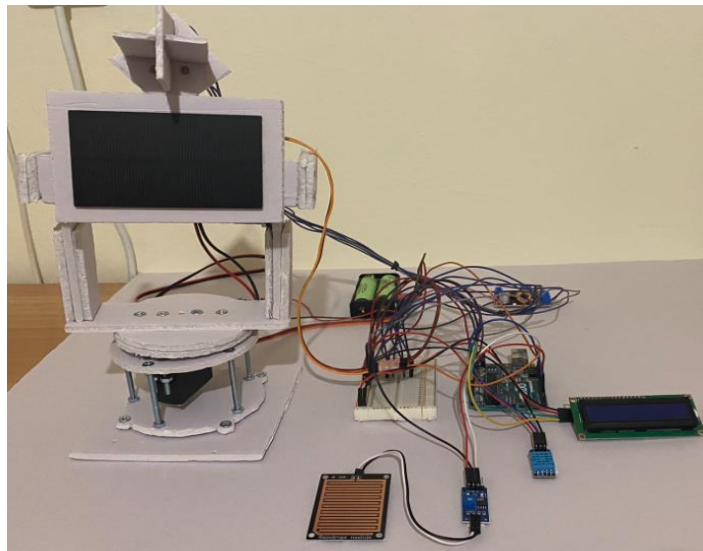


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ηλιακό σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα με
αισθητήρα καιρού»



Της φοιτήτριας
Καρατζίδου Χριστίνα
Αρ. Μητρώου: 517050

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο Γιακουμής Άγγελος
Βαθμίδα Λέκτορας

Ημερομηνία: Σεπτέμβριος 2024

Τίτλος Δ.Ε. Ηλιακό σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα με αισθητήρα καιρού

Κωδικός Δ.Ε. 24102

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Καρατζίδου Χριστίνα

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Άγγελος Γιακουμής

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 08-01-2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 10-09-2024

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 της φοιτήτριας Καρατζίδου Χριστίνα που την εκτόνησε. 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.

*«Στην οικογένεια μου και σε όλους όσους με
στήριξαν στην υλοποίηση αυτής της εργασίας»*

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί την μελέτη και την κατασκευή ενός ηλεκτρονικού συστήματος, το οποίο εντοπίζει την θέση του ήλιου και υιοθετεί την πιο ενεργειακά συμφέρουσα γωνία χρησιμοποιώντας ένα σύστημα διπλού άξονα που ανιχνεύει φως. Σε αυτό το σύστημα θα προσθέσω έναν αισθητήρα καιρού για επιπρόσθετες λειτουργίες.

Η επιλογή αυτής της πτυχιακής έγινε με βάση δύο κύριους λόγους. Αρχικά, την αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμες ενεργειακές λύσεις και πιο συγκεκριμένα στην ηλιακή ενέργεια ο τομέας της παρακολούθησης διπλού άξονα ο οποίος προσφέρει μια πρωτοποριακή προσέγγιση για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των ηλιακών συστημάτων.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση του αισθητήρα καιρού προσφέρει προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες συνδυάζοντας προσιτή ενέργεια και έξυπνο έλεγχο.

Το όφελος που αναμένω από την πτυχιακή αυτή είναι η εμβάθυνση της γνώσης μου στην ανάπτυξη προηγμένων ηλιακών συστημάτων καθώς και την παροχή πρακτικών λύσεων για την αντιμετώπιση των προκλήσεων στον τομέα της ανανεώσιμης ενέργειας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναλύει το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα με ενσωματωμένο αισθητήρα καιρού. Ξεκινώντας αναλύεται η θεωρητική βάση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στην συνέχεια, εξετάζεται η λειτουργία του μέγιστου σημείου ισχύος και των διαφόρων κατηγοριών μετατροπών ισχύος. Η εργασία προχωρά στην παρουσίαση των συστημάτων παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας και των διαφόρων τύπων hardware που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του πρακτικού κομματιού της εργασίας. Επίσης, δίνεται προσοχή στον κώδικα του συστήματος, ο οποίος επιτρέπει την αυτόματη προσαρμογή του ηλιακού πάνελ σύμφωνα με την θέση της πηγής του φωτός καθώς και τον προγραμματισμό των αισθητήρων καιρού. Συνολικά, η εργασία προβάλλει τη σημασία της τεχνολογίας παρακολούθησης στη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας των ηλιακών ενεργειακών συστημάτων, παρέχοντας ένα πρακτικό παράδειγμα που μπορεί να εφαρμοστεί για την προώθηση της βιωσιμότητας.

«Dual axis solar tracking system with weather sensor»

«Karatzidou Christina»

Abstract

The present study examines the design and implementation of a dual-axis solar tracking system with an integrated weather sensor. It begins by analyzing the theoretical foundations of renewable energy sources and photovoltaic systems. Subsequently, the operation of the maximum power point and various categories of power converters is explored. The study then proceeds to present solar tracking systems and the various types of hardware utilized in creating the practical aspect of the work. Attention is also given to the system's code, which enables the automatic adjustment of the solar panel according to the position of the light source, as well as the programming of weather sensors. Overall, the study highlights the importance of tracking technology in improving the performance and efficiency of solar energy systems, providing a practical example that can be applied to promote sustainability.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κύριο Γιακουμή, τον επιβλέποντα καθηγητή αυτής της εργασίας, για την πολύτιμη βοήθεια του στην ολοκλήρωση της. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς την οικογένειά μου και όλους όσους με στήριξαν, όχι μόνο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συνομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Πρόλογος.....	1
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	1
1.3 Ηλιακή ενέργεια	3
1.3.1 Θερμική ενέργεια.....	4
1.3.2 Ηλεκτρική ενέργεια	5
1.4 Προκλήσεις στην Ηλιακή Ενέργεια	5
1.5 Εξελίξεις στην Ηλιακή Ενέργεια.....	6
1.6 Επίλογος.....	6
Κεφάλαιο 2ο: Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Ιστορική επισκόπηση φωτοβολταϊκών.....	7
2.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	9
2.4 Η Φωτοβολταϊκή κυψέλη.....	10
2.5 Επαφή p-n.....	10
2.6 Τύποι φωτοβολταϊκών.....	11
2.7 Αποθήκευση ενέργειας.....	13
2.8 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	13
2.9 Χαρακτηριστικά I-V και P-V	15
2.10 Προβλήματα σκίασης.....	16
2.11 Επίλογος.....	17
Κεφάλαιο 3ο: Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Λειτουργία του Ανιχνευτή Μέγιστης Ισχύος (MPPT)	18

3.3	Τύποι Αλγορίθμων MPPT	20
3.4	Εφαρμογές MPPT.....	22
3.5	Επίλογος.....	23
Κεφάλαιο 4ο:	Μετατροπείς Ισχύος.....	24
4.1	Εισαγωγή.....	24
4.2	Μετατροπείς Ισχύος DC-DC.....	24
4.2.1	Μετατροπέας Buck.....	25
4.2.2	Μετατροπέας Boost.....	26
4.2.3	Μετατροπέας Buck-Boost	27
4.2.4	Μετατροπέας Cuk.....	28
4.2.5	Μετατροπέας SEPIC	29
4.2.6	Μετατροπέας Flyback	30
4.3	Αντιστροφέας DC/AC.....	31
4.4	Επίλογος.....	32
Κεφάλαιο 5ο:	Συστήματα παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας	34
5.1	Εισαγωγή.....	34
5.2	Ηλιακή γεωμετρία	34
5.3	Ηλιακά συστήματα παρακολούθησης.....	35
5.4	Εξαρτήματα ηλιακού συστήματος παρακολούθησης.....	36
5.5	Τύποι συστημάτων παρακολούθησης	37
5.5.1	Παθητικό σύστημα ανίχνευσης ηλίου	37
5.5.2	Ενεργό σύστημα ανίχνευσης ηλίου	38
5.5.2.1	Σύστημα παρακολούθησης μονού άξονα.....	39
5.5.2.2	Σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα.....	40
5.5.3	Χρονολογικό σύστημα ανίχνευσης ηλίου	42
5.6	Επίλογος.....	42
Κεφάλαιο 6ο:	Hardware.....	43
6.1	Εισαγωγή.....	43
6.2	Arduino.....	43
6.2.1	Arduino Uno.....	44
6.2.2	Arduino Modules.....	44
6.2.3	Arduino IDE	44
6.2.4	Libraries.....	45
6.3	Φωτοβολταϊκό Πάνελ.....	45
6.4	Σερβοκινητήρες.....	45

6.5	Αισθητήρας DHT11	47
6.6	Αισθητήρας ανίχνευσης σταγόνων βροχής	48
6.7	Φωτοαντιστάσεις (LDR)	49
6.8	Ο Φορτιστής Micro Usb TP4056	51
6.9	Μετατροπέας Buck DC-DC	52
6.10	Μπαταρία	53
6.11	LCD Οθόνη	53
6.12	Block Διάγραμμα Κυκλώματος.....	54
6.13	Προσομοίωση Συστήματος	55
Κεφάλαιο 7ο: Software		56
7.1	Εισαγωγή.....	56
7.2	Arduino Code	56
7.2.1	Διάγραμμα Ροής Προγράμματος (Flowchart)	56
7.2.2	LDR Code.....	60
7.2.3	Servo Code	60
7.2.4	DHT11 Code	62
7.2.5	Rain State Detection Code.....	63
7.2.6	LCD Code.....	64
Κεφάλαιο 8ο: Η κατασκευή.....		66
8.1	Εισαγωγή.....	66
8.2	Κατασκευή μακέτας	66
8.3	Λίστα υλικών.....	68
8.4	Σύγκριση μετρήσεων επίπεδου φωτοβολταϊκού και συστήματος διπλού άξονα	69
8.5	Σύγκριση με προϊόν εμπορίου	75
Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα		76
9.1	Εισαγωγή.....	76
9.2	Προβλήματα	76
9.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		81

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Ταξινόμηση χωρών της ΕΕ όσον αφορά τη χρήση ΑΠΕ το 2020 [9]	2
Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατάταξη πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, 1971-2019 [10]	3
Εικόνα 1.3: Τυπικός επίπεδος συλλέκτης [11]	4
Εικόνα 1.4: Το μεγαλύτερο πλωτό ηλιακό πάρκο στην Ευρώπη, Πορτογαλία (Πηγή: https://t.ly/xlokG)	5
Εικόνα 2.1: Τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών σε χρονοδιάγραμμα [12]	7
Εικόνα 2.2: Το σύστημα ισχύος 1 MW που κατασκευάστηκε το 1982 από την Arco Solar στην Hesperia της Καλιφόρνια, ήταν το πρώτο ηλιακό πάρκο στον κόσμο. [16]	8
Εικόνα 2.3: Δομή ηλιακής κυψέλης [17]	9
Εικόνα 2.4: Η επαφή p-n [17]	11
Εικόνα 2.5: Γενιές φωτοβολταϊκών κυττάρων [12]	12
Εικόνα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού πάνελ [21]	13
Εικόνα 2.7: Καμπύλη Ρεύματος- Τάσης (V-I) [19]	15
Εικόνα 2.8: Καμπύλη Ισχύς- Τάσης (V-I) [19]	16
Εικόνα 3.1: Καμπύλη I-V για διαφορετικές ακτινοβολίες [25]	19
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα ελέγχου φόρτισης με MPPT [24]	20
Εικόνα 3.3: Βασικό διάγραμμα ροής του συμβατικού P&O [29]	21
Εικόνα 3.4: Κυριότερα χαρακτηριστικά τεχνικών MPPT [28]	22
Εικόνα 4.1: Επισκόπηση μετατροπέων DC-DC για Φ/Β σύστημα [30]	25
Εικόνα 4.2: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Buck [30]	26
Εικόνα 4.3: : Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Boost [30]	27
Εικόνα 4.4: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Buck-Boost [30]	28
Εικόνα 4.5: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Cuk [30]	29
Εικόνα 4.6: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC SEPIC [30]	30
Εικόνα 4.7: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Flyback [30]	31
Εικόνα 4.8: Δομή φωτοβολταϊκού συστήματος [23]	32
Εικόνα 5.1: Ηλιακές γωνίες [34]	35
Εικόνα 5.2: Παθητικό σύστημα ανίχνευσης [37]	38
Εικόνα 5.3: Ενεργό σύστημα ανίχνευσης [37]	39
Εικόνα 5.4: Οριζόντιος και κάθετος ηλιακός ανιχνευτής μονού άξονα (Πηγή: https://t.ly/4J8S2)	40
Εικόνα 5.5: (a) Ανιχνευτής Tip-tilt , (b) Ανιχνευτής αζιμουθίου-ανύψωσης [37]	41
Εικόνα 6.1: Arduino Uno [47]	43
Εικόνα 6.2: Εσωτερικό σερβοκινητήρα [Πηγή: https://t.ly/OF05n]	46
Εικόνα 6.3: Συνδεσμολογία Arduino - Servo motors	47
Εικόνα 6.4: Συνδεσμολογία Arduino - DHT11	48
Εικόνα 6.5: Συνδεσμολογία Arduino - Rain drop sensor	49
Εικόνα 6.6: Δομή φωτοαντίστασης [43]	50
Εικόνα 6.7: Συνδεσμολογία Arduino - LDR	50
Εικόνα 6.8: Διάταξη των LDR [46]	51
Εικόνα 6.9: Συνδεσμολογία Solar cell - TP4056	52
Εικόνα 6.10: Συνδεσμολογία TP4056 - Boost Converter	53
Εικόνα 6.11: Συνδεσμολογία Arduino - I2C LCD	54
Εικόνα 6.12: Block Διάγραμμα Κυκλώματος	55
Εικόνα 6.13: Ολοκληρωμένο κύκλωμα	56

Εικόνα 7.1: Setup Flowchart	57
Εικόνα 7.2: Main loop Flowchart 1.....	58
Εικόνα 7.3: Main loop Flowchart 2.....	59
Εικόνα 7.4: Κώδικας ενδείξεων LDR	60
Εικόνα 7.5: Κώδικας δήλωσης μεταβλητών σερβοκινητήρων	61
Εικόνα 7.6: Έλεγχος σερβομηχανισμού.....	62
Εικόνα 7.7: Κώδικας ένδειξης Θερμοκρασίας-Υγρασίας	63
Εικόνα 7.8: Κώδικας ένδειξης κατάστασης βροχής.....	64
Εικόνα 7.9: Κώδικας οθόνης LCD.....	65
Εικόνα 8.1: Σχεδίαση κομματιών μακέτας.....	66
Εικόνα 8.2: Διάταξη των LDR και φωτοβολταϊκού.....	67
Εικόνα 8.3: Ολοκληρωμένο σύστημα 1	68
Εικόνα 8.4: Ολοκληρωμένο σύστημα 2	68
Εικόνα 8.5: Διαγραμμα της παραγομενης ισχυος	74
Εικόνα 8.6: Διαγραμμα της παραγομενης ισχυος χωρις φορτιο	75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κοστολόγηση κατασκευής	69
Πίνακας 2: Μετρησεις Dual axis tracker- Fixed solar panel.....	71
Πίνακας 3: Μετρησεις ισχυος και ενεργειας.....	73

Συντομογραφίες

AC	Alternating Current
ANN	Artificial Neural Network
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BCM	Boundary Conduction Mode
BD	Blocking Diode
BP Diodes	Bypass Diode
C	Χωρητικότητα
D	Κύκλος Λειτουργίας
DC	Direct Current
FC	Flyback
FF	Συντελεστής Πλήρωσης
FLC	Fuzzy Logic Control
HC	Hill Climbing
HSAT	Horizontal Single Axis Tracker
I	Ρεύμα
I/O	Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
Ib-b	Ρεύμα Εξόδου Buck-Boost
Iboost	Ρεύμα Εξόδου Boost
Ibuck	Ρεύμα Εξόδου Buck
ICSP	In-Circuit Serial Programming
Icuk	Ρεύμα Εξόδου Cuk
Id	Ρεύμα Διόδου
IDE	Integrated Development Environment
Ifc	Ρεύμα Εξόδου Flyback
II	Ρεύμα Απαγωγή
Imp	Ρεύμα στο MPP
INC	Incremental Conductance
Io	Ανάστροφο Ρεύμα Κόρου Διόδου
Iph	Φωτόρευμα
Ipn	Ρεύμα Εισόδου Μετατροπέα
Isc	Ρεύμα βραχυκυκλώματος
Isepic	Ρεύμα Εξόδου Sepic
k	Σταθερά Boltzman
kW	Kilowatt
LCD	Liquid Crystal Display
LDR	Light Dependent Resistor
LED	Light-Emitting Diode
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MW	Megawatt
n	Αριθμός Στροφών στον Ιδανικό Μετασχηματιστή DC

