

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Σχεδίαση και αξιολόγηση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με παρακολούθηση της θέσης του ήλιου»



Του φοιτητή
Κλούρη Νικολάου
Αρ. Μητρώου: 517309

Επιβλέπων
Παπακώστας Δημήτριος
Καθηγητής

Ημερομηνία Μάιος 2026

Τίτλος Δ.Ε. Σχεδίαση και αξιολόγηση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με παρακολούθηση της θέσης του ήλιου

Κωδικός Δ.Ε. 24274

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Κλούρης Νικόλαος
Όνοματεπώνυμο εισηγητή Παπακόστας Δημήτριος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 24-10-2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 24-10-2026

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 Κλούρη Νικολάου που την εκπόνησε/αν. 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.

«Την παρούσα διπλωματική εργασία την αφιερώνω στην οικογένειά μου και σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της υλοποίησής της.»

Πρόλογος

Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος προέκυψε κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης, καθώς και της μετέπειτα επαγγελματικής μου δραστηριότητας σε εταιρικό περιβάλλον. Στο πλαίσιο αυτό συνάντησα εφαρμογές εγκατάστασης συστημάτων μετρήσεων σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση είναι εξαιρετικά περιορισμένη και πρακτικά εφικτή μόνο μια φορά. Κατά την υλοποίηση της εργασίας ασχολήθηκα με πάρα πολλούς τομείς της ηλεκτρονικής επιστήμης, γεγονός που συνέβαλε ουσιαστικά στην επαγγελματική μου εξέλιξη. Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας μου αποκόμισα πολλές γνώσεις σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας, καθώς και με τους κατάλληλους τρόπους μέτρησης και αξιοποίησης της. Επιπλέον διεύρυνα τις γνώσεις μου στη σχεδίαση κυκλωμάτων και πλακετών όπως επίσης και στην ορθή επιλογή υλικών μέσα από σωστή έρευνα. Τέλος, παρατήρησα πόσο μεγάλη διαφορά υπάρχει ανάμεσα σε ένα σύστημα που δουλεύει σε εργαστηριακό περιβάλλον σε σχέση με ένα σύστημα που καλείται να ανταποκριθεί στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στο πεδίο.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη σχεδίαση, κατασκευή και αξιολόγηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με δυνατότητα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου. Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης ενός σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο που μεταβάλλει δυναμικά τον προσανατολισμό του σε δύο άξονες.

Για την υλοποίηση της διάταξης κατασκευάστηκαν δύο ανεξάρτητα φωτοβολταϊκά συστήματα. Κάθε σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ρυθμιστή φόρτισης MPPT, μπαταρία, φορτίο και αισθητήρες μέτρησης τάσης και ρεύματος. Το σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιεί δύο Servo, οι οποίοι ελέγχονται από αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3. Ο προσανατολισμός του πλαισίου υπολογίζεται με βάση την ημερομηνία, την ώρα και τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης.

Οι μετρήσεις συλλέγονται από αισθητήρες INA260, οργανώνονται σε μορφή JSON και αποστέλλονται σε διαδικτυακή υποδομή για αποθήκευση, επεξεργασία και απεικόνιση μέσω Firebase, BigQuery και Grafana. Η ανάλυση βασίζεται στον υπολογισμό της στιγμιαίας ισχύος και της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας σε βατώρες, με δειγματοληψία ανά 10 δευτερόλεπτα.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι το σύστημα παρακολούθησης παρουσίασε σταθερά μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το fixed σύστημα. Για την εξεταζόμενη περίοδο, το tracking σύστημα παρήγαγε περίπου 84.54% περισσότερη ενέργεια. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει ότι η δυναμική προσαρμογή του φωτοβολταϊκού πλαισίου ως προς τη θέση του ήλιου μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

«Autonomous photovoltaic system with solar tracking capability»

«Nick Klouris»

Abstract

This diploma thesis focuses on the design, construction and evaluation of an autonomous photovoltaic system with the ability to track the position of the sun. The main objective of the thesis is to compare the energy performance of a fixed photovoltaic panel with a photovoltaic panel that dynamically adjusts its orientation on two axes.

For the implementation of the system, two independent photovoltaic setups were constructed. Each setup consists of a photovoltaic panel, an MPPT charge controller, a battery, an electrical load and voltage/current measurement sensors. The tracking system uses two Servo motors, which are controlled by an ESP32-S3 development board. The orientation of the panel is calculated based on the date, time and geographical location of the installation.

The measurements are collected by INA260 sensors, organized in JSON format and transmitted to an online infrastructure for storage, processing and visualization through Firebase, BigQuery and Grafana. The analysis is based on the calculation of instantaneous power and daily generated energy in watt-hours, with data sampling every 10 seconds.

The results showed that the tracking system consistently produced more energy than the fixed system. During the examined period, the tracking system generated approximately 84.54% more energy. This result confirms that the dynamic adjustment of the photovoltaic panel according to the position of the sun can significantly increase the energy performance of an autonomous photovoltaic system.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τους καθηγητές, τους συμφοιτητές και τους συναδέλφους μου, που με βοήθησαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας, κύριο Παπακώστα Δημήτριο, για τη βοήθεια και τη στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συντομογραφίες.....	xv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Ηλιακή ενέργεια	1
1.2 Εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας	1
1.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα	1
1.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια και κατηγορίες.....	2
1.4.1 Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Monocrystalline)	2
1.4.2 Πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Polycrystalline)	2
1.4.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου (Thin-film).....	2
1.4.4 Συγκριτική αξιολόγηση	3
1.5 Σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα (fixed panel systems).....	3
1.6 Συστήματα παρακολούθησης ήλιου (tracking systems).....	4
1.6.1 Συστήματα παρακολούθησης ενός άξονα (single-axis tracking)	4
1.6.2 Συστήματα παρακολούθησης δύο αξόνων (dual-axis tracking).....	4
1.7 Επίλογος	5
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο Τεχνολογιών Συστήματος	6
2.1 Μέγιστη σημειακή παρακολούθηση ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT).....	6
2.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	7
2.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.....	7
2.4 Αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών	8
2.5 Αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3.....	8
2.6 Σύστημα πραγματικού χρόνου (RTC).....	9
2.7 Σύστημα κίνησης και κινητήρες Servo	9
2.8 Υπολογισμός θέσης ήλιου	9
2.9 Επικοινωνία και απομακρυσμένη παρακολούθηση δεδομένων	11

2.10	Επίλογος.....	11
Κεφάλαιο 3ο: Υλοποίηση Ηλεκτρονικού Συστήματος και Λογισμικού.....		12
3.1	Εισαγωγή.....	12
3.2	Γενική αρχιτεκτονική του συστήματος.....	12
3.3	Ενεργειακή διάταξη των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	13
3.4	Υλοποίηση συστήματος μετρήσεων.....	15
3.5	Υλοποίηση συστήματος ελέγχου.....	16
3.5.1	Βασικές βιβλιοθήκες λογισμικού.....	16
3.5.2	Συνδέσεις αναπτυξιακής πλακέτας.....	17
3.5.3	Βασικές μεταβλητές λογισμικού.....	17
3.5.4	Αρχικοποίηση συστήματος.....	19
3.5.5	Επιλογή καναλιού πολυπλέκτη και ανάγνωση αισθητήρων.....	20
3.5.6	Συγχρονισμός ώρας μέσω NTP και RTC.....	20
3.5.7	Υπολογισμός ημερήσιων παραμέτρων.....	20
3.5.8	Υπολογισμός γωνιών θέσης του ήλιου.....	21
3.5.9	Έλεγχος των σερβοκινητήρων.....	21
3.5.10	Αποστολή δεδομένων σε μορφή JSON.....	22
3.5.11	Φάσεις λειτουργίας κύριου προγράμματος.....	22
3.6	Υλοποίηση συστήματος κίνησης.....	22
3.7	Τροφοδοσία βοηθητικών κυκλωμάτων.....	23
3.8	Υλοποίηση δικτυακής επικοινωνίας και αποστολής δεδομένων.....	24
3.9	Επίλογος.....	25
Κεφάλαιο 4ο: Μηχανολογική σχεδίαση, κατασκευή και εγκατάσταση συστήματος.....		26
4.1	Εισαγωγή.....	26
4.2	Πλακέτα ελέγχου και μετρήσεων.....	26
4.3	Πίνακας μπαταριών.....	31
4.4	Παροχή ρεύματος από switching τροφοδοτικό.....	34
4.5	Μετατροπείς step-down.....	35
4.5.1	Πυκνωτές εξομάλυνσης και φιλτραρίσματος τροφοδοσίας.....	37
4.6	Ρυθμιστές φόρτισης MPPT.....	37
4.7	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	38
4.8	Φορτία συστήματος.....	40
4.9	Σερβοκινητήρες.....	42
4.10	Σχεδίαση και κατασκευή βάσεων με 3D printer.....	44
4.10.1	Βάση σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	45

4.10.2	Βάση συστήματος παρακολούθησης δύο αξόνων.....	47
4.11	Κονέκτορες και καλωδιώσεις.....	48
4.12	Υλικά ράγας και εσωτερική οργάνωση κεντρικού πίνακα.....	49
4.13	Δικτυακή υποδομή	51
4.14	Διαδικτυακές εφαρμογές αποθήκευσης και απεικόνισης.....	52
4.15	Τελική εγκατάσταση συστήματος.....	55
4.16	Επίλογος.....	56
Κεφάλαιο 5ο:	Μετρήσεις, Αποτελέσματα και Σύγκριση Απόδοσης	57
5.1	Εισαγωγή.....	57
5.2	Διαδικασία συλλογής δεδομένων.....	57
5.3	Υπολογισμός ισχύος και ημερήσιας ενέργειας.....	57
5.4	Επεξεργασία και εξομάλυνση μετρήσεων ισχύος.....	59
5.5	Συγκεντρωτικά ημερήσια αποτελέσματα	61
5.6	Εργαλεία για την γραφική απεικόνιση	62
5.6.1	Open-Meteo Historical Weather.....	62
5.6.2	timeanddate.....	64
5.6.3	Ανάλυση της μέρας 23/05/2026 στο Grafana (Μέρα με χαμηλότερη παραγωγή)	65
5.6.4	Ανάλυση της μέρας 29/05/2026 στο Grafana (Μέρα με υψηλότερη παραγωγή).....	68
5.6.5	Ανάλυση της μέρας 19/05/2026 στο Grafana (Μέρα με μέτρια παραγωγή)	71
5.7	Συνολική αξιολόγηση αποτελεσμάτων	74
5.8	Παρατηρήσεις λειτουργίας και περιορισμοί μετρήσεων.....	76
5.9	Επίλογος κεφαλαίου	76
Κεφάλαιο 6ο:	Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης.....	78
6.1	Εισαγωγή.....	78
6.2	Συμπεράσματα υλοποίησης.....	78
6.3	Συμπεράσματα απόδοσης.....	79
6.4	Περιορισμοί της εργασίας	79
6.5	Προτάσεις μελλοντικής βελτίωσης	80
6.6	Τελικό συμπέρασμα	80
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας λειτουργίας ESP32-S3.....		83

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1: Μπλοκ διάγραμμα συνολικού συστήματος	12
Σχήμα 3-2: Ενεργειακή διάταξη σταθερού φωτοβολταϊκού συστήματος	14
Σχήμα 3-3: Ενεργειακή διάταξη συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ήλιου	14
Σχήμα 3-4: Διάταξη μετρήσεων με αισθητήρες INA260 και πολυπλέκτη I2C.....	15
Σχήμα 3-5: Βασικές μεταβλητές λογισμικού για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου και την καταγραφή μετρήσεων	19
Σχήμα 3-6: Έλεγχος σερβοκινητήρων για την κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου	21
Σχήμα 3-7: Ροή αποστολής δεδομένων από το ESP32-S3 προς τις διαδικτυακές υπηρεσίες	24
Σχήμα 4-1: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας MCU & Sensor Board στο KiCad.....	27
Σχήμα 4-2: Σχεδίαση PCB της πλακέτας MCU & Sensor Board στο KiCad	27
Σχήμα 4-3: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας MCU & Sensor Board.....	28
Σχήμα 4-4: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας PSU Board στο KiCad	29
Σχήμα 4-5: Σχεδίαση PCB της πλακέτας PSU Board στο KiCad	29
Σχήμα 4-6: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας PSU Board.....	30
Σχήμα 4-7: Προσωρινή υλοποίηση κυκλωμάτων ελέγχου και τροφοδοσίας στον κεντρικό πίνακα	30
Σχήμα 4-8: Μπαταρία και πίνακας μπαταριών των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	31
Σχήμα 4-9: Στήριξη μπαταριών με 3D printed βάσεις	32
Σχήμα 4-10: 3D σχέδια βάσεων μπαταριών.....	33
Σχήμα 4-11: Switching τροφοδοτικό 230 VAC σε 12 VDC για την τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων	35
Σχήμα 4-12: Μετατροπείς step-down για τις επιμέρους τάσεις τροφοδοσίας.....	36
Σχήμα 4-13: Ρυθμιστές φόρτισης MPPT των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	38
Σχήμα 4-14: Φωτοβολταϊκά πλαίσια σταθερού και tracking συστήματος.....	39
Σχήμα 4-15: Φορτία συνεχούς τάσης των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων	40
Σχήμα 4-16: Σύγκριση της απόδοσης των πάνελ με 10 watt φορτίο.....	41
Σχήμα 4-17: Σύγκριση της ισχύος των μπαταριών με 10 watt φορτίο.....	41
Σχήμα 4-18: Σύγκριση της τάσης των μπαταριών με 10 watt φορτίο.....	41
Σχήμα 4-19: Τοποθέτηση κινητήρων στις 3D printed βάσεις.....	42
Σχήμα 4-20: Servo υψηλής ροπής για την κίνηση του tracking πλαισίου	43
Σχήμα 4-21: 3D σχεδίαση εξαρτημάτων βάσεων	44
Σχήμα 4-22: 3D εξαρτήματα βάσεων φωτοβολταϊκών πλαισίων προς εκτύπωση.....	44
Σχήμα 4-23: 3D εξαρτήματα σταθερής βάσης	46
Σχήμα 4-24: Εκτυπωμένη σταθερή βάση.....	46
Σχήμα 4-25: 3D εξαρτήματα κινούμενης βάσης.....	47
Σχήμα 4-26: Εκτυπωμένη κινητή βάση.....	48
Σχήμα 4-27: Κονέκτορες SP13 και καλωδιώσεις διασύνδεσης υποσυστημάτων	49
Σχήμα 4-28: Εσωτερική οργάνωση κεντρικού πίνακα ελέγχου και τροφοδοσίας	50
Σχήμα 4-29: Ολοκληρωμένος πίνακας συστήματος	51
Σχήμα 4-30: Δικτυακή υποδομή με χρήση 4G/Wi-Fi router.....	52
Σχήμα 4-31: Καταγραφή δεδομένων στο Firebase	53
Σχήμα 4-32: Αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων στο BigQuery	53
Σχήμα 4-33: Απεικόνιση μετρήσεων στο Grafana Panel 1	54
Σχήμα 4-34: Απεικόνιση μετρήσεων στο Grafana Panel 2	54
Σχήμα 4-35: Απεικόνιση μετρήσεων στο Grafana Panel 3	54

Σχήμα 4-36: Τελική εγκατάσταση του συστήματος με το fixed και το tracking φωτοβολταϊκό πλαίσιο	56
Σχήμα 5-1: Σύγκριση αρχικής καμπύλης ισχύος και εξομαλυμένης καμπύλης με κυλιόμενο μέσο όρο 5 λεπτών για τα tracking και fixed φωτοβολταϊκά πλαίσια	60
Σχήμα 5-2: Συγκεντρωτικός πίνακας ημερήσιων αποτελεσμάτων από το Grafana	61
Σχήμα 5-3: Επιλογή τοποθεσίας και χρονικού διαστήματος στην υπηρεσία Open-Meteo Historical Weather	63
Σχήμα 5-4: Επιλογή μετεωρολογικών μεταβλητών και ηλιακής ακτινοβολίας στην υπηρεσία Open-Meteo.....	63
Σχήμα 5-5: Επιλογή χρονικού διαστήματος στην υπηρεσία Open-Meteo Historical Weather	63
Σχήμα 5-6: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo	64
Σχήμα 5-7: Στοιχεία ανατολής και δύσης ηλίου από την υπηρεσία timeanddate	64
Σχήμα 5-8: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo για τη μέρα 23/05/2026.....	65
Σχήμα 5-9: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για ημέρα με αυξημένη ηλιοφάνεια για τη μέρα 23/05/2026	66
Σχήμα 5-10: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για τη μέρα 23/05/2026	66
Σχήμα 5-11: Ανάλυση της μέρας 23/05/2026 από πίνακα παραγωγής των τελευταίων δεκαπέντε ημερών	67
Σχήμα 5-12: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo για τη μέρα 29/05/2026.....	68
Σχήμα 5-13: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για ημέρα με αυξημένη ηλιοφάνεια για τη μέρα 29/05/2026	69
Σχήμα 5-14: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για τη μέρα 29/05/2026	69
Σχήμα 5-15: Ανάλυση της μέρας 29/05/2026 από πίνακα παραγωγής των τελευταίων δεκαπέντε ημερών	70
Σχήμα 5-16: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo για τη μέρα 19/05/2026.....	71
Σχήμα 5-17: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για ημέρα με αυξημένη ηλιοφάνεια για τη μέρα 19/05/2026	72
Σχήμα 5-18: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για τη μέρα 19/05/2026	72
Σχήμα 5-19: Ανάλυση της μέρας 19/05/2026 από πίνακα παραγωγής των τελευταίων δεκαπέντε ημερών	73
Σχήμα 5-20: Παραγωγή ενέργειας των τελευταίων 15 ημερών	75
Σχήμα 5-21: Συνολική παραγωγή ενέργειας συστημάτων tracking και fixed τις τελευταίες δεκαπέντε μέρες.....	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ενδεικτική απόδοση σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου ανά εποχή	3
Πίνακας 3.1: Βασικά στοιχεία των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων	15
Πίνακας 3.2: Αντιστοίχιση αισθητήρων INA260 στα κανάλια του I2C multiplexer.....	16
Πίνακας 3.3: Βασικές βιβλιοθήκες λογισμικού.....	17
Πίνακας 3.4: Βασικές συνδέσεις του ESP32-S3	17
Πίνακας 3.5: Βασικές μεταβλητές υπολογισμού θέσης	18
Πίνακας 3.6: Μεταβλητές μετρήσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων	19

Πίνακας 3.7: Τροφοδοσία βοηθητικών κυκλωμάτων	23
Πίνακας 4.1: Πίνακας επιλογής ασφάλειας για ασφαλειοαποζεύκτη μπαταριών	33
Πίνακας 4.2: Στοιχεία πίνακα μπαταριών	34
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού βοηθητικών κυκλωμάτων	35
Πίνακας 4.4: Μετατροπείς step-down της κατασκευής	36
Πίνακας 4.5: Πυκνωτές φιλτραρίσματος και σημεία τοποθέτησης	37
Πίνακας 4.6: Ρυθμιστές φόρτισης MPPT.....	38
Πίνακας 4.7: Βασικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάνελ.....	39
Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων.....	43
Πίνακας 4.9: Ρόλος δικτυακής υποδομής.....	52
Πίνακας 4.10: Διαδικτυακές εφαρμογές και ρόλος τους.....	55
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά ημερήσια αποτελέσματα παραγωγής ενέργειας	62

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Maximum Power Point
PWM	Pulse Width Modulation
RTC	Real Time Clock
I2C	Inter-Integrated Circuit
NTP	Network Time Protocol
JSON	JavaScript Object Notation
GPIO	General Purpose Input/Output
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
Wh	Watt-hour
kWh	Kilowatt-hour
V	Volt
A	Ampere
W	Watt

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Καθώς περνάν τα χρόνια παρατηρείται η αυξανόμενη αξιοποίηση της λόγω της ανάγκης για μείωση της εξάρτησης μας από ορυκτά καύσιμα και περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης με την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας αναπτύσσονται αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, τα οποία μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο, καθιστώντας την ηλιακή ενέργεια ακόμα πιο σημαντική διότι αναπτύσσουμε εφαρμογές σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.

Ωστόσο, βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι μεταβάλλεται συνεχώς, καθώς η διαθέσιμη ισχύς εξαρτάται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες και δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται κατάλληλες τεχνικές διαχείρισης και βελτιστοποίησης της παραγόμενης ενέργειας [1].

1.2 Εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες τεχνολογίες και μεθόδους ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και τις ενεργειακές απαιτήσεις της.

Οι βασικοί τρόποι αξιοποίησης είναι:

- Τα θερμικά ηλιακά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμότητα (π.χ. ηλιακοί θερμοσίφωνας).
- Φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Υβριδικά συστήματα, που αξιοποιούν διαφορετικές μορφές ενέργειας με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να διακριθεί επίσης σε:

- Διασυνδεδεμένα συστήματα (grid connected), τα οποία λειτουργούν παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Αυτόνομα συστήματα (off grid), τα οποία λειτουργούν ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά απαιτούν αποθήκευση της ενέργειας.

Το κυριότερο ζήτημα στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης, για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η σωστή τοποθέτηση και ο σωστός προσανατολισμός του πάνελ. Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του πάνελ.

Για να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα έχουν αναπτυχθεί συστήματα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (solar tracking systems), μέσω των οποίων προσαρμόζεται δυναμικά η βέλτιστη θέση του πάνελ ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη παραγόμενη ενέργεια σε σχέση με ένα fixed σύστημα.

1.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η κύρια τεχνολογία που μας επιτρέπει να μετατρέψουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική μονάδα ενός τέτοιου συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο (solar cell), το οποίο κατασκευάζεται κατά κύριο λόγο από ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si).

Η λειτουργία του βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε μια ένωση p-n. Σε αυτή την περίπτωση τα φωτόνια της ακτινοβολίας μεταφέρουν ενέργεια στα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού, προκαλώντας τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων – πών και τελικά την ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού.

Ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει:

- Φωτοβολταϊκά πλαίσια (panels)

- Ρυθμιστή φόρτισης (MPPT)
- Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες)
- Φορτία ή μετατροπείς (inverters)

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από:

- Την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Τη θερμοκρασία λειτουργίας
- Τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας
- Τις απώλειες του συστήματος

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν υπάρχει η έννοια της γραμμικότητας ως προς την τάση και το ρεύμα και γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η Μέγιστη Σημειακή Παρακολούθηση Ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT), ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή απόδοση [1].

1.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια και κατηγορίες

Το κυριότερο εξάρτημα σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι το ίδιο το πλαίσιο γιατί αυτό μας είναι που θα δεχτεί την ηλιακή ακτινοβολία και θα μας την μετατρέψει σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι κατασκευασμένα από ημιαγώγιμα υλικά, με το πυρίτιο να κυριαρχεί. Ανάλογα με την δομή και την μέθοδο κατασκευής τους, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες με τις σημαντικότερες να είναι τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα λεπτού υμενίου [1].

1.4.1 Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Monocrystalline)

Αυτό το είδος των πλαισίων κατασκευάζεται από ένα ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Στη συνέχεια αυτό το κομμάτι κόβεται σε λεπτές φέτες οι οποίες είναι τοποθετημένες σε ανάλογη συστοιχία με τις προδιαγραφές του πλαισίου. Παρατηρώντας την επιφάνεια ενός μονοκρυσταλλικού συλλέκτη, θα παρατηρήσουμε ότι έχει ενιαίο και πιο σκούρο χρώμα, ενώ παράλληλα οι κυψέλες έχουν ρόμβους μεταξύ τους.

Με αυτό τον τρόπο κατασκευής γίνεται πιο εύκολη η κίνηση των ηλεκτρονίων, έτσι παράγονται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας με την απόδοση να κυμαίνεται μεταξύ 15 – 19%.

Τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια αποδίδουν καλύτερα όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα σε αυτά και όταν υπάρχει περιορισμένη ηλιοφάνεια.

1.4.2 Πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Polycrystalline)

Για την κατασκευή αυτών των πλαισίων χρησιμοποιούνται πολλές μπάρες πυριτίου τις οποίες τις λιώνουμε, έτσι ώστε να βγάλουμε το τελικό κράμα. Οι επιφάνειες των πολυκρυσταλλικών πλαισίων έχει συνήθως διάφορες φωτεινές αποχρώσεις του μπλε και είναι πιο γυαλιστερή. Ωστόσο πλέον παρατηρούμε πιο σκούρα χρώματα και σε πολυκρυσταλλικά πλαίσια με αποτέλεσμα να μοιάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα μονοκρυσταλλικά.

Με αυτό τον τρόπο κατασκευής τα ηλεκτρόνια έχουν περιορισμένο χώρο για να κινηθούν και συνεπώς παραγωγή ενέργειας είναι χαμηλότερη και κυμαίνεται μεταξύ 13 – 16%.

Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια παρουσιάζουν συνήθως χαμηλότερη απόδοση σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, ωστόσο αποτελούν οικονομικότερη επιλογή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά σε εφαρμογές όπου ο διαθέσιμος χώρος δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Επειδή στα πολυκρυσταλλικά πλαίσια αξιοποιείται κάθε κομμάτι πυριτίου, θεωρούνται περιβαλλοντικά πιο ωφέλιμα.

1.4.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου (Thin-film)

Σε αυτά τα πλαίσια η κατασκευή γίνεται μέσω της εναπόθεσης πολύ λεπτών στρωμάτων ημιαγώγιμου υλικού πάνω σε ένα υπόστρωμα όπως, γυαλί, πλαστικό ή μέταλλο.

Συγκριτικά με τις τεχνολογίες πυριτίου τα πλαίσια λεπτού υμενίου είναι χαμηλότερα σε απόδοση μεταξύ 10 – 13%, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζουν πολύ καλύτερη απόδοση σε υψηλότερες θερμοκρασίες και διάχυτη ακτινοβολία.

Τα πλαίσια λεπτού υμενίου έχουν ως βασικό πλεονέκτημα το χαμηλό κόστος παραγωγής και την ευελιξία λόγω του μικρού τους βάρους, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για ειδικές εφαρμογές στις οποίες όμως υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια εγκατάστασης για την ίδια παραγωγή ισχύος.

1.4.4 Συγκριτική αξιολόγηση

Συνοψίζοντας, τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά προσφέρουν την υψηλότερη απόδοση, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές όπου διατίθεται περιορισμένος χώρος. Τα πολυκρυσταλλικά αποτελούν μια οικονομικότερη λύση με ελαφρώς μειωμένη απόδοση ενώ τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπου το βάρος και το κόστος παίζουν ρόλο.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου φωτοβολταϊκού εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, το διαθέσιμο χώρο, το κόστος της εγκατάστασης και τέλος τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας.

1.5 Σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα (fixed panel systems)

Τα σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η πιο απλή εγκατάσταση ώστε να υπάρχει παραγωγή ηλιακής ενέργειας. Σε αυτά τα συστήματα, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερή θέση και με συγκεκριμένη κλίση και προσανατολισμό, χωρίς να έχουν την δυνατότητα προσαρμογής ως προς τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Για να υπάρξει η μέγιστη δυνατή απόδοση σε αυτά τα συστήματα, διαλέγουμε να τοποθετήσουμε το φωτοβολταϊκό μας πλαίσιο με νότιο προσανατολισμό και με γωνία κλίσης που προσεγγίζει το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε ότι:

$$\theta = \varphi$$

Όπου:

- θ = γωνία κλίσης πάνελ
- φ = γεωγραφικό πλάτος περιοχής

Έτσι καταλήγουμε στο ότι το καλοκαίρι πρέπει να βρισκόμαστε:

$$\approx \varphi - 10^\circ \approx 20^\circ - 25^\circ,$$

Ενώ το χειμώνα επιλέγουμε:

$$\approx \varphi + 10^\circ \approx 40^\circ - 45^\circ$$

Με αυτά τα δεδομένα, η ιδανική κλίση για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο στην Ελλάδα είναι:

$$\approx \varphi \approx 30^\circ - 35^\circ$$

Η τελική εικόνα λοιπόν, με την παραπάνω επιλογή: $\varphi \approx 30^\circ - 35^\circ$ αποτελεί ένα συμβιβασμό με στόχο την μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας. Ωστόσο όπως φαίνεται και στον πίνακα παρακάτω η τιμή αυτή δεν είναι βέλτιστη για όλες τις εποχές.

Πίνακας 1.1: Ενδεικτική απόδοση σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου ανά εποχή

Εποχή	Απόδοση με επιλογή $30^\circ - 35^\circ$
Καλοκαίρι	Πολύ καλή (90-95%)
Άνοιξη/Φθινόπωρο	Σχεδόν ιδανική (95-100%)
Χειμώνας	Μειωμένη (80-90%)

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των σταθερών φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η απλότητα κατασκευής, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς και η αξιοπιστία που προσφέρουν λόγω της απουσίας κινούμενων μερών. Ωστόσο υπάρχει και το μειονέκτημα της έντονης μειωμένης παραγωγής σε σχέση με συστήματα παρακολούθησης.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, το fixed σύστημα χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς (baseline) με σκοπό τη σύγκριση απόδοσης σε σχέση με ένα σύστημα παρακολούθησης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, έναν ελεγκτή φόρτισης τύπου MPPT, μια μπαταρία για αποθήκευση ενέργειας και ένα φορτίο, ενώ για την παρακολούθηση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται αισθητήρες μέτρησης τάσης και ρεύματος.

Σαν βασικό στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση της παραγόμενης ισχύος και της συνολικής ενέργειας απόδοσης μεταξύ του σταθερού συστήματος και του συστήματος παρακολούθησης [1].

1.6 Συστήματα παρακολούθησης ήλιου (tracking systems)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα που έχουν την δυνατότητα να παρακολουθούν τον ήλιο αποτελούν μια εξελιγμένη κατηγορία, στην οποία τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν τον προσανατολισμό τους κατά τη διάρκεια της ημέρας, με σκοπό να διατηρούν την βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η βασική αρχή λειτουργίας αυτών των συστημάτων βασίζεται στην ρύθμιση της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού έτσι ώστε να λαμβάνει κάθετα τις ηλιακές ακτίνες. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η αύξηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Για να φτιαχτεί ένα σύστημα παρακολούθησης χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν μηχανικές και ηλεκτρικές διατάξεις, όπως κινητήρες, αισθητήρες, αλγόριθμος υπολογισμού θέσης και ένα υπολογιστικό σύστημα που θα ελέγχει όλα τα προηγούμενα. Με την προσθήκη όλων αυτών των πραγμάτων αυξάνουμε την πολυπλοκότητα και το κόστος κατασκευής αλλά παράλληλα και την ενέργεια που λαμβάνουμε.

Στην παρούσα εργασία, το σύστημα παρακολούθησης βασίζεται σε υπολογισμό της θέσης του ήλιου μέσω αλγορίθμου, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την ημερομηνία, την ώρα και την γεωγραφική θέση, έτσι οδηγεί κατάλληλα τους κινητήρες για περιστροφή του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η υλοποίηση πραγματοποιείται με μικροελεγκτή, ο οποίος ελέγχει τους κινητήρες και συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες με τελικό σκοπό τη σύγκριση της απόδοσης.

Η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ του συστήματος παρακολούθησης και του αντίστοιχου σταθερού ως προς τη θέση συστήματος μας επιτρέπει την αξιολόγηση της εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες [1].

1.6.1 Συστήματα παρακολούθησης ενός άξονα (single-axis tracking)

Στα συστήματα παρακολούθησης με έλεγχο στον ένα άξονα διαλέγουμε συνήθως να δουλέψουμε με την ρύθμιση στο αζιμούθιο δηλαδή τον άξονα που μας δίνει την κίνηση από την ανατολή μέχρι την δύση.

Η διαδικασία αυτή έχει ως κύριο σκοπό την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου, αυξάνοντας την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις ώρες της ανατολής και δύσης όπου ένα fixed σύστημα θα παρουσίαζε μειωμένη απόδοση.

Τα συστήματα με έναν άξονα παρουσιάζουν καλύτερη σχέση κόστους – απόδοσης σε σύγκριση με τα συστήματα δύο αξόνων καθώς έχουν λιγότερα μηχανικά μέρη και απλούστερο σύστημα ελέγχου. Ωστόσο δεν μπορούν να προσαρμόζονται πλήρως στη μεταβολή της θέσης του ήλιου ως προς το ύψος (elevation), κάτι που περιορίζει ιδιαίτερα την μέγιστη δυνατή απόδοση.

1.6.2 Συστήματα παρακολούθησης δύο αξόνων (dual-axis tracking)

Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την περιστροφή του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε δύο άξονες, προσφέροντας προσαρμογή τόσο ως προς το αζιμούθιο, δηλαδή την κίνηση ανατολής–δύσης, όσο και ως προς τη γωνία ανύψωσης, δηλαδή το ύψος του ήλιου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται σχεδόν

κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

Επιπλέον σε αυτά τα συστήματα συναντάμε κάποια μειονεκτήματα όπως την αυξημένη πολυπλοκότητα, το υψηλότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας για την κίνηση των μηχανισμών. Όμως η καλή σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος απαντά σε όλα αυτά τα μειονεκτήματα.

Στην εργασία αυτή η υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης έχει βασιστεί σε στο σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο δύο βαθμών ελευθερίας, δηλαδή την ρύθμιση της γωνίας του ζενίθ και του αζιμούθιου, με στόχο την βέλτιστη δυνατή ευθυγράμμιση βάση της θέσης του ήλιου.

1.7 Επίλογος

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις βασικότερες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, με τα φωτοβολταϊκά συστήματα να αποτελούν την κύρια τεχνολογία αξιοποίησης της. Για να πετύχουμε την απόδοση που επιθυμούμε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον κατάλληλο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς και τον τρόπο διαχείρισης και προσανατολισμού του ώστε να επιτευχθεί κάθετη πρόσπτωση στην επιφάνεια του.

Τα σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν απλότητα και αξιοπιστία, ενώ τα συστήματα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου μας παρέχουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση. Η σύγκριση αυτών των συστημάτων αποτελεί το βασικό αντικείμενο αυτής της εργασίας και στόχος είναι η αξιολόγηση της αποδοτικότητας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο Τεχνολογιών Συστήματος

2.1 Μέγιστη σημειακή παρακολούθηση ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT)

Η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται άμεσα από την τάση και το ρεύμα λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά, αυτό σημαίνει ότι η παραγόμενη ισχύς δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιγράφεται από τη σχέση:

$$P = V * I$$

Όπου:

- P: Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού πλαισίου
- V: Τάση εξόδου φωτοβολταϊκού πλαισίου
- I: Ρεύμα εξόδου φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για κάθε συνδυασμό λειτουργίας υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στο οποίο η μέγιστη παραγόμενη ισχύς μεγιστοποιείται. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος (Maximum Power Point - MPP). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, το φωτοβολταϊκό μας σύστημα να βρίσκεται κοντά σε αυτό το σημείο, διότι ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορεί να οδηγήσουν σε αισθητή μείωση της παραγόμενης ισχύος και άρα και της τελικής απόδοσης.

Για να το πετύχουμε αυτό χρειάζονται ρυθμιστές φόρτισης τύπου MPPT. Οι ρυθμιστές φόρτισης είναι το βασικότερο στοιχείο των συστημάτων μας και τοποθετούνται μεταξύ του πάνελ και της μπαταρίας. Ο βασικός ρόλος ενός MPPT είναι η βέλτιστη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας, εξασφαλίζοντας πάντα την ασφαλή φόρτιση της μπαταρίας.

Επίσης οι ρυθμιστές φόρτισης εκτελούν πολλές λειτουργίες προστασίας ως προς το σύστημα μας. Αρχικά προστατεύουν την μπαταρία από υπερφόρτιση, περιορίζοντας το ρεύμα φόρτισης όταν η τάση της μπαταρίας προσεγγίζει το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο. Παράλληλα αποτρέπουν την αντίστροφη ροή ρεύματος από την μπαταρία προς το πάνελ κατά τις βραδινές ώρες όπου η παραγωγή ενέργειας έχει σταματήσει. Τέλος πολλοί ρυθμιστές φόρτισης διαθέτουν προστασία βαθιάς εκφόρτισης, αποσυνδέοντας τα φορτία όταν η τάση της μπαταρίας πέσει κάτω από τα ασφαλή όρια λειτουργίας.

Άλλη μια κατηγορία ρυθμιστών φόρτισης είναι οι PWM (Pulse Width Modulation). Οι PWM ρυθμιστές λειτουργούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες, μεταβάλλοντας τον κύκλο λειτουργίας τους ώστε να ελέγχουν τη διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας. Η τεχνολογία αυτή κερδίζει στην απλότητα και το χαμηλό κόστος αλλά δεν μπορεί να ακολουθήσει την λογική MPP, γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οι MPPT φορτιστές.

Οι φορτιστές MPPT χρησιμοποιούν αλγόριθμους παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος προσαρμόζοντας συνεχώς τη λειτουργία του πάνελ ώστε να επιτυγχάνει την μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας. Αυτό γίνεται με την συνεχή μέτρηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου του πάνελ και υπολογισμού της παραγόμενης ισχύος. Ο ελεγκτής του MPPT μεταβάλλει δυναμικά την ηλεκτρική αντίσταση που βλέπει το πάνελ μέσω ενός μετατροπέα DC – DC, αλλάζοντας έτσι το σημείο λειτουργίας του πάνελ στην χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος (I-V curve). Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή η λειτουργία πολύ κοντά στη σημείο της μέγιστης ισχύος (MPP).

Η διαδικασία της παρακολούθησης πραγματοποιείται συνεχώς, καθώς το σημείο μέγιστης ισχύος μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και με την θερμοκρασία λειτουργίας του πάνελ. Ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους MPPT είναι ο Perturb and Observe (P&O), κατά τον οποίο ο ελεγκτής μεταβάλλει περιοδικά την τάση λειτουργίας του πάνελ και παρατηρεί την αντίστοιχη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος. Αν η ισχύς αυξηθεί, επαναλαμβάνεται η ίδια λειτουργία, ενώ αν η ισχύς μειωθεί, η κατεύθυνση μεταβολής αντιστρέφεται.

Η χρήση της τεχνολογίας MPPT είναι πολύ σημαντική σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου θέλουμε να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ρυθμιστές φόρτισης MPPT σε αυτή την εργασία, ώστε να πετύχουμε την βέλτιστη ενεργειακή απόδοση στα φωτοβολταϊκά συστήματα που θα συγκρίνουμε [1],[3].

2.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός πάνελ καθορίζει την απόδοση και το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Για να αναλύσουμε την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός πάνελ πρέπει να είναι γνωστή η ανοικτού κυκλώματος (Open Circuit Voltage - Voc), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Short Circuit Current - Isc) και τη μέγιστη παραγόμενη ισχύς (Maximum Power - Pmax).

Η τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc) εκφράζει την μέγιστη τάση που μπορεί να εμφανίζει το πάνελ όταν δεν υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο και άρα το ρεύμα εξόδου είναι μηδενικό. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να παρέχει το πάνελ όταν οι δύο ακροδέκτες του είναι βραχυκυκλωμένοι.

Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς του πάνελ δίνεται από το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), το οποίο διαμορφώνεται από την τάση λειτουργίας για MPP (V_{MPP}) και από το ρεύμα λειτουργίας για MPP (I_{MPP}). Αυτά τα μεγέθη αντιστοιχούν στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας όπου το πάνελ αποδίδει τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ.

