στοιχείο στα συστήματα παρακολούθησης φωτοβολταϊκών, αφού εξυπηρετεί στην αξιολόγηση της απόδοσης και στον εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων από την αναμενόμενη λειτουργία [11],[12].

Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη υλοποίηση, πέτυχε την αποθήκευση και παρουσίαση των δεδομένων σε ζωντανό χρόνο, μέσω του στημένου backend, τη βάση δεδομένων και το web dashboard. Τα δεδομένα, δεν παρέμειναν απλά σε αριθμητικές τιμές, αλλά μετατράπηκαν σε χρήσιμη πληροφορία μέσω πινάκων και γραφημάτων, κάνοντας έτσι το σύστημα πιο εύχρηστο και πρακτικό καθώς ο χρήστης παρακολουθεί την κατάσταση του κυκλώματος χωρίς να χρειάζεται την φυσική πρόσβαση στη διάταξη.

Τέλος, το σύστημα λειτούργησε ως ένα ολοκληρωμένο πρότυπο χαμηλού κόστους για μικρές φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Δεν αποτελεί εμπορικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης ή διάγνωση βλαβών, αλλά μια λειτουργική και πειραματική πλατφόρμα που συνδυάζει παραγωγή ενέργειας, συλλογή δεδομένων και απομακρυσμένη παρακολούθηση και βασική ανάλυση.

7.2 Χρησιμότητα στη πράξη

Η χρησιμότητα του παραπάνω συστήματος στην πράξη, αρχίζει από την δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης της παραγωγής ενός μικρού φωτοβολταϊκού πάνελ και της συσχέτισης της με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική, καθώς τα συστήματα παρακολούθησης φωτοβολταϊκών συνεισφέρουν στην καλύτερη κατανόηση της πραγματικής λειτουργίας τους και την αξιοποίηση των δεδομένων για ανάλυση και λήψη αποφάσεων [2][6][12]. Εκτός από την παρακολούθηση, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πρακτική αξιοποίηση της ενέργειας όπου παράγεται μέσα στην ημέρα. Για αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκε δοκιμή φόρτισης κινητού τηλεφώνου από την έξοδο USB του Solar Power Manager. Αυτή η δοκιμή είχε σαν στόχο την επιβεβαίωση ότι η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την τροφοδότηση πραγματικού φορτίου μεσαίας κατανάλωσης και όχι την πλήρη φόρτιση της συσκευής. Κατά την διάρκεια της δοκιμής, το κινητό τηλέφωνο φορτίστηκε για μια ώρα και το ποσοστό

της μπαταρίας αυξήθηκε από 5% σε 25%. Η μπαταρία του κινητού είναι περίπου 3000 mAh, οπότε αυτή η αύξηση αντιστοιχεί ενδεικτικά σε περίπου 600 mAh αποθηκευμένης ενέργειας. Ωστόσο, η τιμή αυτή δεν αποτελεί άμεση μέτρηση της ενέργειας που παρήχθη αποκλειστικά από το φωτοβολταϊκό πάνελ, καθώς η φόρτιση πραγματοποιήθηκε μέσω του Solar Power Manager και υποστηρίχθηκε τόσο από την ενέργεια που παρήγαγε το πάνελ εκείνη τη στιγμή όσο και από την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας του συστήματος. Η συγκεκριμένη δοκιμή δείχνει ότι το σύστημα μπορεί να συνδεθεί με πραγματική χρήση της παραγόμενης ενέργειας χωρίς να προορίζεται για την πλήρη αντικατάσταση κάποιου συμβατικού φορτιστή, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρές ανάγκες φόρτισης, για τροφοδότηση αισθητήρων, μικροελεγκτών, LED φωτισμού ή άλλων συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Επίσης, ιδιαίτερη σημασία μπορεί να έχει η χρήση μίας τέτοιας διάταξης σε πανεπιστημιακό περιβάλλον καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εκπαιδευτική πλατφόρμα σε εργαστήρια όπου σχετίζονται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενσωματωμένα συστήματα, IoT, βάσεις δεδομένων και web εφαρμογές. Οι φοιτητές μπορούν να παρακολουθούν σε ζωντανό χρόνο τη σχέση μεταξύ περιβαλλοντικών παραγόντων, να εξάγουν δεδομένα, να δημιουργούν γραφήματα και να αξιολογούν την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να εγκατασταθεί πιλοτικά σε campus πανεπιστημίου ως μικρός σταθμός φόρτισης συσκευών, αλλά και ταυτόχρονα παρακολούθησης φωτοβολταϊκής παραγωγής. Με αυτό το τρόπο το σύστημα θα μπορούσε να έχει τόσο εκπαιδευτικό όσο και πρακτικό χαρακτήρα, ενισχύοντας την κατανόηση και την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μικρή κλίμακα.