OCV	Open-Circuit Voltage
OP-Amp	Operational Amplifier
OPV	Organic Photovoltaics
P	Ισχύς
P&O	Perturb and Observe
PCB	Printed Circuit Board
Pmax	Μέγιστη Ισχύς
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse Width Modulation
q	Φορτίο Ηλεκτρονίων
Q	Σημείο Λειτουργίας Ηλιακού Στοιχείου
R	Αντίσταση
RCC	Ripple Correlation Control
Rin	Αντίσταση Εισόδου Μετατροπέα
RI	Αντίσταση Φορτίου
Rsh	Αντίσταση Διαρροής
SCC	Short-Circuit Current
SEPIC	Single-Ended Primary Inductor Converter
Tc	Απόλυτη Θερμοκρασία Λειτουργίας Κυττάρου
USB	Universal Serial Bus
V	Τάση
Vb-b	Τάση Εξόδου Buck-Boost
Vboost	Τάση Εξόδου Boost
Vbuck	Τάση Εξόδου Buck
Vcuk	Τάση Εξόδου Cuk
VFC	Τάση Εξόδου Flyback
Vmp	Τάση στο MPP
Voc	Τάση ανοιχτού κυκλώματος
Vpv	Τάση Εισόδου Μετατροπέα
VSAT	Vertical Single Axis Tracker
Vsepic	Τάση Εξόδου Sepic
w	Γεωγραφικό Πλάτος
α	Γωνία Ανύψωσης
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
γs	Ηλιακή Αζιμουθιακή Γωνία
δ	Γωνία Απόκλισης
Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Το παγκόσμιο ζήτημα της ενεργειακής ζήτησης συνδέεται με πολλαπλές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της εξάντλησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης τους. Αυτό αναδεικνύει την σημασία της αντιμετώπισης των ενεργειακών προβλημάτων ως μια κρίσιμη πτυχή της σύγχρονης κοινωνίας.

Η λύση αυτού του προβλήματος προϋποθέτει την προώθηση της βιώσιμης ενέργειας, την έρευνα σε νέες τεχνολογίες και την ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών, η αναβάθμιση των ενεργειακών υποδομών και η υποστήριξη της εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης αποτελούν κρίσιμα βήματα για την επίλυση αυτού του παγκόσμιου προβλήματος. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ειδικότερα η ηλιακή ενέργεια και οι τρόποι αξιοποίησης της.

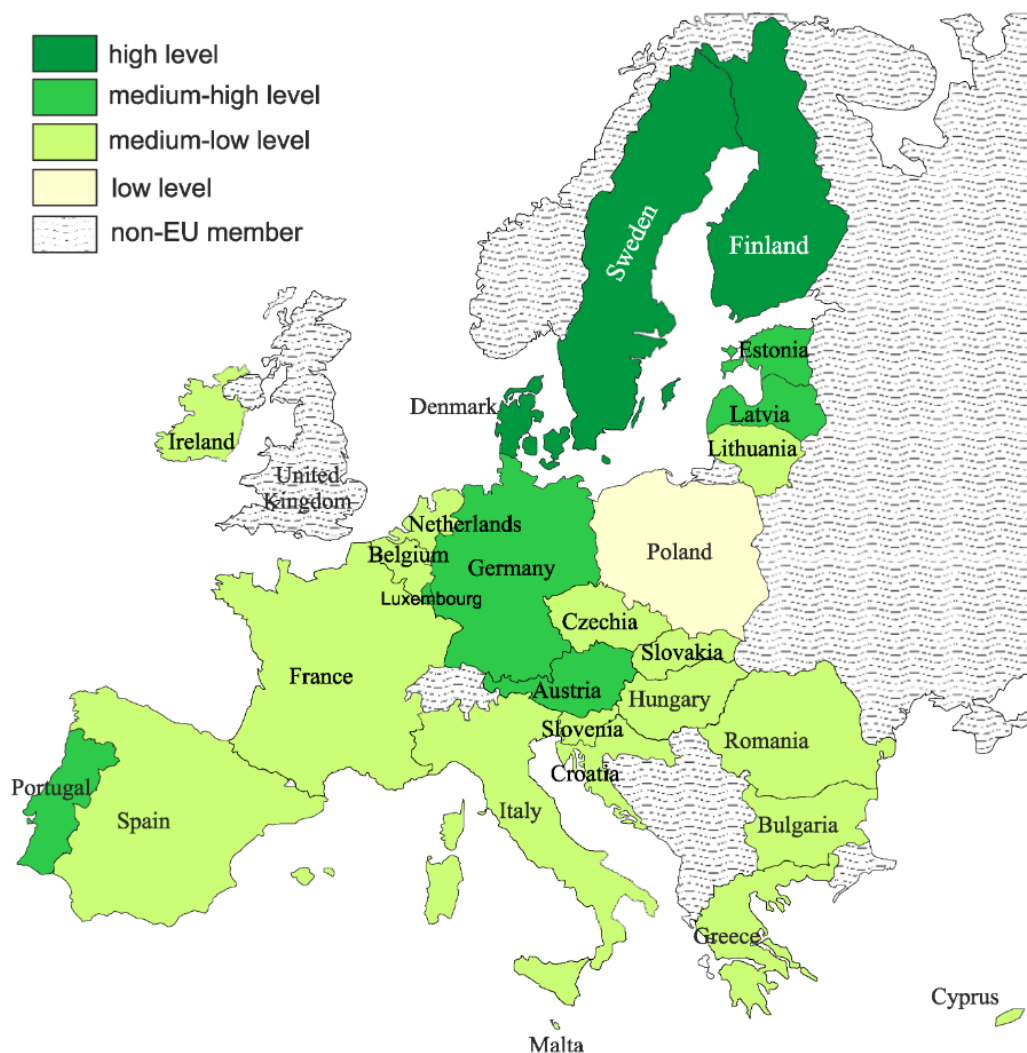
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας, που βασίζονται σε πετρέλαιο, άνθρακα και φυσικό αέριο, έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές για την οικονομία, αλλά ταυτόχρονα προκαλούν βλαβερές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η βιομάζα, η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική και η γεωθερμία, παρέχουν βιώσιμες λύσεις με την αξιοποίηση τοπικών πόρων. Επιπλέον δεν μολύνουν το περιβάλλον με εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και περιορίζουν τη χρήση ορυκτών πόρων στο μέλλον. Η διακύμανση τιμών των ορυκτών καυσίμων και η μείωση του κόστους των συστημάτων ηλιακής και αιολικής ενέργειας αποτελούν κύριο λόγο για τις αυξανόμενες επενδύσεις και την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [1,2]

Η αξιοποίηση φυσικών, απεριόριστων ενεργειακών πόρων από το περιβάλλον με στόχο τη μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια, προσδίδει πολλαπλά πλεονεκτήματα στη χρήση τους. Αρχικά επειδή χρησιμοποιούν πόρους κατευθείαν από το περιβάλλον για να παράγουν ενέργεια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν θα εξαντληθούν, κάτι που δεν μπορεί να ειπωθεί για πολλούς τύπους ορυκτών καυσίμων. Πέρα από αυτό, έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης από τις γεννήτριες που χρησιμοποιούν παραδοσιακές πηγές καυσίμων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τεχνολογία παραγωγής όπως τα ηλιακά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν ελάχιστα ή και καθόλου κινούμενα μέρη και δεν εξαρτώνται από εύφλεκτες πηγές καυσίμου για τη λειτουργία τους. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην διαφύλαξη του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οδηγούν σε χαμηλότερες εκπομπές

αερίων θερμοκηπίου από τις παραδοσιακές πηγές καυσίμων, τα οποία έχει αποδειχθεί ότι επιδεινώνουν την κλιματική αλλαγή. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας και υψηλότερες συχνότητες ακραίων καιρικών φαινομένων. Επιπλέον, η χρήση ορυκτών καυσίμων αναδεικνύει την εκπομπή αερίων θερμοκηπίου και άλλων επιβλαβών ρύπων, τα οποία συνδέονται με σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως προβλήματα αναπνευστικής και καρδιακής λειτουργίας. Αντίθετα, η επιλογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αυτών των ρύπων, προσφέροντας ένα πιο υγιεινό περιβάλλον. Τέλος, μπορούν να βοηθήσουν στην επίλυση του προβλήματος των απορριμμάτων καθώς η χρήση βιομάζας ως πηγή ενέργειας μπορεί να μειώσει την ποσότητα των απορριμμάτων που πηγαίνουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. [2,3]



Εικόνα 1.1: Ταξινόμηση χωρών της ΕΕ όσον αφορά τη χρήση ΑΠΕ το 2020 [9]

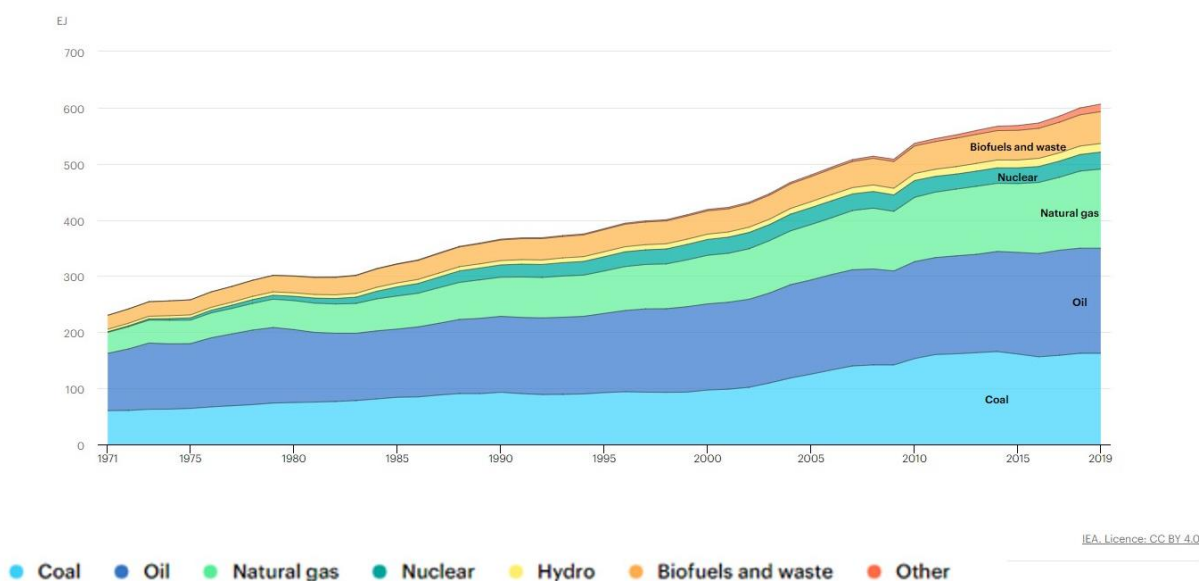
Παρά τα πολλαπλά οφέλη της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την καθημερινή τους χρήση. Λόγω της εξ ολοκλήρου εξάρτησης τους από τη γεωγραφική θέση και τις καιρικές συνθήκες, υπάρχει σημαντικός περιορισμός στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για αυτόν τον λόγο θεωρούνται ασυνεπής. Επιπλέον, έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος κατασκευής μονάδων ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας σε σύγκριση με αυτό των σταθμών παραγωγής ενέργειας ορυκτών. Όσον αφορά τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, οι μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν πολύ μεγαλύτερη έκταση από τις θερμοηλεκτρικές μονάδες για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. [2,3]

Συνεπώς, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα πλεονεκτήματα της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπερτερούν των μειονεκτημάτων, προσφέροντας σημαντικά οφέλη για τη συνολική κοινωνία.

1.3 Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος είναι μια σημαντική ανεξάντλητη πηγή ενέργειας για τον πλανήτη Γη. Η ηλιακή ενέργεια, είναι ικανή να παράγει θερμότητα, να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις ή να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Είναι η πιο άφθονη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς, ο ήλιος εκπέμπει με ρυθμό $3,8 \times 10^{23}$ kW, εκ των οποίων περίπου $1,8 \times 10^{14}$ kW αναχαιτίζονται από τη γη. Επιπλέον, παρέχει σταθερή και αυξανόμενη απόδοση επειδή είναι ανεξάντλητη. [4,5,6]

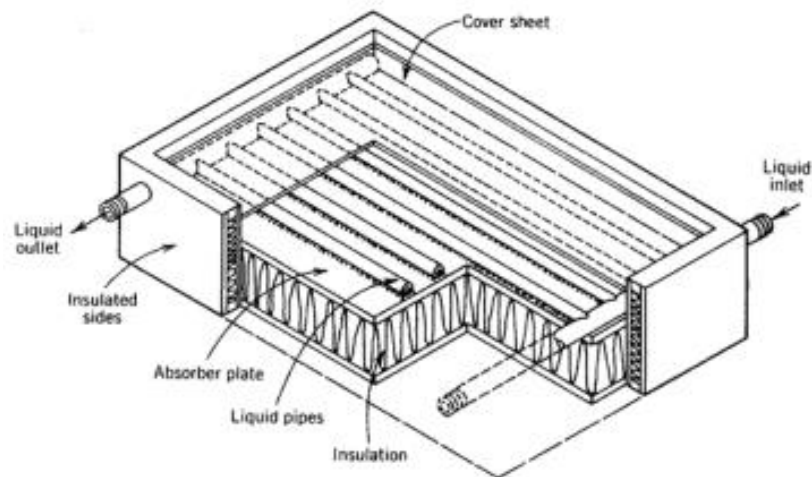


Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατάταξη πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, 1971-2019 [10]

Σε ένα θεωρητικό επίπεδο, η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει επαρκώς τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες, εάν οι τεχνολογίες για τη συλλογή και χρήση της ήταν πλήρως αναπτυγμένες. Παρότι υπάρχει υψηλό δυναμικό και αυξημένη ευαισθητοποίηση, η πραγματική συμβολή της ηλιακής ενέργειας στον παγκόσμιο ενεργειακό εφοδιασμό παραμένει αμελητέα. Αυτό γίνεται επειδή το κόστος συλλογής, μετατροπής και αποθήκευσης είναι μεγάλο και εξακολουθεί να περιορίζει την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. [4,5]

1.3.1 Θερμική ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια ή ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, για τη δέσμευση της ηλιακής ενέργειας και τη μετατροπή της σε θερμική χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Υπάρχουν οι επίπεδοι συλλέκτες οι οποίοι πρέπει να έχουν μεγάλη έκταση επειδή η ένταση της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της Γης είναι χαμηλή. Οι επίπεδοι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση νερού σε ηλιακούς θερμοσίφωνες και συστήματα θέρμανσης. Αποτελούνται από μαυρισμένη μεταλλική πλάκα που καλύπτεται από ένα ή δύο φύλλα γυαλιού. Η πλάκα θερμαίνεται από το ηλιακό φως, με τη θερμότητα να μεταφέρεται σε αέρα ή νερό (φέροντα ρευστά) που κυκλοφορεί πίσω από αυτήν. Η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί για χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συννεφιασμένες ημέρες. Οι επίπεδοι συλλέκτες επίσης χρησιμοποιούνται για θέρμανση χώρου με ζεστό νερό που κυκλοφορεί σε σωλήνες σε πατώματα και οροφές. Οι θερμοκρασίες των φερόντων ρευστών κυμαίνονται συνήθως από 66 έως 93 °C. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 20 έως 80%, ανάλογα με τον σχεδιασμό.