Η λειτουργία το πάνελ περιγράφεται από την χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος ($I - V$ curved), η οποία μας δίνει την μεταβολή του ρεύματος εξόδου σε σχέση με την τάση. Από αυτή την καμπύλη προκύπτει και η καμπύλη ισχύος – τάσης ($P - V$ curved), μέσω της οποίας προσδιορίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πάνελ επηρεάζονται πάρα πολύ από τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας. Από την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούμαστε σε αύξηση του παραγόμενου ρεύματος και συνεπώς της παραγόμενης ισχύος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας προκαλείται μείωση της τάσης εξόδου και κατά συνέπεια της συνολικής απόδοσης του πάνελ.

Λόγω της συνεχής μεταβολής των ηλεκτρικών μεγεθών του πάνελ κρίνεται απαραίτητη η χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης, όπως οι αλγόριθμοι MPPT, ώστε το σύστημα μας να έχει την μέγιστη απόδοση [2].

2.3 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα η αποθήκευση ενέργειας κρίνεται απαραίτητη, καθώς η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία δεν είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της μέρας. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συσσωρευτές (μπαταρίες), στους οποίους αποθηκεύεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ώστε να είναι διαθέσιμη όταν η παραγωγή του συστήματος είναι μειωμένη ή και καθόλου.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται σε αμπερώρια (Ah) και καθορίζει το συνολικό ποσό ηλεκτρικού φορτίου που αποθηκεύεται και μπορεί να αξιοποιηθεί οποιαδήποτε ώρα. Επιπλέον σημαντικά χαρακτηριστικά αποτελούν η ονομαστική τάση λειτουργίας, το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και το βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge - DoD), το οποίο επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Η σωστή διαχείριση φόρτισης της μπαταρίας παρέχει πιο ασφαλή και αποδοτική λειτουργία. Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιούνται ρυθμιστές φόρτισης, οι οποίοι ελέγχουν την διαδικασία της φόρτισης και προστατεύουν την μπαταρία από υπερφόρτωση, βαθιά εκφόρτιση και από συνθήκες λειτουργίας που μπορούν να μειώσουν την διάρκεια ζωής της.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες μπαταριών, όπως μολύβδου – οξέος (Lead – Acid) (Absorbent Glass Mat – AGM), (Gel), και ιόντων λιθίου (Li – ion). Η επιλογή της μπαταρίας εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής που θέλουμε να καλύψουμε. Πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από το κόστος, τη διάρκεια ζωής, την χωρητικότητα και από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μπαταρίες sealed lead – acid ονομαστικής τάσης 12V και χωρητικότητας 12Ah, η οποία πληροί όλα τα χαρακτηριστικά που χρειάζονται για την σωστή λειτουργία και τις επιθυμητές επιδόσεις του συστήματος [1].

2.4 Αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικών μεγεθών

Η παρακολούθηση των ηλεκτρικών μεγεθών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επιτρέπει την αξιολόγηση της λειτουργίας και της ενεργειακής απόδοσής του. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται αισθητήρες μέτρησης τάσης, ρεύματος και ισχύος, μέσω των οποίων μας παρέχεται η συνεχής παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος.

Για την εργασία χρησιμοποιούνται αισθητήρες INA260 οι οποίοι επιτρέπουν την μέτρηση τάσης, ρεύματος μέσω της επικοινωνίας με πρωτόκολλο I2C. Έχοντας πάρει αυτές τις μετρήσεις μπορεί να γίνει και ο μαθηματικός υπολογισμός της ισχύος. Οι αισθητήρες INA260 διαθέτουν μια αντίσταση μέτρησης ρεύματος (shunt resistor), επιτρέποντας έτσι την ακριβή μέτρησης χωρίς την ανάγκη κάποιου εξωτερικού κυκλώματος [5].

Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στην μέτρησης της πτώσης τάσης πάνω στην αντίσταση shunt και του ρεύματος που αναπτύσσεται. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς σύμφωνα με την σχέση:

$$P = V * I$$

Με τη χρήση του πρωτοκόλλου I2C μας επιτρέπεται η σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων στον ίδιο δίαυλο επικοινωνίας, μειώνοντας σημαντικά την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης. Όμως λόγω του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων διευθύνσεων I2C που μας παρέχει η αναπτυξιακή πλακέτα, χρησιμοποιείται πολυπλέκτης (I2C multiplexer), ο οποίος επιτρέπει τη διαχείριση πολλαπλών αισθητήρων με την ίδια διεύθυνση επικοινωνίας ως προς τον μικροελεγκτή.

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των ηλεκτρικών μεγεθών του πάνελ, της μπαταρίας και του φορτίου, επιτρέποντας έτσι τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την αξιολόγησης της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος [6], [7].

2.5 Αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3

Η κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος βασίζεται στην αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3 της εταιρείας Espressif Systems. Το ESP είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των αλγορίθμων ελέγχου, την επικοινωνία με τα περιφερειακά υποσυστήματα και τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες.

Αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3 έχει ένα μικροελεγκτή χαμηλής κατανάλωσης και ταυτόχρονα παρέχει δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας όπως WiFi και Bluetooth, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές Internet of Things (IoT) και συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης. Επίσης διαθέτει μεγάλη υπολογιστική ισχύ, μεγάλο αριθμό ακροδεκτών εισόδου και εξόδου (GPIO), καθώς και υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως I2C, SPI και UART.

Στην εργασία ο ESP χρησιμοποιείται ως κεντρική μονάδα ελέγχου των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα συλλέγει τις μετρήσεις από τους αισθητήρες INA260, πραγματοποιεί την επικοινωνία με το σύστημα πραγματικού χρόνου (RTC), ελέγχει το σύστημα του φωτοβολταϊκού πλαισίου που κινείται και τέλος αποστέλλει τα δεδομένα προς τις διαδικτυακές υπηρεσίες παρακολούθησης και αποθήκευσης.

Με την δυνατότητα που έχει να συνδέεται σε ασύρματο δίκτυο μέσω WiFi επιτρέπει τον απομακρυσμένο έλεγχο καθώς και την παρακολούθηση του συστήματος, όπως επίσης και τη μετάδοση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η υποστήριξη τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης καθιστά το ESP32-S3 κατάλληλο για εφαρμογές αυτόνομων ενεργειακών συστημάτων.

Η χρήση του ESP32-S3 προσφέρει υψηλό επίπεδο ευελιξίας και επεκτασιμότητας, επιτρέποντας την ταυτόχρονη διαχείριση πολλαπλών υποσυστημάτων, αισθητήρων και μηχανισμών ελέγχου στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής [4].

2.6 Σύστημα πραγματικού χρόνου (RTC)

Σε ενσωματωμένα συστήματα που απαιτούν ακριβή διαχείριση της ημερομηνίας και της ώρας χρησιμοποιούνται κυκλώματα πραγματικού χρόνου (Real Time Clock – RTC). Αυτά τα κυκλώματα μας επιτρέπουν τη συνεχή διατήρηση και ενημέρωση του χρονικού συγχρονισμού του συστήματος, ακόμη και όταν η κύρια τροφοδοσία είναι απενεργοποιημένη.

Το RTC είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα χαμηλής κατανάλωσης, το οποίο διατηρεί την ώρα, την ημερομηνία και τη μέρα που βρισκόμαστε ημερολογιακά. Η λειτουργία του είναι πολύ απλή και βασίζεται σε ένα ταλαντωτή κρυστάλλου υψηλής σταθερότητας, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση του χρόνου.

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται για την παροχή ακριβών δεδομένων ώρας και ημερομηνίας στο ESP32-S3 ώστε να μπορεί να συγχρονιστεί σωστά το tracking φωτοβολταϊκό σύστημα. Η πληροφορία αυτή είναι επίσης πολύ σημαντική για τον ακριβή υπολογισμό της θέσης του ήλιου.

Η επικοινωνία του RTC με το ESP32-S3 πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C, επιτρέποντας έτσι την ενσωμάτωσή του στο συνολικό σύστημα ελέγχου με απλό και εύκολο τρόπο. Επιπλέον έχει εφεδρική μπαταρία και έτσι μπορεί να εξασφαλίσει τη διατήρηση χρονικών δεδομένων ακόμη και σε απώλεια της κύριας τροφοδοσίας.

Η χρήση του RTC συμβάλλει σημαντικά στη σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος καθώς επιτρέπει τον ακριβή χρονικό προγραμματισμό και τον σωστό συνεχή υπολογισμό των ηλιακών συντεταγμένων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος [8].

2.7 Σύστημα κίνησης και κινητήρες Servo

Η περιστροφή του πάνελ στο σύστημα παρακολούθησης γίνεται με τη χρήση σερβοκινητήρων (Servo motors) οι οποίοι επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο και την ρύθμιση των γωνιών ως προς το ζενίθ και το αζιμούθιο.

Οι Servo είναι ηλεκτρομηχανικές διατάξεις κλειστού βρόγχου ελέγχου, οι οποίες συνδυάζουν ταυτόχρονα τον κινητήρα, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και το κύκλωμα ελέγχου θέσης. Στην ουσία έχουν ενσωματωμένο στο σασί τους τον driver και έτσι γίνονται πολύ πιο απλοί στη χρήση τους, αφού θέλουν μόνο τροφοδοσία και ένα σήμα για να στραφούν στο επιθυμητό σημείο. Η λειτουργία τους βασίζεται σε παλμούς PWM (Pulse Width Modulation), μέσω των οποίων καθορίζεται η επιθυμητή γωνία περιστροφής του.

Οι Servo παρέχουν υψηλή ακρίβεια περιστροφής, σταθερότητα κίνησης και πολύ απλή διασύνδεση με μικροελεγκτές και αναπτυξιακές πλακέτες. Είναι ιδιαίτερα εύχρηστοι γιατί, έχουν την δυνατότητα ελέγχου της γωνιακής θέσης τους χωρίς την ανάγκη εξωτερικών κυκλωμάτων πέρα από τον ήδη υπάρχον driver.

Στην εργασία χρησιμοποιούνται δύο Servo, επιτρέποντας τον έλεγχο δύο βαθμών ελευθερίας του πάνελ. Ο πρώτος κινητήρας χρησιμοποιείται για την περιστροφή του άξονα αζιμούθιου (ανατολή – δύση), ενώ ο δεύτερος για τη ρύθμιση της γωνίας ζενίθ (ανύψωσης) του πλαισίου ως προς τον ήλιο.

Ο έλεγχος των κινητήρων πραγματοποιείται από την αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3 μέσω σήματος PWM, που παράγονται δυναμικά σύμφωνα με τη θέση του ήλιου. Έτσι επιτυγχάνεται η συνεχής προσαρμογή του προσανατολισμού του πλαισίου με στόχο τη βέλτιστη δυνατή γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [9].

2.8 Υπολογισμός θέσης ήλιου

Ο υπολογισμός της θέσης του ήλιου είναι το πιο βασικό στοιχείο για τη λειτουργία των συστήματος παρακολούθησης, καθώς έτσι υπολογίζεται ο σωστός προσανατολισμός του πλαισίου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη συνεχή ευθυγράμμιση του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η θέση του ήλιου περιγράφεται με δύο βασικές γωνίες:

- Αζιμούθιο (azimuth angle)
- Ανύψωσης (elevation angle)

Η γωνία του αζιμούθιου εκφράζει την οριζόντια θέση του ήλιου ως προς τον ορίζοντα στον άξονα ανατολής – δύσης, ενώ η γωνία ανύψωσης εκφράζει το ύψος του ήλιου σε σχέση με τον ορίζοντα.

Για να υπολογιστούν αυτές οι δύο γωνίες παίρνουν μέρος μαθηματικά μοντέλα αστρονομικών υπολογισμών, τα οποία λαμβάνουν υπόψη:

- Την ημερομηνία
- Την τοπική ώρα
- Το γεωγραφικό πλάτος
- Το γεωγραφικό μήκος της περιοχής εγκατάστασης

Για το λόγο αυτό επιλέγεται το RTC, το οποίο παρέχει συνεχή χρονικό συγχρονισμό στο σύστημα ελέγχου. Επίσης πραγματοποιείται περιοδικός συγχρονισμός μέσω NTP servers, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή χρονική ακρίβεια κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Επίσης μια πολύ βασική παράμετρος είναι η ηλιακή απόκλιση (solar declination), η οποία εκφράζει τη γωνιακή θέση του ήλιου ως προς το επίπεδο του ισημερινού της Γης.

Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\delta = 23.45^\circ * \sin\left(\frac{2\pi(N - 80)}{365.2422}\right)$$

όπου:

- δ : γωνία ηλιακής απόκλισης
- N : ημέρα του έτους

Έπειτα πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ηλιακής ώρας και της γωνιακής μετατόπισης του ήλιου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι, ώστε να βρεθεί η γωνία ανύψωσης και η γωνία αζιμούθιου.

Η γωνία ανύψωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin(\beta) = \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) + \sin(\delta) * \sin(\varphi)$$

όπου:

- β : γωνία ανύψωσης
- φ : γεωγραφικό πλάτος
- δ : ηλιακή απόκλιση
- ω : γωνιακή μετατόπιση του ήλιου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι

Αντίστοιχα υπολογίζεται και η γωνία αζιμούθιου μέσω τριγωνομετρικών σχέσεων που βασίζονται στη γωνία ανύψωσης, στην ηλιακή απόκλιση και στη γεωμετρία του ουράνιου θόλου. Μια από τις βασικές σχέσεις υπολογισμού της γωνίας αζιμούθιου είναι:

$$\cos(A) = \frac{\sin(\delta) * \cos(\varphi) - \cos(\delta) * \cos(\omega) * \sin(\varphi)}{\cos(\beta)}$$

όπου:

- A : γωνία αζιμούθιου
- β : γωνία ανύψωσης
- φ : γεωγραφικό πλάτος
- δ : ηλιακή απόκλιση
- ω : γωνιακή μετατόπιση του ήλιου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι

Οι γωνίες που προκύπτουν από το μαθηματικό μοντέλο είναι και αυτές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των δύο σερβοκινητήρων του συστήματος παρακολούθησης.

Η χρήση του αλγοριθμικού υπολογισμού της θέσης του ήλιου έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με συστήματα που βασίζονται αποκλειστικά σε αισθητήρες φωτεινότητας, καθώς προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, σταθερότητα λειτουργίας και μειωμένη ευαισθησία σε συνθήκες σκίασης ή συννεφιάς.

2.9 Επικοινωνία και απομακρυσμένη παρακολούθηση δεδομένων

Η απομακρυσμένη παρακολούθηση των δεδομένων αποτελεί βασικό στοιχείο της εργασίας, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση μεταξύ των δύο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Με την συνεχή καταγραφή και αποστολή των μετρήσεων πραγματοποιείται η παρακολούθηση της τάσης και του ρεύματος και άρα η σύγκριση της ενεργειακής συμπεριφοράς τόσο του σταθερού συστήματος όσο και του συστήματος παρακολούθησης.

Το ESP32-S3 συνδέεται στο ασύρματα στο WiFi μέσω εξωτερικού 4G router και αποστέλλει τις μετρήσεις στη διαδικτυακή υπηρεσία. Η επικοινωνία πραγματοποιείται με αιτήματα HTTP POST, ενώ τα δεδομένα οργανώνονται σε μορφή JSON (JavaScript Object Notation). Η μορφή JSON επιλέγεται λόγω της απλής δομής που υποστηρίζει και την μεγάλη ευκολία στην ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ ενσωματωμένων συστημάτων και διαδικτυακών υπηρεσιών.

Στο πακέτο με τα δεδομένα περιλαμβάνονται μετρήσεις που προέρχονται από τους αισθητήρες των συστημάτων INA260. Συγκεκριμένα αποστέλλονται τιμές τάσης και ρεύματος για τα πάνελ, τις μπαταρίες και τα φορτία. Έτσι δημιουργείται μια οργανωμένη δομή δεδομένων, η οποία ενημερώνεται συνέχεια κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια τα δεδομένα αποστέλλονται στη βάση δεδομένων Firebase σε μορφή JSON, όπου εκεί καταγράφονται και αποθηκεύονται. Μέσω της βάσης δεδομένων Firebase επιτυγχάνεται η οργανωμένη καταχώρηση μετρήσεων και η δυνατότητα πρόσβασης σε αυτές από απομακρυσμένο περιβάλλον [11].

Έπειτα τα δεδομένα προωθούνται στο BigQuery, το οποίο χρησιμοποιείται ως cloud για αποθήκευση, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων. Επίσης μας παρέχει τη δυνατότητα διατήρησης ιστορικού μετρήσεων, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο [12].

Τέλος η πλατφόρμα. Grafana χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση των δεδομένων. Μέσα από αυτή την πλατφόρμα δημιουργούνται γραφήματα και πίνακες παρακολούθησης, τα οποία επιτρέπουν την άμεση σύγκριση των δύο συστημάτων. Αυτό μπορεί να γίνει σε πραγματικό και έτσι να υπάρξει μια συνεχής και σωστή αξιολόγηση σχετικά με την ενεργειακή απόδοση σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και οποιαδήποτε στιγμή [13].

2.10 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύχθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο για τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Η λειτουργία των ηλιακών φορτιστών MPPT, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πάνελ και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν τη βάση για την κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Επιπλέον παρουσιάστηκαν τα βασικά υποσυστήματα για τις μετρήσεις, τον έλεγχο και την καταγραφή των δύο συστημάτων. Οι αισθητήρες INA260 χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των ηλεκτρικών μεγεθών σε κάθε σημείο του συστήματος. Το ESP αναλαμβάνει τη συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων. Το RTC παρέχει τον απαραίτητο χρονικό συγχρονισμό για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου. Και οι Servo αποτελούν το μηχανικό μέσο το που κινεί το πάνελ βάσει των γωνιών που έχουν υπολογιστεί για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Τέλος η αποστολή των δεδομένων γίνεται σε μορφή JSON και στη συνέχεια μέσω Firebase, BigQuery και Grafana γίνεται η παρακολούθηση και η σύγκριση των δύο συστημάτων. Το θεωρητικό υπόβαθρο που αναπτύχθηκε σε αυτό το κεφάλαιο αποτελεί τη βάση για το επόμενο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζεται η πρακτική υλοποίηση, η συνδεσμολογία και η λειτουργία των επιμέρους υποσυστημάτων.

Κεφάλαιο 3ο: Υλοποίηση Ηλεκτρονικού Συστήματος και Λογισμικού

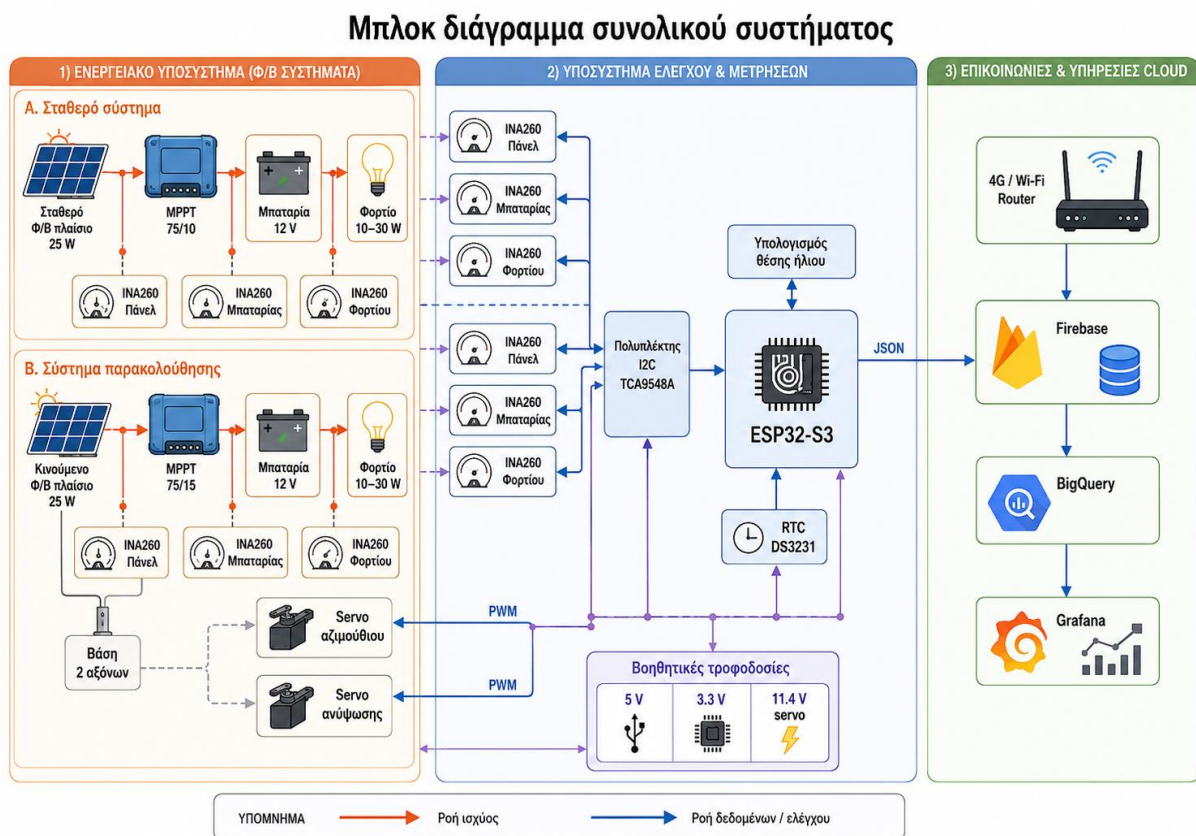
3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρακτική υλοποίηση του συστήματος που αναπτύχθηκε. Η υλοποίηση βασίζεται στη σύγκριση δύο ανεξάρτητων φωτοβολταϊκών διατάξεων, ενός σταθερού συστήματος και ενός συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ήλιου δύο άξωνων.

Κάθε διάταξη περιλαμβάνει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τον ρυθμιστή φόρτισης MPPT, τη μπαταρία για αποθήκευση ενέργειας, το φορτίο και τους αισθητήρες μέτρησης. Παράλληλα χρησιμοποιείται ένα κοινό σύστημα ελέγχου δεδομένων, το οποίο βασίζεται στην αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3, το RTC και έναν πολυπλέκτη I2C για την επικοινωνία με τους αισθητήρες.

Σε αυτό το κεφάλαιο εξηγείται η αρχιτεκτονική του συστήματος, η σύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων, η τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων, η λειτουργία του συστήματος μέτρησης και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου, τον έλεγχο των σερβοκινητήρων και την αποστολή δεδομένων στις διαδικτυακές υπηρεσίες αποθήκευσης και απεικόνισης.

3.2 Γενική αρχιτεκτονική του συστήματος



Σχήμα 3-1: Μπλοκ διάγραμμα συνολικού συστήματος

Η εργασία βασίζεται στη σύγκριση δύο ανεξάρτητων φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία λειτουργούν στο ίδιο περιβάλλον και υπό τις ίδιες συνθήκες. Το πρώτο σύστημα είναι μια σταθερή φωτοβολταϊκή διάταξη εγκατεστημένη με νότιο προσανατολισμό, ενώ το δεύτερο διαθέτει μηχανισμό παρακολούθησης της θέσης του ήλιου με δύο άξονες. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η σύγκριση της παραγόμενης ενέργειας μεταξύ ενός σταθερού και ενός κινητού φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Κάθε διάταξη αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένα ρυθμιστή φόρτισης MPPT, μια μπαταρία αποθήκευσης ενέργειας και ένα ηλεκτρικό φορτίο. Η ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο οδηγείται στον ρυθμιστή φόρτισης, ο οποίος διαχειρίζεται την φόρτιση της μπαταρίας και την τροφοδοσία του φορτίου. Η ύπαρξη δύο ακριβώς ίδιων υποσυστημάτων και στις δύο διατάξεις επιτρέπει την ορθή σύγκριση των δύο συστημάτων.

Για την καταγραφή της λειτουργίας των δύο συστημάτων χρησιμοποιούνται συνολικά έξι αισθητήρες INA260 με ενσωματωμένη αντίσταση μέτρησης shunt. Σε κάθε διάταξη υπάρχουν 3 αισθητήρες, ένας για το πάνελ, ένας για την μπαταρία και ένας για το φορτίο. Με αυτό τον τρόπο καταγράφονται οι τιμές των τάσεων, των ρευμάτων και στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της ισχύος.

Η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με την αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3. Η επικοινωνία με τους αισθητήρες γίνεται μέσω πρωτοκόλλου I2C. Επειδή οι αισθητήρες INA260 διαθέτουν κοινή διεύθυνση επικοινωνίας, χρησιμοποιείται και ένας multiplexer I2C, ο οποίος επιτρέπει στο ESP να διαλέξει κάθε φορά με ποιον αισθητήρα θα μιλήσει.

Το σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου υλοποιείται με δύο κινητήρες Servo, οι οποίοι ελέγχουν την κίνηση του πάνελ. Ο ένας χρησιμοποιείται για την περιστροφή στον άξονα του αζιμούθιου, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της γωνίας ανύψωσης. Οι γωνίες προσανατολισμού υπολογίζονται από το ESP με τη χρήση αλγορίθμου και βάσει της ημερομηνίας, της ώρας και της γεωγραφικής θέσης της εγκατάστασης. Για τον χρονικό συγχρονισμό χρησιμοποιείται το RTC, ενώ επιπλέον υπάρχει και δυνατότητα συγχρονισμού μέσω διαδικτύου με τη χρήση NTP.

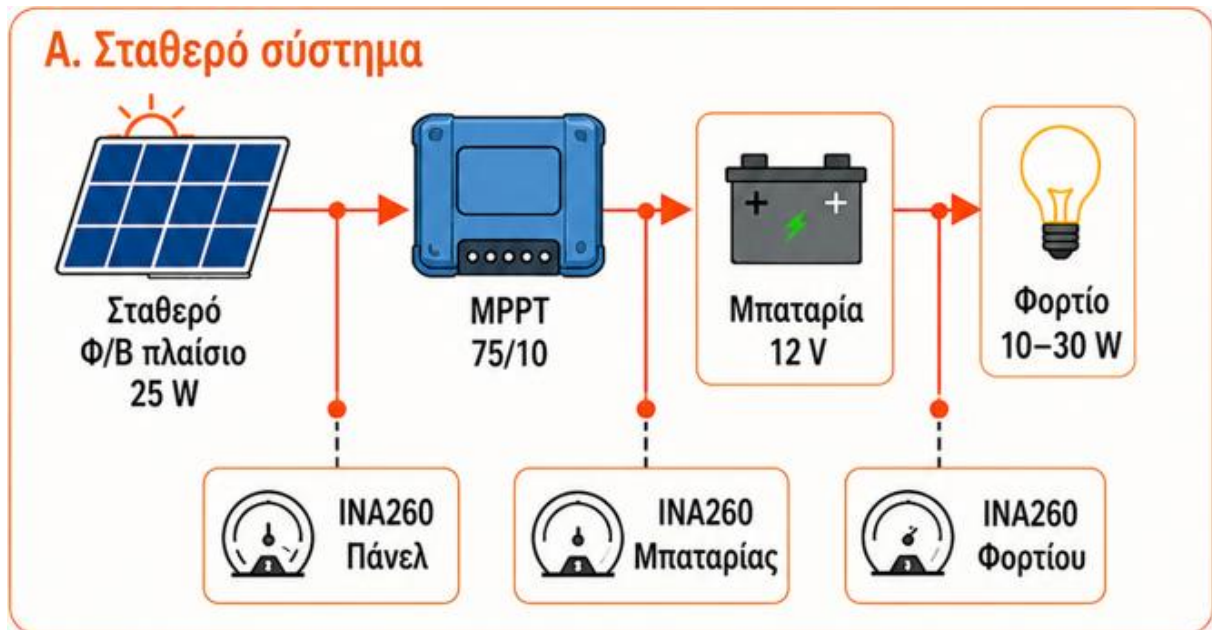
Η τροφοδοσία των κυκλωμάτων και των κινητήρων πραγματοποιείται ανεξάρτητα από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα τροφοδοτικό switching, το οποίο τροφοδοτείται από παροχή 230V AC και με τη σειρά τους επιμέρους μετατροπείς step – down. Με δύο step-down τροφοδοτούνται οι δύο κινητήρες Servo ξεχωριστά και με τρίτο step-down τροφοδοτούνται οι αισθητήρες, το RTC και ο multiplexer. Επιπλέον υπάρχει και ένα τέταρτο step-down που τροφοδοτεί την αναπτυξιακή πλακέτα του ESP.

Τέλος, το ESP συνδέεται σε ασύρματο δίκτυο μέσω 4G router και αποστέλλει τα δεδομένα στη διαδικτυακή υποδομή. Τα δεδομένα οργανώνονται σε μορφή JSON και στη συνέχεια αποθηκεύονται και αξιοποιούνται μέσω Firebase, BigQuery και Grafana. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η απομακρυσμένη παρακολούθηση, η διατήρηση του ιστορικού μετρήσεων και η οπτικοποίηση της λειτουργίας των συστημάτων.

3.3 Ενεργειακή διάταξη των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων

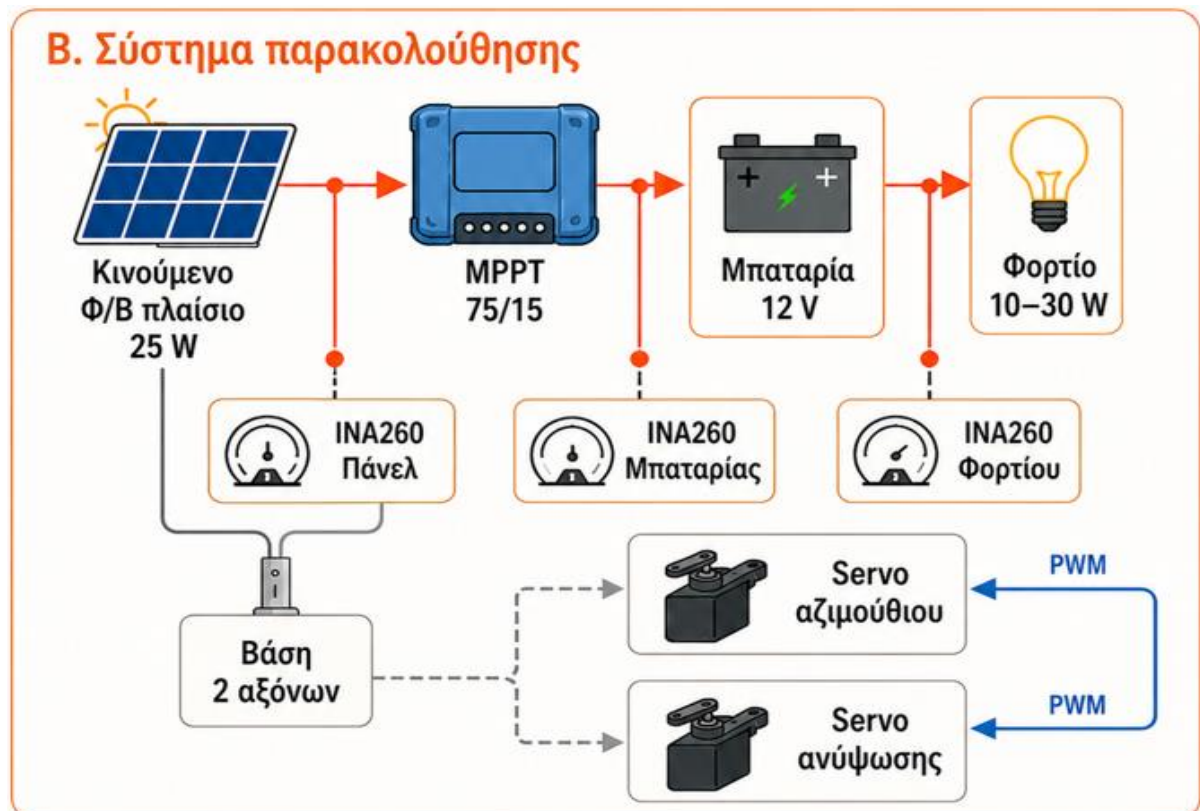
Και τα δύο συστήματα έχουν ίδια βασική ροή ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από το πλαίσιο και οδηγείται στον ρυθμιστή φόρτισης MPPT. Ο ρυθμιστής φόρτισης διαχειρίζεται την ενέργεια που προέρχεται από το πάνελ, φορτίζει την μπαταρία και τροφοδοτεί το φορτίο, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η προστασία της μπαταρίας και καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

Το πλαίσιο του σταθερού συστήματος βρίσκεται πάντα στην ίδια θέση με νότιο προσανατολισμό και 34 μοίρες σε γωνία ανύψωσης. Στο χρησιμοποιείται ηλιακός φορτιστής Blue Solar MPPT 75/10, μπαταρία τύπου sealed lead-acid ονομαστικής τάσης 12V και χωρητικότητας 12 Ah και ένα φορτίο 12V/1A.



Σχήμα 3-2: Ενεργειακή διάταξη σταθερού φωτοβολταϊκού συστήματος

Το πλαίσιο του κινητού συστήματος μεταβάλλει τη θέση του μέσω του μηχανισμού δύο αξόνων, ώστε να ακολουθεί πλήρως τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ενεργειακή διάταξη παραμένει αντίστοιχη με αυτή του σταθερού συστήματος.



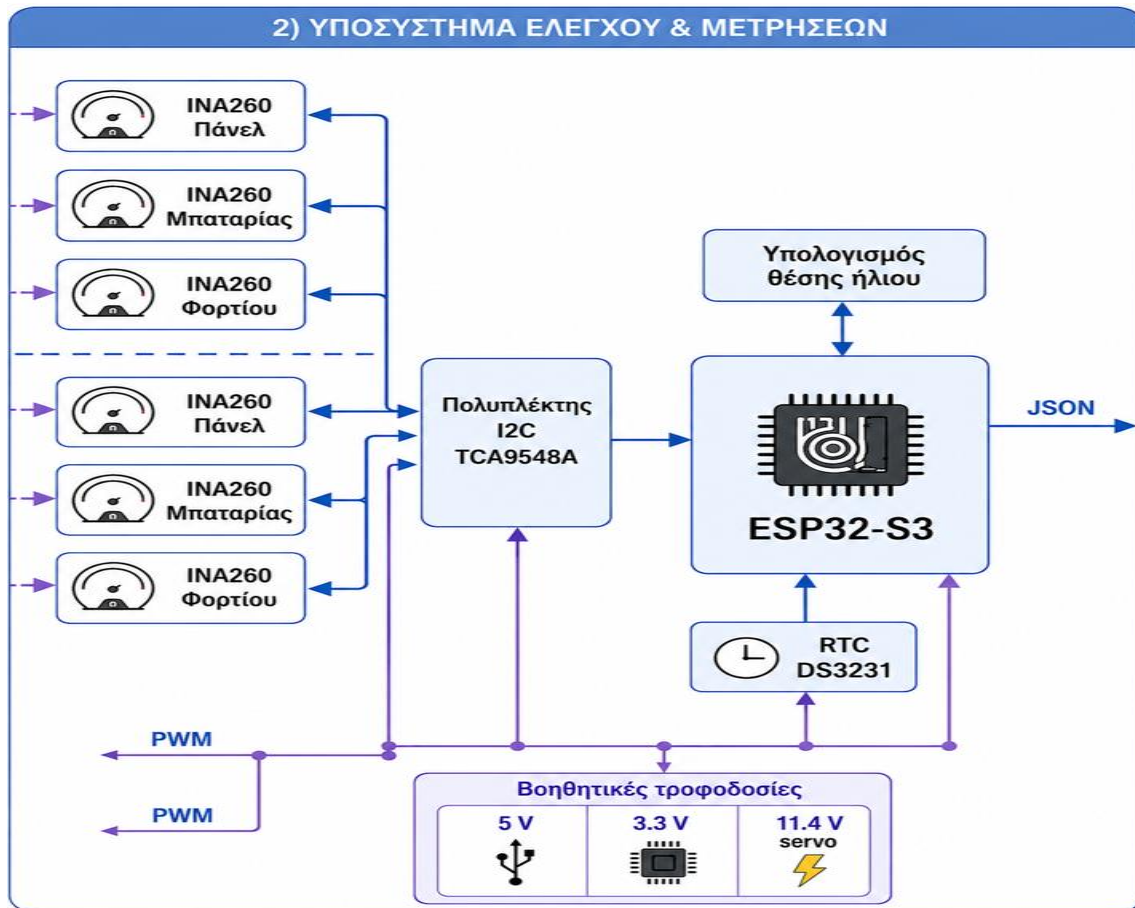
Σχήμα 3-3: Ενεργειακή διάταξη συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ήλιου

Η παρόμοια ενεργειακή διάταξη και στα δύο συστήματα είναι σημαντική, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση της παραγόμενης ισχύος και της ενεργειακής απόδοσης με κύρια μεταβολή τον προσανατολισμό του πλαισίου. Έτσι, οι διαφορές που προκύπτουν στις μετρήσεις μπορούν να αποδοθούν κυρίως στη λειτουργία του μηχανισμού παρακολούθησης και όχι σε διαφορετική υλοποίηση των συστημάτων.

Πίνακας 3.1: Βασικά στοιχεία των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων

Υποσύστημα	fixed σύστημα	Σύστημα παρακολούθησης
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	25W	25W
Ρυθμιστής φόρτισης MPPT	Blue Solar MPPT 75/10	Blue Solar MPPT 75/15
Μπαταρία	12V / 12Ah	12V / 12Ah
Φορτίο	12V / 10W αρχικό, 12V / 30W στις τελικές δοκιμές	12V / 10W αρχικό, 12V / 30W στις τελικές δοκιμές
Αισθητήρες	3 * INA260	3 * INA260
Τρόπος λειτουργίας	Νότιος προσανατολισμός / 34° ανύψωση	Παρακολούθηση με δύο άξονες

3.4 Υλοποίηση συστήματος μετρήσεων



Σχήμα 3-4: Διάταξη μετρήσεων με αισθητήρες INA260 και πολυπλέκτη I2C

Για να υπάρξουν σωστές και αξιόπιστες μετρήσεις έχουν επιλεγθεί συνολικά 6 αισθητήρες INA260, οι οποίοι μετρούν τάση και ρεύμα στα βασικά σημεία κάθε διάταξης.

Σε κάθε σύστημα χρησιμοποιούνται 3 από αυτούς. Ο πρώτος αισθητήρας τοποθετείται στο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ώστε να καταγράφεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ο δεύτερος αισθητήρας τοποθετείται στο κύκλωμα της μπαταρίας, ώστε να παρακολουθείται η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης. Ο τρίτος αισθητήρας τοποθετείται στο κύκλωμα του φορτίου, ώστε να καταγράφεται η ενέργεια που καταναλώνεται από τον προβολέα. Οι αισθητήρες συνδέονται σε διάταξη high-side

current sensing, δηλαδή σε σειρά με τον αγωγό υψηλότερου δυναμικού κάθε κλάδου ως προς το κοινό σημείο αναφοράς του συστήματος.

Με τις μετρήσεις σε αυτά τα τρία σημεία είναι εφικτή η πληρέστερη παρακολούθηση της ενεργειακής ροής. Έτσι είναι εφικτή τόσο η σύγκριση των συστημάτων όσο και των υποσυστημάτων ξεχωριστά, κάτι που κάνει τις μετρήσεις μας άμεσα συγκρίσιμες.

Οι αισθητήρες τροφοδοτούνται με 3.3V από step-down αφού έχει τοποθετηθεί και επιπλέον κεραμικός πυκνωτής στην είσοδο για περαιτέρω φιλτράρισμα. Εκτός από την τροφοδοσία συνδέονται και στο I2C channel του multiplexer TCA9548A μέσω SDA – SCL pins. Ο multiplexer με την σειρά του επιτρέπει την επιλογή του διαφορετικού καναλιού κάθε φορά. Έτσι, ο ESP μπορεί να επικοινωνεί ξεχωριστά με κάθε αισθητήρα, επιλέγοντας το αντίστοιχο κανάλι του multiplexer [5],[6],[7].