7.3 Περιορισμοί της παρούσας υλοποίησης

Το σύστημα παρόλο που πέτυχε τους βασικούς στόχους της διπλωματικής εργασίας, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να αναφερθούν. Η παρούσα υλοποίηση στηρίζεται σε αισθητήρες χαμηλού κόστους όπως ο INA219, ο BH1750 και ο DHT22. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι κατάλληλοι για εκπαιδευτικές και πειραματικές εφαρμογές, αλλά δεν προσφέρουν την ίδια ακρίβεια με επαγγελματικά όργανα μέτρησης, άρα οι τιμές οι οποίες καταγράφονται, περιορίζονται μόνο στη βασική παρακολούθηση και σύγκριση λειτουργίας του πάνελ, και όχι για πιστοποιημένη αξιολόγηση της απόδοσης του [14]. Επιπρόσθετα η υλοποίηση έχει δοκιμαστεί σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας δείχνουν την συμπεριφορά της συγκεκριμένης διάταξης, αλλά δεν μπορούν να γενικευτούν σε μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά συστήματα ή σε διαφορετικές εγκαταστάσεις. Για εφαρμογή σε μεγαλύτερα συστήματα θα απαιτούνταν ακριβέστερες μετρήσεις με περισσότερους αισθητήρες και πιο αναλυτική διαχείριση των δεδομένων. Τέλος το σύστημα εξαρτάται από την σύνδεση Wi-Fi και γενικά από διαδικτυακές υπηρεσίες, όπως ο server, η βάση δεδομένων και το web dashboard. Σε περίπτωση απώλειας του διαδικτύου, η αποστολή των δεδομένων και η απομακρυσμένη προβολή μπορεί να διακοπεί. Επίσης, η συγκεκριμένη υλοποίηση δεν περιλαμβάνει προηγμένες λειτουργίες, όπως αυτόματο εντοπισμό βλαβών, πρόβλεψη παραγωγής ή αλγόριθμο MPPT. Επομένως, το σύστημα αποτελεί ένα λειτουργικό και πλήρως επεκτάσιμο πρότυπο παρακολούθησης αλλά όχι ένα επαγγελματικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης.

7.4 Προτάσεις βελτίωσης

Η παρούσα υλοποίηση, μπορεί να βελτιωθεί σε αρκετά σημεία, χωρίς να αλλάξει ο βασικός χαρακτήρας ως χαμηλού κόστους IoT σύστημα παρακολούθησης Φωτοβολταϊκής ενέργειας. Η πρώτη βελτίωση αφορά την προστασία της διάταξης σε εξωτερικό περιβάλλον. Η χρήση κατάλληλου κουτιού προστασίας, στεγανοποίηση των αισθητήρων και καλύτερης στήριξης του πάνελ θα αύξανε την αξιοπιστία του συστήματος σε μακροχρόνια λειτουργία, καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα

λειτουργούν σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και συχνά εκτίθενται σε έντονη ηλιοφάνεια, υγρασία, βροχή, σκόνη και αλλαγές θερμοκρασίας. Επίσης η web πλατφόρμα θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με περισσότερες λειτουργίες όπως ειδοποιήσεις στον χρήστη όταν η ισχύς πέφτει κάτω από κάποιο συγκεκριμένο όριο, ένδειξη κατάστασης σύνδεσης της συσκευής, αλλά και διάγνωση βλαβών όταν για κάποιο λόγο κάποιο από τα κομμάτια του συστήματος δυσλειτουργεί. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία τα web-based συστήματα παρακολούθησης δεν περιορίζονται μόνο στην προβολή των δεδομένων αλλά υποστηρίζουν και ιστορική ανάλυση, καλύτερη εποπτεία και λήψη αποφάσεων από τον χρήστη [4]. Τέλος θα μπορούσε να προστεθεί τοπική αποθήκευση δεδομένων στον ESP32, με τη χρήση microSD η εσωτερικής προσωρινής μνήμης έτσι ώστε σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης Wi-Fi, οι μετρήσεις δεν θα χάνονται αλλά θα αποστέλλονται στον server όταν αποκατασταθεί η σύνδεση. Αυτή η βελτίωση θα αύξανε την αξιοπιστία του συστήματος και θα ήταν πιο κατάλληλο για χρήση σε πραγματικές συνθήκες.