Εικόνα 1.3: Τυπικός επίπεδος συλλέκτης [11]

Μια ακόμη μέθοδος μετατροπής θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται στις ηλιακές λίμνες, οι οποίες είναι σχεδιασμένες για τη συλλογή και αποθήκευση ηλιακής ενέργειας, παρέχοντας θερμότητα για διάφορες βιομηχανικές χρήσεις και θέρμανση χώρων. Σε περιπτώσεις που χρειάζεται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλιακοί φούρνοι επίσης χρησιμοποιούνται για το μαγείρεμα, συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως και μετατρέποντάς το σε θερμότητα, χωρίς τη χρήση άλλων πηγών ενέργειας. [5]



Εικόνα 1.4: Το μεγαλύτερο πλωτό ηλιακό πάρκο στην Ευρώπη, Πορτογαλία (Πηγή: <https://t.ly/xlokG>)

1.3.2 Ηλεκτρική ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια από ηλιακές κυψέλες (φωτοβολταϊκά στοιχεία). Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά θεωρούνται ως μια από τις καθαρότερες και ασφαλέστερες τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε μεγάλη κλίμακα (gigawatt). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής έχει εξελιχθεί σημαντικά από την ανακάλυψή της στον 19ο αιώνα, καλύπτοντας τόσο τις κυψέλες όσο και τις αποδόσεις, με επιρροές από ποικίλους επιστημονικούς τομείς και δυναμική ανάπτυξη στην αγορά παραγωγής και εγκατάστασης. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2ο. [5,7]

1.4 Προκλήσεις στην Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια αναδύεται ως σταθερή πηγή ενέργειας που μπορεί να διασφαλίσει ενεργειακή ασφάλεια και ανεξαρτησία. Αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την κοινωνικοοικονομική ευημερία, επηρεάζοντας εταιρείες, κοινωνίες, κράτη και έθνη. Παρόλο που η ηλιακή ενέργεια έχει ενσωματωθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές χώρες, υπάρχουν περιορισμοί και οφέλη που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Ένα σημαντικό εμπόδιο για την ηλιακή ενέργεια είναι το υψηλό κόστος αρχικής εγκατάστασης. Η διάρκεια ζωής των μπαταριών και η ασφαλής ανακύκλωση τους είναι επιπλέον ανησυχιές όσον αφορά τα συστήματα ηλιακής ενέργειας. Τέλος, η ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από την ηλιοφάνεια, οπότε

υπάρχουν περιορισμοί σε περιοχές με ασταθείς καιρικές συνθήκες. Παρά τα εμπόδια αυτά, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η ανοικτή συζήτηση για τη βελτίωση της ηλιακής ενέργειας αναμένεται να ανταποκριθούν σε αυτές τις προκλήσεις και να διαμορφώσουν ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον [4].

1.5 Εξελίξεις στην Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια έχει το δυναμικό να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Νέες τεχνολογίες όπως οι κεραίες ναοκλίμακας, θερμοδυναμικοί κύκλοι και ηλιακή φωτοκαταλυτική αποτοξίνωση προσφέρουν καινοτόμες λύσεις. Πιο συγκεκριμένα:

- Κεραίες ναοκλίμακας: Μια καινοτόμα τεχνολογία που αξιοποιεί κεραίες ναοκλίμακας για να μετατρέψει απευθείας το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, με δυνατή υψηλή απόδοση που φτάνει το 80–90%.
- Νέοι θερμοδυναμικοί κύκλοι: Καινοτόμοι κύκλοι για ηλιακή θερμική ενέργεια που μπορούν να μειώσουν το κόστος κεφαλαίου κατά 50%.
- Ηλιακή φωτοκαταλυτική οξείδωση: Μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό βιομηχανικών λυμάτων, πόσιμο νερό, εδάφους και αέρα, εκμεταλλευόμενη την ηλιακή φωτοκαταλυτική διαδικασία.

Παρά τις προκλήσεις, αυτές οι εξελίξεις ανοίγουν νέες προοπτικές για την ηλιακή ενέργεια στην παροχή βιώσιμης και αποδοτικής λύσης στις ενεργειακές ανάγκες μας. [8]

1.6 Επίλογος

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, τελειώσαμε μια σημαντική αναδρομή στον κόσμο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και, ειδικότερα, της ηλιακής ενέργειας. Από τη θερμική ενέργεια μέχρι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρακολουθήσαμε τις προκλήσεις και τις πιθανές εξελίξεις αυτών των τεχνολογιών.

Καθώς συνεχίζουμε για στο επόμενο κεφάλαιο, προβλέπουμε μια βαθύτερη κατανόηση της τεχνολογίας στον τομέα της ηλιακής ενέργειας. Το επόμενο κεφάλαιο θα επικεντρωθεί ειδικότερα στα φωτοβολταϊκά συστήματα, αναλύοντας τις προκλήσεις και τις εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα.

Είναι σαφές πως βαδίζουμε προς ένα μέλλον όπου η ηλιακή ενέργεια θα διαδραματίσει ολόένα και πιο κρίσιμο ρόλο στην παγκόσμια ενεργειακή τοποθέτηση.

Κεφάλαιο 2ο: Φωτοβολταϊκά συστήματα

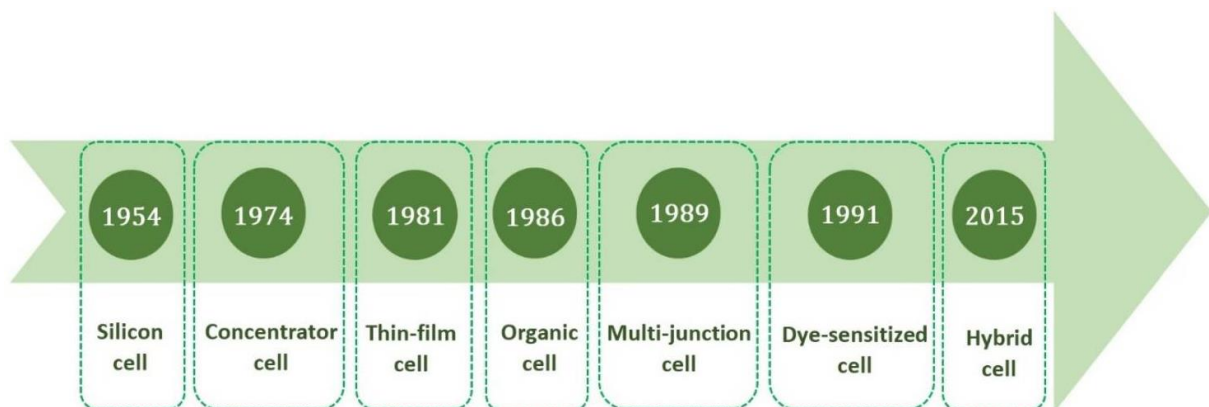
2.1 Εισαγωγή

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί τον πυρήνα της μετασχηματιστικής δύναμης που προσφέρουν στον τομέα της ενεργειακής παραγωγής. Μέσα σε αυτό το κεφάλαιο, θα εμβαθύνουμε στην τεχνολογία που διέπει τη λειτουργία αυτών των συστημάτων, αποκαλύπτοντας το πώς ακριβώς οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια.

Κατά τη διάρκεια αυτού του κεφαλαίου, θα αναλύσουμε την αρχιτεκτονική των φωτοβολταϊκών συστημάτων, εξετάζοντας τη σύνθεση τους, τους τύπους των φωτοβολταϊκών κυττάρων και τις διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Με αυτόν τον τρόπο, θα αναδείξουμε τη σημαντική συμβολή της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην επίτευξη βιώσιμων, αποτελεσματικών και φιλικών προς το περιβάλλον ενεργειακών λύσεων.

2.2 Ιστορική επισκόπηση φωτοβολταϊκών

Η ιστορία των φωτοβολταϊκών κυττάρων ξεκινά στα τέλη του 19ου αιώνα, με τον Γάλλο φυσικό Alexandre-Edmond Becquerel να ανακαλύπτει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το πρώτο βήμα προς την ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι η παρατήρησή του ότι ορισμένα υλικά παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν εκτίθενται στο φως.



Εικόνα 2.1: Τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών σε χρονοδιάγραμμα [12]

Στις αρχές του 20ου αιώνα, ερευνητές όπως ο Albert Einstein και ο Charles Fritts εξετάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και βελτιώνουν την απόδοση των κυττάρων. Ο Fritts δημιουργεί την πρώτη λειτουργική φωτοβολταϊκή κυψέλη, αλλά η απόδοσή της είναι μόνο 1%.

Κεφάλαιο 2

Κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960, ο διαστημικός αγώνας οδηγεί σε σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών, με κυβερνητικές επενδύσεις και τη δημιουργία πιο αποδοτικών κυττάρων.

Στη δεκαετία του 1970, η πετρελαϊκή κρίση ενισχύει το ενδιαφέρον για την ανανεώσιμη ενέργεια και η ανάπτυξη νέων υλικών βελτιώνει την απόδοση και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των φωτοβολταϊκών.

Στον 21ο αιώνα, η τεχνολογία φωτοβολταϊκών συνεχίζει να εξελίσσεται, με απόδοση άνω του 25% και τη χρήση νέων υλικών όπως ο περοβσκίτης και οι κβαντικές κουκκίδες.

Επίσης κατά τις αρχές του 20ου αιώνα, η έρευνα στις οργανικές φωτοβολταϊκές κυψέλες (OPV) ξεκινά με τη χρήση πολυμερών ως φωτοαγωγίμων υλικών. Στις δεκαετίες του 1970 και 1980, πρώιμες προσπάθειες με πολυμερή δίνουν χαμηλή απόδοση, αλλά τεθεί το θεμέλιο για περαιτέρω εξελίξεις. [12]

Το 1982, η ARCO Solar καθιερώνεται ως η πρώτη εταιρεία που παράγει περισσότερα από 1 MW φωτοβολταϊκών μονάδων εντός ενός έτους. Μόλις δύο χρόνια αργότερα, παρατηρείται η εγκατάσταση του πρώτου φωτοβολταϊκού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής με κλίμακα στα MW στην Καλιφόρνια. Αυτή η εγκατάσταση διαθέτει σύστημα χωρητικότητας 1 MW, χρησιμοποιώντας 108 ιχνηλάτες διπλού άξονα (dual-axis trackers). [13]



Εικόνα 2.2: Το σύστημα ισχύος 1 MW που κατασκευάστηκε το 1982 από την Arco Solar στην Hesperia της Καλιφόρνια, ήταν το πρώτο ηλιακό πάρκο στον κόσμο. [16]

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, νέα πολυμερή και υλικά μικρών μορίων βελτιώνουν την απόδοση των OPV κυττάρων σε περίπου 4%.

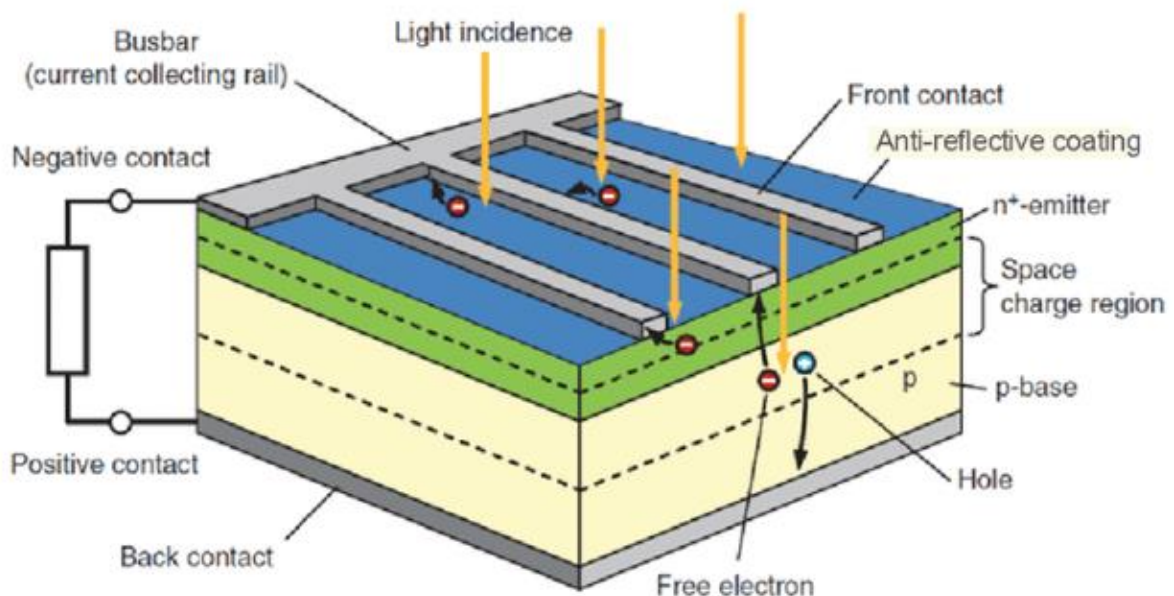
Στις αρχές του 21ου αιώνα, η απόδοση φτάνει το 18%, ενώ συνεχίζεται η έρευνα για νέα υλικά και αρχιτεκτονικές συσκευές.

Σήμερα, οι κυψέλες OPV έχουν απόδοση άνω του 20%, ενισχύοντας τη σημασία τους ως πιθανή πηγή ανανεώσιμης ενέργειας στο μέλλον. [12]

2.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφει τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού δυναμικού στον ημιαγωγό, προκαλούμενου από την ιονίζουσα ακτινοβολία. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία ενός αυτοπαραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ρεύματος, τα οποία μπορούν να τροφοδοτήσουν ηλεκτρικά φορτία. Το φράγμα δυναμικού μπορεί να δημιουργηθεί είτε με τη μέθοδο του φράγματος μετάλλου-ημιαγωγού, όπου εφαρμόζεται διαφανής μεταλλική μεμβράνη στον ημιαγωγό, είτε με τη σύνδεση p-n, όπου εισάγονται ακαθαρσίες στον ημιαγωγό αντίθετου τύπου.

Όταν το ηλιακό στοιχείο εκτίθεται στο ηλιακό φως, τα φωτόνια μετατρέπονται σε ηλεκτρισμό μέσω της διαδικασίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η προσπίπτουσα ενέργεια δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών στον ημιαγωγό, αυξάνοντας τη συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας. Αυτή η αύξηση έχει ως αποτέλεσμα τη ροή των μειοψηφικών φορέων, προκαλώντας ρεύμα κατά μήκος της περιοχής εξάντλησης στις σχεδόν ουδέτερες περιοχές. [14,15]



Εικόνα 2.3: Δομή ηλιακής κυψέλης [17]

2.4 Η Φωτοβολταϊκή κυψέλη

Η κλασική δομή των ηλιακών κυψελών βασίζεται στη χρήση μιας διόδου διασταύρωσης ημιαγωγών p-n, η οποία λειτουργεί υπό την επίδραση ηλιακού φωτισμού. Κατά την έκθεση της επιφάνειας ενός ημιαγωγού στο φως του ηλίου, ένα συγκεκριμένο τμήμα των φωτονίων μεταδίδεται και απορροφάται στο υλικό του ημιαγωγού. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί φωτογενή ζεύγη οπών και ηλεκτρονίων, ενώ το υπόλοιπο φως ανακλάται από την επιφάνεια.

Ορισμένοι από αυτούς τους φωτοπαραγόμενους φορείς φορτίου διαχωρίζονται από το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο της διόδου διασταύρωσης p-n πριν επανασυνδυαστούν και στη συνέχεια συλλέγονται στους ακροδέκτες της κυψέλης, συμβάλλοντας έτσι στο ρεύμα εξόδου της κυψέλης προς το εξωτερικό κύκλωμα.

Ωστόσο, ένα από τα κύρια προβλήματα αυτής της δομής είναι η απώλεια φωτεινότητας λόγω της παρουσίας μετάλλου (μπροστινές επαφές) στην επάνω επιφάνεια του ηλιακού στοιχείου, το οποίο εμποδίζει το φως από το να εισέλθει στο εσωτερικό της κυψέλης.