Πίνακας 3.2: Αντιστοίχιση αισθητήρων INA260 στα κανάλια του I2C multiplexer

Κανάλι multiplexer	Σημείο μέτρησης	Σύστημα
CH0	Μπαταρία	Tracking System
CH1	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	Tracking System
CH2	Φορτίο	Tracking System
CH3	Μπαταρία	Fixed System
CH4	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	Fixed System
CH5	Φορτίο	Fixed System

Κατά τη λειτουργία, ο ESP επιλέγει διαδοχικά τα κανάλια του πολυπλέκτη και διαβάζει τις τιμές της τάσης και του ρεύματος από κάθε αισθητήρα. Στη συνέχεια οι τιμές αποθηκεύονται σε μεταβλητές που αντιστοιχούν στην εκάστοτε μέτρηση. Με βάση τις τιμές της τάσης και του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί και η στιγμιαία ισχύς κάθε σημείου σύμφωνα με την σχέση:

$$P = V * I$$

3.5 Υλοποίηση συστήματος ελέγχου

Το ESP είναι υπεύθυνο για την αρχικοποίηση των περιφερειακών, τη συλλογή των μετρήσεων από τους αισθητήρες INA260, την επικοινωνία με το RTC, τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου, τον έλεγχο των σερβοκινητήρων και την αποστολή των δεδομένων προς τη διαδικτυακή υποδομή.

Η λειτουργία του λογισμικού οργανώνεται σε επιμέρους τμήματα, ώστε κάθε υποσύστημα να εκτελεί συγκεκριμένες λειτουργίες. Στον κώδικα χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες για την επικοινωνία I2C, το RTC, τους αισθητήρες INA260, τον έλεγχο των κινητήρων, τη σύνδεση WiFi, τη δημιουργία HTTP αιτημάτων και τη μορφοποίηση των δεδομένων σε JSON.

3.5.1 Βασικές βιβλιοθήκες λογισμικού

Στον κώδικα χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες που καλύπτουν την επικοινωνία με τα περιφερειακά, τον έλεγχο των κινητήρων την σύνδεση στο δίκτυο και την αποστολή δεδομένων.

Πίνακας 3.3: Βασικές βιβλιοθήκες λογισμικού

Βιβλιοθήκη	Περιγραφή ρόλου
Wire.h	Επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου I2C
RTClib.h	Επικοινωνία με το RTC DS3231
ESP32Servo.h	Έλεγχος των κινητήρων
Adafruit_INA260.h	Ανάγνωση των αισθητήρων
WiFi.h	Σύνδεση του ESP στο ασύρματο δίκτυο
HTTPClient.h	Δημιουργία HTTP αιτημάτων
ArduinoJson.h	Δημιουργία και μορφοποίηση δεδομένων σε JSON
time.h	Συγχρονισμός ώρας μέσω NTP

3.5.2 Συνδέσεις αναπτυξιακής πλακέτας

Ο ESP συνδέεται με τα επιμέρους υποσυστήματα μέσω ψηφιακών ακροδεκτών και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η επικοινωνία με τους αισθητήρες, τον πολυπλέκτη και του RTC πραγματοποιείται μέσω του κοινού διαύλου I2C, ενώ ο έλεγχος των δύο κινητήρων πραγματοποιείται με σήματα PWM απευθείας από τα pins.

Πίνακας 3.4: Βασικές συνδέσεις του ESP32-S3

Υποσύστημα	Σύνδεση σε ESP	Περιγραφή
I2C SDA	GPIO 8	Γραμμή δεδομένων I2C
I2C SCL	GPIO 9	Γραμμή χρονισμού I2C
Servo αζιμούθου	GPIO 18	Έλεγχος άξονα x
Servo ανύψωσης	GPIO 19	Έλεγχος άξονα y
I2C multiplexer	Διεύθυνση 0x70	Επιλογή αισθητήρα INA260
RTC DS3231	I2C bus	Παροχή ημερομηνίας και ώρας
INA260	Μέσω TCA9548A	Μέτρηση τάσης και ρεύματος

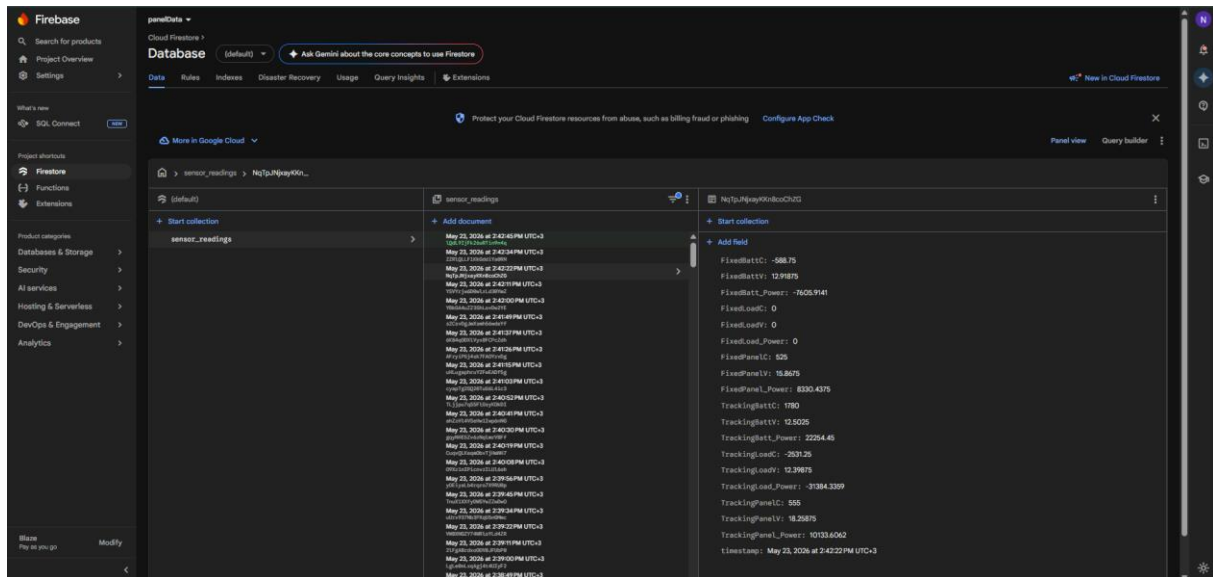
3.5.3 Βασικές μεταβλητές λογισμικού

Στον κώδικα χρησιμοποιούνται μεταβλητές που αφορούν τη γεωγραφική θέση, τον υπολογισμό της ηλιακής θέσης και τις μετρήσεις των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης ορίζεται στη μεταβλητή `grad` σε ακτίνια, ενώ το γεωγραφικό μήκος ορίζεται στη μεταβλητή `I` σε μοίρες. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο υπολογισμού της θέσης του ήλιου.

Πίνακας 3.5: Βασικές μεταβλητές υπολογισμού θέσης

Μεταβλητή	Τύπος Μεταβλητής	Περιγραφή
DD, MM, YY	int	Ημέρα, Μήνας, Έτος
C	int	Μεταβλητή ελέγχου δίσκεκου έτους
N	int	Αριθμός ημέρας μέσα στο έτος
DI	int	Ένδειξη θερινής ή χειμερινής ώρας
frad	double	Γεωγραφικό πλάτος σε ακτίνια
l (longitude)	double	Γεωγραφικό μήκος σε μοίρες
drad	double	Ηλιακή απόκλιση σε ακτίνια
dDeg	double	Ηλιακή απόκλιση σε μοίρες
EqT	double	Εξίσωση του χρόνου
Tsr	double	Ανατολή σε ηλιακή ώρα
Tss	double	Δύση σε ηλιακή ώρα
Tsr_local	double	Τοπική ώρα ανατολής
Tss_local	double	Τοπική ώρα δύσης
Tlocal	double	Τοπική ώρα σε δεκαδική μορφή
UT	double	Παγκόσμια ώρα
Tsolar	double	Ηλιακή ώρα
wRad	double	Γωνιακή μετατόπιση του ήλιου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι
bDeg	double	Γωνία ανύψωσης του ήλιου σε μοίρες
aDeg	double	Γωνία ζενίθ σε μοίρες
zDeg	double	Γωνία αζιμούθιου σε μοίρες
b	int	Ακέραια τιμή γωνίας ανύψωσης για χρήση ελέγχου του Servo
z	int	Ακέραια τιμή γωνίας αζιμούθιου για χρήση ελέγχου του Servo

Για τις μετρήσεις των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιούνται ξεχωριστές μεταβλητές. Για το σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές ένδειξης Tracking, ενώ για το fixed σύστημα χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές ένδειξης Fixed.



Σχήμα 3-5: Βασικές μεταβλητές λογισμικού για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου και την καταγραφή μετρήσεων

Πίνακας 3.6: Μεταβλητές μετρήσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων

Μεταβλητή	Περιγραφή
TrackingBattV (Voltage)	Τάση μπαταρίας συστήματος παρακολούθησης
TrackingBattC (Current)	Ρεύμα μπαταρίας συστήματος παρακολούθησης
TrackingPanelV (Voltage)	Τάση πλαισίου συστήματος παρακολούθησης
TrackingPanelC (Current)	Ρεύμα πλαισίου συστήματος παρακολούθησης
TrackingLoadV (Voltage)	Τάση φορτίου συστήματος παρακολούθησης
TrackingLoadC (Current)	Ρεύμα φορτίου συστήματος παρακολούθησης
FixedBattV (Voltage)	Τάση μπαταρίας σταθερού συστήματος
FixedBattC (Current)	Ρεύμα μπαταρίας σταθερού συστήματος
FixedPanelV (Voltage)	Τάση πλαισίου σταθερού συστήματος
FixedPanelC (Current)	Ρεύμα πλαισίου σταθερού συστήματος
FixedLoadV (Voltage)	Τάση φορτίου σταθερού συστήματος
FixedLoadC (Current)	Ρεύμα φορτίου σταθερού συστήματος

3.5.4 Αρχικοποίηση συστήματος

Κατά την εκκίνηση του συστήματος εκτελείται η συνάρτηση `system_init()`, η οποία είναι υπεύθυνη για την αρχικοποίηση όλων των βασικών υποσυστημάτων. Αρχικά ενεργοποιείται ο δίαυλος επικοινωνίας I2C μέσω της εντολής `Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN)`, όπου ως γραμμή δεδομένων SDA ορίζουμε το GPIO 8 και ως γραμμή χρονισμού SCL ορίζουμε το GPIO 9.

Στη συνέχεια γίνεται η αρχικοποίηση των δύο Servo, pin GPIO 18 για τον κινητήρα του αζιμούθιου και pin GPIO 19 για τον κινητήρα της γωνίας ανύψωσης.

Έπειτα ακολουθεί η αρχικοποίηση του RTC DS3231, το οποίο παρέχει πληροφορίες ώρας και ημερομηνίας στο σύστημα. Επιπλέον ενεργοποιείται η σειριακή επικοινωνία για έλεγχο αποσφαλμάτωσης κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Η αρχικοποίηση των αισθητήρων γίνεται διαδοχικά από τον multiplexer I2C. Για κάθε αισθητήρα επιλέγεται πρώτα το αντίστοιχο κανάλι και στη συνέχεια εκτελείται η `ina.begin()`. Έτσι ελέγχεται ο κάθε αισθητήρας στο αν αποκρίνεται σωστά.

Μετά την αρχικοποίηση των αισθητήρων, το ESP συνδέεται στο ασύρματο δίκτυο μέσω WiFi. Αφού γίνει η σύνδεση με επιτυχία, καλείται η συνάρτηση `syncTimeFromNTP_and_UpdateRTC()`, μέσω της οποίας γίνεται ο συγχρονισμός της ώρας από τους NTP servers και αποθηκεύεται στο RTC.

3.5.5 Επιλογή καναλιού πολυπλέκτη και ανάγνωση αισθητήρων

Η επιλογή του καναλιού στον multiplexer γίνεται με την εντολή `Wire.write(1 << channel)`; Με αυτή τη λογική ενεργοποιείται το αντίστοιχο κανάλι που πρόκειται να διαβαστεί, έτσι ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση διευθύνσεων, καθώς όλοι οι INA260 έχουν κοινή διεύθυνση I2C.

Η συνάρτηση `readOnChannel()` επιλέγει αρχικά το κατάλληλο κανάλι του multiplexer και στη συνέχεια διαβάζει τις τιμές τάσης και ρεύματος από τον αντίστοιχο αισθητήρα. Η τάση επιστρέφεται από τον αισθητήρα σε mV και μετατρέπεται σε Volt με διαίρεση, ενώ το ρεύμα διαβάζεται σε mA.

Η συνάρτηση `readSensors()` καλεί διαδοχικά τη συνάρτηση `readOnChannel()` για κάθε αισθητήρα. Έτσι είναι δυνατή η ανάγνωση όλων των αισθητήρων.

3.5.6 Συγχρονισμός ώρας μέσω NTP και RTC

Ο χρονικός συγχρονισμός του συστήματος γίνεται με τη συνάρτηση `syncTimeFromNTP_and_UpdateRTC()` Η συνάρτηση χρησιμοποιεί δύο NTP servers, τον `pool.ntp.org` και τον `time.google.com`, έτσι ώστε να ληφθεί σωστά η πληροφορία.

Για τη σωστή μετατροπή της ώρας στην τοπική ώρα της Ελλάδας χρησιμοποιείται μεταβλητή ζώνη ώρας στην οποία έχει οριστεί η λειτουργία EET/EEST με αυτόματη προσαρμογή θερινής ή χειμερινής ώρας. Μετά τη λήψη της τοπικής ώρας, η πληροφορία αποθηκεύεται στο RTC μέσω της εντολής `rtc.adjust()`.

Έτσι το σύστημα διαθέτει πάντα την σωστή ώρα, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου και του προσανατολισμού στο tracking σύστημα. Παράλληλα, σε περίπτωση επανεκκίνησης ή προσωρινής απώλειας σύνδεσης στο διαδίκτυο, το RTC συνεχίζει να παρέχει την σωστή ημερομηνία και ώρα στο σύστημα.

3.5.7 Υπολογισμός ημερήσιων παραμέτρων

Η συνάρτηση `calculateDailySolarParameters ()` είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό των παραμέτρων που μεταβάλλονται κυρίως με την ημερομηνία. Στην αρχή το RTC δίνει την τρέχουσα ημερομηνία και υπολογίζεται αν το έτος είναι δίσεκτο. Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί σωστά ο αριθμός της μέρας.

Ο αριθμός της μέρας αποθηκεύεται στην μεταβλητή `N` και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ηλιακής απόκλισης. Έπειτα υπολογίζεται η ηλιακή απόκλιση σε ακτίνια και μετά μετατρέπεται σε μοίρες. Επιπλέον υπολογίζεται και η εξίσωση του χρόνου `EqT`, η οποία χρησιμοποιείται για την μετατροπή της τοπικής ώρας σε ηλιακή.

Στην ίδια συνάρτηση υπολογίζονται η ώρα της ανατολής `Tsr` και η ώρα της δύσης `Tss` βάση της ηλιακής ώρας. Στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή σε τοπική ώρα μέσω των μεταβλητών `Tsr_local` και `Tss_local`, λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό μήκος και τη θερινή ή χειμερινή ώρα.

3.5.8 Υπολογισμός γωνιών θέσης του ήλιου

Η συνάρτηση `calculateSolarPosition()` υπολογίζει την στιγμιαία θέση του ήλιου. Αρχικά υπολογίζεται η παγκόσμια ώρα UT και στη συνέχεια η ηλιακή ώρα `Tsolar`. Από την ηλιακή ώρα προκύπτει η μεταβλητή `wRad`, η οποία εκφράζει τη γωνιακή μετατόπιση του ήλιου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι.

Έπειτα υπολογίζεται η γωνία ανύψωσης του ήλιου. Αυτή η τιμή αποθηκεύεται σε ακτίνια στην μεταβλητή `bRad` και στη συνέχεια μετατρέπεται σε μοίρες και αποθηκεύεται στην μεταβλητή `bDeg`. Η γωνία ζενίθ υπολογίζεται ως η συμπληρωματική της γωνίας ανύψωσης και αποθηκεύεται στη μεταβλητή `aDeg`.

Για τον υπολογισμό της γωνίας του αζιμούθιου χρησιμοποιείται η ενδιάμεση μεταβλητή `cz`, από την οποία προκύπτει η τιμή `zRad`. Στη συνέχεια η γωνία μετατρέπεται σε μοίρες και αποθηκεύεται στη μεταβλητή `zDeg`. Στον κώδικα περιλαμβάνεται και επιπλέον έλεγχος της γωνίας ως προς τη θέση του ήλιου σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι, έτσι ώστε να λαμβάνονται σωστά οι τιμές αζιμούθιου που είναι μεγαλύτερες από 180° .

Οι τελικές ακέραιες τιμές των γωνιών αποθηκεύονται στις μεταβλητές `b` και `z`, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των σερβοκινητήρων.

3.5.9 Έλεγχος των σερβοκινητήρων

Οι κινητήρες ελέγχονται μόνο κατά τη δεύτερη φάση λειτουργίας του συστήματος δηλαδή κατά το χρονικό διάστημα από την ανατολή έως και τη δύση του ηλίου. Αυτό είναι και το διάστημα κατά το οποίο οι τιμές των γωνιών μετατρέπονται σε κατάλληλες τιμές θέσης ώστε να δοθούν κατάλληλα στα Servo.

Οι γωνίες που υπολογίζονται από το μαθηματικό μοντέλο δεν μπορούν να δοθούν κατευθείαν στους Servo. Αυτό συμβαίνει γιατί οι γωνίες έχουν υπολογιστεί με βάση του θέση του ήλιου στον ορίζοντα και το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς, ενώ οι Servo λειτουργούν μέσα στα δικά τους μηχανικά όρια που ορίζει η κατασκευή τους. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται να γίνει μια αντιστοίχιση των θεωρητικών γωνιών σε πραγματικές γωνίες λειτουργίας για τους Servo.

Η αντιστοίχιση πραγματοποιείται με την συνάρτηση `map()`. Η `map()` μετατρέπει μια τιμή από ένα αρχικό εύρος σε ένα νέο εύρος τιμών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η μετατροπή γίνεται από μια γωνία που προκύπτει από τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου σε μια τιμή κατάλληλη για τον αντίστοιχο σερβοκινητήρα.

```
419 //Mapping για servo_zen (0-90 μοίρες) γωνία ανύψωσης
420 int zen_mapped = map(b, 0, 90, 65, 140); //0->65 και 90->140
421 zen_mapped = constrain(zen_mapped, 0, 180); // προληπτικά για out-of-bounds
422
423 // Mapping για servo_az (0-270 μοίρες) δύση-ανατολή
424 int adjusted_az = int(z + 0) % 360;
425 int az_mapped = map(adjusted_az, 90, 270, 155, 25); //90->155 και 270->25
426 az_mapped = constrain(az_mapped, 0, 300); // προληπτικά για out-of-bounds
427
428 // Αναστροφή γωνίας αν χρειάζεται
429 // az_mapped = 180 - az_mapped;
430
431 servo_zen.write(zen_mapped);
432 servo_az.write(az_mapped);
```

Σχήμα 3-6: Έλεγχος σερβοκινητήρων για την κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Για τον σερβοκινητήρα που ελέγχει την γωνία ανύψωσης χρησιμοποιείται η μεταβλητή `b`, η οποία θεωρητικά κυμαίνεται από 0° έως 90° . Το 0 αντιστοιχεί στη θέση του ορίζοντα και το 90 στην κατακόρυφη θέση του ήλιου. Στην κατασκευή όμως το πραγματικό εύρος κίνησης ορίζεται σε 65° έως 140° . Για τον λόγο αυτό χρειάζονται στον κώδικα οι εντολές:

```
int zen_mapped = map(b, 0, 90, 65, 140);
```

```
zen_mapped = constrain(zen_mapped, 0, 180);
```

Στην παραπάνω εντολή, η χρήση της constrain() λειτουργεί σαν πρόσθετο μέτρο προστασίας, ώστε η τελική τιμή που αποστέλλεται στο σερβοκινητήρα να είναι πάντα εντός των επιτρεπτών ορίων.

Για τον σερβοκινητήρα που ελέγχει την περιστροφή στο αζιμούθιο χρησιμοποιείται η μεταβλητή z. Για την παρακολούθηση του ήλιου από την ανατολή έως την δύση, η τιμή του z κυμαίνεται από 90° έως 270°.

```
int adjusted_az = int(z + 0) % 360;
```

```
int az_mapped = map(adjusted_az, 90, 270, 155, 25);
```

```
az_mapped = constrain(az_mapped, 0, 300);
```

Στην κώδικα χρησιμοποιείται η adjusted_az ώστε να βρισκόμαστε πάντα μέσα στο εύρος 0° - 360°. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν μια γωνία υπερβεί τις 360°, μετατρέπεται στην αντίστοιχη γωνία εντός ενός πλήρους κύκλου περιστροφής. Για παράδειγμα μια γωνία 370° θα μετατρεπόταν σε 10° ή αντίστοιχα μια γωνία 725° θα μετατρεπόταν σε 5°.

Στον κώδικα υπάρχει η αντιστοίχιση 90° - 270° σε 155° - 25°. Αυτό μας δείχνει ότι η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά αύξησης της γωνίας του αζιμούθιου. Για αυτό τον λόγο, όσο αυξάνεται η γωνία του αζιμούθιου τόσο μειώνεται η γωνία του κινητήρα. Αυτό είναι ένα τέχνασμα που βοηθάει σε περιπτώσεις όπου οι πραγματικές συνθήκες τοποθέτησης του κινητήρα δεν μπορούν να ακολουθήσουν την πραγματική φορά.

3.5.10 Αποστολή δεδομένων σε μορφή JSON

Η αποστολή των δεδομένων πραγματοποιείται με την συνάρτηση send_to_cloud(). Αρχικά ελέγχεται ότι το ESP είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Αν υπάρχει ενεργή σύνδεση τότε, δημιουργείται HTTP POST αίτημα προς τη διαδικτυακή υπηρεσία/API, η οποία παραλαμβάνει τα δεδομένα σε μορφή JSON και τα προωθεί στη διαδικτυακή υποδομή αποθήκευσης και απεικόνισης.

Οι μετρήσεις οργανώνονται σε ένα αντικείμενο JSON μέσω της βιβλιοθήκης ArduinoJson.

Το JSON περιλαμβάνει τις τιμές τάσεων και ρευμάτων από: μπαταρία, πάνελ, φορτίου του συστήματος παρακολούθησης και μπαταρία, πάνελ, φορτίο του σταθερού συστήματος.

3.5.11 Φάσεις λειτουργίας κύριου προγράμματος

Η κύρια λειτουργία του συστήματος εκτελείται μέσα στη loop() και χωρίζεται σε 3 χρονικές φάσεις. Η επιλογή των φάσεων έχει βασιστεί στην τοπική ώρα και στις ώρες ανατολής και δύσης.

- Πρώτη φάση: 00:01 – ανατολή. Σε αυτή τη φάση, πριν την ανατολή το σύστημα πραγματοποιεί ανάγνωση αισθητήρων και αποστολή δεδομένων χωρίς την ενεργή κίνηση του μηχανισμού παρακολούθησης
- Δεύτερη φάση: ανατολή – δύση. Σε αυτή την φάση, από την ανατολή μέχρι την δύση, εκτελείται η πλήρης λειτουργία του συστήματος. Πραγματοποιείται υπολογισμός της θέσης του ήλιου, ανάγνωση αισθητήρων, αποστολή δεδομένων και έλεγχος των κινητήρων
- Τρίτη φάση: δύση – 23:59. Σε αυτή την φάση, μετά την δύση, το σύστημα συνεχίζει την ανάγνωση από τους αισθητήρες και την αποστολή δεδομένων, χωρίς να πραγματοποιείται ενεργός έλεγχος των κινητήρων

Οι διαδικασίες που γίνονται επαναλαμβάνονται κάθε 10 δευτερόλεπτα, με την delay(10000) που χρησιμοποιείται στον κώδικα. Έτσι εξασφαλίζεται η συνεχής καταγραφή της λειτουργίας των δύο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο.

3.6 Υλοποίηση συστήματος κίνησης

Το σύστημα κίνησης αφορά των έλεγχο δύο κινητήρων Servo που χρησιμοποιούνται για την αλλαγή του προσανατολισμού του πάνελ. Η μηχανολογική σχεδίαση των βάσεων και του μηχανισμού

παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, ενώ σε αυτή την ενότητα αναλύεται η ηλεκτρονική και προγραμματιστική πλευρά του ελέγχου.

Στο σύστημα υπάρχουν δύο Servo. Ένα για τον έλεγχο του αζιμούθιου συνδεδεμένο στο pin GPIO 18 και ένα για τον έλεγχο της γωνίας ανύψωσης συνδεδεμένο στο pin GPIO 19. Και οι δύο κινητήρες οδηγούνται μέσω σημάτων PWM που παράγονται από το ίδιο το ESP.

Επιπλέον κάθε Servo έχει την δική του ξεχωριστή τροφοδοσία από step-down και με την κατάλληλη προστασία με τη χρήση πυκνωτών ώστε να λειτουργούν απροβλημάτιστα.

Αφού έχουν υπολογιστεί οι τελικές τιμές για κάθε Servo όπως αναλύσαμε πριν, αποστέλλονται με τις εντολές `servo_zen.write()` και `servo_az.write()`.

3.7 Τροφοδοσία βοηθητικών κυκλωμάτων

Η τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων πραγματοποιείται ανεξάρτητα από τα δύο φωτοβολταϊκά συστήματα, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή λειτουργία όλων των κυκλωμάτων. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιείται switching τροφοδοτικό 230 VAC σε 12 VDC.

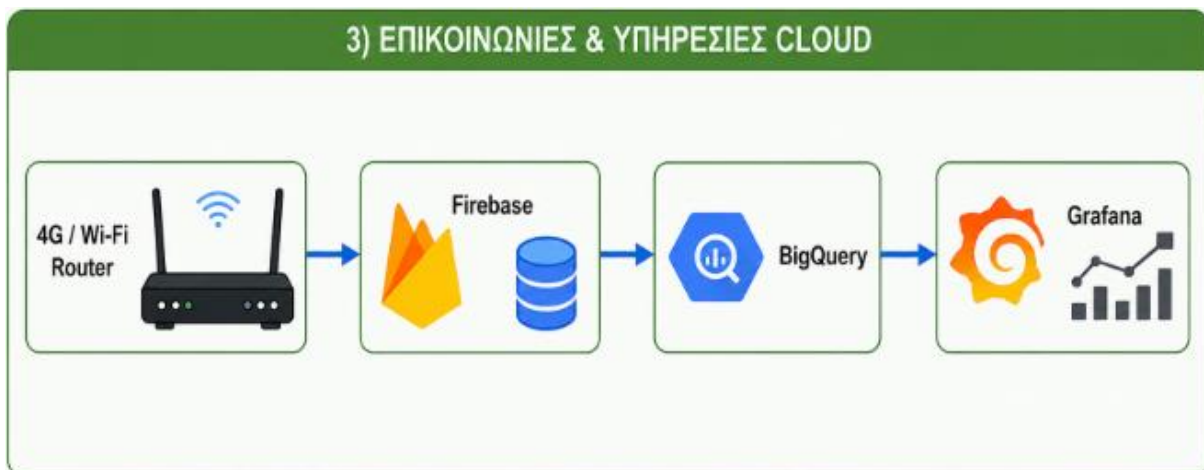
Από την τάση των 12 V δημιουργούνται επιμέρους τροφοδοσίες μέσω step-down. Χρησιμοποιούνται δύο step-down για την τροφοδοσία των κινητήρων, ένα για την τροφοδοσία των 3.3V στα επιμέρους κυκλώματα και ένα USB step-down στα 5 V για την τροφοδοσία του ESP.

Οι ξεχωριστές τροφοδοσίες έχουν επιλεγεί, καθώς οι τα Servo μπορούν να παρουσιάσουν στιγμιαίες αυξήσεις κατανάλωσης κατά την εκκίνηση ή της αλλαγής θέσης. Με την ανεξάρτητη τροφοδοσία των επιμέρους υποσυστημάτων μειώνεται η πιθανότητα επηρεασμού της λειτουργίας όλου του υπόλοιπου συστήματος.

Πίνακας 3.7: Τροφοδοσία βοηθητικών κυκλωμάτων

Υποσύστημα	Τάση τροφοδοσίας	Περιγραφή
Switching τροφοδοτικό	12 VDC	Κεντρική τροφοδοσία βοηθητικών κυκλωμάτων
step-down Servo X	11.4 VDC	Τροφοδοσία Servo αζιμούθιο
step-down Servo Y	11.4 VDC	Τροφοδοσία Servo ανύψωσης
step-down αισθητήρων	3.3 VDC	Τροφοδοσία INA260, TCA9548A και RTC
USB step-down ESP	5 VDC	Τροφοδοσία ESP32-S3

3.8 Υλοποίηση δικτυακής επικοινωνίας και αποστολής δεδομένων



Σχήμα 3-7: Ροή αποστολής δεδομένων από το ESP32-S3 προς τις διαδικτυακές υπηρεσίες

Η αποστολή δεδομένων πραγματοποιείται από το ESP μέσω WiFi. Η σύνδεση στο διαδίκτυο παρέχεται μέσω 4G router, το οποίο εξασφαλίζει την επικοινωνία με τις διαδικτυακές υπηρεσίες λήψης δεδομένων.

Στο κώδικα, η σύνδεση στο WiFi πραγματοποιείται κατά την αρχικοποίηση του συστήματος μέσω της εντολής: `WiFi.begin(ssid, password);`. Έπειτα είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η κατάσταση, κάτι που γίνεται συνέχεια μέχρις ότου να υπάρξει επιτυχής σύνδεση. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η εντολή: `while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)`. Έτσι εξασφαλίζεται η σύνδεση πριν από κάθε άλλη λειτουργία ώστε τις σωστές πληροφορίες οι οποίες είναι κρίσιμες για να λειτουργήσει σωστά και όλο το υπόλοιπο σύστημα.

Η αποστολή των μετρήσεων πραγματοποιείται από τη συνάρτηση `send_to_cloud()` όπου και αυτή περιμένει την επιβεβαίωση `WiFi.status()`. Αυτός ο έλεγχος είναι απαραίτητος, γιατί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας η σύνδεση με το δίκτυο μπορεί να διακοπεί προσωρινά. Εφόσον η σύνδεση είναι ενεργή, δημιουργείται το HTTP POST αίτημα μέσω της βιβλιοθήκης `HTTPClient`.

```
http.begin(serverURL);  
http.addHeader("Content-Type", "application/json");
```

Οι μετρήσεις που έχουν ληφθεί από τους αισθητήρες οργανώνονται σε αντικείμενο JSON μέσω της βιβλιοθήκης `ArduinoJson`. Για να γίνει η μετατροπή JSON σε συμβολοσειρά πραγματοποιείται με την εντολή: `serializeJson(doc, jsonData);`.

Στη συνέχεια η συμβολοσειρά `jsonData` αποστέλλεται στη διαδικτυακή υπηρεσία με HTTP POST: `int responseCode = http.POST(jsonData);`.

Η μεταβλητή `responseCode` αποθηκεύει τον κωδικό απόκρισης του server επιτρέποντας τον έλεγχο της επιτυχίας ή αποτυχίας αποστολής. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας η σύνδεση HTTP τερματίζει με την εντολή: `http.end();`.

Η διαδικασία της αποστολής επαναλαμβάνεται περιοδικά κατά τη λειτουργία του συστήματος και για αυτό τον σκοπό έχει επιλεγεί ο χρόνος των 10 δευτερολέπτων, ώστε οι μετρήσεις να αποστέλλονται σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Με αυτή την επιλογή πετυχαίνουμε και συνεχή ροή δεδομένων, η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση, ανάλυση και την απεικόνιση της λειτουργίας των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων [11], [12], [13].

3.9 Επίλογος

Η χρήση ίδιων συστημάτων επιτρέπει τη σύγκριση της απόδοσης η οποία βασίζεται στη διαφορά του σταθερού πάνελ σε σχέση με το tracking πάνελ.

Το σύστημα με τους έξι αισθητήρες και τον πολυπλέκτη μας επιτρέπει την καταγραφή των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια πλήρης εικόνα για την ενεργειακή συμπεριφορά και έτσι είναι εφικτός ο υπολογισμός της.

Συνδυάζοντας την πληροφορία από το RTC, τον υπολογισμό για τη θέση του συστήματος παρακολούθησης και την σωστή οδήγηση των κινητήρων με τις μοίρες που έχουν υπολογιστεί σωστά επιτυγχάνεται η επιθυμητή συμπεριφορά του κινητού πάνελ.

Τέλος με την αποστολή δεδομένων σε μορφή JSON και την αξιοποίηση τους μέσω Firebase, BigQuery και Grafana ολοκληρώνουν την υποδομή απομακρυσμένης παρακολούθησης. Έτσι το σύστημα δεν περιορίζεται στην τοπική λειτουργία αλλά παρέχει και οργανωμένη καταγραφή, αποθήκευση και απεικόνιση των μετρήσεων.

Κεφάλαιο 4ο: Μηχανολογική σχεδίαση, κατασκευή και εγκατάσταση συστήματος

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η φυσική κατασκευή του συστήματος που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας. Η ανάλυση εστιάζεται στη μηχανολογική σχεδίαση, στις βάσεις στήριξης των δύο πλαισίων, στην κατασκευή των πινάκων, στην τοποθέτηση των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων και στην επιλογή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Η κατασκευή περιλαμβάνει δύο βασικές διατάξεις, μία σταθερή βάση για το fixed σύστημα και μια βάση με τη δυνατότητα κίνησης για το σύστημα παρακολούθησης. Οι βάσεις έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα τις απαιτήσεις της εφαρμογής και έχουν κατασκευαστεί με την μέθοδο της 3D εκτύπωσης.

Η χρήση custom σχεδιασμένων εξαρτημάτων επιτρέπει την προσαρμογή τις κατασκευής στις ανάγκες της εργασίας χωρίς τους περιορισμούς που θα υπήρχαν από έτοιμες εμπορικές βάσεις. Παράλληλα δίνεται και η δυνατότητα τροποποίησης και βελτίωσης των εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια της υλοποίησης, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη λειτουργία.

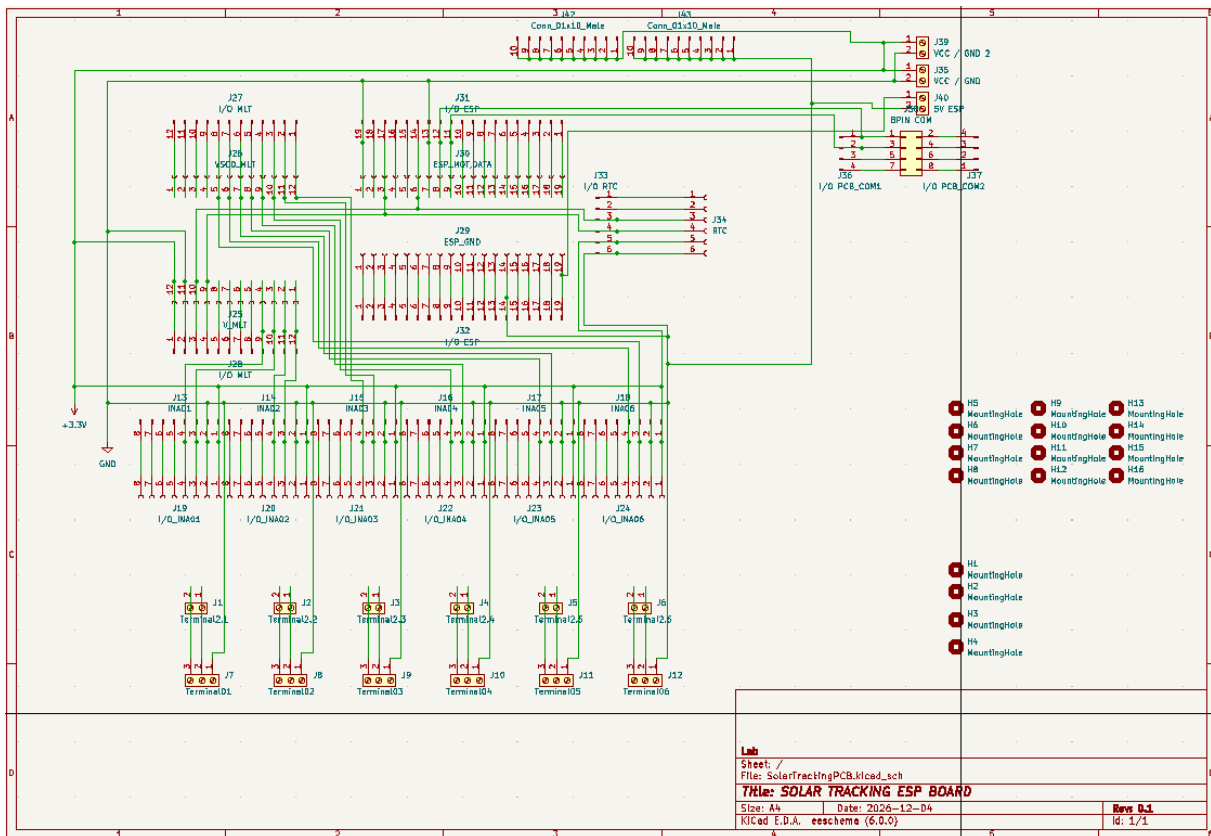
4.2 Πλακέτα ελέγχου και μετρήσεων

Για την καλύτερη οργάνωση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων του συστήματος σχεδιάστηκαν δύο πλακέτες σε περιβάλλον KiCad. Η πρώτη πλακέτα αφορά το κύκλωμα ελέγχου και μετρήσεων, ενώ η δεύτερη αφορά την τροφοδοσία των επιμέρους υποσυστημάτων. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε ώστε να μειωθεί η καλωδίωση, να περιοριστεί η πιθανότητα λανθασμένων συνδέσεων και να υπάρχει πιο καθαρή διάταξη στον κεντρικό πίνακα.

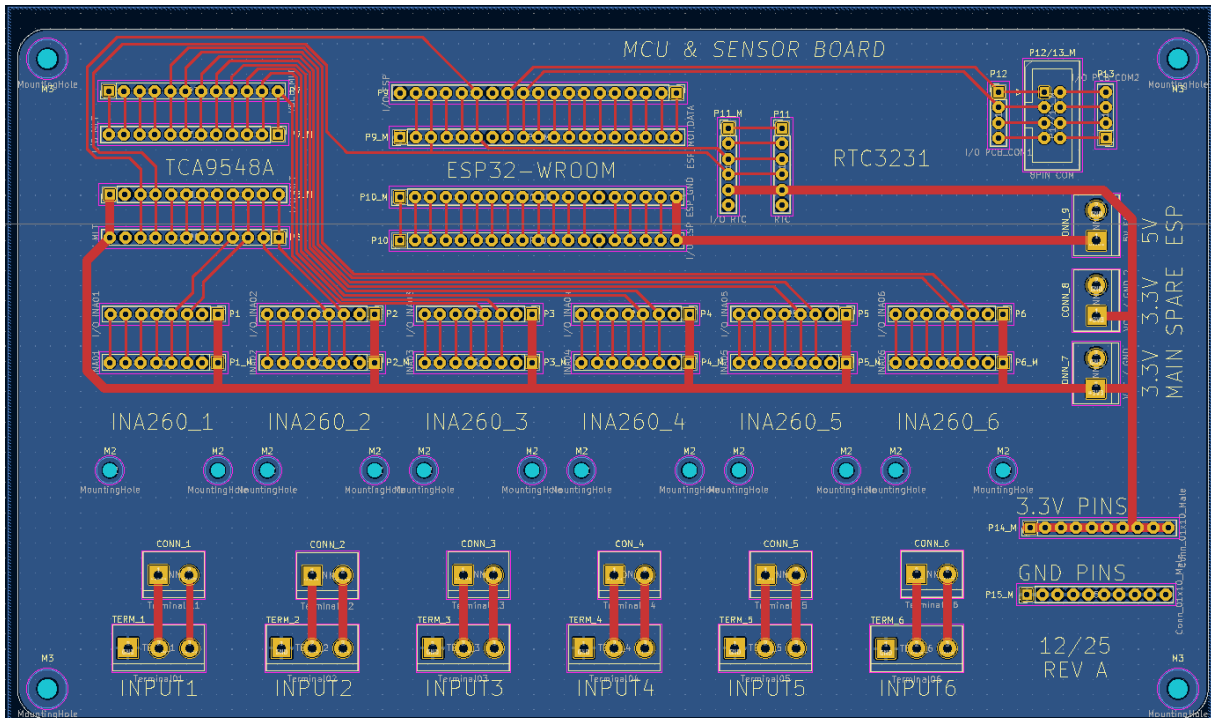
Η πρώτη πλακέτα ονομάζεται MCU & Sensor Board και περιλαμβάνει τις βασικές μονάδες ελέγχου και μέτρησης. Σε αυτήν έχουν προβλεφθεί θέσεις για την αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3, το RTC DS3231, τον πολυπλέκτη Gravity Digital 1-to-8 I2C Multiplexer και τους έξι αισθητήρες INA260. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις του φωτοβολταϊκού πλαισίου, της μπαταρίας και του φορτίου τόσο στο fixed όσο και στο tracking σύστημα.