7.5 Πιθανές επεκτάσεις

Εκτός από τις παραπάνω βελτιώσεις, το σύστημα μπορεί να αποτελέσει μια βάση για αρκετές μελλοντικές επεκτάσεις. Μια βασική επέκταση θα ήταν η ενσωμάτωση αλγόριθμου MPPT. Με αυτόν τον αλγόριθμο το σύστημα δεν θα περιοριζόταν στην παρακολούθηση της παραγωγής ενέργειας, αλλά θα μπορούσε να συνεισφέρει και στη βελτιστοποίηση της ισχύος και να εντοπίζει ασυνήθιστες αποκλίσεις, όπως χαμηλή παραγωγή σε συνθήκες υψηλού φωτισμού, ή απότομες μεταβολές της ισχύος. Μια δεύτερη πιθανή επέκταση είναι η προσθήκη λειτουργιών ανίχνευσης βλαβών. Το σύστημα θα μπορούσε να αναλύει τις τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος για να εντοπίζει ασυνήθιστες αποκλίσεις. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται για την διάγνωση βλαβών και την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων ως βασική λειτουργία προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης φωτοβολταϊκών, καθώς ενισχύουν την μείωση απωλειών και την βελτίωση της συντήρησης [5]. Επίσης η επόμενη πιθανή επέκταση αφορά την χρήση διαφορετικής τεχνολογίας επικοινωνίας όπως Lo-Ra, ή 4G, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να λειτουργεί άρτια και σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση σε Wi-Fi είναι αρκετά δύσκολη. Αυτό θα έκανε την διάταξη καταλληλότερη για μεγαλύτερα και απομακρυσμένα εξωτερικά πεδία μέτρησης. Τέλος μια προχωρημένη μελλοντική επέκταση θα ήταν η χρήση τεχνικών πρόβλεψης παραγωγής. Με την αποθήκευση ιστορικών δεδομένων που ήδη υπάρχουν στο σύστημα, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν αλγόριθμοι πρόβλεψης, η τεχνικές μηχανικής μάθησης για την εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγής με βάση προηγούμενες μετρήσεις και συνθήκες περιβάλλοντος, αξιοποιώντας τα δεδομένα για ενεργειακή διαχείριση και καλύτερο προγραμματισμό της κατανάλωσης του χρήστη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Rao Jaladi, K. Khithani, P. Pawar, K. Malvi, and G. Sahoo, “Environmental Monitoring Using Wireless Sensor Networks (WSN) s on IoT,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, no. 1, pp. 1371–1376, Jan. 2017.
- [2] M. Gopal, T. Chandra Prakash, N. Venkata Ramakrishna, and B. Prabhanjan Yadav, “IoT Based Solar Power Monitoring System,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 981, no. 3, Art. no. 032037, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/981/3/032037.
- [3] G. V. Bhau, R. G. Deshmukh, T. Rajasanthosh Kumar, S. Chowdhury, Y. Sesharao, and Y. Abilmazhinov, “IoT based solar energy monitoring system,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 3697–3701, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.364.
- [4] D. D. Prasanna Rani, D. Suresh, P. R. Kapula, C. H. M. Akram, N. Hemalatha, and P. K. Soni, “IoT based smart solar energy monitoring systems,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 3540–3545, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.293.
- [5] S. H. Cheragee, N. Hassan, S. Ahammed, and A. Z. M. T. Islam, “A Study of IoT Based Real-Time Solar Power Remote Monitoring System,” *International Journal of Ambient Systems and Applications*, vol. 9, no. 1/2, pp. 27–39, Jun. 2021, doi: 10.5121/ijasa.2021.9204.
- [6] S. Adhya, D. Saha, A. Das, J. Jana, and H. Saha, “An IoT Based Smart Solar Photovoltaic Remote Monitoring and Control Unit,” in *2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)*, 2016, pp. 432–436.
- [7] M. M. Rahman, J. Selvaraj, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “Global modern monitoring systems for PV based power generation: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 4142–4158, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.111.
- [8] Y. A. Ahmad, T. S. Gunawan, H. Mansor, B. A. Hamida, A. F. Hishamudin, and F. Arifin, “Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application,” in *2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, 2021, pp. 131–136.
- [9] A. H. Sabry, W. Z. W. Hasan, M. Z. A. Ab. Kadir, M. A. M. Radzi, and S. Shafie, “Low Cost Wireless Sensor Monitoring System for Photovoltaic (PV) Array Parameters,” in *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*, 2017.
- [10] B. Andò, S. Baglio, A. Pistorio, G. M. Tina, and C. Ventura, “Sentinella: Smart Monitoring of Photovoltaic Systems at Panel Level,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 8, pp. 2188–2199, Aug. 2015, doi: 10.1109/TIM.2014.2386931.
- [11] S. M. Patil, M. Vijayalashmi, and R. Tapaskar, “IoT based solar energy monitoring system,” in *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, 2017, pp. 1574–1578.
- [12] S. Dalipto, A. Chouder, P. Guerriero, A. Massi Pavan, A. Mellit, R. Moeini, and P. Tricoli, “Monitoring, Diagnosis, and Power Forecasting for Photovoltaic Fields: A Review,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017, Art. no. 1356851, 2017, doi: 10.1155/2017/1356851.