Αυτές οι απώλειες προκαλούνται από τη διαφάνεια της επάνω επιφάνειας, που καθορίζεται από το κλάσμα της επιφάνειας που καλύπτεται από μέταλλο. Το πλάτος των μεταλλικών γραμμών και η απόστασή τους είναι επίσης κρίσιμα για τη διαφάνεια. Σημαντικός περιορισμός αποτελεί το ελάχιστο πλάτος της γραμμής που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη τεχνολογία επιμετάλλωσης. [17]

2.5 Επαφή p-n

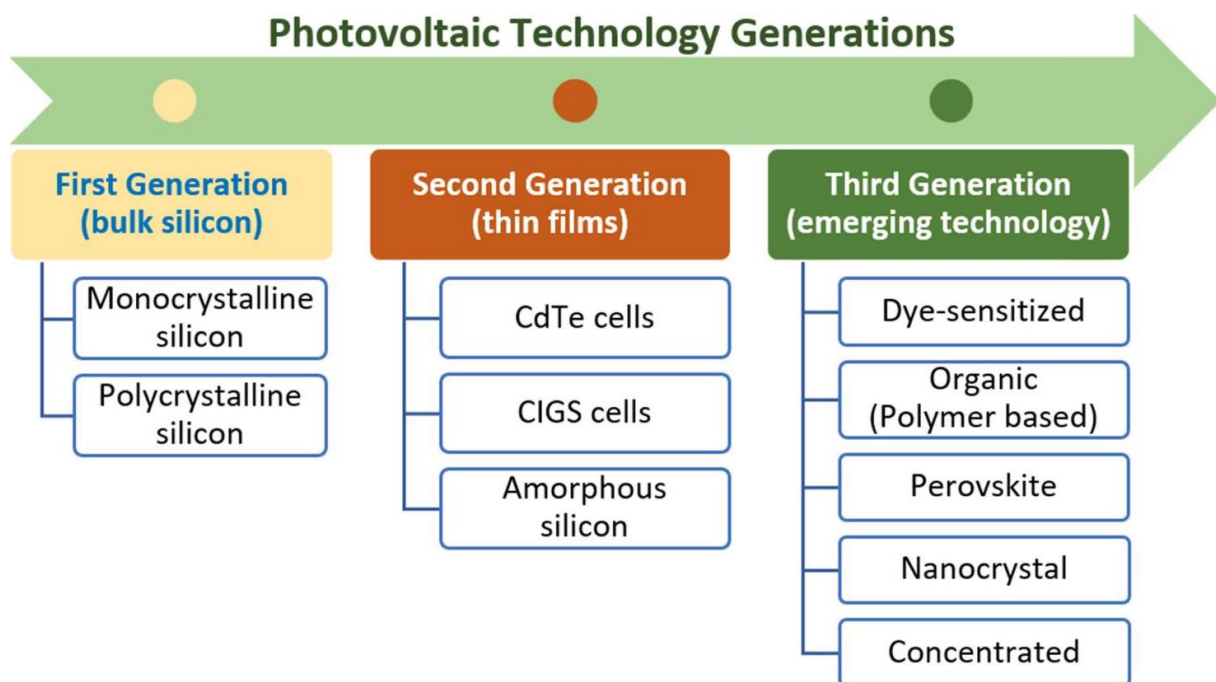
Η επαφή p-n στο ηλιακό κύτταρο είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία πρόσμιξης (Doping) δημιουργεί περιοχές τύπου n και p σε μονοκρυσταλλικό ημιαγωγό, όπως το πυρίτιο. Σε αυτό το πλαίσιο, η σύνδεση p-n παίζει κρίσιμο ρόλο στη δημιουργία ενός ηλιακού στοιχείου.

Στη δομή του ηλιακού κυττάρου, το μπλοκ τύπου n περιέχει μεγάλο αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ το μπλοκ τύπου p περιλαμβάνει ελεύθερες οπές. Κατά την επαφή των δύο τύπων υλικού, τα ηλεκτρόνια μετακινούνται από την περιοχή υψηλής συγκέντρωσης (μπλοκ τύπου n) στην περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης (μπλοκ τύπου p), δημιουργώντας μια θετικά φορτισμένη περιοχή στη μια πλευρά και μια αρνητικά φορτισμένη περιοχή στην άλλη πλευρά.

Σε αντίθεση με αυτό, ένα ηλιακό στοιχείο, ως δίοδος ημιαγωγών, προκαλεί τη διάχυση φορέων φορτίου με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου. Όταν οι ημιαγωγοί n και p έρχονται σε επαφή, τα ηλεκτρόνια διαχέονται στον τύπο p, αφήνοντας πίσω τους θετικά φορτισμένα άτομα δότες, καθώς οι οπές διαχέονται

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία προσφέρουν μια πιο οικονομική επιλογή σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά. Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα περιέχουν πολλούς μικρούς κόκκους κρυστάλλων, κατασκευάζονται με τη χύτευση μιας κυβικής ράβδου από λιωμένο πυρίτιο, η οποία στη συνέχεια τεμαχίζεται με παρόμοιο τρόπο με τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι λιγότερο απαιτητική, και ως αποτέλεσμα, το κόστος παραγωγής μειώνεται. Παρόλο που η απόδοσή τους μπορεί να είναι λίγο χαμηλότερη στα 12-15% σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά, παραμένουν μια δημοφιλής επιλογή λόγω της καλής αναλογίας κόστους-απόδοσης.

Τα φωτοβολταϊκά λεπτής μεμβράνης αντιπροσωπεύουν την πιο προηγμένη τεχνολογία στον τομέα των φωτοβολταϊκών. Η κατασκευή τους προϋποθέτει την εκτύπωση ή τον ψεκασμό ενός λεπτού στρώματος ημιαγωγού φωτοβολταϊκού υλικού σε ένα υπόστρωμα από γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό φύλλο. Παρόλο που αυτά τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν υψηλότερη απορρόφηση φωτός και είναι εξαιρετικά ευέλικτα όσον αφορά τον σχεδιασμό και την εφαρμογή τους, η απόδοσή τους κυμαίνεται στα 6-7% που σε σύγκριση με τους άλλους τύπους φωτοβολταϊκών είναι το λιγότερο αποτελεσματικά. Υπάρχουν επίσης και άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων, που ανήκουν στην τρίτη γενιά, και βασίζονται σε διάφορες τεχνολογίες thin film. Ωστόσο, η πλειοψηφία αυτών των τεχνολογιών εξακολουθεί να είναι στο στάδιο της έρευνας ή της ανάπτυξης. [20]



Εικόνα 2.5: Γενιές φωτοβολταϊκών κυττάρων [12]

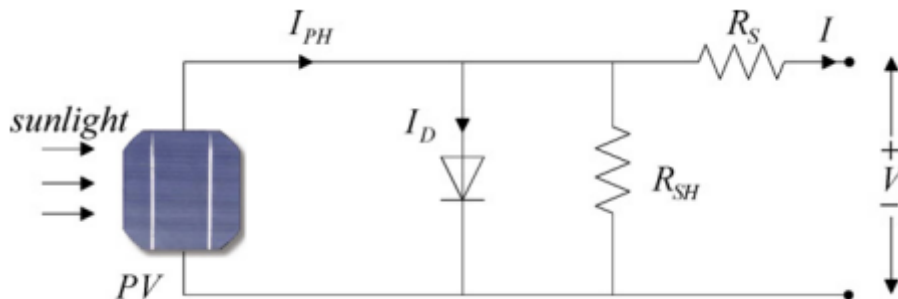
Η επιλογή μεταξύ αυτών των τύπων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες, τις τεχνικές προδιαγραφές και τον διαθέσιμο προϋπολογισμό για την κάθε εφαρμογή.

2.7 Αποθήκευση ενέργειας

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι μεταβολές στην ένταση του ηλιακού φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν μέσα και εξαρτήματα για την αποθήκευση ενέργειας. Η αποθήκευση αυτής της ενέργειας γίνεται είτε εσωτερικά μέσα στις κυψέλες με τη χρήση πυκνωτών για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση, είτε εξωτερικά με τη χρήση μπαταριών για μακροχρόνια αποθήκευση. Αυτή η τεχνολογική λύση εξασφαλίζει τη σταθερή διαθεσιμότητα ενέργειας, καλύπτοντας άμεσα τις ανάγκες κατανάλωσης. Συνολικά, η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό, ιδίως για τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός δικτύου. [7]

2.8 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Όταν η ηλιακή ενέργεια προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται από τα ημιαγώγιμα υλικά, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Αν οι αγωγοί συνδεθούν, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό κύκλωμα όπου τα ηλεκτρόνια μετατρέπονται σε ηλεκτρικό ρεύμα, γνωστό ως φωτορεύμα, I_{PH} . Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί ως δίοδος, χωρίς να παράγει ρεύμα. Ωστόσο, σε σύνδεση με μια εξωτερική τροφοδοσία, παράγεται ένα ρεύμα δίοδου, I_D . Μια φωτοβολταϊκή κυψέλη αντιπροσωπεύεται από ένα ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο δίοδου, το οποίο περιλαμβάνει πηγή ρεύματος, δίοδο και αντίσταση σειράς. [21]



Εικόνα 2.6: Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού πάνελ [21]

Το I_{PH} υποδηλώνει το ρεύμα της πηγής, το R_S την αντίσταση σειράς και το R_{SH} την αντίσταση διαρροής. Η δίοδος διαθέτει επίσης μια εσωτερική αντίσταση διακλάδωσης. Το καθαρό ρεύμα αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ του I_{PH} και του ρεύματος της δίοδου I_D και προκύπτει ως εξής:

$$I = I_{PH} - I_D - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{kT_c}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

Κεφάλαιο 2

Όπου k , η σταθερά Boltzman $1,38 \cdot 10^{-23} J/K$, T_c η απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου σε Kelvin, q το φορτίο ηλεκτρονίων $1,6 \cdot 10^{-19} C$ και I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία. Επειδή η αντίσταση διαρροής R_{SH} είναι αρκετά μεγαλύτερη της R_S , η εξίσωση (1) μπορεί να γραφεί απλά:

$$I = I_{PH} - I_D = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT_c}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Σε ανοικτό κύκλωμα ($I = 0$) έχουμε:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_0}\right) \quad (2.3)$$

$$I_0 = I_{PH} \exp\left(-\frac{qV}{AkT}\right) \quad (2.4)$$

Επειδή το I_0 έχει πολύ μικρή τιμή (δύναμης του -5 με -6), έχουμε:

$$I_{SC} \approx I_{PH} \quad (2.5)$$

$$R_S = \left(\frac{AkT}{q}\right) \ln\left[\left(\frac{I_{PH} + I}{I_0}\right) + 1\right] - \frac{V}{I} \quad (2.6)$$

Για να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς κάνουμε:

$$P_{max} = I_{mp} V_{mp} \{ I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{mp}}{AkT}\right) - 1 \right] \} V_{mp} \quad (2.7)$$

Όπου P_{max} η μέγιστη ισχύς, I_{mp} το ρεύμα και V_{mp} η τάση στο MPP (maximum power point).

Ο συντελεστής πλήρωσης FF ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} και του ρεύματος βραχυκυκλώματος I_{SC} . [12] Δίνεται από:

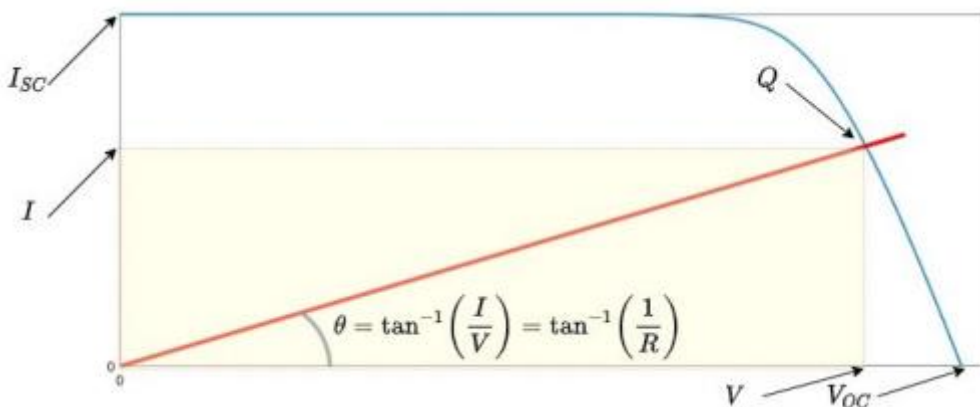
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2.8)$$

2.9 Χαρακτηριστικά I-V και P-V

Η σχέση μεταξύ του ρεύματος εξόδου και της τάσης εξόδου περιγράφεται μαθηματικά από τον νόμο του Ohm:

$$V = I \times R \Rightarrow I = \left(\frac{1}{R}\right) \times V \quad (2.9)$$

Στην Εικόνα 2.7, παρουσιάζεται η καμπύλη I-V. Εφόσον το ηλιακό κύτταρο λειτουργεί ως πηγή συνεχούς ρεύματος, μπορούμε να αντιπροσωπεύσουμε το κύκλωμα φορτίου ως μια απλή αντίσταση, R . Το σημείο λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου, συμβολίζεται ως Q και είναι η τομή της καμπύλης I-V με τη γραμμή του φορτίου. Η χαρακτηριστική καμπύλη σημειώνεται με μπλε χρώμα και περιγράφει το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{SC} και την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} , ενώ το σημείο λειτουργίας Q καθορίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή τάσης V και ρεύματος I και υπακούει στον νόμο του Ohm για την αντίσταση φορτίου. [19]

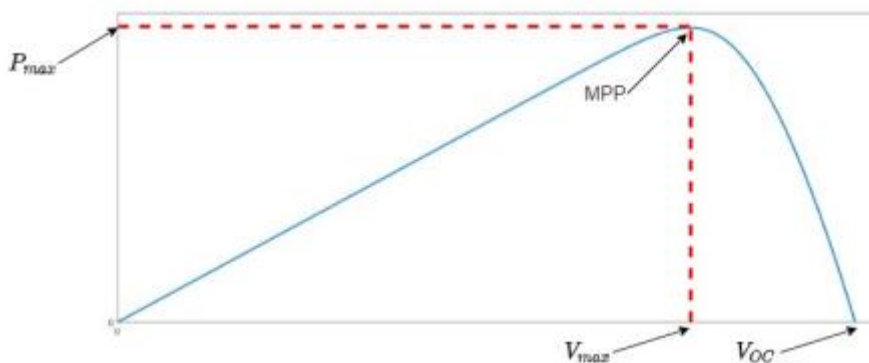


Εικόνα 2.7: Καμπύλη Ρεύματος- Τάσης (V-I) [19]

Στην Εικόνα 2.8, παρουσιάζεται η καμπύλη P-V που αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της ισχύς συνεχούς ρεύματος εξόδου και της τάσης εξόδου ενός ηλιακού κυττάρου. Η ισχύς συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται ως καμπύλη σε σχέση με την τάση εξόδου και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P = I \times V \quad (2.10)$$

Στην Εικόνα 2.8, επίσης, σημειώνεται το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), το οποίο είναι το σημείο στο οποίο το ηλιακό κύτταρο παράγει τη μέγιστη ισχύ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από το ρεύμα και την τάση εξόδου, τα οποία έχουν καθοριστεί για μια συγκεκριμένη αντίσταση φορτίου. [19]



Εικόνα 2.8: Καμπύλη Ισχύος- Τάσης (V-I) [19]

2.10 Προβλήματα σκίασης

Η σκίαση αποτελεί ένα αρκετά συχνό φαινόμενο σε μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα, το οποίο επιφέρει σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία τους. Όταν ένα σύννεφο διαβαίνει πάνω από το ηλιακό πάνελ ή όταν ένα δέντρο ρίχνει σκιά πάνω σε αυτό, ορισμένα κύτταρα ενδέχεται να λαμβάνουν λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργώντας μερική ή ολική σκίαση.