Ο πολυπλέκτης I2C χρησιμοποιείται επειδή οι αισθητήρες INA260 έχουν ίδια διεύθυνση επικοινωνίας. Μέσω του πολυπλέκτη, κάθε αισθητήρας συνδέεται σε διαφορετικό κανάλι και το ESP32-S3 επιλέγει κάθε φορά από ποιον αισθητήρα θα διαβάσει τις μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται συγκρούσεις διευθύνσεων στο I2C bus και η συνδεσμολογία γίνεται πιο οργανωμένη.

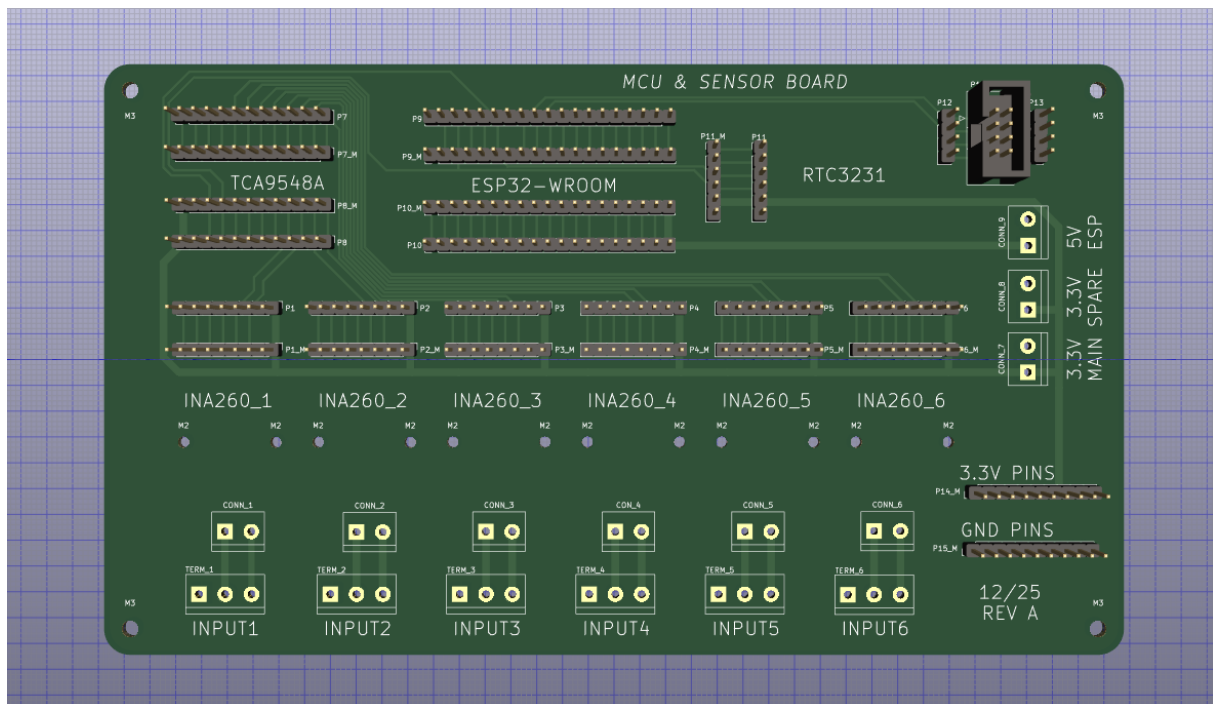
Στην πλακέτα προβλέφθηκαν έξι ξεχωριστές είσοδοι, μία για κάθε σημείο μέτρησης. Οι είσοδοι αυτές αντιστοιχούν στους έξι INA260. Επιπλέον, υπάρχουν γραμμές τροφοδοσίας 3.3 V, 5 V και GND, καθώς και επιπλέον ακροδέκτες για δοκιμές ή μελλοντική επέκταση του συστήματος.



Σχήμα 4-1: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας MCU & Sensor Board στο KiCad



Σχήμα 4-2: Σχεδίαση PCB της πλακέτας MCU & Sensor Board στο KiCad

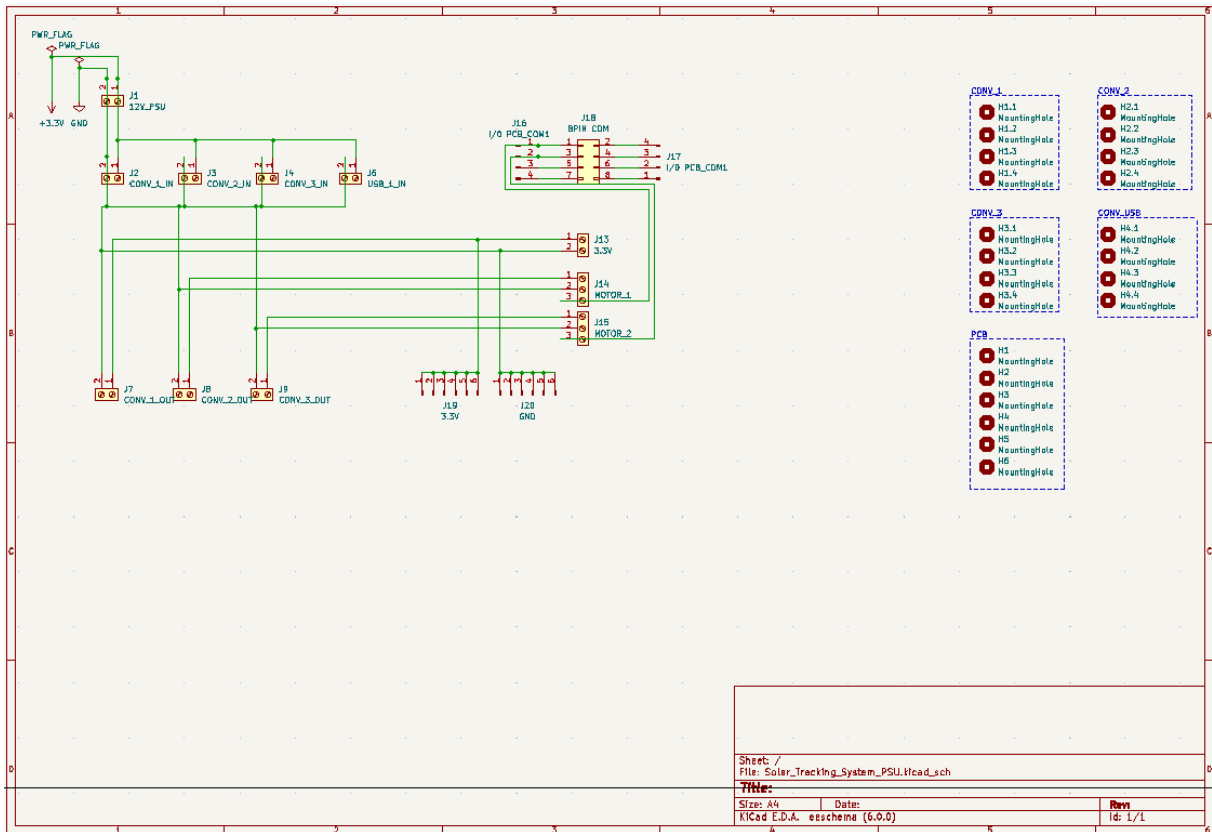


Σχήμα 4-3: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας MCU & Sensor Board

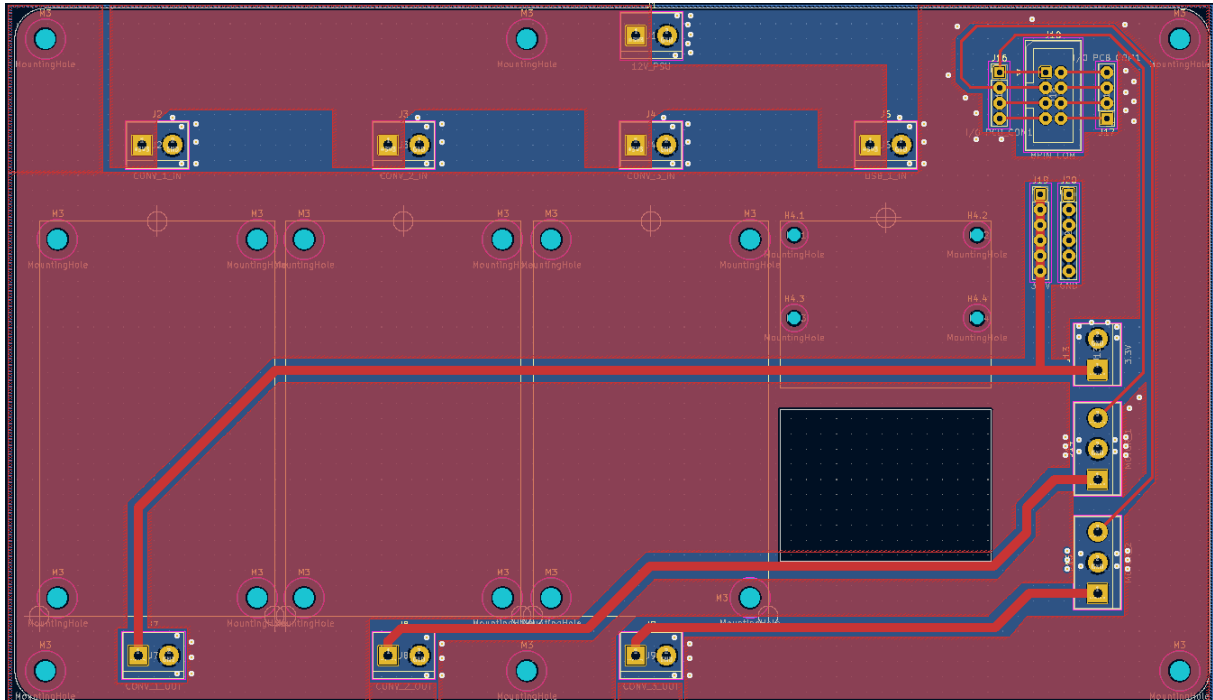
Η δεύτερη πλακέτα είναι η PSU Board και σχεδιάστηκε για την οργάνωση των τροφοδοσιών. Σε αυτήν έχουν προβλεφθεί θέσεις για δύο μετατροπείς step-down που τροφοδοτούν ξεχωριστά τους δύο σερβοκινητήρες, έναν μετατροπέα step-down 3.3 V για την τροφοδοσία της MCU & Sensor Board και έναν USB step-down 5 V για την τροφοδοσία της πλακέτας ESP32-S3 μέσω της θύρας USB Type-C.

Ο διαχωρισμός των τροφοδοσιών κρίθηκε απαραίτητος, επειδή οι σερβοκινητήρες μπορούν να παρουσιάσουν στιγμιαίες αυξήσεις ρεύματος κατά την αλλαγή θέσης. Με ξεχωριστή τροφοδοσία για κάθε servo μειώνεται η πιθανότητα πτώσης τάσης ή παρεμβολών στα κυκλώματα μέτρησης και ελέγχου.

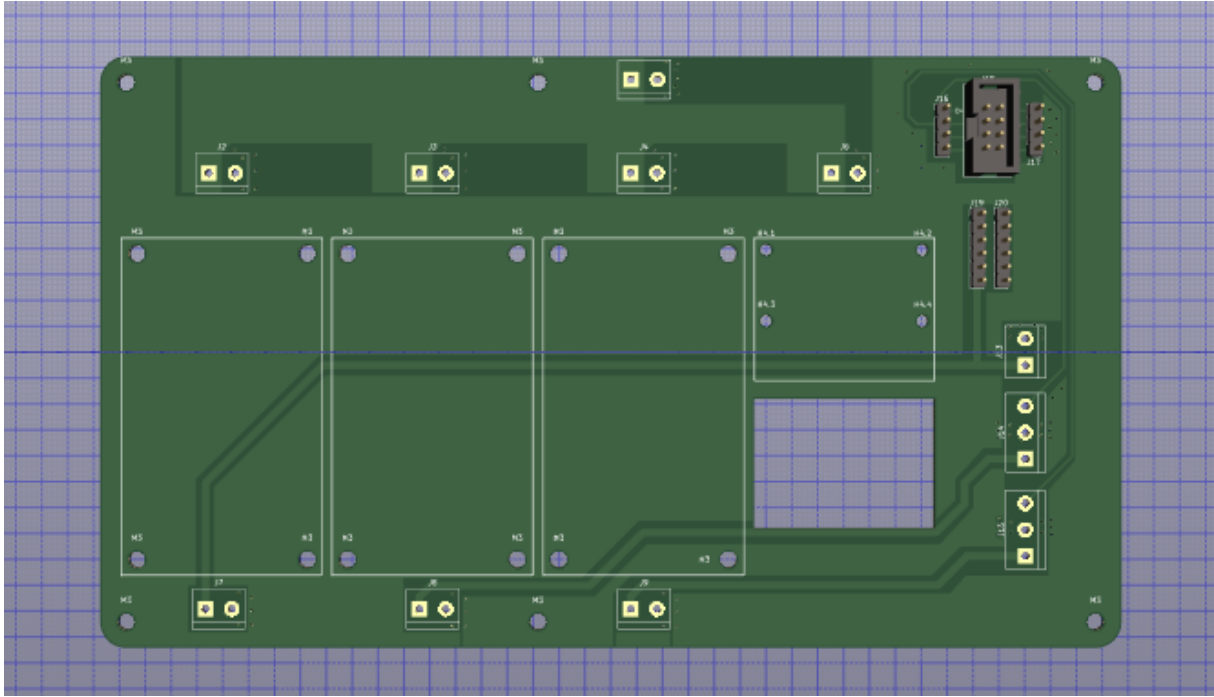
Οι δύο πλακέτες προβλέπεται να συνδέονται μεταξύ τους με καλωδιωταινία. Μέσω αυτής μεταφέρονται οι απαραίτητες γραμμές τροφοδοσίας και επικοινωνίας. Η λύση αυτή επιλέχθηκε ώστε η σύνδεση να είναι καθαρή, αποσπώμενη και εύκολη στον έλεγχο ή στη συντήρηση.



Σχήμα 4-4: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας PSU Board στο KiCad

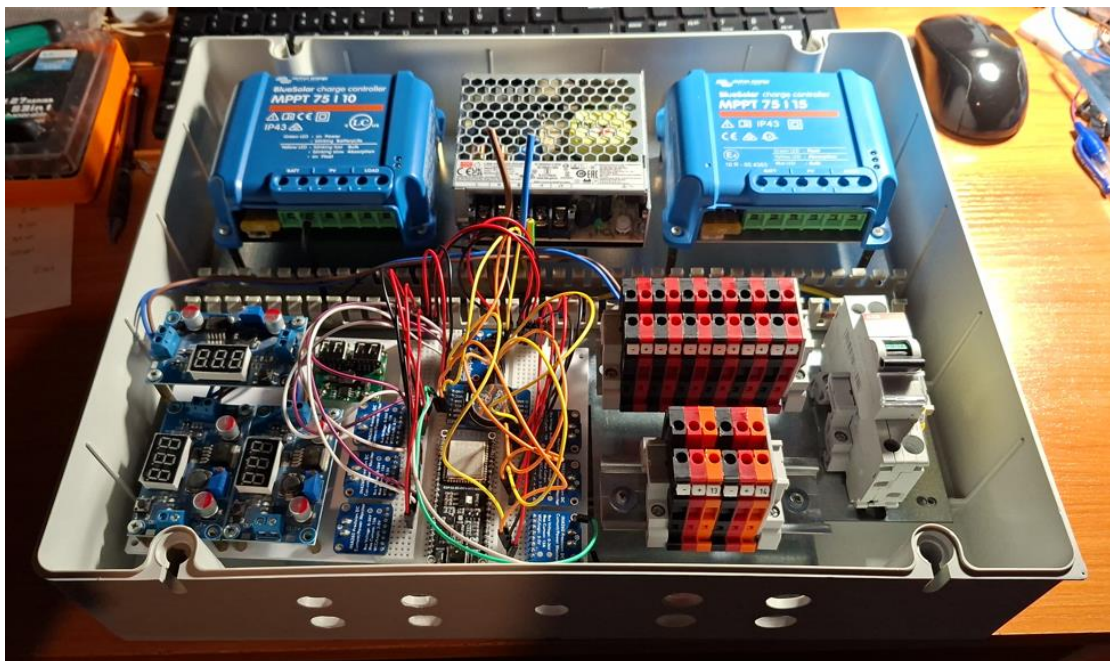


Σχήμα 4-5: Σχεδίαση PCB της πλακέτας PSU Board στο KiCad



Σχήμα 4-6: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας PSU Board

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, πριν από την παραλαβή των τελικών πλακετών, τα επιμέρους modules τοποθετήθηκαν προσωρινά πάνω σε βάση 3D εκτύπωσης πάχους 3 mm. Πάνω στη βάση αυτή βιδώθηκαν οι αισθητήρες INA260, ο πολυπλέκτης, το RTC, η αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3 και οι μετατροπείς τροφοδοσίας. Η προσωρινή διάταξη επέτρεψε τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος, την επιβεβαίωση των συνδέσεων και τη συλλογή των πρώτων μετρήσεων.

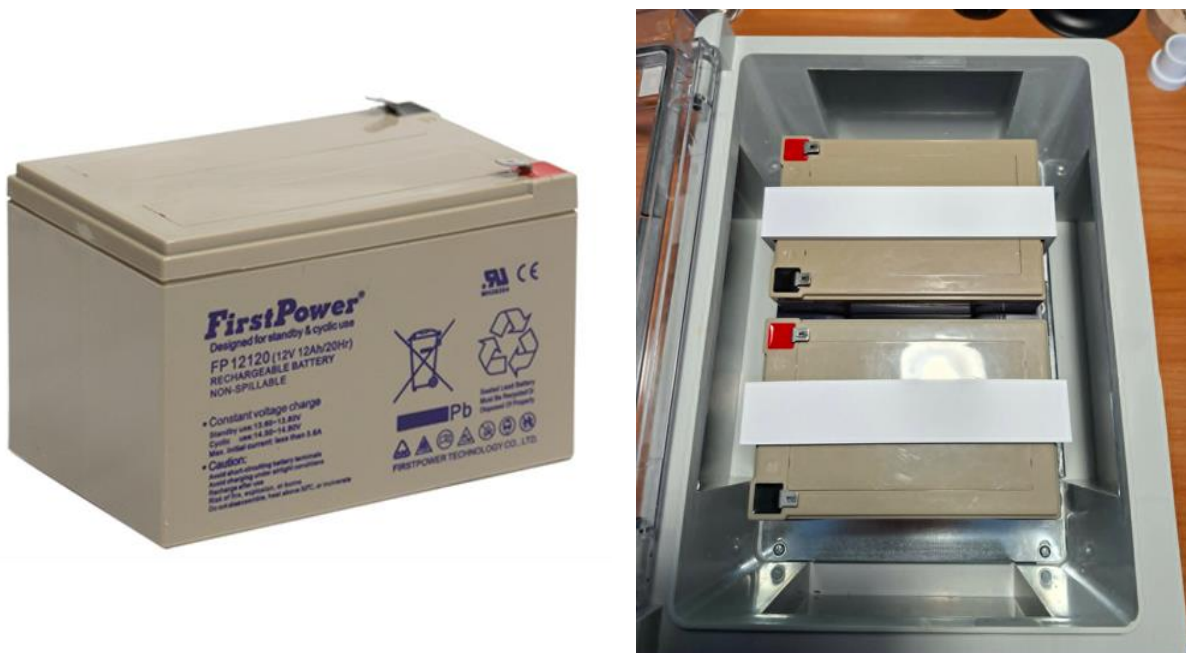


Σχήμα 4-7: Προσωρινή υλοποίηση κυκλωμάτων ελέγχου και τροφοδοσίας στον κεντρικό πίνακα

Η σχεδίαση των δύο πλακετών στο KiCad έγινε με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της οργάνωσης του συστήματος. Με την τελική χρήση των πλακετών θα μειωθεί σημαντικά ο αριθμός των ελεύθερων καλωδίων, θα περιοριστεί η πιθανότητα σφαλμάτων στις συνδέσεις και θα γίνει πιο εύκολη η συντήρηση ή μελλοντική επέκταση της κατασκευής.

4.3 Πίνακας μπαταριών

Ο πίνακας των μπαταριών κατασκευάστηκε με σκοπό την προστασία των δύο μπαταριών που χρησιμοποιούνται για τα δύο φωτοβολταϊκά συστήματα. Στον πίνακα τοποθετούνται 2 μπαταρίες sealed lead – acid 12V / 12Ah, μία για το fixed σύστημα και μία για το σύστημα παρακολούθησης. Με αυτό τον τρόπο κάθε σύστημα έχει την δική του ανεξάρτητη μπαταρία για να αποθηκεύσει την ενέργεια.

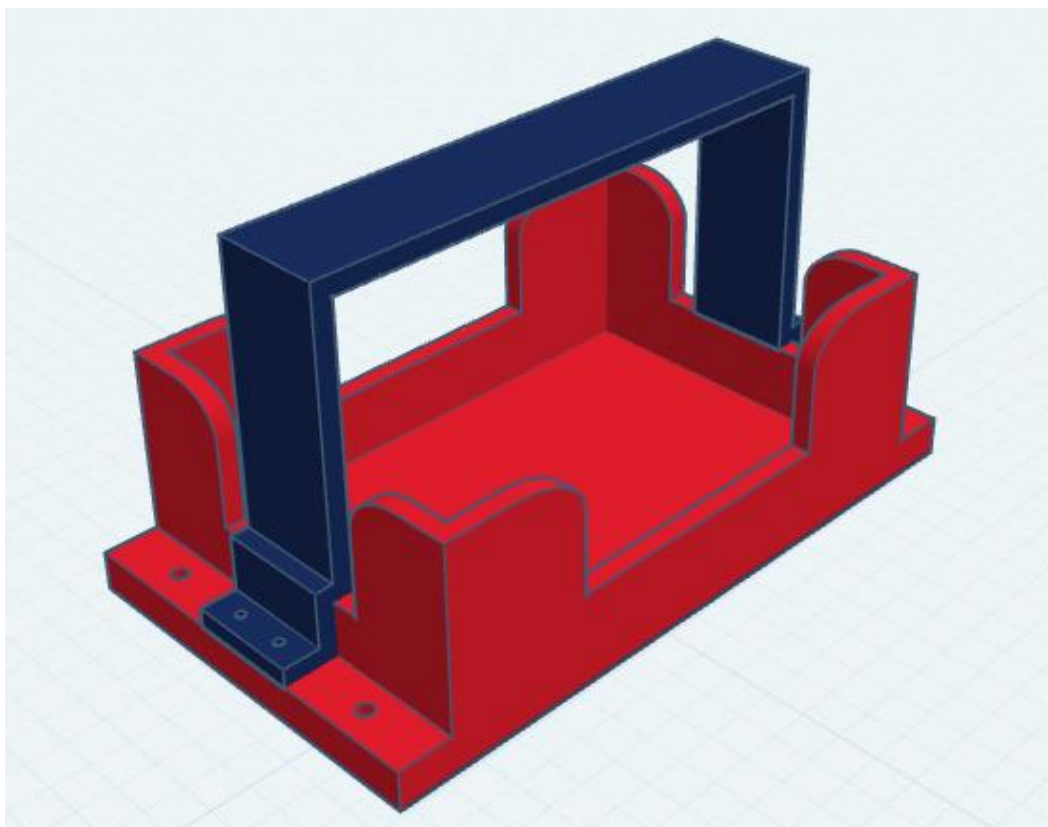


Σχήμα 4-8: Μπαταρία και πίνακας μπαταριών των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων

Για την στήριξη των μπαταριών σχεδιάστηκαν ειδικές βάσεις σε περιβάλλον CAD και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν με 3D εκτυπωτή. Οι βάσεις προσαρμόστηκαν στις διαστάσεις των μπαταριών και στο εσωτερικό μέγεθος του πίνακα, ώστε να παραμένουν σταθερές κατά την μεταφορά και τη λειτουργία του συστήματος. Η χρήση 3D εκτύπωσης επέτρεψε την ακριβή προσαρμογή των βάσεων χωρίς την ανάγκη χρήσης έτοιμων εμπορικών στηριγμάτων.



Σχήμα 4-9: Στήριξη μπαταριών με 3D printed βάσεις



Σχήμα 4-10: 3D σχέδια βάσεων μπαταριών

Η μηχανική συγκράτηση των μπαταριών πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα. Αρχικά, οι κάτω βάσεις κρατούν τις μπαταρίες στη σωστή θέση στην μεταλλική επιφάνεια και το πάνω κομμάτι τις ασφαλίζει σε τυχόν μετακινήσεις.

Για την προστασία του κάθε κυκλώματος χρησιμοποιείται και ένας ασφαλειοαποξεύκτης με μια ασφάλεια των 2A. Κάθε ασφαλειοαποξεύκτης τοποθετείται στον αντίστοιχο κλάδο τροφοδοσίας, ώστε αν περάσει υπερβολικό ρεύμα ή γίνει κάποιο βραχυκύκλωμα να διακοπεί η παροχή από και προς την μπαταρία.

Ο ασφαλειοαποξεύκτης δέχεται φυσίγγι, το οποίο για την συγκεκριμένη εφαρμογή έχει επιλεγεί στα 2 αμπέρ με βάση τα 12V λειτουργίας και μέγιστο ρεύμα λιγότερο από 1A αφού το φορτίο είναι 10W / 12V.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10\text{Watt}}{12\text{Volt}} = 0.833\text{A} = 833\text{mA}$$

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές φορτίου, επομένως η τιμή του φυσιγγίου προσαρμόστηκε ανάλογα με το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας. Η επιλογή της ασφάλειας έγινε με βάση την ισχύ του φορτίου, την τάση λειτουργίας των 12 V και τη διατομή των καλωδιώσεων του αντίστοιχου κλάδου.

Πίνακας 4.1: Πίνακας επιλογής ασφάλειας για ασφαλειοαποξεύκτη μπαταριών

Ισχύς φορτίου	Ρεύμα λειτουργίας	Ρεύμα με περιθώριο 25%
5W	0.42A	0.52A
10W	0.83A	1.04A
15W	1.25A	1.56A
20W	1.67A	2.08A

25W	2.08A	2.60A
30W	2.50A	3.13A

Η σύνδεση του πίνακα με το υπόλοιπο σύστημα γίνεται με κονέκτορες SP13, έτσι ώστε να υπάρχει τέλεια σύνδεση τόσο ηλεκτρολογικά όσο και σε θέμα αντοχής σε καιρικές συνθήκες.

Πίνακας 4.2: Στοιχεία πίνακα μπαταριών

Στοιχείο	Ποσότητα	Ρόλος στην κατασκευή
Μπαταρία sealed lead-acid 12 V / 12 Ah	2	Αποθήκευση ενέργειας ξεχωριστά για κάθε σύστημα
Ασφάλεια προστασίας	2	Προστασία από υπερβολικό ρεύμα ή βραχυκύκλωμα
Κάτω 3D εκτυπωμένες βάσεις	2	Βάση για την τοποθέτηση των μπαταριών εντός του πίνακα
Ανω 3D εκτυπωμένα στηρίγματα τύπου «Π»	2	Στήριξη των μπαταριών στις βάσεις
Καλωδιώσεις ισχύος, κονέκτορες sp13	2	Μεταφορά ρευμάτων

4.4 Παροχή ρεύματος από switching τροφοδοτικό

Η τροφοδοσία των κυκλωμάτων της κατασκευής πραγματοποιείται μέσω switching τροφοδοτικού, το οποίο μετατρέπει την τάση του δικτύου 230VAC σε 12 VDC. Η χρήση ξεχωριστού τροφοδοτικού επιλέχθηκε ώστε τα ηλεκτρονικά ελέγχου, τα step-down και οι κινητήρες να μην εξαρτώνται απευθείας από τις μπαταρίες των συστημάτων.

Η επιλογή ανεξάρτητης τροφοδοσίας για τα βοηθητικά κυκλώματα έγινε ώστε η λειτουργία του συστήματος ελέγχου, των αισθητήρων και των σερβοκινητήρων να μην εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών των δύο φωτοβολταϊκών διατάξεων. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η πιθανότητα οι μετρήσεις ή η λειτουργία του μηχανισμού παρακολούθησης να επηρεαστούν από μεταβολές στην τάση των μπαταριών. Από το τροφοδοτικό τροφοδοτούνται τα επιμέρους step-down, τα οποία με τη σειρά τους τροφοδοτούν τα υπόλοιπα κυκλώματα με τις επιθυμητά επίπεδα τάσης.



Σχήμα 4-11: Switching τροφοδοτικό 230 VAC σε 12 VDC για την τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού βοηθητικών κυκλωμάτων [10]

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
Τύπος τροφοδοτικού	Mean Well LRS-100-12
Τάση εισόδου	230 VAC
Τάση εξόδου	12 VDC
Χρήση	Τροφοδοσία step-down μετατροπέων και βοηθητικών κυκλωμάτων
Υποσυστήματα που τροφοδοτούνται έμμεσα	Servo, ESP32-S3, INA260, RTC, I2C multiplexer
Λόγος χρήσης	Σταθερή και ανεξάρτητη τροφοδοσία του συστήματος ελέγχου

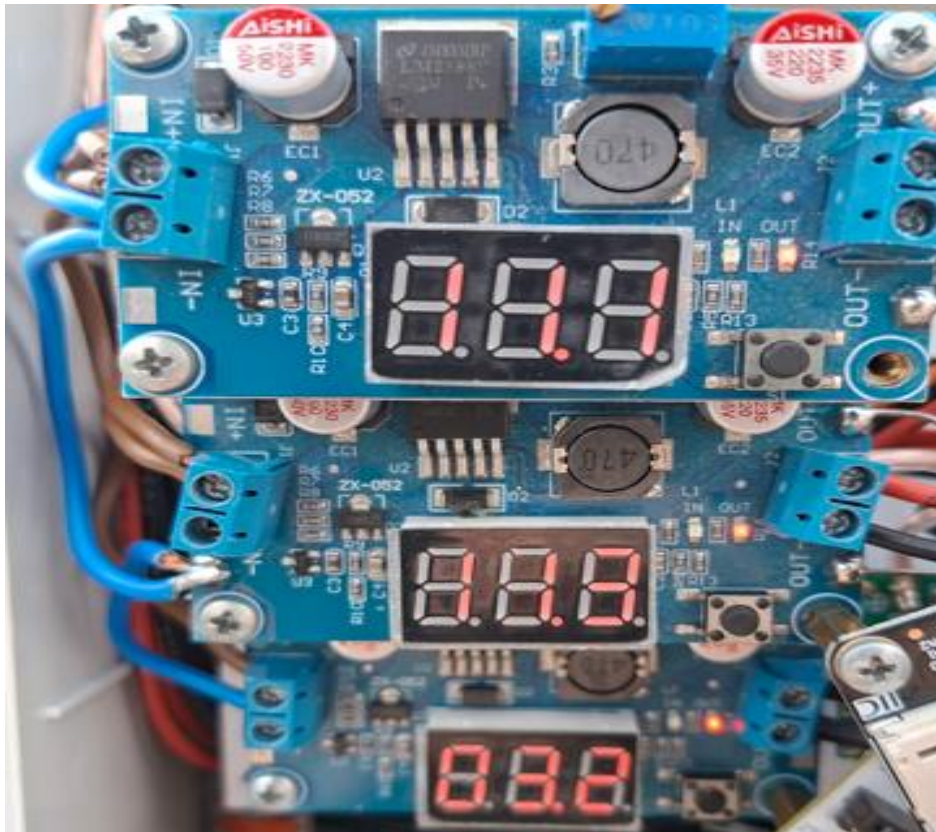
4.5 Μετατροπείς step-down

Οι μετατροπείς step-down χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των επιμέρους τάσεων τροφοδοσίας που απαιτούνται από τα βοηθητικά κυκλώματα της κατασκευής. Η βασική τροφοδοσία του πίνακα προέρχεται από το switching τροφοδοτικό στα 12VDC, όμως τα επιμέρους κυκλώματα δεν λειτουργούν όλα σε αυτή την τάση. Για τον λόγο αυτό, η τάση των 12V υποβιβάζεται μέσω ανεξάρτητων μετατροπέων DC – DC.

Στην κατασκευή χρησιμοποιούνται 2 ξεχωριστοί μετατροπείς step-down για τα δύο Servo, ένας για τον άξονα του αζιμούθιου και ένας για τον άξονα της γωνίας ανύψωσης. Η επιλογή της ανεξάρτητης τροφοδοσίας των servo έγινε ώστε να μειωθεί η πιθανότητα πτώσης τάσης ή παρεμβολών κατά την κίνηση τους. Οι Servo μπορούν να παρουσιάσουν στιγμιαία αυξημένη κατανάλωση ρεύματος κατά την εκκίνηση ή την αλλαγή θέσης. Για τον λόγο αυτό τροφοδοτούνται από ανεξάρτητους μετατροπείς step-down, ώστε να περιορίζεται η πιθανότητα πτώσης τάσης ή παρεμβολών στα κυκλώματα ελέγχου και μετρήσεων.

Επιπλέον χρησιμοποιείται ξεχωριστός μετατροπέας για τα 3.3V, τα οποία τροφοδοτούν τους αισθητήρες INA260, τον multiplexer I2C και το RTC. Τα συγκεκριμένα υποσυστήματα λειτουργούν σε

χαμηλή τάση και απαιτούν σταθερή τροφοδοσία καθώς συμμετέχουν στη μέτρηση και στη μεταφορά των δεδομένων προς το ESP.



Σχήμα 4-12: Μετατροπείς step-down για τις επιμέρους τάσεις τροφοδοσίας.

Για την τροφοδοσία του ESP χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστό USB step-down στα 5V. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε η πλακέτα να τροφοδοτείται μέσω της θύρας TYPE-C που έχει και ταυτόχρονα να μπορεί να συνδεθεί στον υπολογιστή με το ίδιο καλώδιο σε περίπτωση που χρειαστεί κάποιος τοπικός έλεγχος.

Η χρήση πολλαπλών ανεξάρτητων step-down επιτρέπει τον διαχωρισμό των γραμμών τροφοδοσίας ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε υποσυστήματος. Έτσι τα Servo, τα κυκλώματα μέτρησης και η αναπτυξιακή πλακέτα του ESP τροφοδοτούνται από διαφορετικούς κλάδους, γεγονός που βελτιώνει τη σταθερότητα λειτουργίας και διευκολύνει τον έλεγχο ή την αποσύνδεση κάθε επιμέρους τμήματος.

Πίνακας 4.4: Μετατροπείς step-down της κατασκευής

Μετατροπέας	Τάση εξόδου	Υποσύστημα που τροφοδοτεί	Ρόλος
Step-down Servo X	11.4 VDC	Servo αζιμούθιου	Τροφοδοσία οριζόντιας κίνησης
Step-down servo Y	11.4 VDC	Servo ανύψωσης	Τροφοδοσία κατακόρυφης κίνησης
Step-down 3.3 V	3.3 VDC	INA260, RTC, I2C multiplexer	Τροφοδοσία κυκλωμάτων χαμηλής τάσης
USB step-down 5 V	5 VDC	ESP32-S3	Τροφοδοσία αναπτυξιακής πλακέτας

4.5.1 Πυκνωτές εξομάλυνσης και φιλτραρίσματος τροφοδοσίας

Στην κατασκευή τοποθετήθηκαν πυκνωτές μεταξύ των γραμμών τροφοδοσίας και του κοινού σημείου αναφοράς GND, με σκοπό την σταθεροποίηση της τάσης και τη μείωση των στιγμιαίων διακυμάνσεων που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη λειτουργία. Η χρήση πυκνωτών είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σημεία όπου υπάρχουν μετατροπείς DC – DC, Servo, και ψηφιακά κυκλώματα, καθώς οι στιγμιαίες μεταβολές ρεύματος μπορούν να προκαλέσουν πτώσεις τάσεις ή ηλεκτρικό θόρυβο.

Στις εξόδους των step-down που τροφοδοτούν τα Servo τοποθετήθηκε ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 2200uf και ένας κεραμικός 100nf. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση μεγαλύτερων και πιο αργών μεταβολών της τάσης οι οποίες μπορεί να προκύψουν από την αυξημένη κατανάλωση κατά την κίνηση. Ο κεραμικός πυκνωτής χρησιμοποιείται για την απόσβεση υψίσυχνου θορύβου.

Επιπλέον τοποθετήθηκαν κεραμικοί πυκνωτές 100nf στις γραμμές τροφοδοσίας των ψηφιακών κυκλωμάτων, συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε πυκνωτής 100nf στην τροφοδοσία των 5V του ESP και 100nf σε όλους τους αισθητήρες, στο RTC και στον multiplexer. Με αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η σταθερότητα της τροφοδοσίας των κυκλωμάτων μέτρησης και επικοινωνίας, μειώνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων στις μετρήσεις ή στην επικοινωνία I2C.

Πίνακας 4.5: Πυκνωτές φιλτραρίσματος και σημεία τοποθέτησης

Σημείο τοποθέτησης	Πυκνωτής	Ρόλος
Έξοδος step-down σερβοκινητήρα αζιμούθιου	2200uf ηλεκτρολυτικός 100nf κεραμικός	Εξομάλυνση τάσης και απόσβεση θορύβου
Έξοδος step-down σερβοκινητήρα ανύψωσης	2200uf ηλεκτρολυτικός 100nf κεραμικός	Εξομάλυνση τάσης και απόσβεση θορύβου
Τροφοδοσία 5VESP32-S3	100nf κεραμικός	Σταθεροποίηση τροφοδοσίας και μείωση υψίσυχνου θορύβου
Έξοδος step-down 3.3V	100nf κεραμικός	Φιλτράρισμα γραμμής 3.3V
Κάθε αισθητήρας INA260	100nf κεραμικός	Σταθεροποίηση τροφοδοσίας και μείωση υψίσυχνου θορύβου
RTC, I2C multiplexer	100nf κεραμικός	Σταθεροποίηση τροφοδοσίας και μείωση υψίσυχνου θορύβου

4.6 Ρυθμιστές φόρτισης MPPT

Στην κατασκευή χρησιμοποιούνται δύο ανεξάρτητοι ρυθμιστές φόρτισης MPPT, ένας για κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα. Ο διαχωρισμός αυτός είναι απαραίτητος, ώστε το fixed σύστημα και το σύστημα παρακολούθησης να λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους και να μην υπάρχει καμία κοινή ενεργειακή διαχείριση που θα επηρέαζε τα αποτελέσματα της σύγκρισης.