- [13] T. L. Narayana, C. Venkatesh, A. Kiran, C. B. J, A. Kumar, S. B. Khan, A. Almusharraf, and M. T. Quasim, “Advances in real time smart monitoring of environmental parameters using IoT and sensors,” *Heliyon*, vol. 10, Art. no. e28195, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28195.
- [14] Rohm Semiconductor, “BH1750FVI: Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC,” Technical Note / Datasheet.
- [15] Waveshare, “Solar Power Management Module, for 6V~24V Solar Panel,”
- [16] XTAR, “XTAR 3.7V 14500 800mAh Lithium Battery,” product specifications, accessed Mar. 21, 2026.
- [17] Google, “Firebase Realtime Database Documentation.” [Online]. Available: <https://firebase.google.com/docs/database>
- [18] C. Honsberg and S. Bowden, “IV Curve,” *PV Education*. [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>.
- [19] K. Meah and M. H. Ali, “Comparative Evaluation of Small-Scale Residential PV System Applications in a Developed and a Developing Economy,” in 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), 2018, doi: 10.1109/PVSC.2018.8547785.
- [20] X. Wu, Z. Cheng, and X. Wei, “A Study of Maximum Power Point Tracking in Novel Small-Scale Photovoltaic LED Lighting Systems,” in 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, vol. 2, 2009, pp. 40–43, doi: 10.1109/AICI.2009.387.
- [21] K. Meah and M. H. Ali, “Comparative Evaluation of Small-Scale Residential PV System Applications in a Developed and a Developing Economy,” in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, Waikoloa Village, HI, USA, 2018, pp. 3604–3607.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας ESP32

```
#include <WiFi.h>
#include "esp_sleep.h"
#include <WebServer.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>
#include "DHT.h"
#include <BH1750.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <WiFiClientSecure.h>

// WiFi & API Config
const char* ssid = "YOUR_WIFI";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";
const char* serverUrl = "https://your-server/api/data";
const char* INGEST_KEY = "YOUR_KEY";
const char* DEVICE_ID = "esp32-1";

// I2C Pins
#define I2C_SDA 1
#define I2C_SCL 2
#define BH_SDA 8
#define BH_SCL 9
TwoWire I2C_BH(1);

Adafruit_INA219 ina219(0x45);

#define DHTPIN 4
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

BH1750 lightMeter;

// Sensor values
float lastBusV = NAN;
float lastCurrent_mA = NAN;
float lastPower_mW = NAN;
float lastTempC = NAN;
float lastHumidity = NAN;
float lastLux = NAN;

bool inaOk = false;
bool bhOk = false;

// Intervals
const unsigned long DAY_INTERVAL_MS = 60000; // 1 minute
const unsigned long NIGHT_INTERVAL_MS = 3600000; // 1 hour

// Lux thresholds with hysteresis
const float DAY_LUX_THRESHOLD = 15.0; // enter/stay day above this
const float NIGHT_LUX_THRESHOLD = 8.0; // enter/stay night below this

// Persistent state across deep sleep
RTC_DATA_ATTR bool dayMode = false;
```

```

String jsonNumberOrNull(float v, int decimals) {
    if (isnan(v)) return "null";
    return String(v, decimals);
}

float readStableLux() {
    if (!bhOk) return NAN;

    delay(1200); // sensor warm-up after wakeup

    float sum = 0.0;
    int validCount = 0;

    for (int i = 0; i < 3; i++) {
        float lux = lightMeter.readLightLevel();

        if (!isnan(lux) && lux >= 0.0) {
            sum += lux;
            validCount++;
        }

        delay(200);
    }

    if (validCount == 0) return NAN;
    return sum / validCount;
}

void updateModeFromLux() {
    if (!bhOk || isnan(lastLux)) return;

    if (!dayMode && lastLux >= DAY_LUX_THRESHOLD) {
        dayMode = true;
    }

    if (dayMode && lastLux <= NIGHT_LUX_THRESHOLD) {
        dayMode = false;
    }
}

String getModeLabel() {
    return dayMode ? "Day" : "Night";
}

unsigned long currentIntervalMs() {
    return dayMode ? DAY_INTERVAL_MS : NIGHT_INTERVAL_MS;
}

void readAllSensors() {
    if (inaOk) {
        lastBusV = ina219.getBusVoltage_V();
        lastCurrent_mA = ina219.getCurrent_mA() * 10.0f;
        lastPower_mW = ina219.getPower_mW() * 10.0f;
    }

    float t = dht.readTemperature();
    float h = dht.readHumidity();
}