Οι προσπάθειες για τη μείωση των απωλειών λόγω σκίασης είναι ζωτικής σημασίας. Μελέτες όπως αυτές των Quaschnig & Hanitsch και Viitanen έχουν αποδείξει τον σημαντικό αντίκτυπο της σκίασης στην απόδοση, με απώλειες που μπορεί να ανέρχονται ακόμα και σε ποσοστά όπως το 80%. Η ποσοτικοποίηση των απωλειών από σκίαση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού των σκιασμένων κυψελών, των χαρακτηριστικών της κυψέλης και της σύνδεσής της με άλλα πάνελ.

Επιπλέον, η χρήση διαφορετικών συστημάτων σύνδεσης μπορεί να συμβάλει στη μείωση των απωλειών λόγω σκίασης. Μελέτες όπως αυτές που αναφέρθηκαν προτείνουν διάφορες τεχνικές για τη βελτίωση

της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επίσης, σε περιπτώσεις υψηλής ισχύος, η χρήση προστατευτικών διόδων όπως οι δίοδοι παράκαμψης (BP Diodes) και οι δίοδοι αποκλεισμού (BD) αποτελεί αποτελεσματικό μέσο για τη διαχείριση της σκίασης και τη διατήρηση της απόδοσης. Τέτοιες τεχνικές μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή βλάβης των κυττάρων λόγω υπερθέρμανσης ή υπέρτασης, ενώ εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες.

Τέλος, η επίδραση της σκίασης στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η τεχνολογία, τα υλικά των κυψελών, οι καιρικές συνθήκες και το περιβάλλον. Έτσι, υπάρχει η ανάγκη για διάφορες προσεγγίσεις και ρυθμίσεις για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων αυτού του φαινομένου. [19, 22]

2.11 Επίλογος

Εν κατακλείδι, σε αυτό το κεφάλαιο εξετάσαμε την ανάπτυξη και λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αναλύθηκε η ιστορική εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, οι τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων και τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά.

Από την εμβάθυνση στις ηλεκτρικές ιδιότητες έως την αντιμετώπιση προβλημάτων σκίασης, καλύψαμε ένα ευρύ φάσμα θεμάτων που αφορούν τη λειτουργία και την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Συνοψίζοντας, αυτό το κεφάλαιο μας παρείχε βαθιά κατανόηση της κατασκευής, της λειτουργίας και των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Καθώς προχωρούμε στο επόμενο κεφάλαιο, θα εξετάσουμε αναλυτικά την λειτουργία του ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και η σημασία του στη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Κεφάλαιο 3ο: Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

3.1 Εισαγωγή

Η ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, προσφέροντας λύσεις σε προβλήματα όπως η μερική σκίαση. Η μερική σκίαση αποτελεί σημαντική πρόκληση για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς η σκίαση ενός μέρους του ηλιακού πάνελ μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής ισχύος εξόδου, με αποτέλεσμα τη μειωμένη παραγωγή ενέργειας.

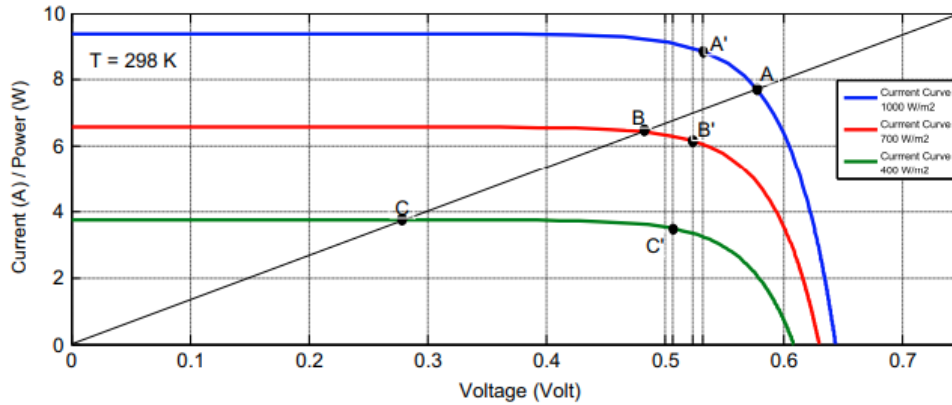
Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών Ανίχνευσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος έχει αναδειχθεί ως ένας τρόπος αντιμετώπισης της μερικής σκίασης. Το MPPT βασίζεται σε αλγορίθμους ελέγχου που παρακολουθούν το σημείο μέγιστης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, προσαρμόζοντας το σημείο λειτουργίας του συστήματος για να διατηρεί τη μέγιστη ισχύ εξόδου.

Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου, θα εξετάσουμε πιο λεπτομερώς τη λειτουργία του MPPT, τους διάφορους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται και τη σημασία της εφαρμογής τους στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Επιπλέον, θα εξετάσουμε πώς οι τεχνικές MPPT μπορούν να αντιμετωπίσουν τη μερική σκίαση και να αυξήσουν την απόδοση παραγωγής ενέργειας.

Τέλος, θα διερευνήσουμε την εφαρμογή των αλγορίθμων MPPT σε διάφορα είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων και τη σημασία της επιλογής τους, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας.

3.2 Λειτουργία του Ανιχνευτή Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Ο ανιχνευτής μέγιστης ισχύος (MPPT) αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς επιτρέπει τη βέλτιστη αξιοποίηση της ενέργειας του ηλίου. Μέσω μιας προηγμένης διαδικασίας παρακολούθησης και προσαρμογής, ο MPPT εντοπίζει το σημείο μέγιστης ισχύος του ηλιακού συστήματος και το διατηρεί σε αυτό το επίπεδο, ανεξάρτητα από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

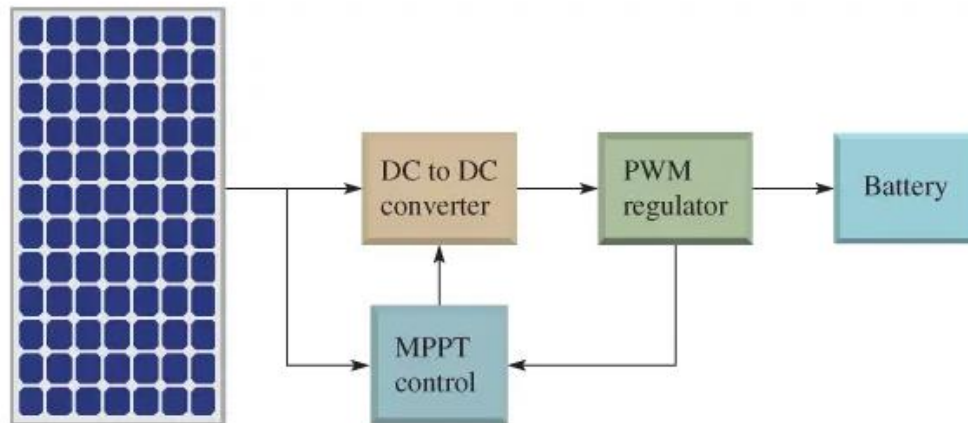


Εικόνα 3.1: Καμπύλη I-V για διαφορετικές ακτινοβολίες [25]

Κατά τη λειτουργία του, ο MPPT παρακολουθεί συνεχώς την ισχύ και την τάση εξόδου των ηλιακών κυψελών. Με τη βοήθεια του αλγορίθμου Perturb and Observe, πραγματοποιεί μικρές αλλαγές στην τάση ή στο ρεύμα εισόδου προκειμένου να παρακολουθήσει τις αντίστοιχες αλλαγές στην ισχύ. Μέσω αυτής της διαδικασίας, εντοπίζει το σημείο όπου η ισχύς εξόδου είναι μέγιστη, διασφαλίζοντας τη μέγιστη απόδοση του συστήματος.

Επιπλέον, οι ελεγκτές MPPT είναι εξοπλισμένοι με PWM και μετατροπέα DC σε DC, οι οποίοι αναλαμβάνουν την προσαρμογή της τάσης εξόδου των ηλιακών κυψελών ώστε να αντιστοιχεί στις ανάγκες φόρτισης των μπαταριών. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι η μέγιστη ισχύς που παράγεται από τις ηλιακές κυψέλες μεταφέρεται αποτελεσματικά στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Συνοψίζοντας, ο MPPT λειτουργεί ως "εγκέφαλος" του φωτοβολταϊκού συστήματος, προσαρμόζοντας συνεχώς τη λειτουργία του για να εξασφαλίσει τη μέγιστη απόδοση και αποτελεσματικότητα, ανεξάρτητα από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος και φόρτισης. [22,23,24]



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα ελέγχου φόρτισης με MPPT [24]

3.3 Τύποι Αλγορίθμων MPPT

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, αυτό είναι το υψηλότερο κόστος παραγωγής ενέργειας σε σύγκριση με άλλες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της αιολικής ενέργειας. Επομένως, η βέλτιστη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτεί τη μέγιστη δυνατή απόδοση ισχύος στην έξοδο, μέσω της χρήσης αλγορίθμων MPPT. [26]

Καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ακτινοβολία αλλάζουν, η μέγιστη ισχύς που παράγεται από τα ηλιακά συστήματα είναι μεταβλητή. Λόγω αυτών των μεταβολών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ένας ανιχνευτής μέγιστης ισχύος σε πραγματικό χρόνο αποτελεί απαραίτητο στοιχείο του φωτοβολταϊκού συστήματος.

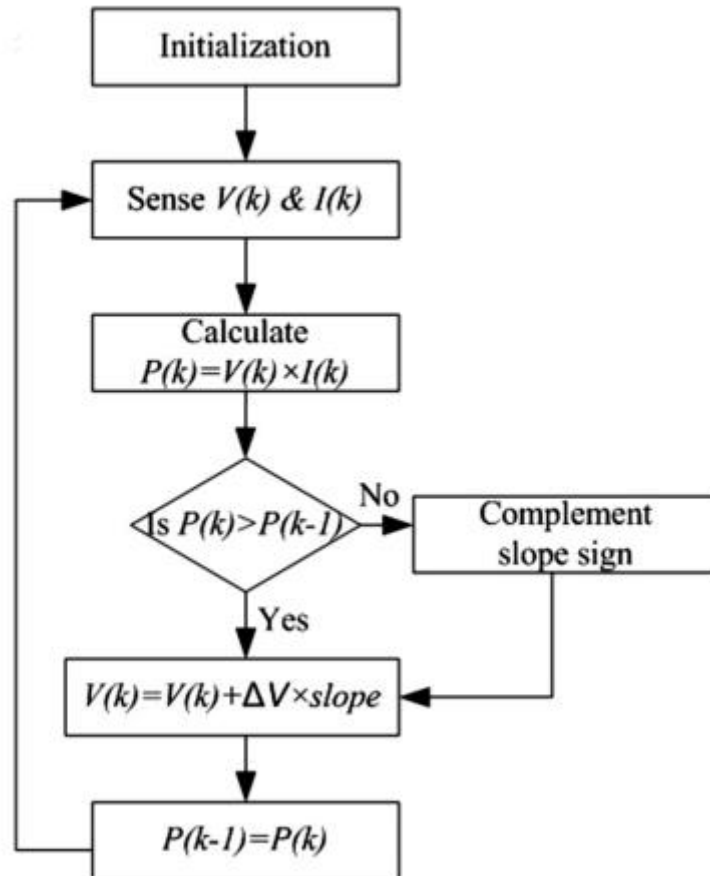
Τα προτεινόμενα σχήματα παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) στην τεχνική βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- Άμεσες μέθοδοι,
- Μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης και
- Έμμεσες μέθοδοι.

Οι άμεσες μέθοδοι MPPT επιδιώκουν την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) διαταράσσοντας συνεχώς τη λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν το Perturb and Observe (P&O), το Hill Climbing (HC) και το Incremental Conductance (INC).

- Perturb and Observe (P&O): Αυτή η μέθοδος λειτουργεί διαταράσσοντας την τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για να εντοπίσει το MPP.

- Hill Climbing (HC): Σε αυτήν τη μέθοδο, ο κύκλος λειτουργίας του μετατροπέα DC-DC διαταράσσεται για να επιτευχθεί η εύρεση του MPP.
- Incremental Conductance (INC): Αυτή η μέθοδος επιδιώκει τη μείωση της ταλάντωσης σταθερής κατάστασης. Βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση της ισχύος έναντι της τάσης είναι μηδέν στο MPP.



Εικόνα 3.3: Βασικό διάγραμμα ροής του συμβατικού P&O [29]

Οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης αποτελούν μια προσέγγιση που εκμεταλλεύεται τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων προκειμένου να προσφέρουν γρήγορες λύσεις για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP). Αυτές οι μέθοδοι είναι γνωστές για τις υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις που απαιτούνται για τη λειτουργία τους, αλλά παρέχουν γρήγορες και αποτελεσματικές λύσεις για το πρόβλημα του MPPT. Οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται για το MPPT σε φωτοβολταϊκά συστήματα είναι:

- Έλεγχος Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Control - FLC): Χρησιμοποιεί ασαφείς κανόνες και σύνολα κανόνων για να λάβει αποφάσεις βάσει πολύπλοκων συνθηκών.
- Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Network - ANN): Αναπτύσσουν μοντέλα που μπορούν να μάθουν και να προσαρμοστούν σε δεδομένα, επιτρέποντας την πρόβλεψη και τη λήψη αποφάσεων.

Κεφάλαιο 2

Οι έμμεσες μέθοδοι εξάγουν το MPP από τα χαρακτηριστικά εξόδου του συστήματος. Παραδείγματα αυτών των μεθόδων είναι οι μέθοδοι κλασματικής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (open-circuit voltage - OCV) και ρεύματος βραχυκυκλώματος (short-circuit current - SCC), οι οποίες προσφέρουν απλούς και αποτελεσματικούς τρόπους εύρεσης του MPP.

Οι διάφοροι τύποι αλγορίθμων MPPT προσφέρουν διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μέγιστη εξαγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκά συστήματα, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας και τις ατμοσφαιρικές μεταβολές. [27]

MPPT Technique	PV Array Dependent?	True MPPT?	Analog or Digital?	Periodic Tuning?	Convergence Speed	Implementation Complexity	Sensed Parameters
Hill-climbing/P&O	No	Yes	Both	No	Varies	Low	Voltage, Current
IncCond	No	Yes	Digital	No	Varies	Medium	Voltage, Current
Fractional V_{OC}	Yes	No	Both	Yes	Medium	Low	Voltage
Fractional I_{SC}	Yes	No	Both	Yes	Medium	Medium	Current
Fuzzy Logic Control	Yes	Yes	Digital	Yes	Fast	High	Varies
Neural Network	Yes	Yes	Digital	Yes	Fast	High	Varies
RCC	No	Yes	Analog	No	Fast	Low	Voltage, Current
Current Sweep	Yes	Yes	Digital	Yes	Slow	High	Voltage, Current
DC Link Capacitor Droop Control	No	No	Both	No	Medium	Low	Voltage
Load I or V Maximization	No	No	Analog	No	Fast	Low	Voltage, Current
dP/dV or dP/dI Feedback Control	No	Yes	Digital	No	Fast	Medium	Voltage, Current
Array Reconfiguration	Yes	No	Digital	Yes	Slow	High	Voltage, Current
Linear Current Control	Yes	No	Digital	Yes	Fast	Medium	Irradiance
I_{MPP} & V_{MPP} Computation	Yes	Yes	Digital	Yes	N/A	Medium	Irradiance, Temperature
State-based MPPT	Yes	Yes	Both	Yes	Fast	High	Voltage, Current
OCC MPPT	Yes	No	Both	Yes	Fast	Medium	Current
BFV	Yes	No	Both	Yes	N/A	Low	None
LRCM	Yes	No	Digital	No	N/A	High	Voltage, Current
Slide Control	No	Yes	Digital	No	Fast	Medium	Voltage, Current

Εικόνα 3.4: Κυριότερα χαρακτηριστικά τεχνικών MPPT [28]

3.4 Εφαρμογές MPPT

Διάφορες τεχνικές MPPT προσαρμόζονται σε διάφορες εφαρμογές. Για παράδειγμα, σε δορυφόρους και τροχιακούς σταθμούς, όπου η αξιοπιστία είναι καθοριστική και το κόστος δεν είναι τόσο σημαντικό, επιλέγονται μέθοδοι όπως το Hill Climbing (HC), Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (INC) και το Ripple correlation control (RCC). Για ηλιακά οχήματα, προτιμάται η γρήγορη σύγκλιση με το MPP, και εδώ είναι κατάλληλες οι μέθοδοι ελέγχου ασαφούς λογικής, νευρωνικά δίκτυα και RCC. Για τα οικιακά συστήματα, η ελαχιστοποίηση του χρόνου απόσβεσης είναι ο στόχος, επομένως επιλέγονται μέθοδοι όπως το INC και η διαδικασία σάρωσης. Τέλος, στα φωτοβολταϊκά συστήματα φωτισμού δρόμων που απλώς φορτίζουν μπαταρίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, είναι εφικτή η χρήση πιο απλών και οικονομικών μεθόδων, όπως τα κλασματικά V_{OC} ή I_{SC} . [28]

3.5 Επίλογος

Στον επίλογο αυτού του κεφαλαίου, καταλήγουμε σε βαθύτερη κατανόηση της Ανίχνευσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT) και των διαφόρων τύπων αλγορίθμων που την υποστηρίζουν. Ο ανιχνευτής αυτός αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Κατανοήσαμε τη λειτουργία του MPPT και πώς οι διάφοροι αλγόριθμοι επιτυγχάνουν αυτόν τον στόχο με διαφορετικούς τρόπους.