Στο fixed φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιείται ρυθμιστής φόρτισης BlueSolar MPPT 75/10, ενώ στο σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιείται BlueSolar MPPT 75/15. Και οι δύο ρυθμιστές τοποθετούνται μεταξύ του αντίστοιχου φωτοβολταϊκού πλαισίου και της μπαταρίας, με σκοπό τη διαχείριση της φόρτισης και την καλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 4-13: Ρυθμιστές φόρτισης MPPT των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων

Σε κάθε MPPT συνδέεται το αντίστοιχο πάνελ, η μπαταρία και το φορτίο. Σε κάθε κλάδο μέτρησης, ο αγωγός υψηλότερου δυναμικού περνά σε σειρά από τον αντίστοιχο αισθητήρα INA260, ώστε να καταγράφονται η τάση και το ρεύμα του συγκεκριμένου σημείου.

Η επιλογή των ρυθμιστών φόρτισης τύπου MPPT έγινε επειδή επιτρέπουν στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο να λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτό είναι σημαντικό για την εργασία, καθώς στόχος είναι η σύγκριση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των δύο συστημάτων και όχι η αξιολόγηση του ρυθμιστή φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο και τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν με αντίστοιχη λογική ενεργειακής διαχείρισης, γεγονός που βοηθά ώστε η σύγκριση να βασίζεται κυρίως στη διαφορά προσανατολισμού και όχι σε διαφορετικό τρόπο φόρτισης [3].

Πίνακας 4.6: Ρυθμιστές φόρτισης MPPT

Σύστημα	Ρυθμιστής φόρτισης MPPT	Ρόλος
fixed σύστημα	BlueSolar MPPT 75/10	Φόρτιση μπαταρίας και τροφοδοσία φορτίου σταθερού συστήματος
Σύστημα παρακολούθησης	BlueSolar MPPT 75/15	Φόρτιση μπαταρίας και τροφοδοσία φορτίου συστήματος παρακολούθησης

4.7 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Στην κατασκευή χρησιμοποιούνται δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια ίδιας ονομαστικής ισχύος και ίδιας σειράς παραγωγής, ώστε η σύγκριση μεταξύ του σταθερού συστήματος και του συστήματος παρακολούθησης να πραγματοποιείται με όσο το δυνατόν πιο ισοδύναμες συνθήκες. Το ένα πάνελ τοποθετείται σε σταθερή βάση και παραμένει ακίνητο ενώ το δεύτερο τοποθετείται στον μηχανισμό κίνησης.

Τα πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν είναι μονοκρυσταλλικού τύπου με ονομαστική ισχύ 25 W. Η έξοδος κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου οδηγείται στον αντίστοιχο ρυθμιστή φόρτισης MPPT, ενώ στον κλάδο του πλαισίου έχει τοποθετηθεί αισθητήρας INA260 για την καταγραφή της τάσης και του ρεύματος παραγωγής [2].



Σχήμα 4-14: Φωτοβολταϊκά πλαίσια σταθερού και tracking συστήματος

Πίνακας 4.7: Βασικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πάνελ

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ονομαστική ισχύς Pmax	25W
Τάση μέγιστης ισχύος Vmp	18V
Ρεύμα μέγιστης ισχύος Imp	1.39A
Τάση ανοικτού κυκλώματος Voc	21.6V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc	1.42A
Τεχνολογία κυψελών	Monocrystalline
Διαστάσεις	540*350*17
Βάρος	1.9kg
Junction box	IP 67 rated

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της λειτουργίας και τη συμβατότητα με τους ρυθμιστές φόρτισης. Η τάση μέγιστης ισχύος Vmp και το ρεύμα μέγιστης ισχύος Imp είναι ιδιαίτερα σημαντικά καθώς καθορίζουν το σημείο στο οποίο το πάνελ μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ισχύ του σε πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Αυτά τα μεγέθη δίνουν και την τιμή που δηλώνει ο κατασκευαστής για Pmax:

$$P_{max} = V_{mp} * I_{mp} = 18 * 1.39 = 25.02W$$

4.8 Φορτία συστήματος

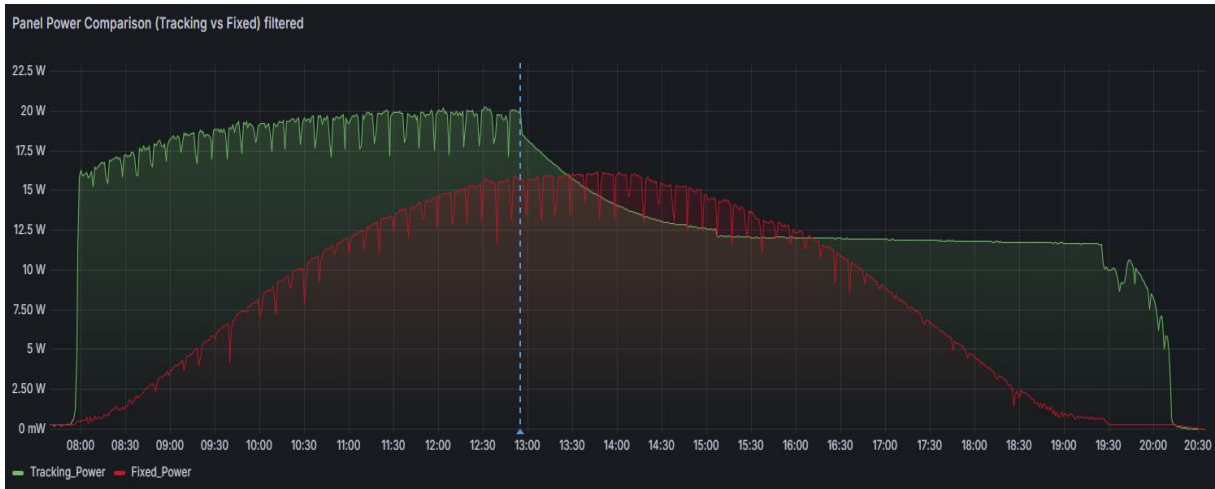


Σχήμα 4-15: Φορτία συνεχούς τάσης των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων

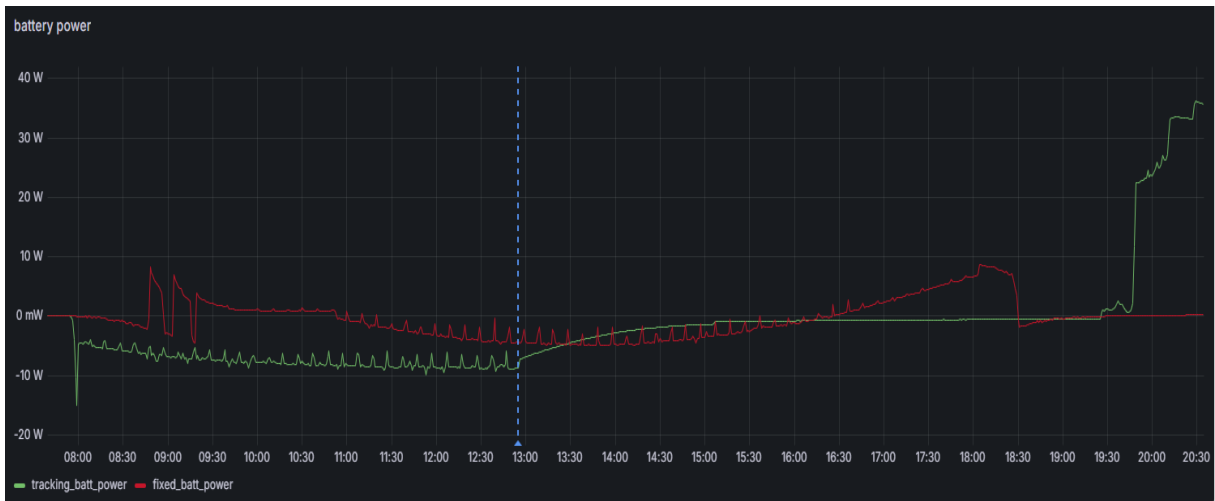
Στην κατασκευή χρησιμοποιούνται δύο ίδια φορτία, ένα για κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα. Ως φορτία επιλέχθηκαν προβολείς συνεχούς τάσης, ώστε να υπάρχει επαναλαμβανόμενη και συγκρίσιμη κατανάλωση ενέργειας και στις δύο διατάξεις. Και τα δύο φορτία έχουν συνδεθεί στην έξοδο του MPPT και όχι στους ακροδέκτες της μπαταρίας όπως συνηθίζεται. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε η διαχείριση της κατανάλωσης να γίνεται από το MPPT και να υπάρχει προστασία της μπαταρίας από βαθιά εκφόρτιση. Παράλληλα, η σύνδεση του φορτίου στην έξοδο του MPPT επιτρέπει στο σύστημα να αξιοποιεί την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ η μπαταρία λειτουργεί ως ένα στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε φορτίο ισχύος 10 W σε κάθε σύστημα. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι το φορτίο αυτό ήταν μικρό σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ του συστήματος παρακολούθησης. Ως αποτέλεσμα, η μπαταρία του tracking συστήματος έφτανε γρήγορα σε υψηλό επίπεδο φόρτισης και ο MPPT περιόριζε σταδιακά την ισχύ που απορροφούσε από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το φαινόμενο αυτό επηρέαζε την καμπύλη παραγωγής, καθώς το σύστημα δεν λειτουργούσε συνεχώς κοντά στο σημείο μέγιστης αξιοποίησης της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.

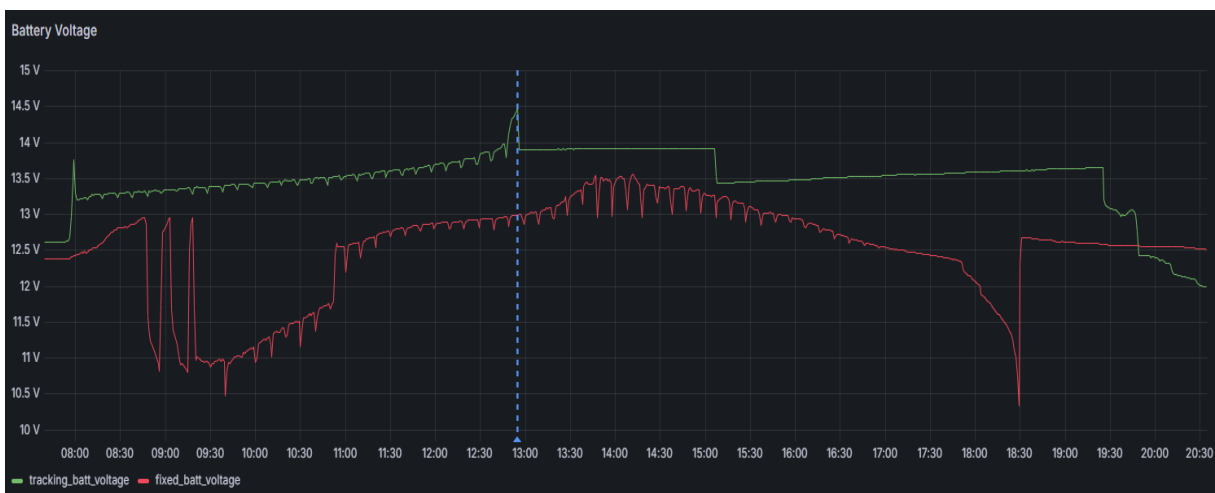
Για τον λόγο αυτό προστέθηκε επιπλέον προβολέας ισχύος 20 W, με αποτέλεσμα το συνολικό φορτίο κάθε συστήματος να γίνει 30 W. Η αύξηση της ισχύος του φορτίου δημιούργησε μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση, επιτρέποντας στον MPPT να αξιοποιεί μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης παραγωγής του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο οι μετρήσεις έγιναν πιο αντιπροσωπευτικές για τη σύγκριση μεταξύ του σταθερού και του tracking συστήματος.



Σχήμα 4-16: Σύγκριση της απόδοσης των πάνελ με 10 watt φορτίο



Σχήμα 4-17: Σύγκριση της ισχύος των μπαταριών με 10 watt φορτίο



Σχήμα 4-18: Σύγκριση της τάσης των μπαταριών με 10 watt φορτίο

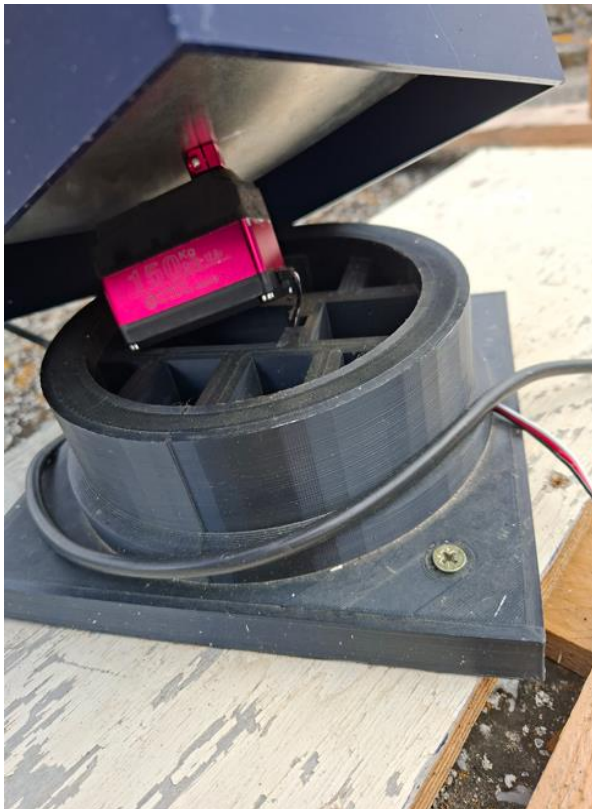
Το φαινόμενο αυτό φαίνεται και στις καμπύλες λειτουργίας. Όταν η τάση της μπαταρίας προσεγγίζει την περιοχή πλήρους φόρτισης, ο ρυθμιστής μειώνει σταδιακά το ρεύμα φόρτισης. Εφόσον το φορτίο είναι μικρό, η απαιτούμενη ισχύς από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιορίζεται, με αποτέλεσμα η παραγόμενη ισχύς να σταθεροποιείται κοντά στην ισχύ που ζητά το φορτίο.

4.9 Σερβοκινητήρες

Για την κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο σύστημα παρακολούθησης χρησιμοποιούνται δύο κινητήρες servo υψηλής ροπής. Ο πρώτος Servo είναι τοποθετημένος σε ειδική υποδοχή στο κάτω μέρος της βάσης και είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του άνω μέρους από ανατολή προς δύση. Ο δεύτερος Servo είναι τοποθετημένος στο άκρο του άνω τμήματος της βάσης και χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της γωνίας ανύψωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η επιλογή των κινητήρων υψηλής ροπής έγινε με γνώμονα τις μηχανικές απαιτήσεις της κατασκευής. Το πλαίσιο μαζί με το πάνω μέρος της βάσης στήριξης και τα επιμέρους εξαρτήματα του μηχανισμού, δημιουργούν φορτίο το οποίο απαιτεί επαρκή ροπή για την αξιόπιστη κίνηση. Επιπλέον η κατασκευή επηρεάζεται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα ο αέρας που θα προκαλέσει μηχανικές αντιστάσεις και τριβές, επομένως η επιλογή ισχυρότερων σερβοκινητήρων προσφέρει μεγαλύτερο περιθώριο ασφάλειας.

Έτσι οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται είναι δύο DS5115-12V με δυνατότητα λειτουργίας σε τάση από 10V έως 12.6V. Στην παρούσα κατασκευή οι Servo τροφοδοτούνται με τάση 11.4 V μέσω ανεξάρτητων μετατροπέων step-down. Η τιμή αυτή βρίσκεται εντός των ορίων λειτουργίας και επιλέχθηκε ώστε να παρέχεται επαρκής ροπή, χωρίς να λειτουργεί ο κινητήρας στο ανώτατο όριο της ονομαστικής του τάσης.



Σχήμα 4-19: Τοποθέτηση κινητήρων στις 3D printed βάσεις

Με βάση τα χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, το Servo εμφανίζει 150 kg.cm στα 10 V, 165 kg.cm στα 12 V και 173 kg.cm στα 12.6 V. Επομένως, στην τάση λειτουργίας των 11.4V, η διαθέσιμη ροπή βρίσκεται προσεγγιστικά μεταξύ 10V και 12V, καλύπτοντας τις απαιτήσεις της κατασκευής για την περιστροφή και στήριξη του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Οι Servo διαθέτουν εύρος παλμών από 500 – 2500us και γωνία περιστροφής 180°. Έτσι μπορούν να δουλέψουν πάρα πολύ εύκολα με το ESP και να οδηγηθούν επίσης εύκολα μέσω PWM σημάτων. Τέλος διαθέτουν προστασία IP67, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό για την εφαρμογή που λειτουργεί σε εξωτερικό περιβάλλον [9].

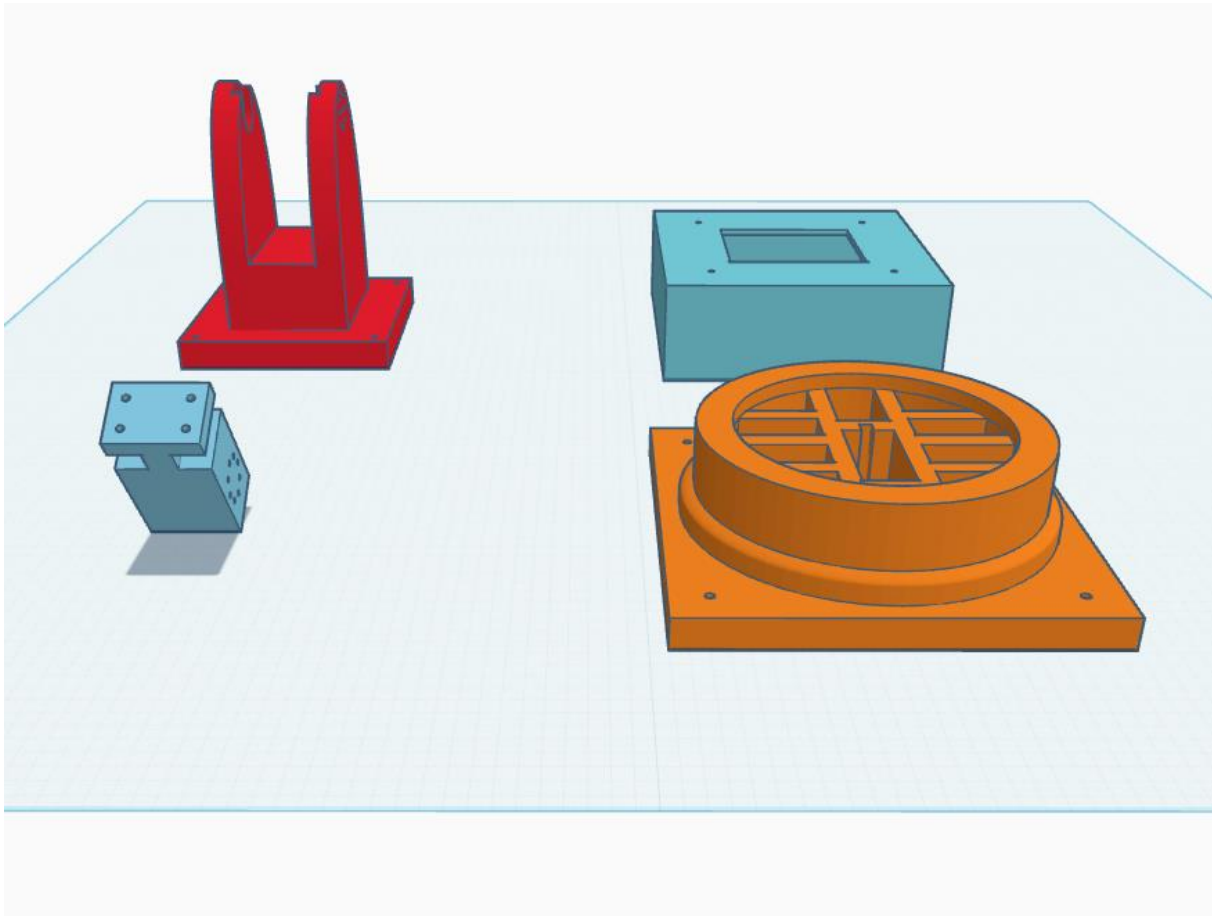


Σχήμα 4-20: Servo υψηλής ροπής για την κίνηση του tracking πλαισίου

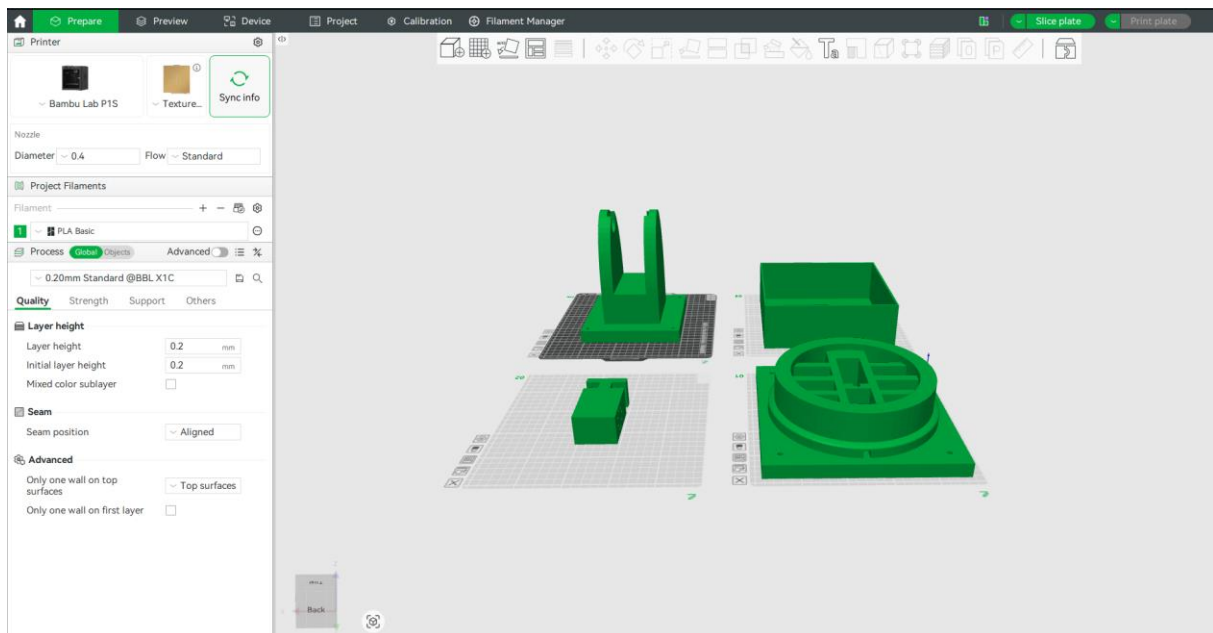
Πίνακας 4.8: Χαρακτηριστικά σερβοκινητήρων

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Μοντέλο	DS5115-12V
Τύπος	Digital Servo
Τάση λειτουργίας	10 V – 12.6 V
Τάση λειτουργίας στην κατασκευή	11.4 V
Ροπή στα 10 V	150 kg·cm
Ροπή στα 12 V	165 kg·cm
Ροπή στα 12.6 V	173 kg·cm
Εύρος παλμού ελέγχου	500–2500 μs
Γωνία περιστροφής	180°
Προστασία	IP67

4.10 Σχεδίαση και κατασκευή βάσεων με 3D printer



Σχήμα 4-21: 3D σχεδίαση εξαρτημάτων βάσεων



Σχήμα 4-22: 3D εξαρτήματα βάσεων φωτοβολταϊκών πλαισίων προς εκτύπωση

Τα εξαρτήματα των βάσεων σχεδιάστηκαν σε περιβάλλον CAD και συγκεκριμένα στο SolidWorks, ενώ για την καλύτερη οπτική παρουσίαση των επιμέρους κομματιών χρησιμοποιήθηκε και το Tinkercad. Η κατασκευή τους πραγματοποιήθηκε με 3D εκτύπωση, ώστε κάθε εξάρτημα να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η επιλογή custom βάσεων έγινε ώστε η κατασκευή να προσαρμοστεί στις διαστάσεις των πλαισίων, των κινητήρων και να υπάρχει δυνατότητα γρήγορης τροποποίησης και επανεκτύπωσης σε περίπτωση αλλαγών κατά τη φάση των δοκιμών. Με αυτό τον τρόπο αποφεύχθηκαν οι περιορισμοί από βάσεις του εμπορίου και δόθηκε η δυνατότητα πλήρους προσαρμογής στις ανάγκες της εργασίας.

Τα εξαρτήματα των βάσεων εκτυπώθηκαν με υλικό PLA+ της eSUN σε εκτυπωτή Bambu Lab P1S. Το PLA+ επιλέχθηκε λόγω της ευκολίας εκτύπωσης, της καλής ακρίβειας στις τελικές διαστάσεις των εκτυπωμένων κομματιών και της ικανοποιητικής μηχανικής αντοχής για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής. Παρότι υλικά όπως το ASA παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε εξωτερικές συνθήκες, υπεριώδη ακτινοβολία και υψηλότερες θερμοκρασίες, δεν κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τους στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Η επιλογή του PLA+ αποτέλεσε πιο πρακτική και οικονομική λύση, καθώς κάλυψε τις απαιτήσεις της κατασκευής και επέτρεψε ταχύτερη και ευκολότερη εκτύπωση των εξαρτημάτων. Σε περίπτωση μακροχρόνιας ή μόνιμης εγκατάστασης σε εξωτερικό περιβάλλον, η χρήση υλικού με μεγαλύτερη αντοχή στις καιρικές συνθήκες, όπως το ASA, θα αποτελούσε καταλληλότερη επιλογή.

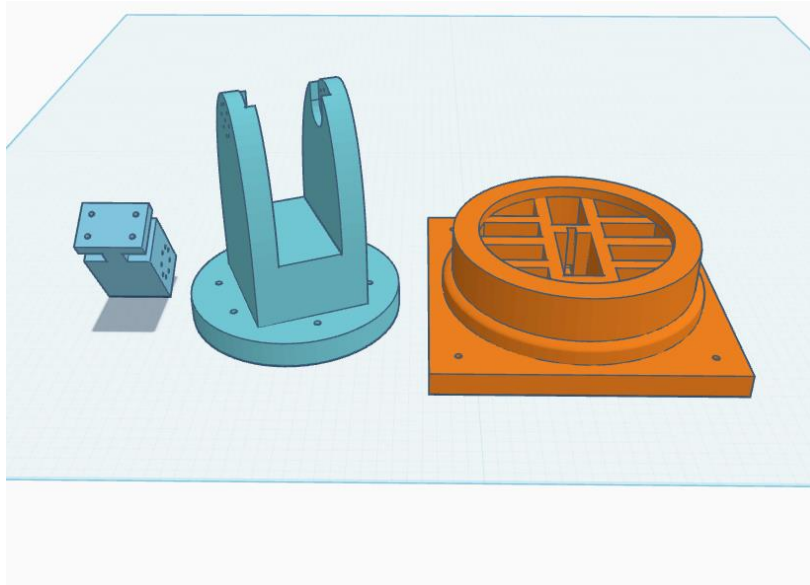
4.10.1 Βάση σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η βάση του σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου σχεδιάστηκε ώστε να συγκρατεί το πάνελ σε σταθερή θέση και με συγκεκριμένη γωνία κλίσης. Η σταθερή διάταξη χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς επομένως η βάση πρέπει να εξασφαλίζει σταθερότητα και να μην μετακινείται καθόλου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

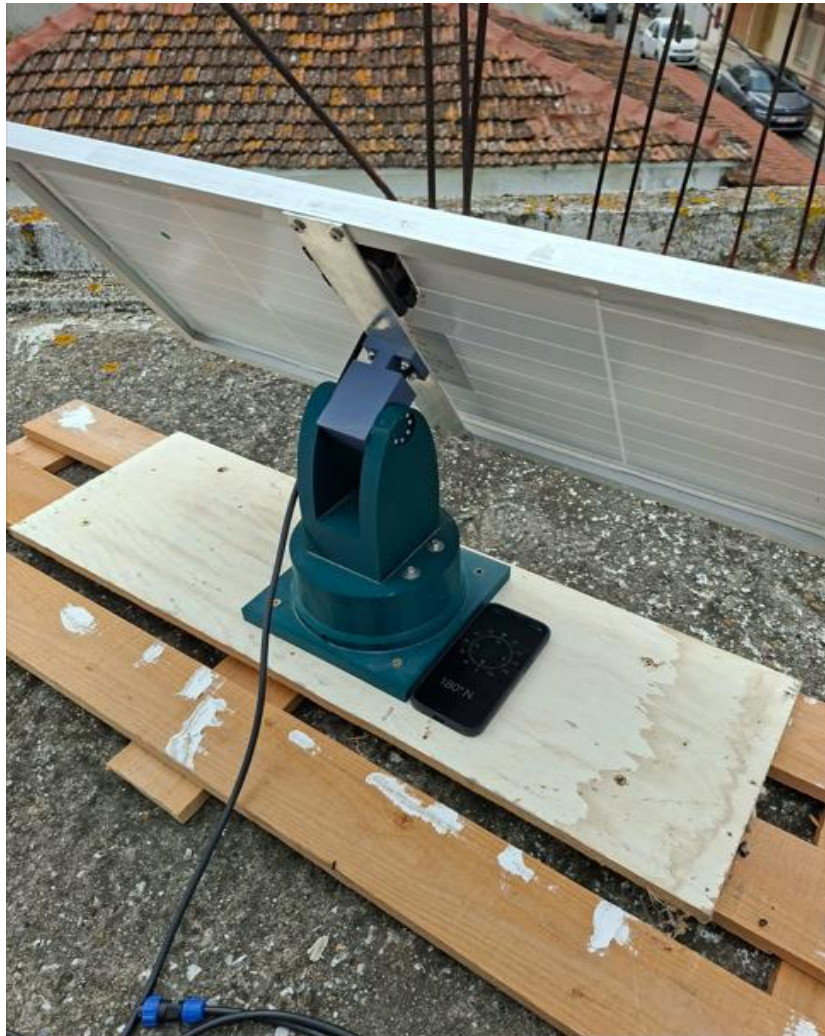
Η βάση αποτελείται από τρία κομμάτια. Το πρώτο είναι το κάτω κομμάτι της βάσης, το οποίο λειτουργεί ως βασικό σημείο στήριξης της κατασκευής. Το δεύτερο κομμάτι είναι το επάνω κομμάτι της βάσης, το οποίο συνδέεται με το κάτω κομμάτι μέσω περαστών βιδών. Το τρίτο κομμάτι είναι το κομμάτι σύνδεσης της βάσης με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο συγκρατεί το πάνελ στην επιθυμητή γωνία.

Το πάνω κομμάτι της βάσης σχεδιάστηκε με πατούρα, ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν περαστές βίδες και να επιτευχθεί πάρα πολύ σταθερή σύνδεση με το κάτω κομμάτι. Στο πάνω μέρος του έχει σχεδιαστεί κατάλληλο σημείο στήριξης, πάνω στο οποίο βιδώνεται το εξάρτημα που συνδέεται με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Μέσω αυτής της διάταξης το πάνελ συγκρατείται σε γωνία περίπου 34°.

Η σχεδίαση της σταθερής βάσης έγινε με στόχο την απλότητα, την εύκολη συναρμολόγηση και τη δυνατότητα σταθεροποίησης του πάνελ χωρίς επιπλέον κομμάτια. Με αυτό τον τρόπο το fixed φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να λειτουργεί ως αξιόπιστο σημείο σύγκρισης απέναντι στο σύστημα παρακολούθησης.



Σχήμα 4-23: 3D εξαρτήματα σταθερής βάσης



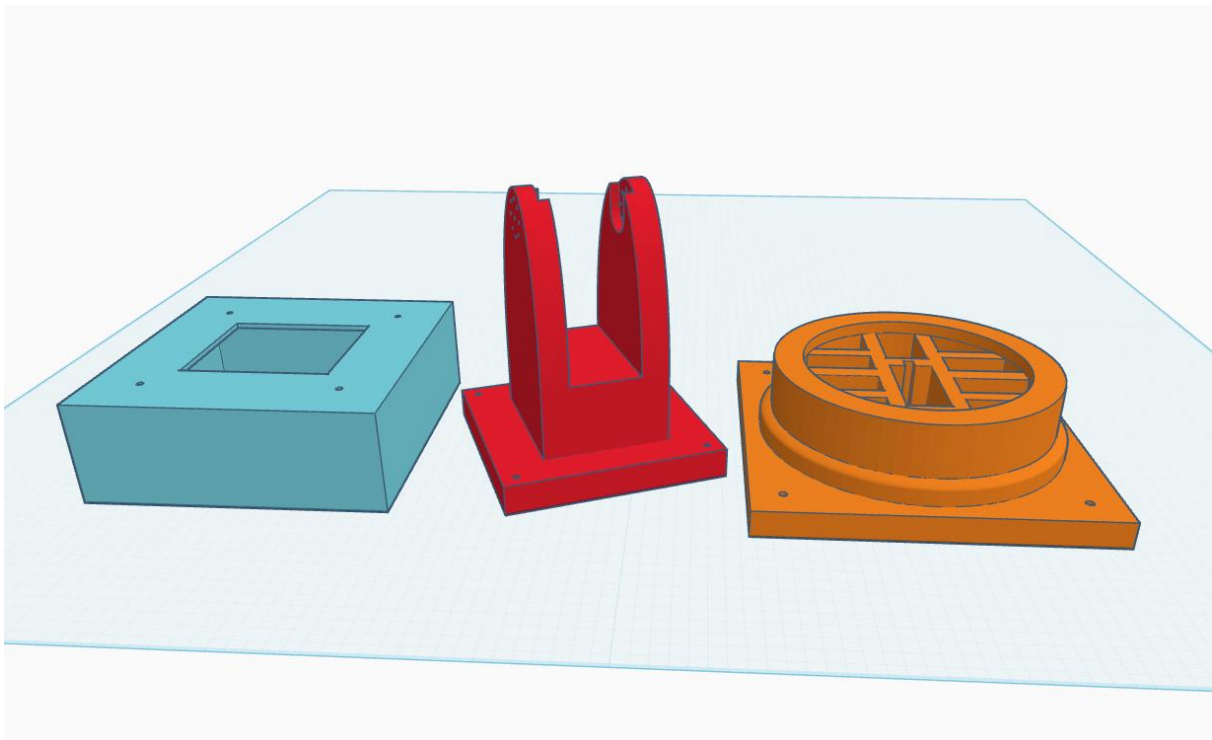
Σχήμα 4-24: Εκτυπωμένη σταθερή βάση

4.10.2 Βάση συστήματος παρακολούθησης δύο αξόνων

Η βάση του συστήματος παρακολούθησης σχεδιάστηκε ώστε να επιτρέπει την κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε δύο άξονες. Η κατασκευή έπρεπε να υποστηρίξει τη μηχανική τοποθέτηση των σερβοκινητήρων, τη μετάδοση της κίνησης, τη στήριξη του πάνελ και την προστασία των κρίσιμων τμημάτων από εξωτερικούς παράγοντες. Η βάση αποτελείται από τέσσερα βασικά κομμάτια: την κάτω βάση, το πάνω κομμάτι της βάσης με ειδική τετράγωνη πατούρα, το κάλυμμα προστασίας και την μεταλλική πλάκα σύνδεσης.

Η κάτω βάση έχει σχεδιαστεί για να φωλιάζει ο Servo με τέτοιο τρόπο, ώστε να έρχεται το γρανάζι του στο κέντρο όλης της κατασκευής. Το πάνω κομμάτι της βάσης είναι ίδιο με αυτό του σταθερού συστήματος με την μόνη διαφορά ότι έχει τετράγωνη πατούρα. Η τετράγωνη πατούρα επιτρέπει την τοποθέτηση της μεταλλικής πλάκας σύνδεσης και του συρταρωτού καλύμματος προστασίας. Στην κάτω πλευρά της μεταλλικής πλάκας έχει τοποθετηθεί σύνδεσμος τύπου 18T, ο οποίος εφαρμόζει στο γρανάζι εξόδου του σερβοκινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο η περιστροφή του κινητήρα μεταφέρεται στο άνω μέρος της βάσης. Έτσι μπορούν με περαστές βίδες να ενωθούν όλα μαζί και να προσαρμοστούν πάνω στο γρανάζι του σερβοκινητήρα σαν ένα εξάρτημα. Τέλος στο πάνω μέρος της βάσης εφαρμόζει το μοτέρ όπως ακριβώς και το εκτυπωμένο κομμάτι σύνδεσης του σταθερού συστήματος χωρίς χρειάζεται κάποια συγκεκριμένη θέση τοποθέτησης αφού το ρυθμίζουμε εμείς μετά.

Η συνολική σχεδίαση της κινούμενης βάσης έγινε με στόχο την απλή συναρμολόγηση και εύκολη αποσυναρμολόγηση σε περίπτωση ελέγχου, συντήρησης ή αλλαγής εξαρτημάτων..



Σχήμα 4-25: 3D εξαρτήματα κινούμενης βάσης



Σχήμα 4-26: Εκτυπωμένη κινητή βάση

4.11 Κονέκτορες και καλωδιώσεις

Στην κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν αποσπώμενοι κονέκτορες με σκοπό την εύκολη σύνδεση και αποσύνδεση των υποσυστημάτων. Η χρήση τους κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η κατασκευή αποτελείται από επιμέρους τμήματα, όπως οι πίνακες, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι Servo και τα φορτία. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η μεταφορά, η συντήρηση και ο έλεγχος του συστήματος, χωρίς να απαιτείται αποσύνδεση καλωδίων από το εσωτερικό των πινάκων.

Οι κονέκτορες τοποθετήθηκαν στους πίνακες, ώστε οι εξωτερικές συνδέσεις να πραγματοποιούνται οργανωμένα και με σαφή διαχωρισμό. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν στα καλώδια που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ με τους αντίστοιχους πίνακες, στα καλώδια των σερβοκινητήρων και στις συνδέσεις των προβολέων που χρησιμοποιούνται ως φορτία. Έτσι, κάθε βασικό υποσύστημα μπορεί να αποσυνδεθεί ανεξάρτητα από την υπόλοιπη εγκατάσταση.

Για τις περισσότερες συνδέσεις χρησιμοποιήθηκαν κονέκτορες τύπου SP13. Οι κονέκτορες αυτοί αξιοποιήθηκαν στις συνδέσεις των πινάκων, των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των σερβοκινητήρων και των προβολέων. Η χρήση ίδιου κονέκτορα σε πολλά σημεία της εγκατάστασης απλοποιεί την κατασκευή των καλωδίων και διευκολύνει την αντικατάσταση.