```

```

    if (!isnan(t)) lastTempC = t;
    if (!isnan(h)) lastHumidity = h;
}

void postToNode() {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) return;

    WiFiClientSecure client;
    client.setInsecure();

    HTTPClient http;
    if (http.begin(client, serverUrl)) {
        http.addHeader("Content-Type", "application/json");
        http.addHeader("x-ingest-key", INGEST_KEY);

        String json = "{\"deviceId\":\"" + String(DEVICE_ID) + "\",";
        json += "\"voltage_V\":\"" + jsonNumberOrNull(lastBusV, 3) + "\",";
        json += "\"current_mA\":\"" + jsonNumberOrNull(lastCurrent_mA, 3) + "\",";
        json += "\"power_mW\":\"" + jsonNumberOrNull(lastPower_mW, 3) + "\",";
        json += "\"temp_C\":\"" + jsonNumberOrNull(lastTempC, 2) + "\",";
        json += "\"humidity_pct\":\"" + jsonNumberOrNull(lastHumidity, 2) + "\",";
        json += "\"light_lux\":\"" + jsonNumberOrNull(lastLux, 1) + "\",";
        json += "\"mode\":\"" + getModeLabel() + "\"}";

        http.POST(json);
        http.end();
    }
}

void connectWiFi() {
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
    }
}

void goToSleep(unsigned long intervalMs) {
    Serial.print("Lux: ");
    Serial.println(lastLux);

    Serial.print("Mode: ");
    Serial.println(dayMode ? "DAY" : "NIGHT");

    Serial.print("Next wakeup in (ms): ");
    Serial.println(intervalMs);

    esp_sleep_enable_timer_wakeup((uint64_t)intervalMs * 1000ULL);
    esp_deep_sleep_start();
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    Wire.begin(I2C_SDA, I2C_SCL);
    I2C_BH.begin(BH_SDA, BH_SCL);

    if (lightMeter.begin(BH1750::CONTINUOUS_HIGH_RES_MODE, 0x23, &I2C_BH)) {
        bhOk = true;
    }
}

```

```
if (ina219.begin()) {
  inaOk = true;
}

dht.begin();
}

void loop() {
  // 1. First read lux and update mode
  lastLux = readStableLux();
  updateModeFromLux();

  // 2. Read the rest of sensors
  readAllSensors();

  // 3. Connect and send in BOTH modes
  connectWiFi();
  postToNode();

  // 4. Sleep according to mode
  goToSleep(currentIntervalMs());
}
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Σύνδεσμοι υλοποίησης

Github Repository: https://github.com/alexmavrotheris/Thesis_Project

Web dashboard: <https://solar-dashboard-server.onrender.com/>

Google Sheet: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1sEE3_Ar8uSXKhOHB88Md