Τέλος, εξετάσαμε πιθανές εφαρμογές του MPPT σε διάφορους τομείς, από φωτοβολταϊκά συστήματα κατοικιών μέχρι σε δορυφόρους και τροχιακούς σταθμούς. Η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης και η αποτελεσματική αντιμετώπιση των προκλήσεων, όπως η μερική σκίαση, καθιστούν το MPPT κρίσιμο εργαλείο για τη μελλοντική ανάπτυξη και ολοκλήρωση φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

Κεφάλαιο 4ο: Μετατροπείς Ισχύος

4.1 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς ισχύος αποτελούν κρίσιμο στοιχείο στα συστήματα φωτοβολταϊκής ενέργειας, καθώς επιτρέπουν τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε μορφή ηλεκτρικού ρεύματος και τάσης σε μια μορφή που είναι χρήσιμη για την τροφοδοσία δικτύου ή για τη φόρτιση μπαταριών.

Οι μετατροπείς ισχύος είναι υπεύθυνοι για την αποτελεσματική μεταφορά της ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα στα ηλεκτρικά δίκτυα ή σε αποθήκευση μπαταριών. Εκτελούν σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος, τη μέγιστη απόδοση και την προστασία από υπερτάσεις και υποτάσεις.

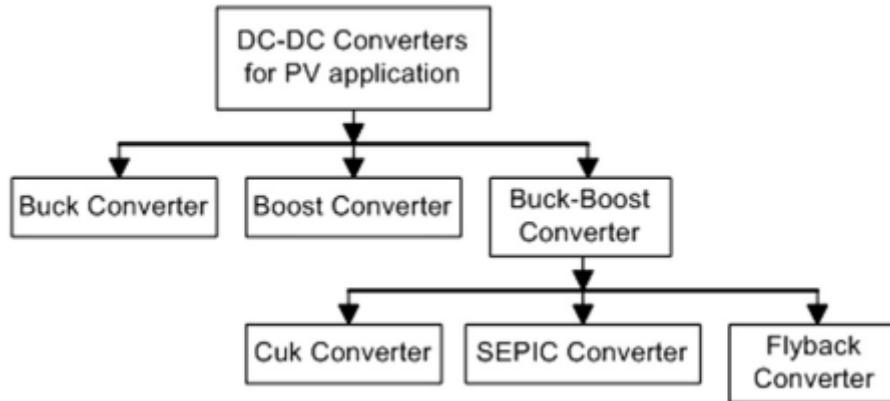
Στο πλαίσιο αυτού του κεφαλαίου, θα εξετάσουμε τους διάφορους τύπους μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα και τις λειτουργίες τους.

4.2 Μετατροπείς Ισχύος DC-DC

Οι μετατροπείς DC-σε-DC αποτελούν ηλεκτρονικά κυκλώματα που μεταβάλλουν την τάση μιας πηγής συνεχούς ρεύματος (DC) από ένα επίπεδο σε ένα άλλο. Τα επίπεδα ισχύος τους κυμαίνονται από πολύ χαμηλά, κατάλληλα για μικρές μπαταρίες, έως πολύ υψηλά, κατάλληλα για μετάδοση ισχύος υψηλής τάσης. Στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, η απόδοση εξαρτάται σημαντικά από τον μετατροπέα DC-DC.

Ο μετατροπέας DC-DC συνήθως τοποθετείται μεταξύ του ηλιακού πίνακα και του φορτίου, χρησιμοποιώντας μεθόδους παρακολούθησης για την εξαγωγή της διαθέσιμης ισχύος. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων, όπως ο μετατροπέας buck, ο μετατροπέας ενίσχυσης, ο μετατροπέας buck-boost, ο μετατροπέας cuk, ο μετατροπέας SEPIC και ο μετατροπέας flyback, οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή σε αυτόνομα συστήματα, συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο, υβριδικά συστήματα ενέργειας κ.λπ.

Σε αυτά τα συστήματα, ο μετατροπέας DC-DC λειτουργεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο λειτουργίας της μέγιστης ισχύος, με στόχο τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η καταλληλότητα του μετατροπέα εξαρτάται από τον τύπο της εφαρμογής και τις ακριβείς απαιτήσεις που αυτή προϋποθέτει. [23,30]



Εικόνα 4.1: Επισκόπηση μετατροπέων DC-DC για Φ/Β σύστημα [30]

4.2.1 Μετατροπέας Buck

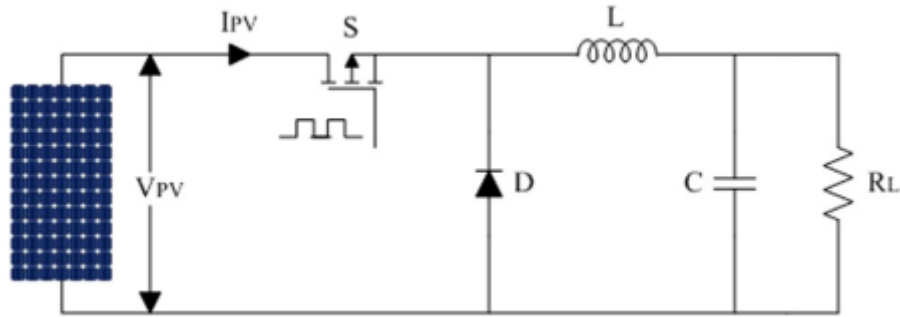
Ο step-down μετατροπέας Buck, μειώνει την τάση εξόδου σε σχέση με την είσοδο. Αυτή η τοπολογία επιτρέπει την ενσωμάτωση υψηλότερων τάσεων μονάδας σε χαμηλότερα φορτία ή μπαταρίες. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές ηλιακών φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούν αυτούς τους μετατροπέις, συμπεριλαμβανομένων αυτόνομων συστημάτων ηλιακής άντλησης για την παροχή νερού σε αγροτικές περιοχές, ηλιακών φορτιστών μπαταριών, συστημάτων παρακολούθησης MPPT που συνδέονται στο δίκτυο, και φωτοβολταϊκών συστημάτων δικτύου off-grid. [31]

Ο μετατροπέας λειτουργεί είτε σε συνεχή είτε σε ασυνεχή αγωγιμότητα. Στη συνεχή λειτουργία, ο διακόπτης είναι ON και η διόδος OFF, ενώ στην ασυνεχή, ο διακόπτης είναι OFF και η διόδος ON. Ο λόγος μετατροπής ορίζεται ως:

$$\frac{V_{buck}}{V_{pv}} = \frac{I_{buck}}{I_{pv}} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{in}}} = D \quad (4.1)$$

Όπου D είναι ο λόγος λειτουργίας του διακόπτη, V_{buck} η τάση εξόδου, V_{pv} η τάση εισόδου, I_{buck} το ρεύμα εξόδου, I_{pv} το ρεύμα εισόδου, R_L η αντίσταση φορτίου και R_{in} η αντίσταση εισόδου του μετατροπέα Buck.

Ωστόσο, η αλλαγή από συνεχή σε ασυνεχή λειτουργία προκαλεί πολυπλοκότητα και δεν είναι ιδανική για σταθερή λειτουργία. Η χρήση σύγχρονων μοντέλων μετατροπέων και πολυφασικών κυκλωμάτων μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και τη σταθερότητα του συστήματος. [30]



Εικόνα 4.2: Κύκλωμα μετατροπέα DC–DC Buck [30]

4.2.2 Μετατροπέας Boost

Ο step-up μετατροπέας Boost, αυξάνει την τάση εξόδου σε σχέση με την είσοδο. Ο μετατροπέας Boost βελτιστοποιεί την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αντιμετωπίζοντας προβλήματα όπως η μερική σκίαση, με τη χρήση αλγορίθμων ελέγχου και προηγμένων κυκλωμάτων. [23]

Ο μετατροπέας λειτουργεί με βάση τις διακυμάνσεις της τάσης στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Η τάση εξόδου πρέπει να ταιριάζει με το φορτίο, οπότε το σχέδιο αντιστοίχισης ισχύος είναι αναγκαίο προκειμένου να ευθυγραμμιστεί με τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος. Γενικά, ο μετατροπέας Boost λειτουργεί με δύο τρόπους συνεχής και ασυνεχής. Η δυναμική κατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος με μετατροπέα ενίσχυσης DC–DC εκφράζεται από τη σχέση:

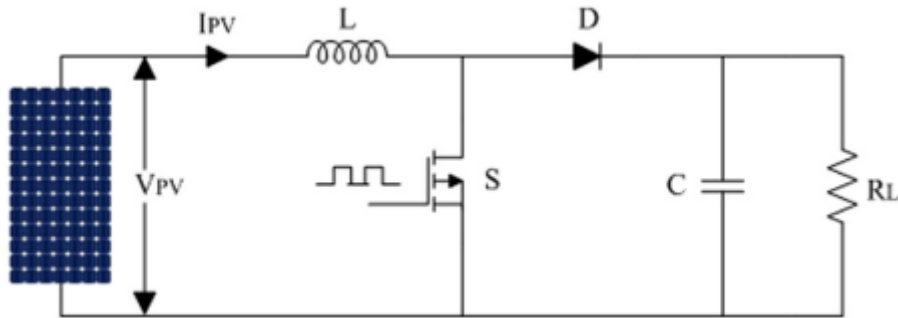
$$I_{pv} = C \times V_{pv} + I_L \quad (4.2)$$

Όπου C είναι η χωρητικότητα και I_L το ρεύμα του απαγωγέα. Το κέρδος τάσης $\frac{V_{boost}}{V_{pv}}$ και ο κύκλος λειτουργίας D του μετατροπέα ώθησης υπολογίζονται ως:

$$\frac{V_{boost}}{V_{pv}} = \frac{I_{boost}}{I_{pv}} = \sqrt{\frac{R_L}{R_{in}}} = \frac{1}{1-D} \quad (4.3)$$

Όπου V_{boost} είναι η τάση ενίσχυσης του φωτοβολταϊκού και I_{boost} το ρεύμα εξόδου Buck. Οι μετατροπέες ενίσχυσης ελέγχονται με τη χρήση είτε της συχνότητας είτε του κύκλου λειτουργίας, ανάλογα με την εφαρμογή. Οι παράμετροι εισόδου ελέγχου είναι το ρεύμα, η τάση και η ισχύς, επιλέγονται ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής, είτε αυτό είναι αυτόνομο είτε συνδεδεμένο σε δίκτυο. [30]

Ο συζευγμένος επαγωγέας και ένας πυκνωτής μεταγωγής χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα του μετατροπέα Boost για να ενισχυθεί το κέρδος τάσης. Η επαγωγή διαρροής επιτρέπει τη μείωση των προβλημάτων ανάστροφης ανάκτησης στην πλευρά εξόδου. Αν και αυτή η δομή μειώνει τους κυματισμούς και τις απώλειες μεταγωγής, αυξάνει την απώλεια μεταγωγής και την τάση ρεύματος. [31]



Εικόνα 4.3: : Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Boost [30]

4.2.3 Μετατροπέας Buck-Boost

Ο μετατροπέας Buck-Boost αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, προσφέροντας επιλογές για τη μείωση ή αύξηση της τάσης εξόδου. Στη λειτουργία του, η ενέργεια μεταφέρεται στο φορτίο με το άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη.

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, η τάση V_{pv} του φωτοβολταϊκού συστήματος συνδέεται με τον επαγωγέα, ενώ ο πυκνωτής είναι ανοικτός και το πηνίο συνδέεται με το φορτίο εξόδου. Η αναλογία μετατροπής της τάσης εκφράζεται ως:

$$\frac{V_{B-B}}{V_{pv}} = \frac{I_{B-B}}{I_{pv}} = \frac{D}{1-D} \quad (4.4)$$

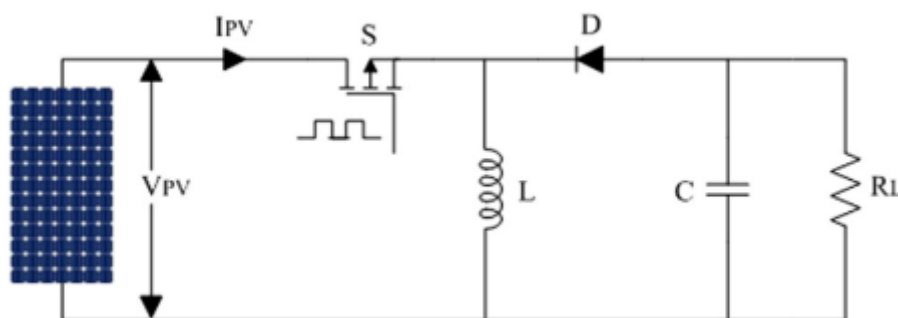
Όπου V_{B-B} η τάση εξόδου, V_{pv} η τάση εισόδου, I_{B-B} το ρεύμα εξόδου και I_{pv} το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα Buck-Boost.

Η τοπολογία αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών, επιτρέποντας τη λειτουργία στο MPP. Ωστόσο, οι μεταβολές στο περιβάλλον επηρεάζουν τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος, κάτι που επηρεάζει την απόδοση του μετατροπέα.

Για τη βελτίωση του λειτουργικού περιθωρίου, προτείνονται τροποποιημένοι μετατροπείς Buck-Boost για τη σύνδεση με το σύστημα φόρτωσης. Επιπλέον, η χρήση δύο μετατροπέων Buck-Boost σε εφαρμογές συστημάτων διανομής DC επιτρέπει την επίλυση περιορισμών που αντιμετωπίζονται με τους μετατροπείς ενίσχυσης.

Για τη μείωση της ταλάντωσης στο ρεύμα εξόδου, προτείνονται επιπλέον κυκλώματα φίλτρου εξόδου, ενώ η εφαρμογή της τοπολογίας μετατροπέα μερικής επεξεργασίας ισχύος επιτρέπει την απλοποίηση του MPPT.

Τέλος, η βέλτιστη λειτουργία του μετατροπέα Buck-Boost επιτυγχάνεται μέσω προηγμένων μοντέλων παρακολούθησης, ενώ η χρήση μη αντιστρεφόμενων μετατροπέων συνεισφέρει στη σταθερότητα του συστήματος. [30]



Εικόνα 4.4: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Buck-Boost [30]

4.2.4 Μετατροπέας Cuk

Ο μετατροπέας Cuk αναδύεται από τη σύνδεση του μετατροπέα Boost με τον μετατροπέα Buck, δημιουργώντας ένα εξελιγμένο σύστημα DC-DC. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η χρήση ενός πυκνωτή σύζευξης για τη μεταφορά ενέργειας. Σε σύγκριση με άλλους μετατροπείς, ο Cuk χρησιμοποιεί λιγότερους διακόπτες και αξιολογεί τη σταθερότητά του με εξισώσεις χώρου κατάστασης. Για τη μείωση των διακυμάνσεων παραγωγής, χρησιμοποιείται μια μέθοδος αντιστάθμισης ανάδρασης.