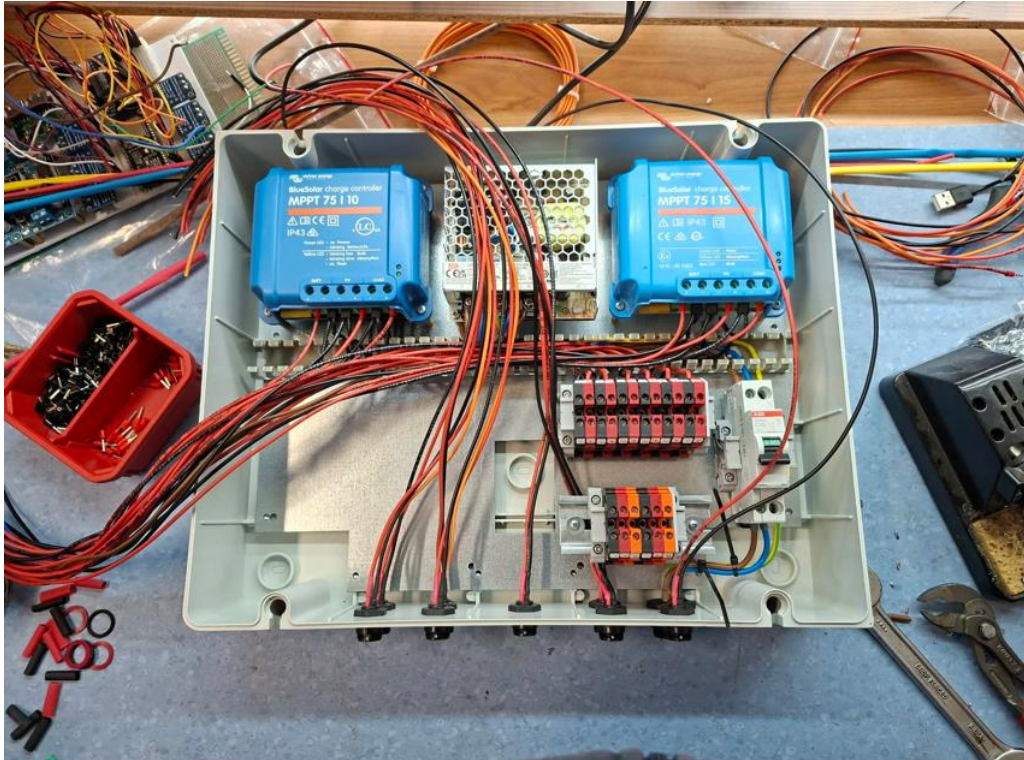
Σχήμα 4-27: Κονέκτορες SP13 και καλωδιώσεις διασύνδεσης υποσυστημάτων

Η είσοδος της παροχής 230 VAC πραγματοποιείται μέσω κονέκτορα τύπου SP21, ο οποίος χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την τροφοδοσία του switching τροφοδοτικού. Η χρήση διαφορετικού κονέκτορα για την είσοδο της εναλλασσόμενης τάσης επιλέχθηκε ώστε να υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ της παροχής δικτύου και των συνδέσεων συνεχούς τάσης.

4.12 Υλικά ράγας και εσωτερική οργάνωση κεντρικού πίνακα

Για την εσωτερική οργάνωση του πίνακα χρησιμοποιήθηκαν υλικά ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, όπως ράγες στήριξης, κλέμες σύνδεσης και αυτόματη ασφάλεια. Η χρήση αυτών των υλικών επιλέχθηκε ώστε ο πίνακας να έχει οργανωμένη, ασφαλή και εύκολα ελέγξιμη εσωτερική διάταξη. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η καλωδίωση, η συντήρηση και ο έλεγχος των επιμέρους υποσυστημάτων.

Οι ράγες χρησιμοποιούνται ως βασικά σημεία στήριξης του ηλεκτρολογικού υλικού. Σε συνδυασμό με τους αποστάτες που επιλέχθηκαν, επιτρέπουν τη σταθερή μηχανική συγκράτηση των εξαρτημάτων, ενώ παράλληλα διευκολύνουν την αντικατάσταση ή μετακίνηση κάποιου στοιχείου σε περίπτωση αλλαγής της διάταξης.



Σχήμα 4-28: Εσωτερική οργάνωση κεντρικού πίνακα ελέγχου και τροφοδοσίας

Οι κλέμες σύνδεσης τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ αφίξεων και αναχωρήσεων του πίνακα. Η κάτω σειρά χρησιμοποιείται για τις αναχωρήσεις προς τους Servo, ενώ η πάνω σειρά χρησιμοποιείται για τις αφίξεις και τη διανομή των γραμμών τροφοδοσίας. Επιπλέον έχουν χρησιμοποιηθεί τα κατάλληλα χρώματα στα καλώδια ώστε να ξεχωρίζουν οι γραμμές με τα θετικότερα δυναμικά, τα σήματα και το σημείο αναφοράς. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον σωστό τερματισμό των καλωδίων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα ακροχιτώνια, τα οποία πρεσαρίστηκαν με ειδικό εργαλείο και στη συνέχεια βιδώθηκαν στις κλέμες και στα υπόλοιπα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους.

Στην είσοδο της παροχής 230 VAC έχει τοποθετηθεί ασφαλειοδιακόπτης 10 A τύπου καστανίας, με σκοπό την προστασία της γραμμής τροφοδοσίας και του switching τροφοδοτικού από υπερφόρτωση ή βραχυκύκλωμα. Οι καλωδιώσεις εντός του πίνακα τοποθετήθηκαν σε κανάλια όδευσης, ώστε να υπάρχει καλύτερη οργάνωση, προστασία των αγωγών και ευκολότερη πρόσβαση κατά τον έλεγχο ή τη συντήρηση.



Σχήμα 4-29: Ολοκληρωμένος πίνακας συστήματος

4.13 Δικτυακή υποδομή

Η δικτυακή υποδομή της κατασκευής υλοποιήθηκε με χρήση εξωτερικού router, το οποίο παρέχει ασύρματη σύνδεση WiFi στο ESP. Η χρήση του 4G router επιλέχθηκε ώστε το σύστημα να μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα από σταθερό τοπικό δίκτυο και να διαθέτει πρόσβαση στο διαδίκτυο για την αποστολή των μετρήσεων και τον συγχρονισμό ώρας μέσω NTP.

Το router λειτουργεί ως ενδιάμεσο σημείο επικοινωνίας μεταξύ της αναπτυξιακής πλακέτας και του διαδικτύου. Η ESP32-S3 συνδέεται στο ασύρματο δίκτυο μέσω WiFi και, εφόσον η σύνδεση είναι ενεργή, μπορεί να αποστείλει τα δεδομένα σε μορφή JSON προς τη διαδικτυακή υποδομή της εργασίας.



Σχήμα 4-30: Δικτυακή υποδομή με χρήση 4G/Wi-Fi router

Πίνακας 4.9: Ρόλος δικτυακής υποδομής

Στοιχείο	Ρόλος
4G Router	Παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο και δημιουργία τοπικού WiFi δικτύου
WiFi σύνδεση	Σύνδεση της αναπτυξιακής πλακέτας ESP32-S3 με το router
NTP servers	Συγχρονισμός ώρας και ενημέρωση του RTC
HTTP επικοινωνία	Αποστολή μετρήσεων προς τη διαδικτυακή υποδομή
ESP32-S3	Συλλογή δεδομένων και αποστολή μέσω WiFi

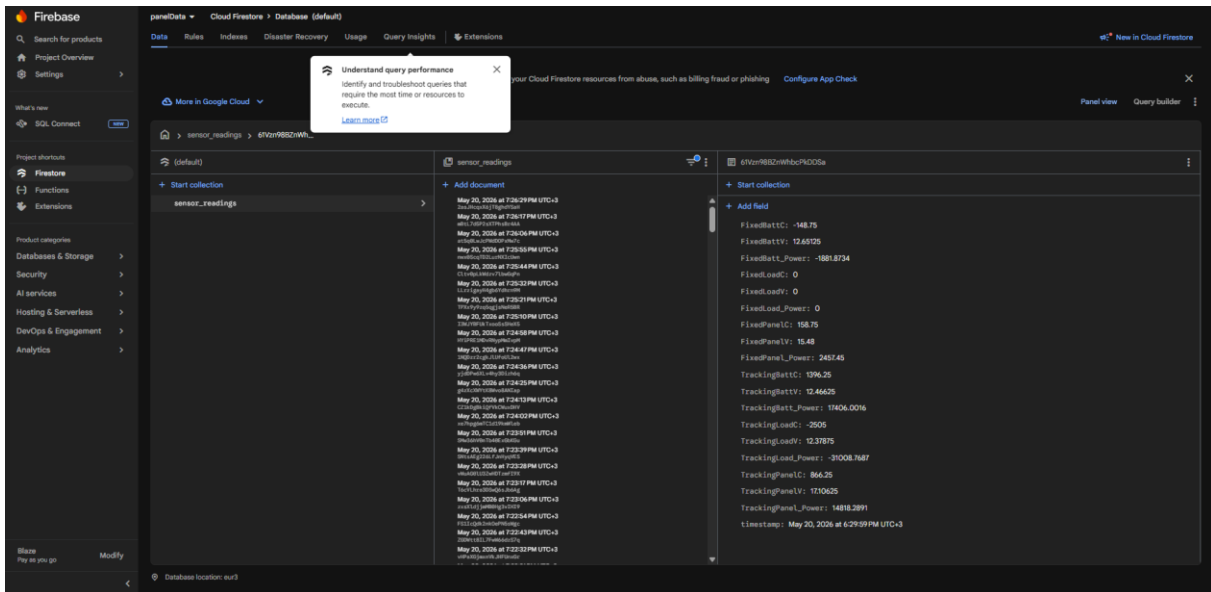
Με την παραπάνω δικτυακή υποδομή το σύστημα αποκτά δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης, καθώς τα δεδομένα δεν παραμένουν μόνο τοπικά στην αναπτυξιακή πλακέτα, αλλά αποστέλλονται σε διαδικτυακές υπηρεσίες για περαιτέρω αξιοποίηση. Η διαδικασία αποθήκευσης και απεικόνισης των δεδομένων μέσω Firebase, BigQuery και Grafana παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

4.14 Διαδικτυακές εφαρμογές αποθήκευσης και απεικόνισης

Για την αποθήκευση, επεξεργασία και απεικόνιση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε διαδικτυακή υποδομή, ώστε οι μετρήσεις των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων να είναι διαθέσιμες απομακρυσμένα. Η υποδομή αυτή επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τη διατήρηση ιστορικού μετρήσεων και την οπτική σύγκριση της λειτουργίας του σταθερού και του tracking φωτοβολταϊκού πλαισίου.

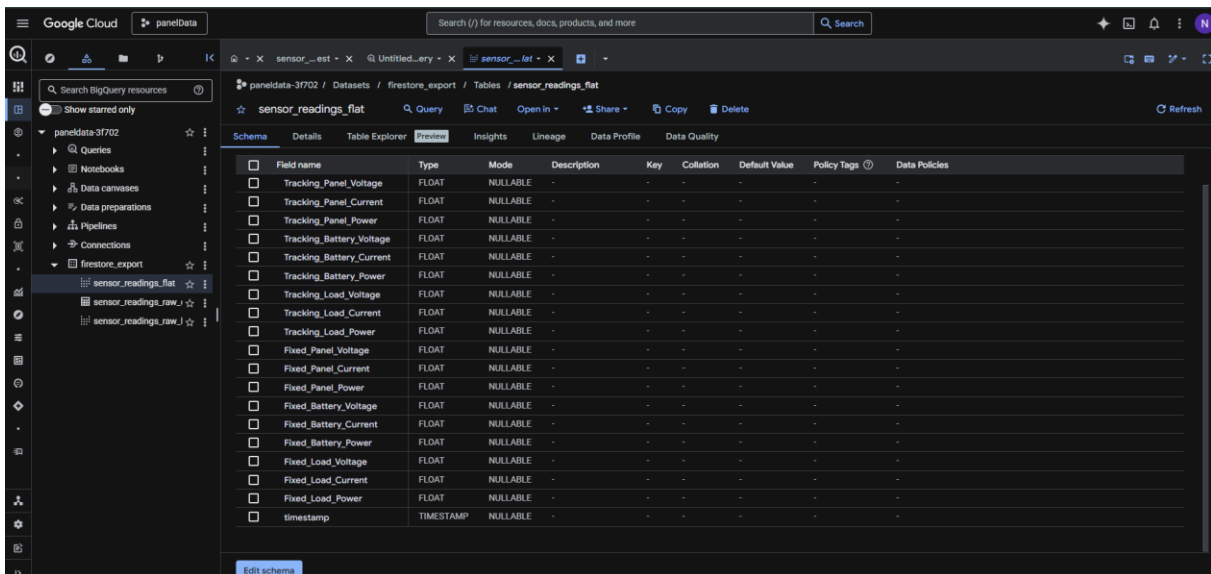
Η αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3 αποστέλλει τις μετρήσεις σε μορφή JSON. Το JSON περιλαμβάνει τις τιμές τάσης και ρεύματος από τα βασικά σημεία μέτρησης των δύο συστημάτων, δηλαδή από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τη μπαταρία και το φορτίο. Η επιλογή της μορφής JSON έγινε επειδή επιτρέπει την οργανωμένη αποστολή πολλών μεταβλητών και είναι συμβατή με διαδικτυακές υπηρεσίες και βάσεις δεδομένων.

Η αρχική καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιείται στο Firebase, το οποίο χρησιμοποιείται ως βάση δεδομένων για την οργάνωση των μετρήσεων που αποστέλλονται από την αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3. Μέσω του Firebase είναι δυνατή η συλλογή των δεδομένων που αποστέλλονται από το σύστημα και η περαιτέρω αξιοποίησή τους από τις υπόλοιπες υπηρεσίες [11].



Σχήμα 4-31: Καταγραφή δεδομένων στο Firebase

Στη συνέχεια, τα δεδομένα αξιοποιούνται μέσω του BigQuery, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διατήρηση ιστορικού, την εκτέλεση ερωτημάτων και την επεξεργασία μεγάλου όγκου μετρήσεων. Η χρήση του BigQuery επιτρέπει την εκτέλεση ερωτημάτων πάνω στα δεδομένα, τον υπολογισμό μέσω τιμών, την εξαγωγή ισχύος από τάση και ρεύμα και τη δημιουργία οργανωμένων αποτελεσμάτων για την απεικόνιση [12].

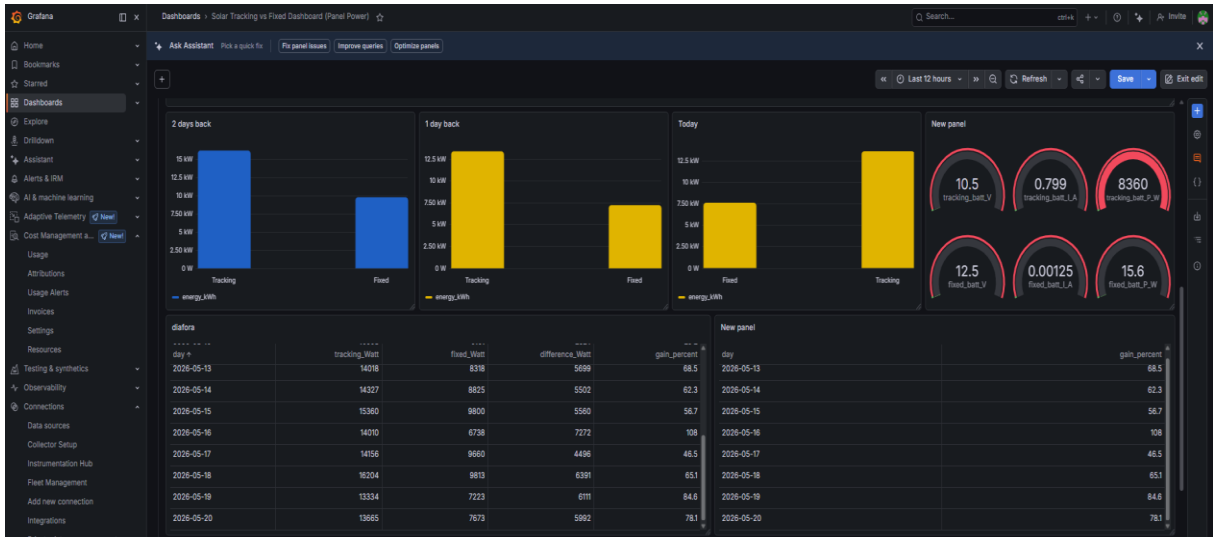


Σχήμα 4-32: Αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων στο BigQuery

Για την απεικόνιση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Grafana. Στο Grafana δημιουργήθηκαν dashboards, στα οποία παρουσιάζονται οι μετρήσεις σε μορφή γραφημάτων χρόνου. Μέσω των γραφημάτων είναι δυνατή η σύγκριση της τάσης, του ρεύματος, της ισχύος και της παραγόμενης ενέργειας μεταξύ του σταθερού συστήματος και του συστήματος παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο η αξιολόγηση της απόδοσης δεν βασίζεται μόνο σε μεμονωμένες τιμές, αλλά σε συνεχή χρονική παρακολούθηση της λειτουργίας [13].



Σχήμα 4-33: Απεικόνιση μετρήσεων στο Grafana Panel 1



Σχήμα 4-34: Απεικόνιση μετρήσεων στο Grafana Panel 2



Σχήμα 4-35: Απεικόνιση μετρήσεων στο Grafana Panel 3

Η συνολική ροή δεδομένων της διαδικτυακής υποδομής είναι η εξής:

ESP32-S3 → JSON → Firebase → BigQuery → Grafana

Η ροή αυτή περιγράφει τη μετάβαση των δεδομένων από τη μέτρηση στο πεδίο μέχρι την τελική απεικόνισή τους. Το ESP32-S3 συλλέγει τις μετρήσεις και τις οργανώνει σε μορφή JSON. Τα δεδομένα καταγράφονται στο Firebase, στη συνέχεια αξιοποιούνται στο BigQuery για ιστορικό και επεξεργασία, και τελικά προβάλλονται στο Grafana μέσω γραφημάτων και dashboards.

Πίνακας 4.10: Διαδικτυακές εφαρμογές και ρόλος τους

Εφαρμογή / Υπηρεσία	Ρόλος στην κατασκευή
HTTP POST	Τρόπος αποστολής δεδομένων από το ESP32-S3 προς τη διαδικτυακή υπηρεσία
JSON	Δομημένη μορφή οργάνωσης και μεταφοράς των μετρήσεων
Firebase	Αρχική καταγραφή και διαχείριση δεδομένων
BigQuery	Διατήρηση ιστορικού, εκτέλεση ερωτημάτων και επεξεργασία μετρήσεων
Grafana	Οπτικοποίηση δεδομένων και δημιουργία dashboards

Με την παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται πλήρης απομακρυσμένη παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος. Η υποδομή αυτή αποτελεί σημαντικό κομμάτι της εργασίας, καθώς παρέχει τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο για τη σύγκριση της απόδοσης του σταθερού και του tracking φωτοβολταϊκού πλαισίου.

4.15 Τελική εγκατάσταση συστήματος

Η τελική εγκατάσταση του συστήματος περιλαμβάνει το fixed φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο του συστήματος παρακολούθησης, τον πίνακα μπαταριών, τον κεντρικό πίνακα ηλεκτρονικών και τροφοδοσίας, τους προβολείς που χρησιμοποιούνται ως φορτία και τη δικτυακή υποδομή. Μετά την ολοκλήρωση της επιμέρους κατασκευής και των συνδέσεων, τα υποσυστήματα συνδέθηκαν μεταξύ τους ώστε να λειτουργούν ως ενιαίο σύστημα μέτρησης και σύγκρισης.

Η διάταξη τοποθετήθηκε έτσι ώστε τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια να δέχονται τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το fixed πάνελ παραμένει σε σταθερή γωνία και προσανατολισμό, ενώ το tracking πάνελ μεταβάλλει τη θέση του μέσω του μηχανισμού δύο αξόνων. Η τοποθέτηση των δύο πλαισίων στον ίδιο χώρο επιτρέπει τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης με κύρια μεταβλητή τον τρόπο προσανατολισμού.

Οι δύο πίνακες της κατασκευής συνδέονται μεταξύ τους με αποσπώμενα καλώδια, ώστε να είναι δυνατή η εύκολη αποσύνδεση και μεταφορά τους. Ο πίνακας μπαταριών περιλαμβάνει τους δύο συσσωρευτές και τις ασφάλειες προστασίας, ενώ ο κεντρικός πίνακας περιλαμβάνει τους MPPT, το switching τροφοδοτικό, τους step-down μετατροπείς, τις κλέμες, τα κυκλώματα μέτρησης και τη μονάδα ελέγχου. Η χρήση δύο ξεχωριστών πινάκων διευκολύνει την εσωτερική οργάνωση και την πρόσβαση στα επιμέρους κυκλώματα.

Η τελική κατασκευή επιτρέπει την ανεξάρτητη λειτουργία των δύο φωτοβολταϊκών διατάξεων, την καταγραφή των ηλεκτρικών μεγεθών σε πραγματικό χρόνο και την απομακρυσμένη παρακολούθηση της λειτουργίας μέσω Grafana. Με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, το σύστημα είναι έτοιμο για τη συλλογή των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στο επόμενο κεφάλαιο για τη σύγκριση της απόδοσης μεταξύ σταθερού και tracking φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 4-36: Τελική εγκατάσταση του συστήματος με το fixed και το tracking φωτοβολταϊκό πλαίσιο

4.16 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η φυσική κατασκευή και εγκατάσταση του συστήματος. Η κατασκευή οργανώθηκε σε επιμέρους υποσυστήματα, όπως ο πίνακας μπαταριών, ο κεντρικός πίνακας ηλεκτρονικών και τροφοδοσίας, οι ρυθμιστές φόρτισης MPPT, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα φορτία, οι Servo, οι κονέκτορες και η δικτυακή υποδομή.

Ιδιαίτερη σημασία είχε η μηχανολογική σχεδίαση των βάσεων, καθώς μέσω της 3D εκτύπωσης κατασκευάστηκαν εξαρτήματα προσαρμοσμένα στις ανάγκες της διάταξης. Η σταθερή βάση επιτρέπει την τοποθέτηση του πλαισίου σε συγκεκριμένη γωνία, ενώ η κινούμενη βάση υποστηρίζει την παρακολούθηση της θέσης του ήλιου σε δύο άξονες.

Με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης, τα ηλεκτρονικά, ενεργειακά, μηχανολογικά και δικτυακά υποσυστήματα συνδυάζονται σε μία ενιαία διάταξη. Το σύστημα είναι πλέον κατάλληλα οργανωμένο ώστε να πραγματοποιεί μετρήσεις, να αποστέλλει δεδομένα και να επιτρέπει τη σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης μεταξύ του σταθερού και του tracking φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Κεφάλαιο 5ο: Μετρήσεις, Αποτελέσματα και Σύγκριση Απόδοσης

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των μετρήσεων που συλλέχθηκαν από το fixed φωτοβολταϊκό σύστημα και από το σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των δύο διατάξεων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της παρακολούθησης στην παραγόμενη ενέργεια.

Η σύγκριση πραγματοποιείται με βάση τα ηλεκτρικά μεγέθη που καταγράφονται στα βασικά σημεία κάθε συστήματος, δηλαδή στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, στη μπαταρία και στο φορτίο. Μέσα από τις μετρήσεις αυτές εξετάζεται η παραγωγή ισχύος, η φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών, καθώς και η κατανάλωση των φορτίων.

Στο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία οργάνωσης των δεδομένων, ο τρόπος υπολογισμού της ισχύος και της ημερήσιας ενέργειας, καθώς και η μεθοδολογία υπολογισμού του ποσοστού βελτίωσης του συστήματος παρακολούθησης σε σχέση με το fixed σύστημα. Επιπλέον, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά γραφήματα από το Grafana και συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων, μέσω των οποίων γίνεται η τελική σύγκριση των δύο φωτοβολταϊκών διατάξεων.

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται ανά χρονικά διαστήματα 10 δευτερολέπτων. Επομένως, για τον υπολογισμό της ημερήσιας ενέργειας λαμβάνεται υπόψη η στιγμιαία ισχύς κάθε μέτρησης και το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω πινάκων και γραφημάτων από το Grafana, ώστε να είναι δυνατή η άμεση οπτική σύγκριση της λειτουργίας των δύο φωτοβολταϊκών διατάξεων.

5.2 Διαδικασία συλλογής δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται αυτόματα από την αναπτυξιακή πλακέτα ESP32-S3, η οποία διαβάζει τις τιμές των αισθητήρων INA260 σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Σε κάθε κύκλο μέτρησης επιλέγεται διαδοχικά το αντίστοιχο κανάλι του I2C multiplexer και καταγράφονται οι τιμές τάσης και ρεύματος για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τη μπαταρία και το φορτίο κάθε συστήματος.

Κάθε εγγραφή δεδομένων περιλαμβάνει τις μετρήσεις του σταθερού συστήματος και του συστήματος παρακολούθησης για την ίδια χρονική στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο οι τιμές είναι άμεσα συγκρίσιμες, καθώς αντιστοιχούν στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες και στο ίδιο χρονικό σημείο λειτουργίας.

Τα δεδομένα οργανώνονται σε μορφή JSON και αποστέλλονται στη διαδικτυακή υποδομή, όπου αποθηκεύονται και αξιοποιούνται για την παραγωγή γραφημάτων και πινάκων. Για την ανάλυση της απόδοσης επιλέγεται κυλιόμενο χρονικό παράθυρο δεκαπέντε ημερών. Καθώς προστίθενται νέες πλήρεις ημέρες λειτουργίας, οι παλαιότερες αντικαθίστανται, ώστε η τελική σύγκριση να βασίζεται στα πιο πρόσφατα και αντιπροσωπευτικά δεδομένα.

Πριν από τον τελικό υπολογισμό της ημερήσιας ενέργειας πραγματοποιείται έλεγχος των δεδομένων, ώστε να εντοπίζονται ημέρες με ελλιπείς μετρήσεις, διακοπές σύνδεσης ή μη κανονική λειτουργία του συστήματος. Οι ημέρες αυτές δεν χρησιμοποιούνται ως κύριες ημέρες σύγκρισης, αλλά μπορούν να αναφερθούν ως παρατηρήσεις λειτουργίας.

5.3 Υπολογισμός ισχύος και ημερήσιας ενέργειας

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτείται ο υπολογισμός της στιγμιαίας ισχύος και στη συνέχεια της συνολικής ενέργειας που παράγεται σε κάθε ημέρα λειτουργίας.

Οι αισθητήρες INA260 παρέχουν τις τιμές τάσης και ρεύματος, από τις οποίες υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς.

Η στιγμιαία ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P = V * I$$

Όπου:

P: ισχύς σε Watt (W)

V: τάση σε Volt (V)

I: ρεύμα σε Ampere (A)

Στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας, η τάση αποθηκεύεται σε Volt, ενώ το ρεύμα που επιστρέφεται από τον αισθητήρα INA260 αποθηκεύεται σε mA. Για τον λόγο αυτό, ο υπολογισμός της ισχύος σε Watt γίνεται ως εξής:

$$P(W) = V(V) * \frac{I(mA)}{1000}$$

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας ενέργειας χρησιμοποιείται το άθροισμα της ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή επί το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων:

$$Ewh = \sum P(W) * \Delta t$$

Η δειγματοληψία των δεδομένων πραγματοποιείται κάθε 10 δευτερόλεπτα, επομένως το χρονικό διάστημα σε ώρες είναι:

$$\Delta t = \frac{10}{3600} h$$

Αρα η ημερήσια ενέργεια σε Wh υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Ewh = \sum P(W) * \frac{10}{3600}$$

Η μετατροπή από Wh σε kWh γίνεται ως εξής:

$$Ekwh = \sum P(W) * \frac{10}{1000}$$

Για κάθε ημέρα υπολογίζεται ξεχωριστά η ενέργεια του σταθερού φωτοβολταϊκού συστήματος και η ενέργεια του συστήματος παρακολούθησης. Η βασική σύγκριση γίνεται με βάση την ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο κάθε συστήματος.

Το ποσοστό βελτίωσης του συστήματος παρακολούθησης σε σχέση με το fixed σύστημα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Βελτίωση (\%)} = \frac{E_{tracking} - E_{fixed}}{E_{fixed}} * 100$$

Όπου:

E_{tracking}: ημερήσια ενέργεια του συστήματος παρακολούθησης

E_{fixed}: ημερήσια ενέργεια του σταθερού συστήματος

Με τον υπολογισμό αυτό προκύπτει η ποσοστιαία διαφορά της παραγόμενης ενέργειας μεταξύ των δύο διατάξεων. Θετική τιμή σημαίνει ότι το σύστημα παρακολούθησης παράγει περισσότερη ενέργεια από το fixed σύστημα, ενώ μικρότερη ή μηδενική τιμή δείχνει ότι η διαφορά απόδοσης ήταν περιορισμένη για τη συγκεκριμένη ημέρα.

Οι τιμές που εμφανίζονται στο Grafana ως άθροισμα ισχύος δεν αποτελούν απευθείας ενέργεια. Επειδή η δειγματοληψία πραγματοποιείται ανά 10 s, η ενέργεια σε Wh υπολογίζεται διαιρώντας το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών ισχύος με 360.

5.4 Επεξεργασία και εξομάλυνση μετρήσεων ισχύος

Κατά την απεικόνιση των μετρήσεων στο Grafana εφαρμόστηκε επεξεργασία στα δεδομένα ισχύος, ώστε τα γραφήματα να παρουσιάζουν πιο καθαρά τη γενική συμπεριφορά των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στις μετρήσεις της ισχύος εμφανίζονται στιγμιαίες αιχμές και απότομες μεταβολές, οι οποίες σχετίζονται με τη λειτουργία των ρυθμιστών MPPT. Οι ρυθμιστές MPPT μεταβάλλουν συνεχώς το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ώστε να εντοπίζουν και να διατηρούν τη λειτουργία κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να δημιουργεί μικρές στιγμιαίες αυξομειώσεις στις μετρήσεις ισχύος.

Οι αιχμές αυτές δεν θεωρούνται απαραίτητα λανθασμένες μετρήσεις, αλλά αποτελούν μέρος της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος φόρτισης. Ωστόσο, όταν ο σκοπός είναι η συνολική οπτική σύγκριση της ημερήσιας παραγωγής του fixed και του tracking συστήματος, οι πολύ γρήγορες μεταβολές μπορούν να κάνουν το γράφημα λιγότερο ευανάγνωστο. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε εξομάλυνση της καμπύλης ισχύος.

Για την εξομάλυνση των καμπυλών ισχύος εξετάστηκαν δύο βασικές μέθοδοι: ο απλός κυλιόμενος μέσος όρος και ο εκθετικός κυλιόμενος μέσος όρος. Ο απλός κυλιόμενος μέσος όρος υπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή τον μέσο όρο ενός συγκεκριμένου αριθμού κοντινών μετρήσεων. Η μέθοδος αυτή μειώνει τις πολύ γρήγορες στιγμιαίες διακυμάνσεις και κάνει την καμπύλη πιο ευανάγνωστη.

Ο απλός κυλιόμενος μέσος όρος περιγράφεται από τη σχέση:

$$y(n) = \frac{1}{N} = \sum_{l=0}^{N-1} x(n-1)$$

όπου:

$x[n]$: είναι η τρέχουσα μέτρηση,
 N : είναι το πλήθος των δειγμάτων του παραθύρου,
 $y[n]$: είναι η εξομαλυμένη τιμή.

Δηλαδή, η εξομαλυμένη τιμή προκύπτει από τον μέσο όρο της τρέχουσας μέτρησης και ενός αριθμού προηγούμενων μετρήσεων:

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-(n-1))}{N}$$

όπου:

$x[n]$: η τρέχουσα μέτρηση
 $x[n-1]$: η προηγούμενη μέτρηση
 N : πόσες μετρήσεις παίρνεις για τον μέσο όρο
 $y[n]$: η τελική εξομαλυμένη τιμή

Ο εκθετικός κυλιόμενος μέσος όρος, γνωστός ως Exponential Moving Average ή EMA, δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις πιο πρόσφατες μετρήσεις και μικρότερη στις παλαιότερες. Περιγράφεται από τη σχέση:

$$y(n) = a * x(n) + (1 - a) * y(n - 1)$$

όπου:

α είναι ο συντελεστής εξομάλυνσης,
 $x[n]$ είναι η τρέχουσα μέτρηση,
 $y[n-1]$ είναι η προηγούμενη εξομαλυμένη τιμή.

Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε EMA, επειδή στόχος της επεξεργασίας δεν ήταν ο έλεγχος του συστήματος σε πραγματικό χρόνο ούτε η πρόβλεψη της επόμενης τιμής ισχύος. Ο EMA είναι χρήσιμος σε εφαρμογές όπου οι πιο πρόσφατες τιμές πρέπει να έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα, όμως απαιτεί επιλογή συντελεστή α και αναδρομικό υπολογισμό. Για την παρούσα ανάλυση αυτό θα πρόσθετε περιττή πολυπλοκότητα, χωρίς να προσφέρει ουσιαστικό πλεονέκτημα στην τελική σύγκριση των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων.

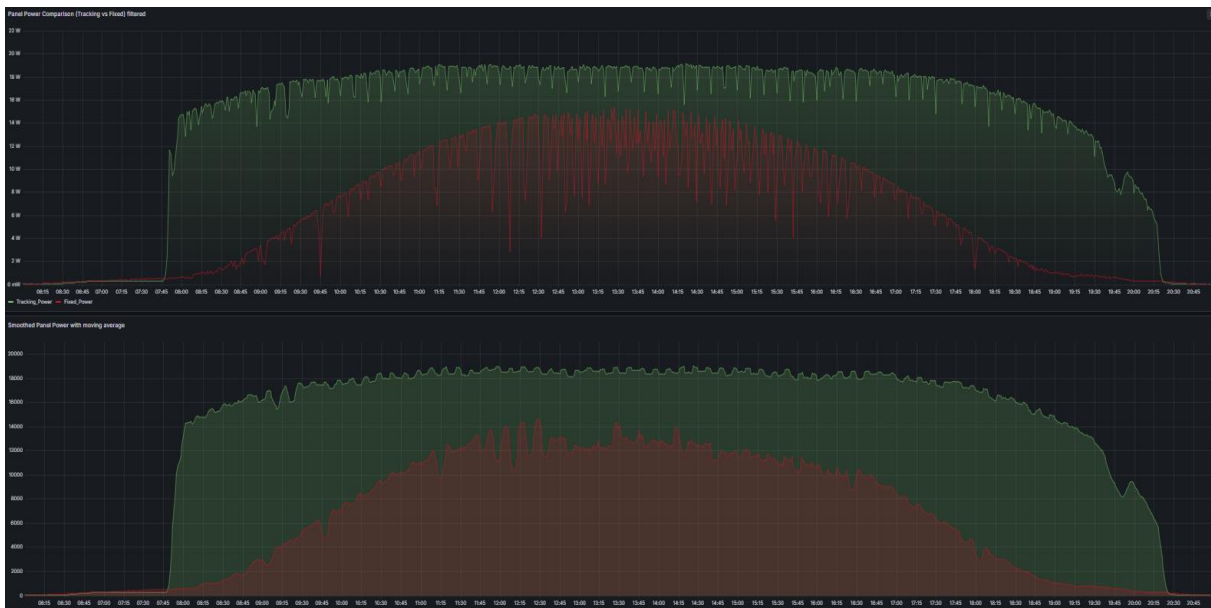
Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε απλός κυλιόμενος μέσος όρος. Η επιλογή αυτή είναι πιο κατάλληλη για την εργασία, επειδή είναι απλή, κατανοητή και επαναλήψιμη. Επιπλέον, εφαρμόζεται εύκολα στα δεδομένα του BigQuery και αποδίδει καθαρά τη γενική ημερήσια τάση παραγωγής, χωρίς να αλλοιώνει τη σύγκριση μεταξύ fixed και tracking συστήματος.

Συγκεκριμένα, τα αρχικά δεδομένα ομαδοποιήθηκαν ανά λεπτό και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος της τρέχουσας τιμής μαζί με τις τέσσερις προηγούμενες τιμές. Επομένως, για την εφαρμογή της εργασίας χρησιμοποιείται παράθυρο $N = 5$:

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n - 1) + x(n - 2) + x(n - 3) + x(n - 4)}{5}$$

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει εξομάλυνση περίπου πέντε λεπτών. Η διαδικασία αυτή περιορίζει τις πολύ γρήγορες διακυμάνσεις που σχετίζονται με τη δυναμική λειτουργία του MPPT, ενώ διατηρεί τη βασική μορφή της ημερήσιας καμπύλης ισχύος.

Η εξομάλυνση χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την οπτική παρουσίαση των δεδομένων στα γραφήματα και όχι για την αλλοίωση των τελικών αποτελεσμάτων. Οι πραγματικές μεταβολές που οφείλονται σε συννεφιά ή αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας εξακολουθούν να εμφανίζονται, αλλά η συνολική συμπεριφορά των δύο συστημάτων γίνεται πιο καθαρή και πιο εύκολη στην ανάλυση.



Σχήμα 5-1: Σύγκριση αρχικής καμπύλης ισχύος και εξομαλυμένης καμπύλης με κυλιόμενο μέσο όρο 5 λεπτών για τα tracking και fixed φωτοβολταϊκά πλαίσια

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται η στιγμιαία ισχύς των δύο φωτοβολταϊκών πλαισίων μετά την εφαρμογή απλού κυλιόμενου μέσου όρου πέντε λεπτών. Η εξομάλυνση περιορίζει τις πολύ γρήγορες διακυμάνσεις που εμφανίζονται λόγω της δυναμικής λειτουργίας των MPPT, ενώ διατηρεί τη γενική μορφή της ημερήσιας παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο η σύγκριση μεταξύ tracking και fixed συστήματος γίνεται πιο καθαρή και πιο εύκολη στην ερμηνεία.

5.5 Συγκεντρωτικά ημερήσια αποτελέσματα

Για τη συνολική αξιολόγηση της απόδοσης των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιείται συγκεντρωτικός πίνακας ημερήσιων αποτελεσμάτων. Σε κάθε ημέρα καταγράφεται η συνολική ενέργεια που παρήχθη από το fixed φωτοβολταϊκό πλαίσιο και από το σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου.

Η ενέργεια υπολογίζεται σε βατώρες (Wh), καθώς οι ημερήσιες τιμές είναι μικρές και η μονάδα αυτή αποδίδει πιο καθαρά τη σύγκριση των δύο συστημάτων. Επιπλέον, υπολογίζεται η ποσοστιαία βελτίωση του συστήματος παρακολούθησης σε σχέση με το fixed σύστημα.

Ημερήσια αποτελέσματα δεκαπέντε ημερών				
day ↑	tracking_Watt	fixed_Watt	difference_Watt	gain_percent
2026-05-06	16353	10163	6190	60.9
2026-05-07	5220	3101	2119	68.3
2026-05-08	2041	1670	371	22.2
2026-05-09	8367	6414	1953	30.5
2026-05-10	11982	7525	4457	59.2
2026-05-11	15072	8962	6110	68.2
2026-05-12	16395	9121	7274	79.7
2026-05-13	14018	8318	5699	68.5
2026-05-14	14327	8825	5502	62.3
2026-05-15	15360	9800	5560	56.7
2026-05-16	14010	6738	7272	108
2026-05-17	14156	9660	4496	46.5
2026-05-18	16204	9813	6391	65.1
2026-05-19	13334	7223	6111	84.6
2026-05-20	14065	7695	6370	82.8
2026-05-21	15157	9108	6049	66.4

Σχήμα 5-2: Συγκεντρωτικός πίνακας ημερήσιων αποτελεσμάτων από το Grafana

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά ημερήσια αποτελέσματα παραγωγής ενέργειας

Ημερομηνία	Tracking (Wh)	Fixed (Wh)	Διαφορά (Wh)	Βελτίωση (%)
2026-05-15	42.67	27.22	15.44	56.7
2026-05-16	38.92	18.72	20.20	108.0
2026-05-17	39.32	26.83	12.49	46.5
2026-05-18	45.01	27.26	17.75	65.1
2026-05-19	37.04	20.06	16.98	84.6
2026-05-20	39.07	21.38	17.69	82.2
2026-05-21	42.10	25.30	16.80	66.4
2026-05-22	24.91	12.51	12.40	99.1
2026-05-23	24.00	13.10	10.90	83.2
2026-05-24	25.49	14.04	11.45	81.5
2026-05-25	45.64	22.24	23.39	105
2026-05-26	47.59	22.54	25.05	111
2026-05-27	48.18	22.58	25.59	113
2026-05-28	41.43	21.44	19.99	93.3
2026-05-29	51.58	23.42	28.16	120

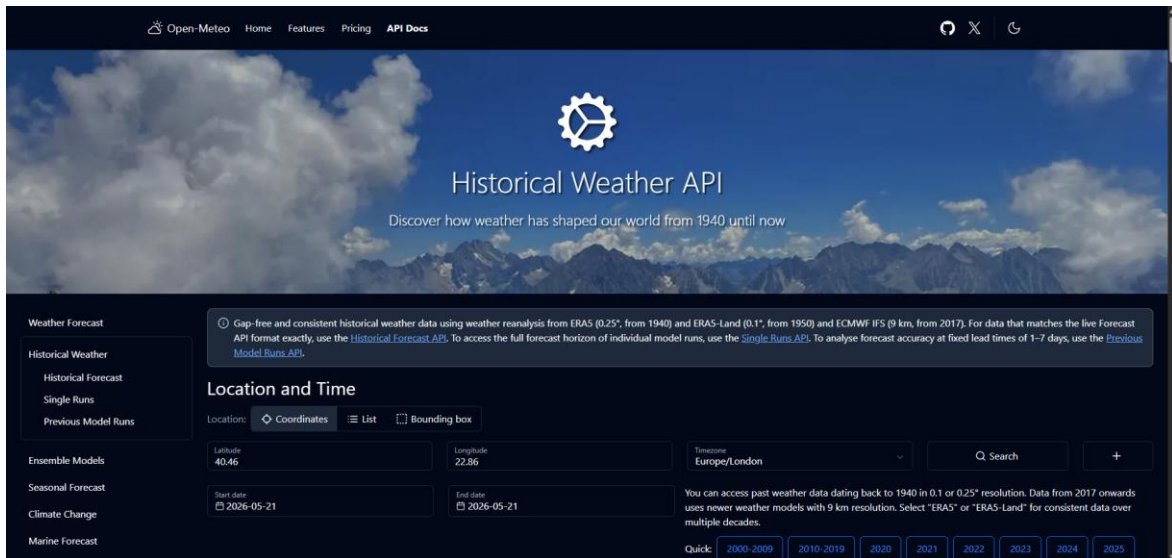
Με βάση τον παραπάνω πίνακα μπορούν να υπολογιστούν η συνολική ενέργεια δεκαπενθημέρου για κάθε σύστημα, καθώς και η μέση ημερήσια παραγωγή. Τα μεγέθη αυτά επιτρέπουν την πιο αξιόπιστη αξιολόγηση της απόδοσης, καθώς μειώνεται η επίδραση μεμονωμένων ημερών με ασυνήθιστες καιρικές συνθήκες ή πιθανές διακυμάνσεις στη λειτουργία.

5.6 Εργαλεία για την γραφική απεικόνιση

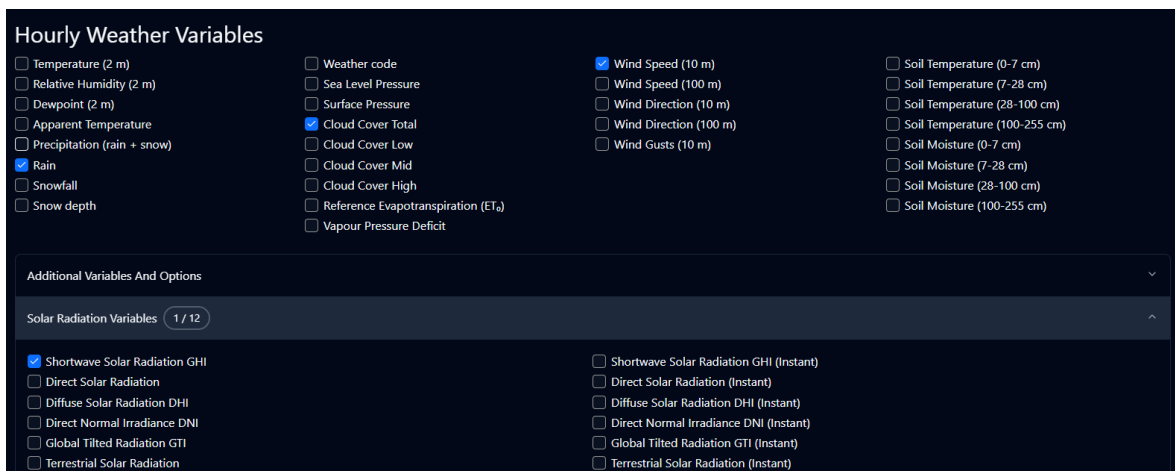
5.6.1 Open-Meteo Historical Weather

Σαν πρώτο βήμα για γίνει η σωστή ανάλυση μιας μέρας πρέπει να είναι γνωστές οι καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν. Αυτό γίνεται με την απλή μέθοδο της παρατήρησης και καταγραφής αυτού που βλέπουμε ή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το Open-Meteo Historical Weather που κάνει ακριβώς αυτή την δουλειά.

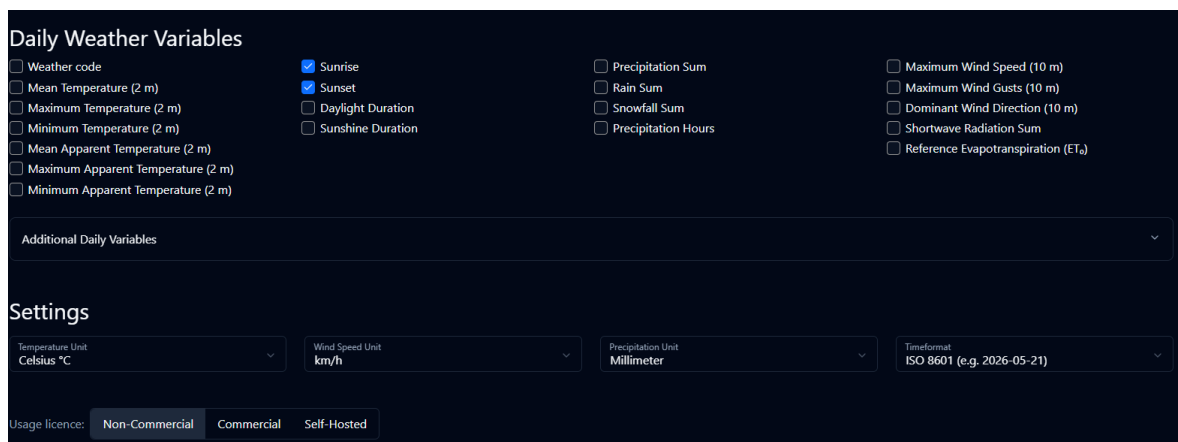
Το πρώτο βήμα είναι να γίνει η σωστή επιλογή των συντεταγμένων και της ημερομηνίας που θέλουμε να αναλύσουμε.



Σχήμα 5-3: Επιλογή τοποθεσίας και χρονικού διαστήματος στην υπηρεσία Open-Meteo Historical Weather
 Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή της ανάλυσης που χρειάζεται η εφαρμογή. Για την περίπτωση της εργασίας έχει επιλεγθεί ανάλυση βροχής, πλήρης συννεφιάς, ανέμου με ταχύτητα 10m και ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 . Επίσης επιλέχθηκε και η απεικόνιση της ανατολής και της δύσης [14].

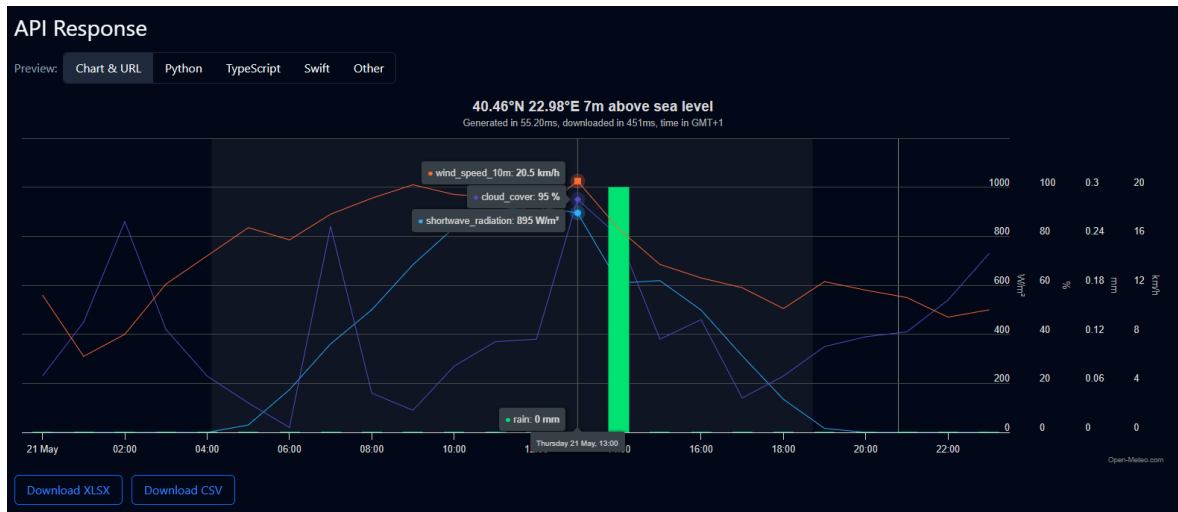


Σχήμα 5-4: Επιλογή μετεωρολογικών μεταβλητών και ηλιακής ακτινοβολίας στην υπηρεσία Open-Meteo



Σχήμα 5-5: Επιλογή χρονικού διαστήματος στην υπηρεσία Open-Meteo Historical Weather

Έτσι πλέον μπορεί να αρχίσει η σωστή ανάλυση της μέρας γνωρίζοντας τις καιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της καταγραφής που έχει γίνει στο Grafana.

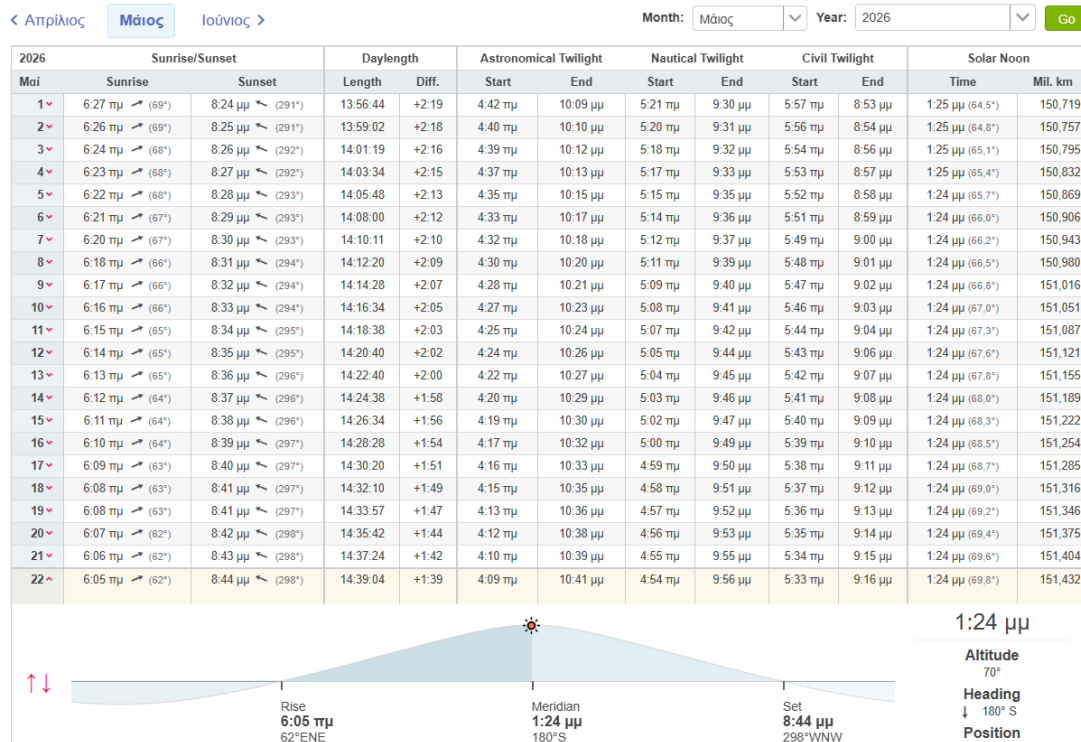


Σχήμα 5-6: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo

5.6.2 timeanddate

Επίσης πολύ χρήσιμο είναι η διάρκεια του διαστήματος ανατολής – δύσης, το οποίο παίζει μεγάλο ρόλο για τους υπολογισμούς που θα γίνουν παρακάτω στη συνέχεια. Μέσα από το timeanddate με την επιλογή μήνα και έτους είναι διαθέσιμο το ιστορικό κάθε μέρας ξεχωριστά της διάρκειας ανατολής – δύσης και της γωνίας που έχει ο ήλιος οποιαδήποτε στιγμή [15].

Μάιος 2026 — Sun in Thessaloniki



Σχήμα 5-7: Στοιχεία ανατολής και δύσης ηλίου από την υπηρεσία timeanddate

5.6.3 Ανάλυση της μέρας 23/05/2026 στο Grafana (Μέρα με χαμηλότερη παραγωγή)

Η αρχή της ανάλυσης ξεκινάει με τις καιρικές συνθήκες που υπήρξαν μέσα στη μέρα

Απλή παρακολούθηση και καταγραφή καιρικών συνθηκών: Μέρα με λίγο ήλιο το πρωί και πολύ λίγο το απόγευμα με αρκετή συννεφιά όλη την μέρα και βροχή ανά διαστήματα.

Καταγραφή από Open-Meteo Historical Weather:



Σχήμα 5-8: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo για τη μέρα 23/05/2026

Εδώ φαίνεται η ταχύτητα του ανέμου με πορτοκαλί, η συννεφιά με μωβ, η ηλιακή ακτινοβολία με κυανό και η βροχή με πράσινο, όλα αυτά τα δεδομένα είναι χρήσιμα για όσο βρίσκονται εντός του διαστήματος ανατολή – δύση, δηλαδή εντός του πλαισίου.

Αφού πλέον υπάρχει εικόνα για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν την ημέρα 23/05/2026, μπορεί να συνεχίσει η ανάλυση μέσω Grafana.

Το πρώτο και σημαντικότερο μέσο για την ανάλυση είναι η απεικόνιση της ισχύος που παράγουν τα πάνελ. Αυτό γίνεται μέσω μετρήσεων ανά 10 δευτερόλεπτα με τους αισθητήρες INA260 που βρίσκονται στο κλάδο των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Με αυτό τον τρόπο το δείγμα διαθέτει 6 μετρήσεις το λεπτό, 360 μετρήσεις σε μία ώρα και 3600 σε 10 ώρες.

Στη μέρα 23/05/2026 που η ώρα ανατολής δύσης είναι 06:04 - 20:45, έχουμε:

$$20:45 - 06:04 = 14 \text{ ώρες και } 41 \text{ λεπτά}$$

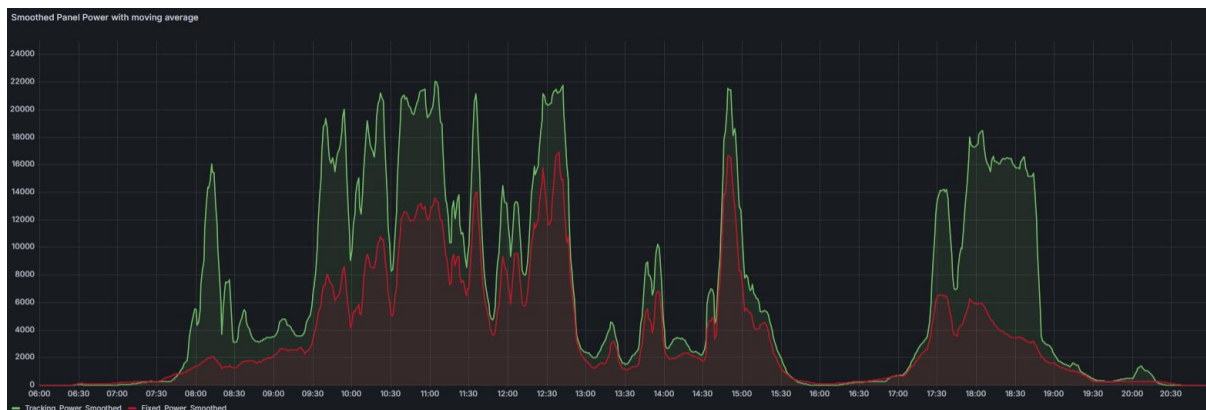
Σε δευτερόλεπτα:

$$14 * 3600 + 41 * 60 = 50400 + 2460 = 52860s$$

Άρα με μια μέτρηση κάθε 10 δευτερόλεπτα:

$$\frac{52860}{10} = 5286$$

Άρα τα τελικά γραφήματα της στιγμιαίας ισχύος του σταθερού πλαισίου και του κινητού πλαισίου διαμορφώνονται από 5286 δείγματα.



Σχήμα 5-9: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για ημέρα με αυξημένη ηλιοφάνεια για τη μέρα 23/05/2026

Σε αυτό το γράφημα φαίνεται η συμπεριφορά και των δύο πάνελ ταυτόχρονα, με μια πρώτη ματιά είναι αντιληπτό και λογικό ότι το fixed πάνελ που είναι με κόκκινο χρώμα ξεκινάει χαμηλά το πρωί, ανεβαίνει με αργό ρυθμό μέχρι το μεσημέρι και μετά πάλι πέφτει με αργό ρυθμό. Αυτό είναι φυσιολογικό και εξηγεί ακριβώς τον ορισμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με fixed πάνελ. Από την άλλη το tracking πάνελ φαίνεται να ακολουθεί την συμπεριφορά του σταθερού ως ένα βαθμό αλλά εκμεταλλεύεται όλη την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα σε αυτό.

Στο γράφημα φαίνονται μεγάλα κενά (βυθίσεις), αυτά μεταφράζονται συννεφιά μεγάλης διάρκειας. Επίσης υπάρχουν και μικρές μύτες προς τα κάτω (μικρές βυθίσεις), αυτά μεταφράζονται σε συννεφιά πάρα πολύ μικρής διάρκειας.

Η τελική συνολική δείχνει ότι το fixed σύστημα ακολουθεί μια καμπύλη που τείνει να φτάνει στα μέγιστα Watt, το μεσημέρι που ο ήλιος το χτυπάει κάθετα, ενώ το tracking πάνελ παίρνει συνεχώς την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία που του παρέχεται κάθε χρονική στιγμή.

Το παραπάνω γράφημα δείχνει την συμπεριφορά, έτσι έρχονται τα επόμενα δύο panel που θα μας δώσουν πιο ξεκάθαρα νούμερα και αποτελέσματα.



Σχήμα 5-10: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για τη μέρα 23/05/2026

Ημερήσια αποτελέσματα δεκαπέντε ημερών				
day ↑	tracking_Watt	fixed_Watt	difference_Watt	gain_percent
2026-05-06	16353	10163	6190	60.9
2026-05-07	5220	3101	2119	68.3
2026-05-08	2041	1670	371	22.2
2026-05-09	8367	6414	1953	30.5
2026-05-10	11982	7525	4457	59.2
2026-05-11	15072	8962	6110	68.2
2026-05-12	16395	9121	7274	79.7
2026-05-13	14018	8318	5699	68.5
2026-05-14	14327	8825	5502	62.3
2026-05-15	15360	9800	5560	56.7
2026-05-16	14010	6738	7272	108
2026-05-17	14156	9660	4496	46.5
2026-05-18	16204	9813	6391	65.1
2026-05-19	13334	7223	6111	84.6
2026-05-20	14065	7695	6370	82.8
2026-05-21	15157	9108	6049	66.4

Σχήμα 5-11: Ανάλυση της μέρας 23/05/2026 από πίνακα παραγωγής των τελευταίων δεκαπέντε ημερών

Από τα δύο panel που καταγράφουν την συνολική ισχύ, επιβεβαιώνεται ότι το πρώτο panel που δείχνει έντονα ότι το tracking σύστημα υπερτερεί κατά πολύ από το fixed:

fixed σύστημα: 4715 Watt

tracking σύστημα: 8639 Watt

Η διαφορά δίνεται από την αφαίρεση:

Κινητό σύστημα - Σταθερό σύστημα

Άρα προκύπτει ότι:

$$8639 - 4715 = 3924 \text{ W}$$

Άρα το ποσοστό διαφοράς είναι:

$$\frac{\text{Κινητό σύστημα} - \text{Σταθερό σύστημα}}{\text{Σταθερό σύστημα}} * 100 =$$

$$= \frac{3924}{4715} * 100 = 0,832 * 100 = 83,2\%$$

Άρα είναι πράγματι βέβαιο ότι το tracking σύστημα παρήγαγε 83,2% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το fixed σύστημα.

Επειδή η εφαρμογή ασχολείται με τη σύγκριση της παραγωγής ισχύος είναι χρήσιμο να δοθούν και τα ποσά ενέργειας των δύο συστημάτων.

Εφόσον η μέτρηση γίνεται κάθε 10 δευτερόλεπτα:

$$10 = \frac{10}{3600} h = \frac{1}{360} h$$

Άρα κάθε μέτρηση αντιστοιχεί σε:

$$P * \frac{1}{360}$$

Άρα:

$$Ewh = \frac{P}{360}$$

tracking σύστημα:

$$Ewh = \frac{8639}{360} = 23.99 Wh$$

fixed σύστημα:

$$Ewh = \frac{4715}{360} = 13.09 Wh$$

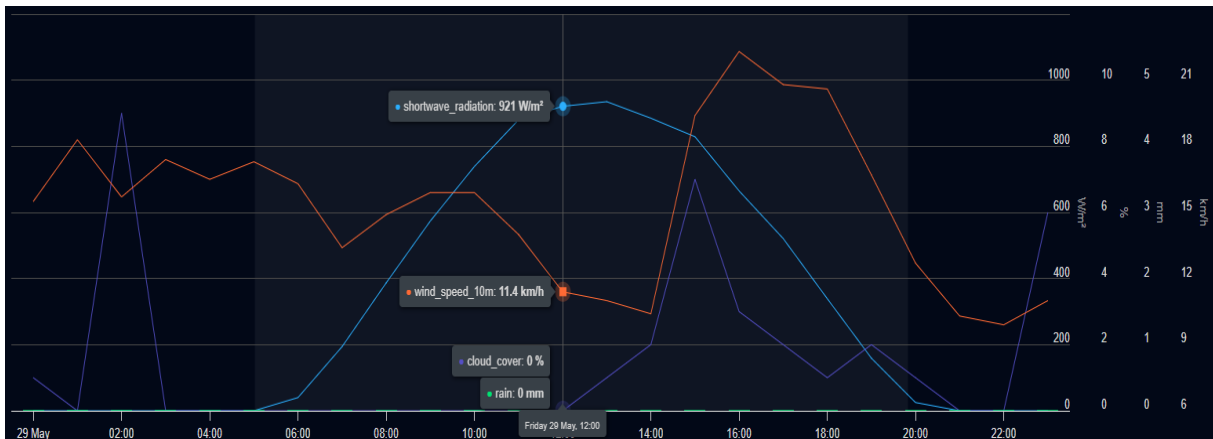
Διαφορά tracking σύστημα με fixed σύστημα:

$$23.99Wh - 13.09Wh = 10.9Wh$$

5.6.4 Ανάλυση της μέρας 29/05/2026 στο Grafana (Μέρα με υψηλότερη παραγωγή)

Απλή παρακολούθηση και καταγραφή καιρικών συνθηκών: Σε όλη την διάρκεια της ημέρας υπήρχε ήλιος

Καταγραφή από Open-Meteo Historical Weather:



Σχήμα 5-12: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo για τη μέρα 29/05/2026

Στη μέρα 29/05/2026 που η ώρα ανατολής δύσης είναι 06:01 - 20:50, έχουμε:

$$20:50 - 06:01 = 14 \text{ ώρες και } 49 \text{ λεπτά}$$

Σε δευτερόλεπτα:

$$14 * 3600 + 49 * 60 = 50400 + 2940 = 53340s$$

Άρα με μια μέτρηση κάθε 10 δευτερόλεπτα:

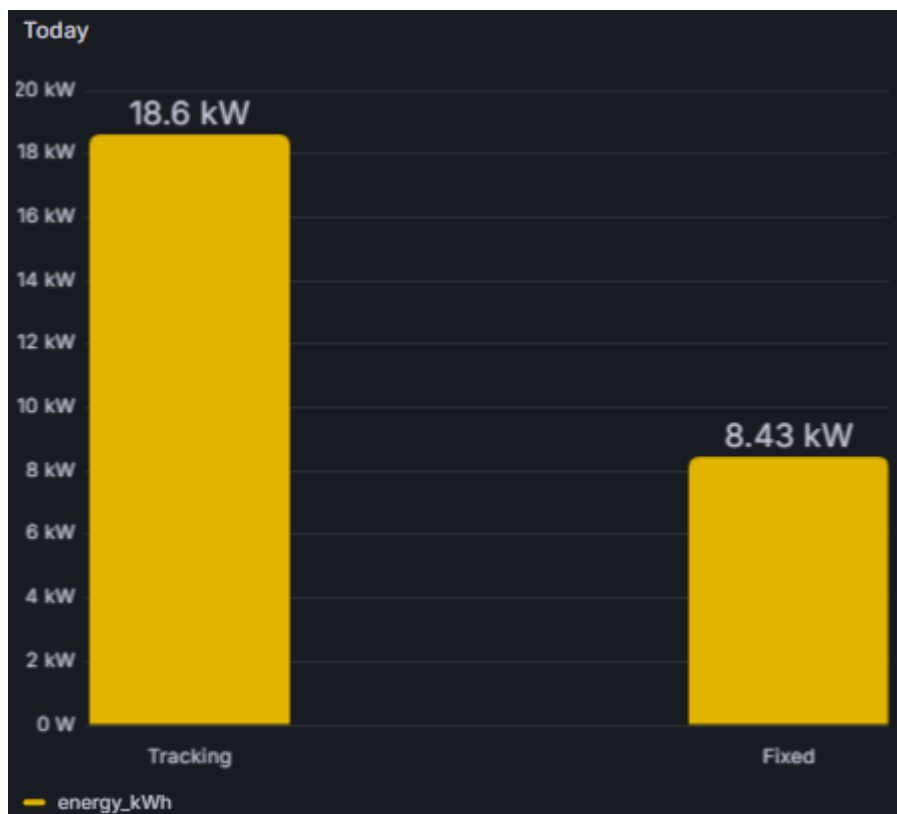
$$\frac{53340}{10} = 5334$$

Άρα τα τελικά γραφήματα της στιγμιαίας ισχύος του σταθερού πλαισίου και του κινητού πλαισίου διαμορφώνονται από 5334 δείγματα.



Σχήμα 5-13: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για ημέρα με αυξημένη ηλιοφάνεια για τη μέρα 29/05/2026

Από το Grafana και βάση των καιρικών συνθηκών ότι σε αυτή τη μέρα τα επίπεδα ηλιοφάνειας και ηλιακής ακτινοβολίας ήταν πολύ μικρά. Το πρωί φαίνεται ότι η μέρα ξεκίνησε με αρκετό ήλιο, στη συνέχεια άρχισαν να επηρεάζουν οι συννεφίες και κατά τη διάρκεια της ημέρας οι συννεφίες αυξάνονταν και ο καιρός χαλούσε.



Σχήμα 5-14: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για τη μέρα 29/05/2026

Ημερήσια αποτελέσματα δεκαπέντε ημερών				
day ↑	tracking_Watt	fixed_Watt	difference_Watt	gain_percent
2026-05-06	16353	10163	6190	60.9
2026-05-07	5220	3101	2119	68.3
2026-05-08	2041	1670	371	22.2
2026-05-09	8367	6414	1953	30.5
2026-05-10	11982	7525	4457	59.2
2026-05-11	15072	8962	6110	68.2
2026-05-12	16395	9121	7274	79.7
2026-05-13	14018	8318	5699	68.5
2026-05-14	14327	8825	5502	62.3
2026-05-15	15360	9800	5560	56.7
2026-05-16	14010	6738	7272	108
2026-05-17	14156	9660	4496	46.5
2026-05-18	16204	9813	6391	65.1
2026-05-19	13334	7223	6111	84.6
2026-05-20	14065	7695	6370	82.8
2026-05-21	15157	9108	6049	66.4

Σχήμα 5-15: Ανάλυση της μέρας 29/05/2026 από πίνακα παραγωγής των τελευταίων δεκαπέντε ημερών

Από τα δύο panel που καταγράφουν την συνολική ισχύ, επιβεβαιώνεται ότι το πρώτο panel που δείχνει έντονα ότι το tracking σύστημα υπερτερεί κατά πολύ από το fixed:

fixed σύστημα: 8432 Watt

tracking σύστημα: 18570 Watt

Η διαφορά δίνεται από την αφαίρεση:

Κινητό σύστημα - Σταθερό σύστημα

Άρα προκύπτει ότι:

$$18570 - 8432 = 10138 W$$

Άρα το ποσοστό διαφοράς είναι:

$$\frac{\text{Κινητό σύστημα} - \text{Σταθερό σύστημα}}{\text{Σταθερό σύστημα}} * 100 =$$

$$= \frac{10138}{8432} * 100 = 1.20 * 100 = 120\%$$

Άρα είναι πράγματι βέβαιο ότι το tracking σύστημα παράγει 120% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το fixed σύστημα.

Επειδή η εφαρμογή ασχολείται με τη σύγκριση της παραγωγής ισχύος είναι χρήσιμο να δοθούν και τα ποσά ενέργειας των δύο συστημάτων.

Εφόσον η μέτρηση γίνεται κάθε 10 δευτερόλεπτα:

$$10 = \frac{10}{3600} h = \frac{1}{360} h$$

Άρα κάθε μέτρηση αντιστοιχεί σε:

$$P * \frac{1}{360}$$

Άρα:

$$Ewh = \frac{P}{360}$$

tracking σύστημα:

$$Ewh = \frac{18570}{360} = 51.58 Wh$$

fixed σύστημα:

$$Ewh = \frac{8432}{360} = 23.42 Wh$$

Διαφορά tracking σύστημα με fixed σύστημα:

$$51.58Wh - 23.42Wh = 28.16Wh$$

5.6.5 Ανάλυση της μέρας 19/05/2026 στο Grafana (Μέρα με μέτρια παραγωγή)

Απλή παρακολούθηση και καταγραφή καιρικών συνθηκών: Σε αυτή την μέρα είχαμε ήλιο γενικά με συνεχείς συννεφίες και βροχές από το μεσημέρι μέχρι και το απόγευμα.

Καταγραφή από Open-Meteo Historical Weather:



Σχήμα 5-16: Γραφική απεικόνιση μετεωρολογικών δεδομένων από το Open-Meteo για τη μέρα 19/05/2026

Στη μέρα 19/05/2026 που η ώρα ανατολής δύσης είναι 06:08 - 20:41, έχουμε:

$$20:41 - 06:08 = 14 \text{ ώρες και } 33 \text{ λεπτά}$$

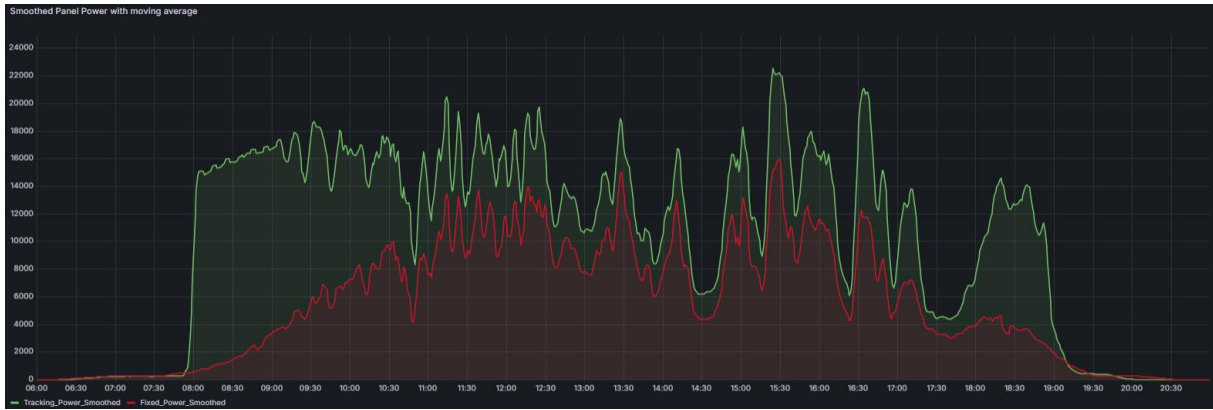
Σε δευτερόλεπτα:

$$14 * 3600 + 33 * 60 = 50400 + 1980 = 52380s$$

Άρα με μια μέτρηση κάθε 10 δευτερόλεπτα:

$$\frac{52380}{10} = 5238$$

Άρα τα τελικά γραφήματα της στιγμιαίας ισχύος του σταθερού πλαισίου και του κινητού πλαισίου διαμορφώνονται από 5238 δείγματα.



Σχήμα 5-17: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για ημέρα με αυξημένη ηλιοφάνεια για τη μέρα 19/05/2026

Από το Grafana και βάση των καιρικών συνθηκών ότι σε αυτή τη μέρα τα επίπεδα ηλιοφάνειας και ηλιακής ακτινοβολίας ήταν πολύ μικρά. Ο καιρός ήταν χαλασμένος σε όλη την διάρκεια της μέρας εκτός από κάποιες πρωινές ώρες.



Σχήμα 5-18: Ημερήσια παραγωγή ενέργειας tracking και fixed συστήματος για τη μέρα 19/05/2026

Ημερήσια αποτελέσματα δεκαπέντε ημερών				
day ↑	tracking_Watt	fixed_Watt	difference_Watt	gain_percent
2026-05-06	16353	10163	6190	60.9
2026-05-07	5220	3101	2119	68.3
2026-05-08	2041	1670	371	22.2
2026-05-09	8367	6414	1953	30.5
2026-05-10	11982	7525	4457	59.2
2026-05-11	15072	8962	6110	68.2
2026-05-12	16395	9121	7274	79.7
2026-05-13	14018	8318	5699	68.5
2026-05-14	14327	8825	5502	62.3
2026-05-15	15360	9800	5560	56.7
2026-05-16	14010	6738	7272	108
2026-05-17	14156	9660	4496	46.5
2026-05-18	16204	9813	6391	65.1
2026-05-19	13334	7223	6111	84.6
2026-05-20	14065	7695	6370	82.8
2026-05-21	15157	9108	6049	66.4

Σχήμα 5-19: Ανάλυση της μέρας 19/05/2026 από πίνακα παραγωγής των τελευταίων δεκαπέντε ημερών

Από τα δύο panel που καταγράφουν την συνολική ισχύ, επιβεβαιώνεται ότι το πρώτο panel που δείχνει έντονα ότι το tracking σύστημα υπερτερεί κατά πολύ από το fixed:

fixed σύστημα: 7223 Watt

tracking σύστημα: 13334 Watt

Η διαφορά δίνεται από την αφαίρεση:

Κινητό σύστημα - Σταθερό σύστημα

Άρα προκύπτει ότι:

$$13334 - 7223 = 6111 W$$

Άρα το ποσοστό διαφοράς είναι:

$$\frac{\text{Κινητό σύστημα} - \text{Σταθερό σύστημα}}{\text{Σταθερό σύστημα}} * 100 =$$

$$= \frac{6111}{7223} * 100 = 0.846 * 100 = 84,6\%$$

Άρα είναι πράγματι βέβαιο ότι το tracking σύστημα παράγει 84,6% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το fixed σύστημα.

Επειδή η εφαρμογή ασχολείται με τη σύγκριση της παραγωγής ισχύος είναι χρήσιμο να δοθούν και τα ποσά ενέργειας των δύο συστημάτων.

Εφόσον η μέτρηση γίνεται κάθε 10 δευτερόλεπτα:

$$10 = \frac{10}{3600}h = \frac{1}{360}h$$

Άρα κάθε μέτρηση αντιστοιχεί σε:

$$P * \frac{1}{360}$$

Άρα:

$$Ewh = \frac{P}{360}$$

tracking σύστημα:

$$Ewh = \frac{13334}{360} = 37.03 Wh$$

fixed σύστημα:

$$Ewh = \frac{7223}{360} = 20.06 Wh$$

Διαφορά tracking σύστημα με fixed σύστημα:

$$37.03Wh - 20.06Wh = 16.97Wh$$

5.7 Συνολική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Μετά την παρουσίαση των ημερήσιων αποτελεσμάτων και την ανάλυση χαρακτηριστικών ημερών, πραγματοποιείται η συνολική αξιολόγηση της απόδοσης των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η αξιολόγηση βασίζεται στις ημερήσιες τιμές ενέργειας που υπολογίστηκαν για το fixed φωτοβολταϊκό πλαίσιο και για το σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου.

Από τα συγκεντρωτικά δεδομένα προκύπτει ότι το σύστημα παρακολούθησης παρουσίασε μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας σε όλες τις ημέρες της περιόδου μέτρησης. Η διαφορά αυτή δείχνει ότι η δυναμική μεταβολή της θέσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της ημέρας.

Για το σύνολο των ημερών που εξετάστηκαν, η συνολική ενέργεια που παρήχθη από το tracking σύστημα ήταν:

$$E_{tracking} = 633Wh$$

ενώ η συνολική ενέργεια που παρήχθη από το fixed σύστημα ήταν:

$$E_{fixed} = 343Wh$$

Η συνολική διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο συστημάτων υπολογίζεται ως:

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_{tracking} - E_{fixed} = \\ &= 633 - 343 = 290Wh \end{aligned}$$

Το συνολικό ποσοστό βελτίωσης του συστήματος παρακολούθησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Βελτίωση(\%) = \frac{E_{tracking} - E_{fixed}}{E_{fixed}} * 100$$

Άρα:

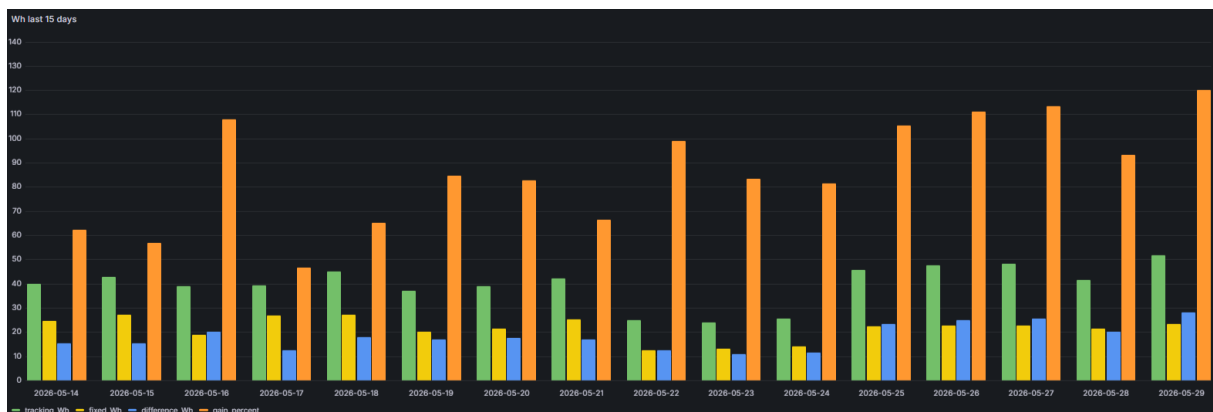
$$Βελτίωση(\%) = \frac{290}{343} * 100 = 84.54\%$$

Επομένως, για την εξεταζόμενη περίοδο, το σύστημα παρακολούθησης παρήγαγε περίπου 84.54% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το fixed φωτοβολταϊκό σύστημα.

Η διαφορά αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δεν προκύπτει από θεωρητική προσομοίωση, αλλά από πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Το fixed φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρουσιάζει καλύτερη απόδοση κυρίως κοντά στις μεσημεριανές ώρες, όταν η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο κοντά στον fixed προσανατολισμό του πλαισίου. Αντίθετα, το tracking σύστημα διατηρεί ευνοϊκότερη γωνία πρόσπτωσης σε μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, με αποτέλεσμα να αξιοποιεί καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία κυρίως κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες.