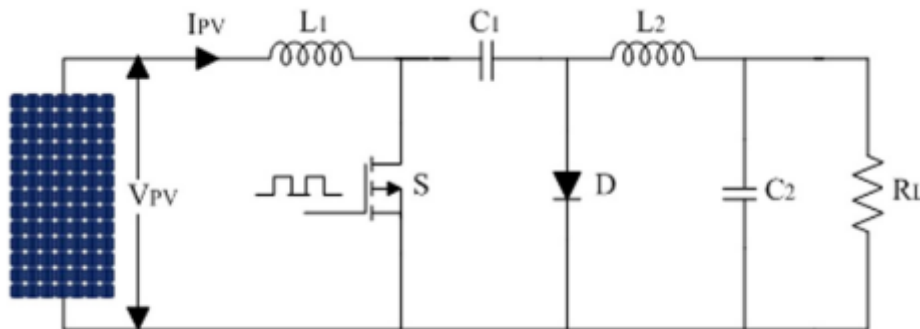
Ο μετατροπέας εφαρμόζεται ευρέως για τη ρύθμιση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων, ελέγχοντας το ρεύμα που παράγεται από κάθε στοιχείο. Επιπλέον, η τεχνική MPPT της Incremental Conductance (INC) αποδείχθηκε αποτελεσματική στην απομάκρυνση του αναλογικού-ολοκληρωτικού βρόχου ελέγχου, προσφέροντας σταθερή παρακολούθηση MPP χωρίς ταλάντωση στη σταθερή κατάσταση. [23]

Η σχέση μεταξύ τάσης εισόδου και εξόδου καθορίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{V_{cuk}}{V_{pv}} = \frac{I_{cuk}}{I_{pv}} = \frac{D}{1-D} \quad (4.5)$$

Όπου V_{cuk} η τάση εξόδου, V_{pv} η τάση εισόδου, I_{cuk} το ρεύμα εξόδου και I_{pv} το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα Cuk.

Τέλος, παρέχει ομαλοποίηση του ρεύματος εισόδου και εξόδου, μειώνοντας τις διαταραχές και βελτιώνοντας τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών. [30]



Εικόνα 4.5: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC Cuk [30]

4.2.5 Μετατροπέας SEPIC

Ο μετατροπέας SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) αναδεικνύεται ως μια ενθαρρυντική εξέλιξη στον τομέα των μετατροπέων DC/DC, προσφέροντας νέες δυνατότητες στη μετατροπή ενέργειας. Αυτή η τοπολογία αναπτύχθηκε με βάση τον μετατροπέα buck-boost, προσφέροντας ευελιξία στην παραγωγή τάσης εξόδου που μπορεί να είναι μεγαλύτερη, χαμηλότερη ή ίση με την τάση εισόδου, διατηρώντας την ίδια πολικότητα.

Ο μετατροπέας SEPIC έχει χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό του MPP σε ηλιακά πάνελ. Με αυτήν την προσέγγιση, η σύνδεση του ηλιακού πάνελ με το δίκτυο φόρτου ή με την μπαταρία επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα DC/DC SEPIC που ρυθμίζεται με τη μέθοδο Pulse Width Modulation (PWM), εξασφαλίζοντας απώλειες ισχύος κάτω από τα 0,2 W. [23]

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε γραμμές AC, λειτουργώντας στη λειτουργία Boundary Conduction Mode (BCM). Στον τομέα της παραγωγής ηλιακής ενέργειας, ο μετατροπέας SEPIC χρησιμοποιείται ευρέως για τη ρύθμιση των διακυμάνσεων της τάσης DC.

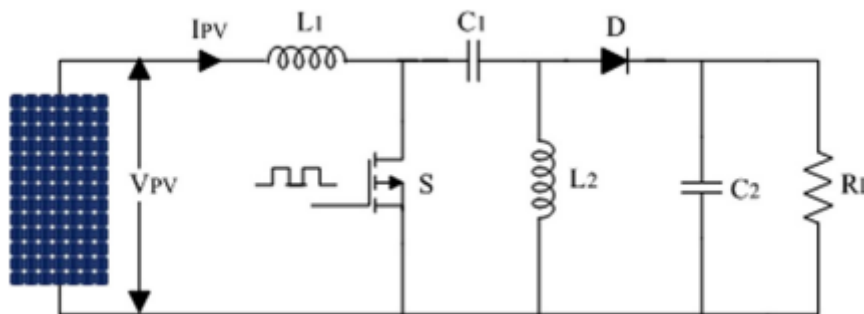
Κατά τον σχεδιασμό του μετατροπέα SEPIC, υπάρχουν πολλοί περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Συγκεκριμένα, όταν ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας λειτουργεί με αυτόν τον τύπο μετατροπέα, πρέπει να μειωθεί ο κυματισμός στην τάση εξόδου. Αυτό είναι σημαντικό για τη διατήρηση των βασικών χαρακτηριστικών, όπως η συνέχεια του ρεύματος εξόδου και η ελαχιστοποίηση της πίεσης μεταγωγής.

Για να βελτιωθεί η απόδοση και η ευστάθεια του μετατροπέα, χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες ελέγχου, όπως ο έλεγχος PI, ο έλεγχος λειτουργίας ολίσθησης και ο έλεγχος ανάδρασης dP/dV. Επιπλέον, η εφαρμογή της ασαφούς λογικής συνιστάται για την επίτευξη της μέγιστης ισχύος. [31]

Η σχέση μεταξύ τάσης εισόδου και εξόδου καθορίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{V_{SEPIC}}{V_{pv}} = \frac{I_{SEPIC}}{I_{pv}} = \frac{D}{1-D} \quad (4.6)$$

Όπου V_{SEPIC} η τάση εξόδου, V_{pv} η τάση εισόδου, I_{SEPIC} το ρεύμα εξόδου και I_{pv} το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα SEPIC. [30]



Εικόνα 4.6: Κύκλωμα μετατροπέα DC-DC SEPIC [30]

4.2.6 Μετατροπέας Flyback

Ο μετατροπέας Flyback (FC) αποτελεί μια παραλλαγή του μετατροπέα Buck-Boost, εμπλουτισμένη με έναν ιδανικό μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος. Η κύρια περιέλιξη του ιδανικού μετασχηματιστή συνδέεται με τη φωτοβολταϊκή πηγή όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η διόδος προκαλεί αντίστροφη πόλωση, δημιουργώντας αρνητική τάση στο δευτερεύον τύλιγμα, ενώ ο πυκνωτής τροφοδοτεί ενέργεια στο φορτίο. Κατά την ανοικτή φάση του διακόπτη S, το ρεύμα και η μαγνητική ροή συγκεντρώνονται στο δευτερεύον τύλιγμα, ενώ η διόδος προκαλείται να προωθήσει την ενέργεια προς το φορτίο. [30]

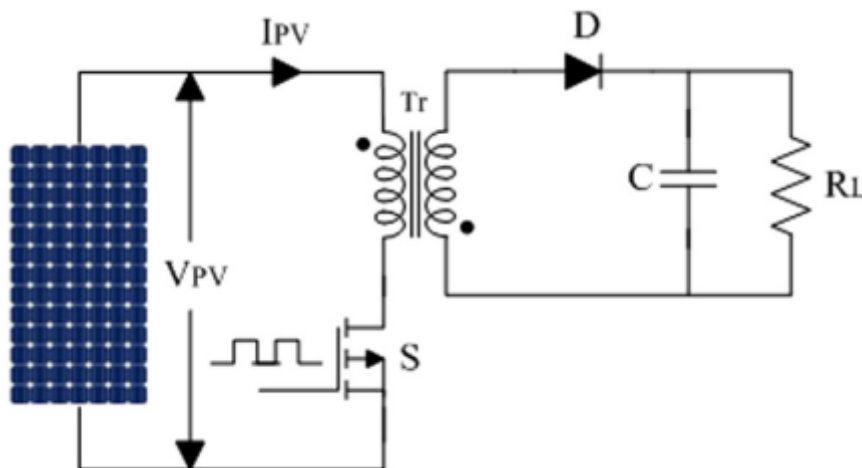
Οι μετατροπείς Flyback, είναι κυρίως κατάλληλοι για εφαρμογές στα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα χαμηλής ισχύος. Όταν απαιτείται υψηλότερο κέρδος από τον μετατροπέα σε συνδυασμό με τη χρήση των μετασχηματιστών, η βασική επιλογή συνήθως είναι οι μετατροπείς Flyback.

Για εφαρμογές υψηλής ισχύος, οι μετατροπείς πρέπει να διαθέτουν μεγάλο διάκενο αέρα για την αποθήκευση ενέργειας. Το μεγάλο αυτό διάκενο επιφέρει λιγότερη μαγνητική επαγωγή. Οι μετατροπείς Flyback προσφέρουν μεγαλύτερη ροή διαρροής και μικρότερη απόδοση μεταφοράς ενέργειας. [31]

Ο λόγος μετατροπής του FC δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{V_{FC}}{V_{pv}} = \frac{I_{FC}}{I_{pv}} = n \left(\frac{D}{D'} \right) \quad (4.7)$$

Όπου n ο αριθμός στροφών στον ιδανικό μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος, V_{FC} η τάση εξόδου, V_{pv} η τάση εισόδου, I_{FC} το ρεύμα εξόδου και I_{pv} το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα Flyback. [30]



Εικόνα 4.7: Κύκλωμα μετατροπέα DC–DC Flyback [30]

4.3 Αντιστροφείας DC/AC

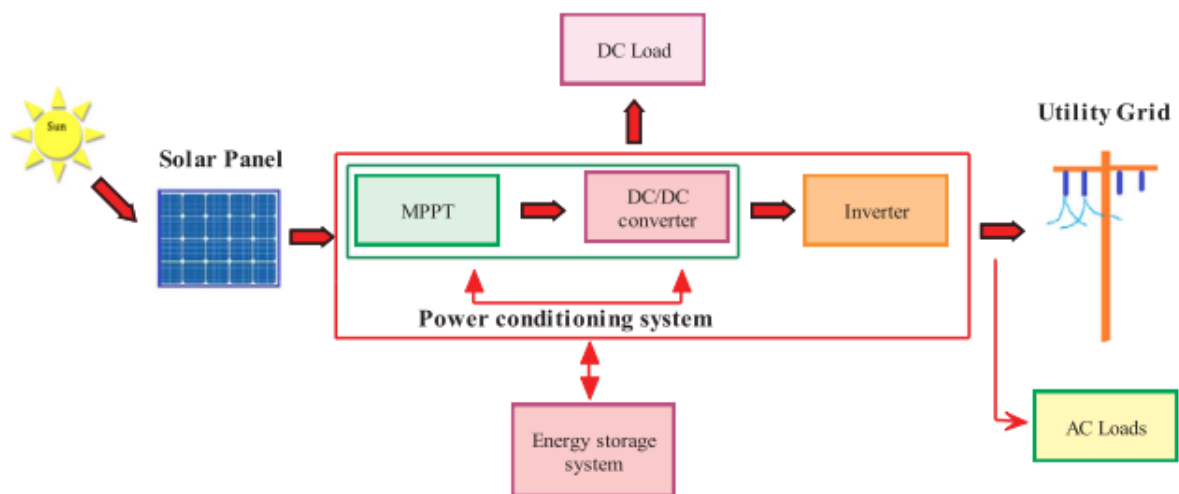
Οι αντιστροφείς DC/AC αναλαμβάνουν τον μετασχηματισμό της συνεχούς ισχύος που παράγεται από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε εναλλασσόμενη μορφή για χρήση στο δίκτυο. Στην ουσία, λειτουργούν σαν γέφυρα μεταξύ της ενέργειας που παράγεται από τον ήλιο και της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται από το δίκτυο.

Καθώς οι ηλιακές πηγές ενέργειας λειτουργούν σε διάφορες συνθήκες φωτισμού, οι αντιστροφείς πρέπει να διαχειρίζονται την τάση και το ρεύμα της συνεχούς ενέργειας για να εξασφαλίσουν τη μέγιστη απόδοση από τις ηλιακές συστοιχίες. Η ισχύς εδώ μετριέται με τον πολλαπλασιασμό της τάσης με το ρεύμα, και η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται όταν το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος είναι μέγιστο.

Μέσω προηγμένων αλγορίθμων MPPT, οι αντιστροφείς εντοπίζουν το σημείο μέγιστης ισχύος στις ηλιακές συστοιχίες. Οι αλγόριθμοι αυτοί αποστέλλουν οδηγίες στον ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος, ρυθμίζοντας την τάση και το ρεύμα για την μέγιστη δυνατή απόδοση.

Εκτός από τη διαχείριση της ενέργειας, οι αντιστροφείς επίσης επιβλέπουν την ασφάλεια του δικτύου. Κατά τη λειτουργία τους, ελέγχονται για να διασφαλιστεί ότι η τάση AC παραμένει εντός συγκεκριμένου εύρους. Σε περίπτωση υπέρβασης αυτού του εύρους, οι αντιστροφείς απενεργοποιούνται προληπτικά για ασφάλεια, αποφεύγοντας την αποστολή ισχύος στο δίκτυο.

Τέλος, οι αντιστροφείς είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους, με ιδιαίτερη προσοχή στην κατάλληλη ψύξη και αερισμό για τη διατήρηση της απόδοσης και της αντοχής τους σε διάφορες καιρικές συνθήκες. [32]



Εικόνα 4.8: Δομή φωτοβολταϊκού συστήματος [23]

4.4 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάσαμε μια σειρά από μετατροπείς ισχύος DC-DC που χρησιμοποιούνται ευρέως στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Καθένας από αυτούς τους μετατροπείς προσφέρει μοναδικά

πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά που του επιτρέπουν να εφαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες λειτουργίας.

Ο μετατροπέας Buck μειώνει την τάση εξόδου, ενώ ο Boost την αυξάνει. Ο Buck-Boost μετατροπέας παρέχει τη δυνατότητα είτε μείωσης είτε αύξησης της τάσης. Οι μετατροπείς Cuk, SEPIC και Flyback είναι υποκατηγορίες του μετατροπέα Buck-Boost. Ο αντιστροφέας DC/AC είναι απαραίτητος για τη μετατροπή της DC ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε AC, προκειμένου να τροφοδοτήσει το ηλεκτρικό δίκτυο. Κάθε ένας από αυτούς τους μετατροπείς έχει τον δικό του ρόλο και συμβάλλει στην ολοκληρωμένη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Τέλος, οι μετατροπείς αυτοί αποτελούν το κύριο εργαλείο για την αποτελεσματική λειτουργία και τη μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος, είναι ουσιώδης για την αποτελεσματική λειτουργία του.

Κεφάλαιο 5ο: Συστήματα παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας

5.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας αποτελούν ουσιώδες κομμάτι στην ανάπτυξη και την αποδοτικότητα των ηλιακών συστημάτων. Καθώς η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξελίσσεται και η ανάγκη για αποδοτικότερη παραγωγή ενέργειας αυξάνεται, η αξιοποίηση συστημάτων παρακολούθησης διπλού άξονα καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα εξετάσουμε πιο αναλυτικά τα συστήματα παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας διπλού άξονα. Θα αναπτύξουμε τη λειτουργία τους, τα οφέλη που προσφέρουν στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς και τις τεχνολογίες και τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στα προηγμένα συστήματα παρακολούθησης.

5.2 Ηλιακή γεωμετρία

Η ηλιακή γεωμετρία αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα. Κατανοώντας τη θέση του ήλιου σε σχέση με τον γεωγραφικό προσανατολισμό και την κίνηση της Γης, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση και την αποτελεσματικότητα του συστήματος παρακολούθησης.