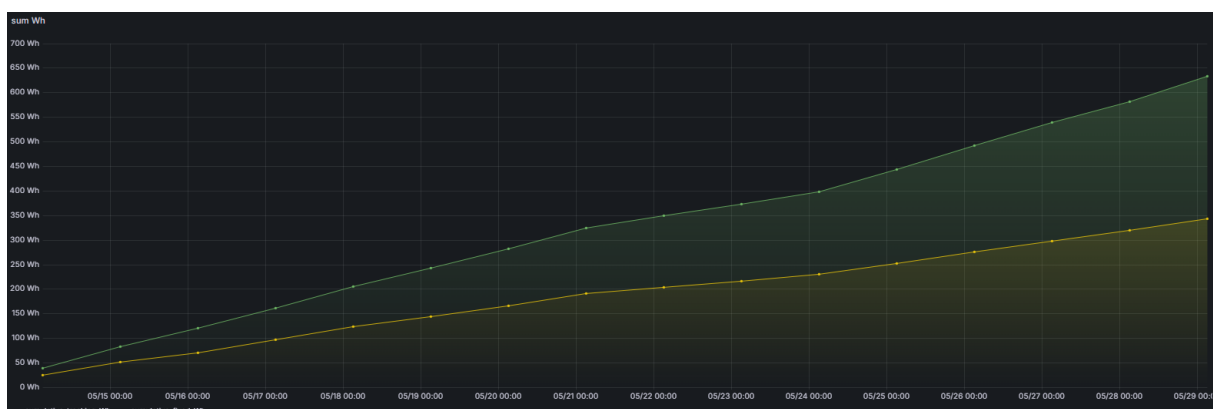
Παράλληλα, κατά την περίοδο των μετρήσεων υπήρξαν μεταβολές στις καιρικές συνθήκες, όπως συννεφιά, μεταβαλλόμενη ηλιοφάνεια και άνεμος. Παρόλα αυτά, το tracking σύστημα διατήρησε υψηλότερη ημερήσια παραγωγή σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό δείχνει ότι η αύξηση της απόδοσης δεν περιορίζεται μόνο σε ιδανικές συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, αλλά εμφανίζεται και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Παρά την επίδραση του φορτίου και των καιρικών συνθηκών, η συνολική εικόνα παραμένει ξεκάθαρη. Το σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου παρουσίασε σταθερά μεγαλύτερη ενεργειακή παραγωγή από το fixed σύστημα. Συνεπώς, η χρήση μηχανισμού παρακολούθησης δύο αξόνων αποδείχθηκε αποτελεσματική για την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.



Σχήμα 5-20: Παραγωγή ενέργειας των τελευταίων 15 ημερών

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή ενέργειας των δύο συστημάτων για τις τελευταίες δεκαπέντε ημέρες μέτρησης. Παρατηρείται ότι το σύστημα παρακολούθησης παρουσιάζει μεγαλύτερη παραγωγή σε κάθε ημέρα του δείγματος. Η διαφορά αυτή αποτυπώνεται τόσο στις τιμές ενέργειας όσο και στο ποσοστό βελτίωσης, το οποίο παραμένει θετικό σε όλη την περίοδο μέτρησης.



Σχήμα 5-21: Συνολική παραγωγή ενέργειας συστημάτων tracking και fixed τις τελευταίες δεκαπέντε μέρες

Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται η συσσωρευμένη παραγωγή ενέργειας των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η καμπύλη του tracking συστήματος αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από την αντίστοιχη καμπύλη του fixed συστήματος, γεγονός που δείχνει ότι το ενεργειακό όφελος του συστήματος παρακολούθησης συσσωρεύεται σταδιακά κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης.

Η συνολική εικόνα των γραφημάτων επιβεβαιώνει τα αριθμητικά αποτελέσματα του πίνακα. Το tracking σύστημα δεν εμφανίζει μεμονωμένη βελτίωση σε συγκεκριμένες ημέρες, αλλά σταθερά υψηλότερη παραγωγή σε όλη την περίοδο μέτρησης. Συνεπώς, η χρήση μηχανισμού παρακολούθησης της θέσης του ήλιου οδηγεί σε ουσιαστική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με τη σταθερή διάταξη.

5.8 Παρατηρήσεις λειτουργίας και περιορισμοί μετρήσεων

Οι μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, η συμπεριφορά των δύο φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν εξαρτάται μόνο από τη θέση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, αλλά και από εξωτερικούς και λειτουργικούς παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας.

Βασικός παράγοντας επίδρασης είναι οι καιρικές συνθήκες. Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω νεφώσεων, βροχόπτωσης, σκόνης, αέρα ή απότομων αλλαγών στη φωτεινότητα. Οι μεταβολές αυτές εμφανίζονται άμεσα στα γραφήματα ισχύος, κυρίως με τη μορφή απότομων αυξομειώσεων. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση δεν βασίστηκε σε μία μόνο ημέρα μέτρησης, αλλά σε περίοδο δεκαπέντε ημερών, ώστε να υπάρχει πιο αντιπροσωπευτική εικόνα της λειτουργίας των δύο συστημάτων.

Η ύπαρξη μηχανικών μερών στο σύστημα παρακολούθησης αποτελεί επίσης παράγοντα που επηρεάζει τη λειτουργία. Οι Servo, η μηχανική βάση δύο αξόνων και οι ανοχές της κατασκευής μπορούν να προκαλέσουν μικρές αποκλίσεις από την ιδανική γωνία προσανατολισμού. Παρόλα αυτά, το σύστημα παρακολούθησης παρουσίασε σταθερά υψηλότερη παραγωγή σε σχέση με το fixed σύστημα, γεγονός που δείχνει ότι οι μηχανικές αποκλίσεις δεν αναιρούν το ενεργειακό όφελος της διάταξης.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση δεν πραγματοποιήθηκε σε απόλυτα ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τις πραγματικές συνθήκες του χώρου εγκατάστασης, όπως ο προσανατολισμός, η θερμοκρασία, πιθανές σκιάσεις, η συμπεριφορά των μπαταριών και η λειτουργία των φορτίων. Αυτό όμως αποτελεί και βασικό πλεονέκτημα της αξιολόγησης, καθώς τα αποτελέσματα αποτυπώνουν τη συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες αντίστοιχες με αυτές που θα αντιμετώπιζε μία πραγματική αυτόνομη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί δεν αναιρούν τα αποτελέσματα της σύγκρισης, αλλά βοηθούν στη σωστή ερμηνεία τους. Η αυξημένη παραγωγή του tracking συστήματος παρατηρήθηκε παρά τις μεταβολές του καιρού και τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, η σύγκριση θεωρείται αντιπροσωπευτική για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των δύο διατάξεων.

5.9 Επίλογος κεφαλαίου

Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων μέσω Grafana επέτρεψε την καλύτερη παρατήρηση της συμπεριφοράς των δύο συστημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μέσα από την ανάλυση χαρακτηριστικών ημερών φάνηκε ότι το σύστημα παρακολούθησης παρουσιάζει μεγαλύτερη παραγωγή σε σχέση με το fixed πλαίσιο, ιδιαίτερα σε χρονικά διαστήματα όπου η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται σημαντικά. Ταυτόχρονα, η συσχέτιση με τα μετεωρολογικά δεδομένα βοήθησε στην ερμηνεία των μεταβολών της παραγόμενης ισχύος.

Από τη συνολική αξιολόγηση της περιόδου μέτρησης προέκυψε ότι το tracking σύστημα παρουσίασε σταθερά υψηλότερη ενεργειακή απόδοση από το fixed σύστημα. Η διαφορά αυτή επιβεβαιώθηκε τόσο από τα ημερήσια αποτελέσματα όσο και από τη συσσωρευμένη παραγωγή ενέργειας. Παρά τις μεταβολές των καιρικών συνθηκών, την αλλαγή φορτίου και τους περιορισμούς μιας πραγματικής

εγκατάστασης πεδίου, το σύστημα παρακολούθησης διατήρησε αυξημένη παραγωγή σε όλη την εξεταζόμενη περίοδο.

Συμπερασματικά, το κεφάλαιο αυτό επιβεβαίωσε πειραματικά ότι η χρήση συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ήλιου μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγόμενη ενέργεια ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποτελούν τη βάση για τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας, τα οποία παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση και την αξιολόγηση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Η εργασία είχε ως βασικό στόχο τη σύγκριση ενός σταθερού φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο που ακολουθεί τη θέση του ήλιου, ώστε να εκτιμηθεί το ενεργειακό όφελος του συστήματος παρακολούθησης.

Η αξιολόγηση δεν περιορίστηκε μόνο στη θεωρητική ανάλυση, αλλά βασίστηκε σε πραγματική κατασκευή και σε πραγματικές μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια της εργασίας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια, ρυθμιστές φόρτισης MPPT, μπαταρίες, φορτία, αισθητήρες μέτρησης, σύστημα ελέγχου, μηχανισμό κίνησης και διαδικτυακή υποδομή αποθήκευσης και απεικόνισης δεδομένων.

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε αναλυτικά η μεθοδολογία συλλογής των δεδομένων, ο τρόπος υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας και η σύγκριση της απόδοσης των δύο συστημάτων. Στο κεφάλαιο αυτό συγκεντρώνονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, οι περιορισμοί που παρατηρήθηκαν κατά την υλοποίηση και οι προτάσεις για μελλοντική βελτίωση του συστήματος.

6.2 Συμπεράσματα υλοποίησης

Από την υλοποίηση της εργασίας προκύπτει ότι κατασκευάστηκε ένα πλήρες αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα για τη σύγκριση σταθερής και κινούμενης φωτοβολταϊκής διάταξης. Η κατασκευή δεν περιορίστηκε μόνο στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αλλά περιλάμβανε το σύνολο των απαραίτητων υποσυστημάτων για την παραγωγή, αποθήκευση, κατανάλωση, μέτρηση και αποστολή των δεδομένων.

Η διάταξη χωρίστηκε σε δύο ανεξάρτητα συστήματα, ένα fixed και ένα tracking. Κάθε σύστημα διαθέτει ξεχωριστό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ρυθμιστή φόρτισης MPPT, μπαταρία, φορτίο και αισθητήρες μέτρησης. Με αυτόν τον τρόπο η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με κοινή βασική ενεργειακή δομή και η κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των δύο συστημάτων ήταν ο τρόπος προσανατολισμού του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Σημαντικό μέρος της υλοποίησης αποτέλεσε το σύστημα μετρήσεων. Οι αισθητήρες INA260 χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή τάσης και ρεύματος στα βασικά σημεία κάθε διάταξης, δηλαδή στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, στη μπαταρία και στο φορτίο. Μέσω των μετρήσεων αυτών ήταν δυνατός ο υπολογισμός της ισχύος και στη συνέχεια της ημερήσιας ενέργειας κάθε συστήματος.

Επιπλέον, υλοποιήθηκε σύστημα ελέγχου με ESP32-S3, το οποίο ανέλαβε την ανάγνωση των αισθητήρων, τον υπολογισμό της θέσης του ήλιου και τον έλεγχο των σερβοκινητήρων του tracking συστήματος. Η χρήση δύο αξόνων κίνησης επέτρεψε τη μεταβολή τόσο της γωνίας ανύψωσης όσο και της γωνίας αζιμούθιου του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε διαδικτυακή υποδομή για την αποστολή, αποθήκευση και απεικόνιση των δεδομένων. Τα δεδομένα αποστέλλονται ασύρματα και στη συνέχεια αξιοποιούνται για τη δημιουργία γραφημάτων και συγκεντρωτικών πινάκων. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατή η απομακρυσμένη παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος και η μετέπειτα ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Συνολικά, η υλοποίηση έδειξε ότι είναι εφικτή η κατασκευή ενός ολοκληρωμένου αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος παρακολούθησης με σχετικά απλά και διαθέσιμα υλικά. Η διάταξη λειτούργησε σε πραγματικές συνθήκες και παρείχε τα απαραίτητα δεδομένα για την αξιολόγηση της απόδοσης του tracking συστήματος σε σχέση με το fixed σύστημα.

6.3 Συμπεράσματα απόδοσης

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων προέκυψε ότι το σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου παρουσίασε υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σχέση με το fixed φωτοβολταϊκό σύστημα. Η διαφορά αυτή εμφανίστηκε σε όλες τις ημέρες της περιόδου μέτρησης, γεγονός που δείχνει ότι η μεταβολή του προσανατολισμού του πλαισίου συμβάλλει ουσιαστικά στην καλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.

Το βασικό πλεονέκτημα του tracking συστήματος παρατηρείται κυρίως στις πρωινές και απογευματινές ώρες. Στα χρονικά αυτά διαστήματα, το fixed πλαίσιο παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση από την ιδανική γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ το tracking πλαίσιο προσαρμόζει τη θέση του ακολουθώντας την πορεία του ήλιου. Έτσι, το tracking σύστημα μπορεί να διατηρεί υψηλότερη παραγωγή για μεγαλύτερο μέρος της ημέρας.

Συνολικά, για την εξεταζόμενη περίοδο, το tracking σύστημα παρήγαγε περίπου 66,0% περισσότερη ενέργεια από το fixed σύστημα. Το ποσοστό αυτό αποτελεί σημαντική βελτίωση, ειδικά αν ληφθεί υπόψη ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι σε ιδανικό εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μεταβολές της ηλιοφάνειας, η νέφωση, ο άνεμος και η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών επηρέασαν τις μετρήσεις, όμως το tracking σύστημα διατήρησε σταθερά υψηλότερη παραγωγή.

Η αξιολόγηση έδειξε επίσης ότι η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι σταθερή για κάθε ημέρα ή εποχή. Η θέση του ήλιου, η διάρκεια της ημέρας και οι καιρικές συνθήκες μεταβάλλονται μέσα στο έτος, με αποτέλεσμα το ενεργειακό όφελος του tracking να διαφοροποιείται ανάλογα με την περίοδο μέτρησης. Παρόλα αυτά, ακόμη και στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που εξετάστηκε, το κέρδος ήταν αρκετά μεγάλο ώστε να επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διάταξης παρακολούθησης.

Συμπερασματικά, η χρήση συστήματος παρακολούθησης δύο αξόνων αποδείχθηκε ενεργειακά αποδοτικότερη από τη σταθερή τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Παρότι η τελική απόδοση επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας και από την κατανάλωση του μηχανισμού κίνησης, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βελτιωμένη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας.

6.4 Περιορισμοί της εργασίας

Παρότι η υλοποίηση λειτούργησε κανονικά και παρείχε χρήσιμα αποτελέσματα για τη σύγκριση των δύο συστημάτων, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν τα αποτελέσματα της εργασίας, αλλά βοηθούν στη σωστή ερμηνεία τους.

Αρχικά, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και όχι σε πλήρως ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάστηκε από παράγοντες όπως η νέφωση, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ο άνεμος, η θερμοκρασία και πιθανές στιγμιαίες μεταβολές των συνθηκών στον χώρο εγκατάστασης.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά τη χρονική περίοδο αξιολόγησης. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, καθώς αλλάζει η τροχιά του ήλιου, η διάρκεια της ημέρας και η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Επομένως, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης περιόδου αποτυπώνουν τη συμπεριφορά του συστήματος για τις συνθήκες μέτρησης που επικρατούσαν τότε και όχι απαραίτητα για ολόκληρο το έτος.

Επιπλέον, η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και η λειτουργία των ρυθμιστών MPPT επηρεάζουν την απορρόφηση ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όταν η μπαταρία βρίσκεται σε υψηλό επίπεδο φόρτισης, ο ρυθμιστής φόρτισης μπορεί να περιορίσει την ισχύ που λαμβάνεται από το πάνελ, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για πλήρη απορρόφηση της διαθέσιμης ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, στις τελικές

μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε φορτίο 30 W, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση και να αξιοποιείται πιο αντιπροσωπευτικά η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Περιορισμός υπάρχει και στο μηχανικό μέρος του tracking συστήματος. Η κίνηση του πλαισίου πραγματοποιείται με Servo, οι οποίοι καταναλώνουν ενέργεια και καταπονούνται μηχανικά, ειδικά όταν καλούνται να συγκρατούν τη θέση του πάνελ ή όταν υπάρχει άνεμος. Η κατανάλωση και η καταπόνηση των κινητήρων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες σε μια πλήρη αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος.

Συνολικά, οι παραπάνω περιορισμοί δείχνουν ότι τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως αποτελέσματα πραγματικής εγκατάστασης πεδίου. Παρά τις μεταβολές των εξωτερικών συνθηκών και τους τεχνικούς περιορισμούς της υλοποίησης, το tracking σύστημα παρουσίασε ξεκάθαρη βελτίωση σε σχέση με το fixed φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

6.5 Προτάσεις μελλοντικής βελτίωσης

Με βάση την υλοποίηση και τη λειτουργία του συστήματος, μπορούν να προταθούν ορισμένες βελτιώσεις που θα μπορούσαν να αυξήσουν την αξιοπιστία, την ενεργειακή απόδοση και την ακρίβεια της αξιολόγησης.

Μία βασική βελτίωση αφορά το μηχανικό μέρος του συστήματος παρακολούθησης. Στην παρούσα υλοποίηση η κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου πραγματοποιείται μέσω σερβοκινητήρων, οι οποίοι αναλαμβάνουν τόσο την περιστροφή όσο και τη συγκράτηση της θέσης του πάνελ. Σε μελλοντική έκδοση θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν καταλληλότεροι κινητήρες ή ενεργοποιητές για εξωτερικές εφαρμογές, με μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και καλύτερη συμπεριφορά σε συνθήκες ανέμου.

Επιπλέον, θα μπορούσε να προστεθεί μηχανισμός μηχανικού κλειδώματος ή αυτοασφαλιζόμενη μετάδοση, ώστε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να παραμένει fixed στη θέση του χωρίς να απαιτείται συνεχής κατανάλωση ρεύματος από τους κινητήρες. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωνόταν η ενεργειακή κατανάλωση του tracking μηχανισμού και ταυτόχρονα θα περιοριζόταν η μηχανική καταπόνηση των μοτέρ.

Για πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση θα ήταν χρήσιμη η συλλογή δεδομένων σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η απόδοση του tracking συστήματος μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, τη διάρκεια της ημέρας, τη γωνία του ήλιου και τις καιρικές συνθήκες. Επομένως, μετρήσεις σε διαφορετικές εποχές του έτους θα έδιναν πιο πλήρη εικόνα για το πραγματικό ετήσιο ενεργειακό όφελος της διάταξης.

Επιπλέον, θα μπορούσε να ενσωματωθεί αισθητήρας ηλιακής ακτινοβολίας ή τοπικός μετεωρολογικός σταθμός. Με αυτόν τον τρόπο η παραγόμενη ισχύς θα μπορούσε να συσχετιστεί πιο άμεσα με την πραγματική διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου και τη νέφωση. Αυτό θα βελτίωνε την ακρίβεια της ανάλυσης και θα βοηθούσε στην καλύτερη ερμηνεία των ημερήσιων διαφορών παραγωγής.

Τέλος, σε επίπεδο λογισμικού θα μπορούσε να γίνει προσθήκη ειδοποιήσεων για μη φυσιολογικές τιμές ή για πιθανή δυσλειτουργία κάποιου υποσυστήματος θα έκανε τη διάταξη πιο αξιόπιστη για μακροχρόνια λειτουργία.

Συνολικά, οι παραπάνω βελτιώσεις θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ένα πιο αποδοτικό, αξιόπιστο και ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης της θέσης του ήλιου, κατάλληλο για μεγαλύτερης διάρκειας μετρήσεις και για εφαρμογές υψηλότερης ισχύος.

6.6 Τελικό συμπέρασμα

Συνολικά, η εργασία απέδειξε ότι η χρήση συστήματος παρακολούθησης της θέσης του ήλιου μπορεί να αυξήσει ουσιαστικά την παραγόμενη ενέργεια ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Παράλληλα, η κατασκευή και η λειτουργία της διάταξης ανέδειξαν τη σημασία της ολοκληρωμένης

προσέγγισης που συνδυάζει ηλεκτρονικά ισχύος, αισθητήρες, μηχανικό σχεδιασμό, λογισμικό ελέγχου και απομακρυσμένη παρακολούθηση δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

[1] Ι. Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος*, 2η έκδ., Εκδόσεις Τζιόλα, 2019.

Datasheets και τεχνικά εγχειρίδια

[2] ApolloTECK GmbH, *ApolloTECK-M25WP Mono 25Wp Solar Panel Data Sheet*.

[3] Victron Energy, *BlueSolar Charge Controllers MPPT 75/10, 75/15, 100/15, 100/20 Datasheet*.

[4] Espressif Systems, *ESP32-S3 Series Datasheet*.

[5] Texas Instruments, *INA260 Precision Digital Current and Power Monitor with Low-Drift, Precision Integrated Shunt Datasheet*.

[6] DFRobot, *Gravity: Digital 1-to-8 I2C Multiplexer, SKU: DFR0576*.

[7] Texas Instruments, *TCA9548A Low-Voltage 8-Channel I2C Switch with Reset Datasheet*.

[8] Analog Devices / Maxim Integrated, *DS3231 Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal Datasheet*.

[9] DSServo / ANNIMOS, *DS51150-12V Digital Servo Product Datasheet*.

[10] MEAN WELL, *LRS-100 Series 100 W Single Output Switching Power Supply Datasheet*.

Διαδικτυακές πηγές και τεκμηρίωση λογισμικού

[11] Google, *Firestore Documentation*.

[12] Google Cloud, *BigQuery Documentation*.

[13] Grafana Labs, *Grafana Documentation*.

[14] Open-Meteo, *Historical Weather API Documentation*.

[15] timeanddate, *Sunrise and Sunset Calculator / Sun Data*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Κώδικας λειτουργίας ESP32-S3

```
#include <RTCLib.h>
#include <Wire.h>
#include <ESP32Servo.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_INA260.h>
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <ArduinoJson.h>
#include <time.h>

const char *ssid = "TP-Link_70A1";
const char *password = "17852951";
const char *serverURL = "https://save-sensor-data-vrfe6ghn7a-uc.a.run.app";

const char* ntpServer1 = "pool.ntp.org";
const char* ntpServer2 = "time.google.com";

// Ελλάδα: EET/EEST με αυτόματο DST
const char* tzInfo = "EET-2EEST,M3.5.0/3,M10.5.0/4";

// #include <Adafruit_INA219.h>

#define SERVO_AZ_PIN 18 //20
#define SERVO_ZEN_PIN 19 //21

// ESP32 I2C pins
#define SDA_PIN 8
#define SCL_PIN 9

#define TCA_ADDR 0x70

RTC_DS3231 rtc;
Servo servo_az;
Servo servo_zen;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

Adafruit_INA260 ina1;
Adafruit_INA260 ina2;
Adafruit_INA260 ina3;
Adafruit_INA260 ina4;
Adafruit_INA260 ina5;
Adafruit_INA260 ina6;

int DD, MM, YY, HH, LL, C, N, D1 = 3, a, b, z;

double fRad = 40.6 * PI / 180; //latitude σε rad
double l = 22.9; //longitude σε μοίρες

float TrackingBattV, TrackingBattC, TrackingPanelV, TrackingPanelC,
TrackingLoadV, TrackingLoadC; // metablites global gia tracking panel
float FixedBattV, FixedBattC, FixedPanelV, FixedPanelC, FixedLoadV,
FixedLoadC; // metablites global gia fixed panel
```

```

double dRad, dDeg, ws, Tsr, Tss, EqT, Tsr_local, Tss_local; //
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΟΥ ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΡΑ
double Tsolar, wRad, sb, bRad, bDeg, aDeg, cz, zRad, zDeg, Tlocal, UT; //
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΟΥ ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΡΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΩΡΑ
int declination;

/*****
*****/
// FUNCTION CALC_TIME_DATE_PARAMETERS
// diabazo time,date
// tsek gia disekto
// ypologizo arithmo meras N
// ypologismos declination kai tlocal sun
// ypologismos therinis i xeimerinis
// diorthosi offset gia ellada
// ypologismos oras anatolis disis
// metatropi toy tlocal se h/min
void calculateDailySolarParameters () {
    // ΒΛΕΠΩ ΜΗΝΑ ΜΕΡΑ ΚΑΙ ΕΤΟΣ
    DateTime now = rtc.now();
    DD = now.day();
    MM = now.month();
    YY = now.year();

    // ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝ ΤΟ ΕΤΟΣ ΕΙΝΑΙ ΔΙΣΕΚΤΟ C=1 ΑΝ ΕΙΝΑΙ ΚΑΙ C=2 ΑΝ ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ
    if (YY % 4 == 0) {
        if (YY % 100 == 0) {
            if (YY % 400 == 0) {
                C = 1;
            } else C = 2;
        } else C = 1;
    } else C = 2;

    // ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΜΕΡΑΣ N
    N = int(275 * MM / 9) - C * int((9 + MM) / 12) + DD - 30;

    // ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΑΛΛΑΖΟΥΝ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΡΑ
    dRad = 23.45 * sin(2 * PI * (N - 80) / 365.2422) * PI / 180; //ηλιακή απόκλιση
    δ σε rad
    dDeg = dRad * 180 / PI; //ηλιακή απόκλιση
    δ σε μοίρες, δεκαδικός
    declination = dDeg; //ηλιακή απόκλιση
    δ σε μοίρες, ακέραιος

    ws = acos(-tan(dRad) * tan(fRad)); //η τοπική ώρα που αντιστοιχεί στο ηλιακό
    μεσημέρι Tlocal-sn

    EqT = 7.5 * sin(2 * PI * (N - 2) / 365.25) - 9.87 * sin(4 * PI * (N - 80) /
    365.25); //η εξίσωση του χρόνου
    Tsr = 12 - 12 * ws /
    PI; //η ανατολή
    του ήλιου με αναφορά την ηλιακή ώρα
    Tss = 12 + 12 * ws /
    PI; //η δύση του
    ήλιου με αναφορά την ηλιακή ώρα

```

```

        // === ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΙΝΗΣ Ή ΧΕΙΜΕΡΙΝΗΣ ΩΡΑΣ ===
if ((MM > 3 && MM < 10) || (MM == 3 && DD >= 31) || (MM == 10 && DD < 31)) {
    Dl = 1; // Θερινή ώρα
} else {
    Dl = 0; // Χειμερινή ώρα
}
double time_zone_offset = Dl == 1 ? 3.0 : 2.0; // UTC+3 ή UTC+2

// ΤΟΠΙΚΗ ώρα ανατολής/δύσης
Tsr_local = Tsr + time_zone_offset - l / 15 - EqT / 60; //η ανατολή του ήλιου
με βάση την δική μας ώρα
Tss_local = Tss + time_zone_offset - l / 15 - EqT / 60; //η δύση του ήλιου
με βάση την δική μας ώρα

// Υπολογισμός πραγματικής ώρας σε δεκαδική μορφή
DateTime real_time = rtc.now();
Tlocal = ((double)real_time.hour() * 60 + (double)real_time.minute()) /
60; //η ώρα με μορφή ποσοστού
}
/*****
*****/
// Pairnei tin ora tora kai ypologizei gonies zenith kai azimuth
// metatrepei tis gonies zenith kai azimuth se gonies gia ta moter
void calculateSolarPosition () {
    UT = Tlocal - (Dl == 1 ? 3.0 : 2.0); // Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΩΡΑ. Η ΤΟΠΙΚΗ ΩΡΑ
ΕΙΝΑΙ Tlocal=UT+2 ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
    Tsolar = UT + l / 15.0 + EqT / 60.0; // Η ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΑ ΜΕ ΔΕΚΑΔΙΚΑ, ΟΧΙ ΣΕ
ΜΟΡΦΗ ΡΟΛΟΓΙΟΥ
    wRad = (15 * PI / 180) * (Tsolar - 12); // Η ΓΩΝΙΑ ΩΡΑΣ (Η γωνία του ήλιου
σε σχέση με τον μεσημβρινό)
    sb = cos(dRad) * cos(fRad) * cos(wRad) + sin(dRad) * sin(fRad);
    bRad = asin(sb); // Η ΓΩΝΙΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΣΕ RAD
    bDeg = bRad * 180 / PI;
    aDeg = 90 - bDeg; // ΓΩΝΙΑ ΖΕΝΙΘ ΣΕ RAD
    cz = (sin(dRad) * cos(fRad) - cos(dRad) * cos(wRad) * sin(fRad)) / cos(bRad);
    zRad = acos(cz); // ΓΩΝΙΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟΥ ΣΕ RAD
    if (wRad > 0) {
        zRad = 2 * PI - zRad; // ΕΛΕΓΧΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ Ζ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ
ΓΩΝΙΑ ΤΗΣ ΩΡΑΣ
    }
    //ΑΥΤΟ ΓΙΝΕΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΣ ΑΠΟ 180 ΜΟΙΡΕΣ
    zDeg = zRad * 180 / PI; // ΓΩΝΙΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟΥ ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ, (ΑΥΤΕΣ ΕΙΝΑΙ ΠΟΥ
ΘΕΛΟΥΜΕ)
    b = bDeg; // ΓΩΝΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΜΟΤΕΡ ΧΩΡΙΣ ΔΕΚΑΔΙΚΑ
    z = zDeg; // ΓΩΝΙΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΜΟΤΕΡ ΧΩΡΙΣ ΔΕΚΑΔΙΚΑ
}

void pp() {
    Serial.print(DD);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(MM);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(YY);
    Serial.print(Tlocal);
}

```

```

Serial.print(" clock format: ");
Serial.println(((int)Tlocal / 1 + (Tlocal - (int)Tlocal / 1) * 60 / 100));
Serial.print("dRad: ");
Serial.print(dRad);
Serial.print(" dDeg: ");
Serial.print(dDeg);
Serial.print(" declination: ");
Serial.println(declination);
Serial.print(" ws ");
Serial.println(ws);
Serial.print(" EqT ");
Serial.println(EqT);
Serial.print(" Tsr ");
Serial.print(Tsr);
Serial.print(" clock format: ");
Serial.println(((int)Tsr / 1 + (Tsr - (int)Tsr / 1) * 60 / 100));
Serial.print(" Tss ");
Serial.print(Tss);
Serial.print(" clock format: ");
Serial.println(((int)Tss / 1 + (Tss - (int)Tss / 1) * 60 / 100));
Serial.print(" Tsr_local ");
Serial.print(Tsr_local);
Serial.print(" clock format: ");
Serial.println(((int)Tsr_local / 1 + (Tsr_local - (int)Tsr_local / 1) * 60 /
100));
Serial.print(" Tss_local ");
Serial.print(Tss_local);
Serial.print(" clock format: ");
Serial.println(((int)Tss_local / 1 + (Tss_local - (int)Tss_local / 1) * 60 /
100));
Serial.print(" UT ");
Serial.println(UT);
Serial.print(" Tsolar ");
Serial.println(Tsolar);
Serial.print(" wRad ");
Serial.println(wRad);
Serial.print(" sb ");
Serial.println(sb);
Serial.print("bRad: ");
Serial.print(bRad);
Serial.print(" bDeg: ");
Serial.print(bDeg);
Serial.print(" aDeg: ");
Serial.println(aDeg);
Serial.print("zRad: ");
Serial.print(zRad);
Serial.print(" zDeg: ");
Serial.println(zDeg);
}

void pp2() {
  Serial.println(
    String("Tracking Panel: ") + " Battery V " + String(TrackingBattV, 3) + "
Battery C " + String(TrackingBattC, 3) + " Panel V " + String(TrackingPanelV,
3) + " Panel C" + String(TrackingPanelC, 3) + " Load V" + String(TrackingLoadV,
3) + " Load C" + String(TrackingLoadC, 3));
}

```

```

    Serial.println(
        String("    Fixed Panel: ") + " Battery V " + String(FixedBattV, 3) + "
Battery C " + String(FixedBattC, 3) + " Panel V " + String(FixedPanelV, 3) + "
Panel C" + String(FixedPanelC, 3) + " Load V" + String(FixedLoadV, 3) + " Load
C" + String(FixedLoadC, 3));
}

// Επιλογή καναλιού στο TCA9548A
void tcaSelect(uint8_t channel) {
    if (channel > 7) return; // ο TCA έχει κανάλια 0-7
    Wire.beginTransmission(TCA_ADDR);
    Wire.write(1 << channel); // ενεργοποιεί μόνο το συγκεκριμένο κανάλι
    Wire.endTransmission();
}
// Αρχικοποίηση ενός INA260 σε συγκεκριμένο κανάλι
bool beginOnChannel(Adafruit_INA260 &ina, uint8_t channel, const char *name)
{
    tcaSelect(channel);
    delay(5); // μικρή καθυστέρηση για σταθεροποίηση I2C

    if (!ina.begin()) { // default διεύθυνση 0x40
        Serial.print(name);
        Serial.println(" FAIL (no ACK)");
        return false;
    } else {
        Serial.print(name);
        Serial.println(" OK");
        return true;
    }
}

// Ανάγνωση δεδομένων από ένα INA260 σε συγκεκριμένο κανάλι
void readOnChannel(Adafruit_INA260 &ina, uint8_t channel, const char *name) {
    tcaSelect(channel);
    delay(2);

    switch (channel) {
        case 0:
            TrackingBattV = ina.readBusVoltage() / 1000.0; // Volts
            TrackingBattC = ina.readCurrent(); // mA
            break;
        case 1:
            TrackingPanelV = ina.readBusVoltage() / 1000.0; // Volts
            TrackingPanelC = ina.readCurrent(); // mA
            break;
        case 2:
            TrackingLoadV = ina.readBusVoltage() / 1000.0; // Volts
            TrackingLoadC = ina.readCurrent(); // mA
            break;
        case 3:
            FixedBattV = ina.readBusVoltage() / 1000.0; // Volts
            FixedBattC = ina.readCurrent(); // mA
            break;
        case 4:
            FixedPanelV = ina.readBusVoltage() / 1000.0; // Volts

```

```

        FixedPanelC = ina.readCurrent();           // mA
        break;
    case 5:
        FixedLoadV = ina.readBusVoltage() / 1000.0; // Volts
        FixedLoadC = ina.readCurrent();           // mA
        break;
    default:
        Serial.print("code shit");
        break;
    }
}

void system_init() {

    Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN);

    //LCD initialization
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.clear();

    //Servo Initialazation
    servo_az.attach(SERVO_AZ_PIN);
    servo_zen.attach(SERVO_ZEN_PIN);

    //rtc Initialazation
    rtc.begin();

    //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

    //Serial communication Initialazation
    Serial.begin(115200);
    delay(200);

    // Αρχικοποίηση αισθητήρων (κανάλια 0,1,2,3,4,5)
    beginOnChannel(ina1, 0, "INA1 (CH0)");
    beginOnChannel(ina2, 1, "INA2 (CH1)");
    beginOnChannel(ina3, 2, "INA3 (CH2)");
    beginOnChannel(ina4, 3, "INA1 (CH3)");
    beginOnChannel(ina5, 4, "INA2 (CH4)");
    beginOnChannel(ina6, 5, "INA3 (CH5)");

    WiFi.begin(ssid, password);

    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(1000);
        Serial.println("Connecting...");
    }
    Serial.println("WiFi connected");

    syncTimeFromNTP_and_UpdateRTC();
}

void send_to_cloud() {

```

```

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    HTTPClient http;
    http.begin(serverURL);
    http.addHeader("Content-Type", "application/json");

    StaticJsonDocument<512> doc;

    // ---- SEND 12 VALUES ----
    doc["TrackingBattV"] = TrackingBattV;
    doc["TrackingBattC"] = TrackingBattC;
    doc["TrackingPanelV"] = TrackingPanelV;
    doc["TrackingPanelC"] = TrackingPanelC;
    doc["TrackingLoadV"] = TrackingLoadV;
    doc["TrackingLoadC"] = TrackingLoadC;

    doc["FixedBattV"] = FixedBattV;
    doc["FixedBattC"] = FixedBattC;
    doc["FixedPanelV"] = FixedPanelV;
    doc["FixedPanelC"] = FixedPanelC;
    doc["FixedLoadV"] = FixedLoadV;
    doc["FixedLoadC"] = FixedLoadC;

    String jsonData;
    serializeJson(doc, jsonData);
    Serial.println("Sending JSON:");
    Serial.println(jsonData);

    int responseCode = http.POST(jsonData);
    Serial.printf("Response: %d\n", responseCode);
    http.end();
}
}
void readSensors() {
    readOnChannel(ina1, 0, "INA1 (CH0)");
    readOnChannel(ina2, 1, "INA2 (CH1)");
    readOnChannel(ina3, 2, "INA3 (CH2)");
    readOnChannel(ina4, 3, "INA1 (CH3)");
    readOnChannel(ina5, 4, "INA2 (CH4)");
    readOnChannel(ina6, 5, "INA3 (CH5)");
}

bool syncTimeFromNTP_and_UpdateRTC() {
    configTzTime(tzInfo, ntpServer1, ntpServer2);

    struct tm timeinfo;
    for (int i = 0; i < 20; i++) {
        if (getLocalTime(&timeinfo, 500)) break;
    }
    if (!getLocalTime(&timeinfo)) {
        Serial.println("NTP FAILED: no time");
        return false;
    }
}

// ΓΡΑΨΕ ΤΟΠΙΚΗ ΩΡΑ ΣΤΟ RTC (όπως πριν)
rtc.adjust(DateTime(
    timeinfo.tm_year + 1900,

```

```

        timeinfo.tm_mon + 1,
        timeinfo.tm_mday,
        timeinfo.tm_hour,
        timeinfo.tm_min,
        timeinfo.tm_sec
    ));

    Serial.printf("Local time: %04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d\n",
        timeinfo.tm_year + 1900, timeinfo.tm_mon + 1, timeinfo.tm_mday,
        timeinfo.tm_hour, timeinfo.tm_min, timeinfo.tm_sec);

    return true;
}

void setup() {

    system_init();
}

void loop() {

    calculateDailySolarParameters ();
    calculateSolarPosition ();

    //*****
    //*****//
    // ΦΑΣΗ 1 : 00:01 - ΑΝΑΤΟΛΗ ΗΛΙΟΥ
    while (Tlocal < Tsr_local) {
        calculateDailySolarParameters ();
        calculateSolarPosition ();
        readSensors();
        //servo_zen.write(100);
        //servo_az.write(130);

        // Διαβάζουμε όλους τους αισθητήρες με τη σειρά

        pp2();
        pp();
        send_to_cloud();
        Serial.println("-----");
        Serial.println("WHILE1");

        delay(10000);
    }
    //*****
    //*****//
    // ΦΑΣΗ 2 : Ανατολή - Δύση
    while (Tsr_local <= Tlocal && Tlocal <= Tss_local) {

        calculateDailySolarParameters ();
        calculateSolarPosition ();

        // Διαβάζουμε όλους τους αισθητήρες με τη σειρά
        readSensors();
        pp2();
    }
}

```

```

pp();

send_to_cloud();
Serial.println("-----");
Serial.println("WHILE2");

delay(10000);

//Mapping για servo_zen (0-90 μοίρες) γωνία ανύψωσης
int zen_mapped = map(b, 0, 90, 65, 140); //0->65 και 90->140
zen_mapped = constrain(zen_mapped, 0, 180); // προληπτικά για out-of-bounds

// Mapping για servo_az (0-270 μοίρες) δύση-ανατολή
int adjusted_az = int(z + 0) % 360;
int az_mapped = map(adjusted_az, 90, 270, 155, 25); //90->155 και 270->25
az_mapped = constrain(az_mapped, 0, 300); // προληπτικά για out-
of-bounds

// Αναστροφή γωνίας αν χρειάζεται
// az_mapped = 180 - az_mapped;

servo_zen.write(zen_mapped);
servo_az.write(az_mapped);
}
//*****
*****//
// ΦΑΣΗ 3 : Δύση - 23:59
while (Tss_local < Tlocal && Tlocal < 23.99) {
  calculateDailySolarParameters ();
  calculateSolarPosition ();

  // servo_zen.write(100);
  // servo_az.write(130);

  // Διαβάζουμε όλους τους αισθητήρες με τη σειρά
  readSensors();
  send_to_cloud();
  pp2();
  pp();

  Serial.println("-----");
  Serial.println("WHILE3");
  delay(10000);
}
}

```