Η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι σχεδόν κυκλική, με μέση απόσταση 149,6 εκατομμυρίων χιλιομέτρων. Ο άξονας περιστροφής της Γης κλίνει κατά γωνία $23,441^\circ$ ως προς την κάθετη στο επίπεδο της τροχιάς της. Αυτή η κλίση επηρεάζει τη φαινομενική θέση του Ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

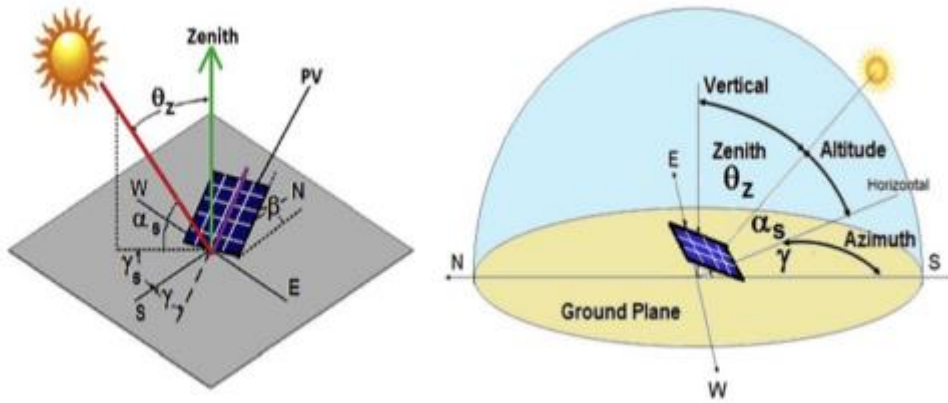
Για να μελετηθεί η ηλιακή γεωμετρία, χρησιμοποιούνται τρία βασικά πλαίσια αναφοράς: το εκλειπτικό, το ισημερινό και το πλαίσιο αναφοράς ορίζοντα. Αυτά τα πλαίσια είναι κεντραρισμένα στο κέντρο της Γης και λαμβάνουν υπόψη τη φαινομενική κίνηση του Ήλιου.

Η ηλιακή γεωμετρία χαρακτηρίζεται από τις εξής έννοιες:

- Γωνία Απόκλισης (δ): Είναι η γωνιακή απόσταση της θέσης του ήλιου στα βόρεια ή νότια του ισημερινού της γης. Η γωνία αυτή ποικίλλει από περίπου $23,45^\circ$ βόρεια στο Χειμερινό Ηλιοστάσιο έως $23,45^\circ$ νότια στο Θερινό Ηλιοστάσιο.
- Υψομετρική Γωνία ή Γωνία Ανύψωσης (α): Αναφέρεται στο ύψος που φαίνεται ο ήλιος στον ουρανό. Η γωνία αυτή είναι αρνητική όταν ο ήλιος βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα.
- Ηλιακή Αζιμουθιακή Γωνία (γ_s): Αναφέρεται στη γωνιακή απόσταση μεταξύ του νότου και της προβολής της γραμμής όρασης προς τον ήλιο στο έδαφος.

- Γεωγραφικό Πλάτος (w): Αναφέρεται στη γωνία που δημιουργεί η ακτινική γραμμή που ενώνει τη θέση του παρατηρητή με το κέντρο της Γης με το ισημερινό επίπεδο.

Η κατανόηση της ηλιακής γεωμετρίας είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία ενός ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα, καθώς αυτό επιτρέπει την ακριβή προσαρμογή των πάνελ στην κατεύθυνση του ήλιου για τη μέγιστη συλλογή ενέργειας. [33]



Εικόνα 5.1: Ηλιακές γωνίες [34]

5.3 Ηλιακά συστήματα παρακολούθησης

Τα ηλιακά συστήματα παρακολούθησης αποτελούν σημαντικό μέσο για τη συλλογή και τη χρήση ηλιακής ενέργειας με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Με τη χρήση οπτικών μέσων, όπως παραβολικά πιάτα ή φωτοβολταϊκά πάνελ, μπορεί να συλλεγεί και να μετατραπεί η ηλιακή ενέργεια σε χρήσιμη μορφή.

Για τη μέγιστη απόδοση της ενεργειακής απόδοσης, είναι απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση της θέσης του ηλίου. Οι μηχανισμοί παρακολούθησης του ηλίου προσαρμόζουν συνεχώς τη θέση των ηλιακών συλλεκτών για να ακολουθούν την κίνηση του ηλίου. Με την αξιοποίηση πληροφοριών σχετικά με τη θέση του ηλίου, οι μηχανισμοί αυτοί διευκολύνουν τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. [35]

Στον χώρο της ηλιακής ενέργειας, υπάρχουν δύο κύριοι τύποι συστημάτων παρακολούθησης που καθορίζουν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των ηλιακών συστημάτων: η παρακολούθηση

μονού άξονα και η παρακολούθηση διπλού άξονα. Κάθε τύπος παρακολούθησης προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Η παρακολούθηση μονού άξονα εστιάζει στην παρακολούθηση της κίνησης του ήλιου κατά μήκος ενός μόνο άξονα, είτε αυτός είναι ο βόρειος-νότιος άξονας είτε ο ανατολικός-δυτικός άξονας. Από την άλλη πλευρά, η παρακολούθηση διπλού άξονα προσαρμόζεται στην τρισδιάστατη κίνηση του ηλίου, λαμβάνοντας υπόψη την ετήσια αλλαγή στη θέση του.

Παρά το γεγονός ότι η παρακολούθηση διπλού άξονα απαιτεί περισσότερο προηγμένο εξοπλισμό και έχει υψηλότερο κόστος συντήρησης, η επίδρασή της στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική. Το πλεονέκτημα της παρακολούθησης διπλού άξονα έγκειται στην ικανότητά της να προσαρμόζεται στην ετήσια κίνηση του ήλιου, ενισχύοντας την απόδοση του συστήματος.

Συνολικά, οι πρόσφατες μελέτες έχουν επισημάνει τη σημασία και των δύο τύπων παρακολούθησης, με κάθε έναν να έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και προκλήσεις. Ενώ η επιλογή μεταξύ τους εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες και περιορισμούς κάθε εγκατάστασης, η τάση προς τη χρήση της παρακολούθησης διπλού άξονα αυξάνεται σε πολλές εφαρμογές λόγω της υψηλότερης απόδοσης και ευελιξίας που προσφέρει. [36]

5.4 Εξαρτήματα ηλιακού συστήματος παρακολούθησης

Το ηλιακό σύστημα παρακολούθησης αποτελείται από πολλά εξαρτήματα που συνεργάζονται για την ακριβή και αποδοτική παρακολούθηση της θέσης του ηλίου και την μέγιστη απόδοση της ηλιακής ενέργειας. Αυτά τα εξαρτήματα περιλαμβάνουν:

- **Συσκευή Παρακολούθησης:** Η κύρια συσκευή παρακολούθησης καθορίζει τη θέση του ηλιακού συλλέκτη με βάση τις πληροφορίες που λαμβάνει από το σύστημα εντοπισμού θέσης και τον αλγόριθμο παρακολούθησης.
- **Αλγόριθμος Παρακολούθησης:** Αυτός ο αλγόριθμος καθορίζει τις γωνίες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του ηλιακού συλλέκτη.
- **Μονάδα Ελέγχου:** Η μονάδα ελέγχου εκτελεί τον αλγόριθμο παρακολούθησης και διαχειρίζεται το σύστημα εντοπισμού θέσης και τον μηχανισμό οδήγησης.
- **Σύστημα Εντοπισμού Θέσης:** Αναγνωρίζει τη θέση του ηλίου και καθοδηγεί τη συσκευή παρακολούθησης για να τον ακολουθήσει.
- **Μηχανισμός Οδήγησης:** Αυτός ο μηχανισμός είναι υπεύθυνος για τη μετακίνηση της συσκευής παρακολούθησης στη θέση που καθορίζεται από το σύστημα εντοπισμού θέσης.
- **Συσκευές Ανίχνευσης:** Αισθητήρες και μετρήσεις που παρακολουθούν τις συνθήκες περιβάλλοντος, όπως ένταση φωτός, θερμοκρασία, κλίση κ.λπ.

Τα εξαρτήματα αυτά συνεργάζονται για να διασφαλίσουν ότι ο ηλιακός συλλέκτης ακολουθεί ακριβώς την κίνηση του ηλίου, επιτρέποντας έτσι τη μέγιστη συλλογή ηλιακής ενέργειας και την αποδοτική μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. [33]

5.5 Τύποι συστημάτων παρακολούθησης

Τα συστήματα παρακολούθησης ηλιακών πάνελ χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες βάσει των μεθόδων που ελέγχουν την κίνηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτές οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τα παθητικά, τα ενεργητικά και τα χρονολογικά συστήματα παρακολούθησης.

5.5.1 Παθητικό σύστημα ανίχνευσης ηλίου

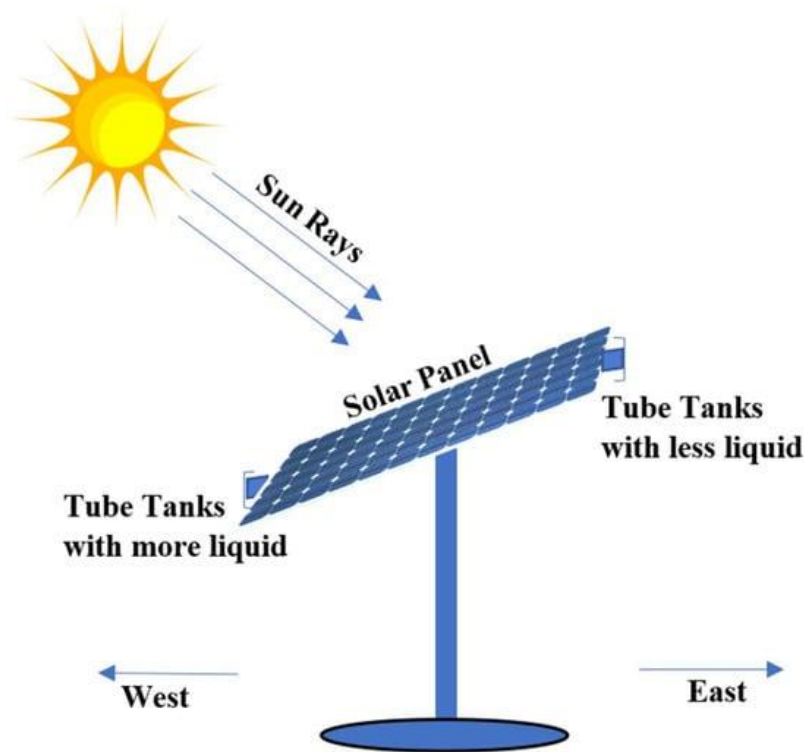
Οι παθητικοί ηλιακοί ιχνηλάτες εκμεταλλεύονται τη φυσική αρχή της θερμικής διαστολής για να προσανατολίσουν τις μονάδες ανίχνευσης προς την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς τη χρήση μηχανικών κινήσεων. Αυτοί οι ιχνηλάτες συνήθως αποτελούνται από ένα ζεύγος ενεργοποιητών και είναι γεμάτοι με διαστελλόμενο αέριο ή κράμα μνήμης σε σχήμα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανισορροπία της πίεσης μεταξύ δύο σημείων στα άκρα τους.

Όταν ο ήλιος αλλάζει θέση, η ανισορροπία αυτή προκαλεί θέρμανση σε μία πλευρά του ιχνηλάτη, η οποία επίσης διαστέλλεται, επιτρέποντας την επαφή με την άλλη πλευρά και προκαλώντας έτσι την περιστροφή του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας είναι ιδιαίτερα ευρέως διαδεδομένη στα παθητικά συστήματα παρακολούθησης του ήλιου.

Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα παθητικής ηλιακής παρακολούθησης πρωτοεμφανίστηκε το 1969 από την Zomeworks Corporation. Σε συγκεκριμένο μοντέλο της εταιρείας, γνωστό ως Track Racks, ο φωτοβολταϊκός πίνακας σε συνδυασμό με το σύστημα παρακολούθησης μπορεί να αυξήσει την παραγωγή ενέργειάς του κατά 25% σε σύγκριση με έναν σταθερό φωτοβολταϊκό πίνακα.

Με περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι ερευνητές δοκιμάζουν διάφορες προσεγγίσεις για τη βελτίωση της απόδοσης των παθητικών συστημάτων. Πρόσφατες εργασίες έχουν εστιάσει σε μοντέλα με διάφορα είδη αερίων, όπως διαλυτικό, ακετόνη και μεθανόλη, που μπορούν να αυξήσουν την απόδοση έως και 23%.

Συνολικά, η εφαρμογή των παθητικών συστημάτων παρακολούθησης του ηλίου αντιπροσωπεύει μια οικονομική και αποδοτική επιλογή για την αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, παρέχοντας αξιόπιστη παρακολούθηση του ηλίου χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρέμβασης. [34]

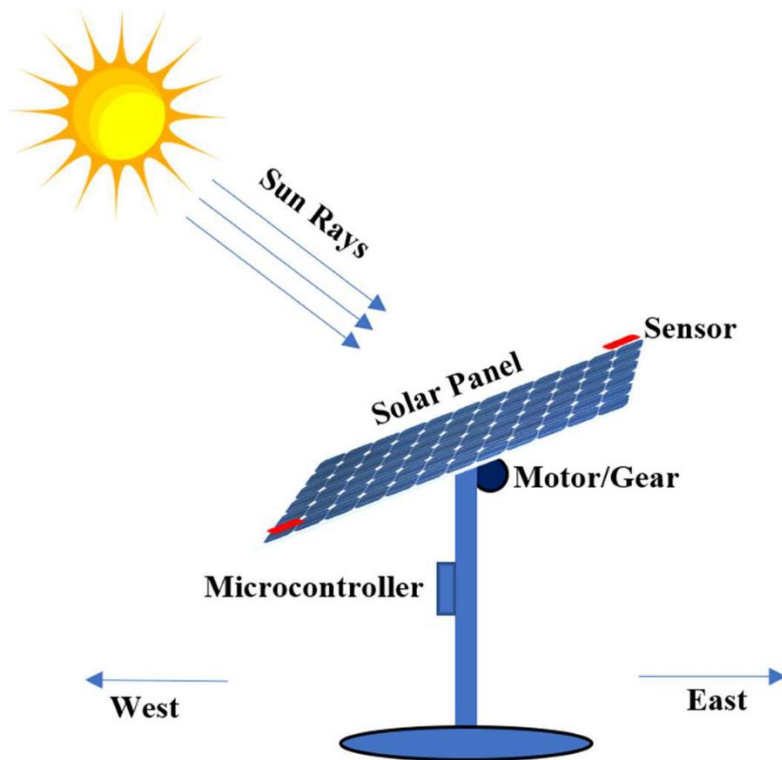


Εικόνα 5.2: Παθητικό σύστημα ανίχνευσης [37]

5.5.2 Ενεργό σύστημα ανίχνευσης ηλίου

Το ενεργό σύστημα παρακολούθησης του ηλίου λειτουργεί διαρκώς κατά τη διάρκεια της ημέρας, χάρη στην παρουσία αισθητήρων. Οι αισθητήρες ενεργοποιούν τους κινητήρες ή τους ενεργοποιητές για να προσανατολίσουν το σύστημα προς την κατεύθυνση του ηλίου. Αν το φως του ηλίου δεν πέφτει κάθετα στον ιχνηλάτη, τότε διαπιστώνεται διαφορά φωτισμού μεταξύ των αισθητήρων, η οποία χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να κινηθεί ο ιχνηλάτης, προκειμένου να ευθυγραμμιστεί κάθετα στον ήλιο. [34]

Τα ενεργά ηλιακά συστήματα παρακολούθησης χωρίζονται περαιτέρω σε κατηγορίες βάσει των τροπών παρακολούθησης. Αυτές περιλαμβάνουν τον ιχνηλάτη μονού άξονα και τον ιχνηλάτη διπλού άξονα και τις υποκατηγορίες τους.



Εικόνα 5.3: Ενεργό σύστημα αντίχενωσης [37]

5.5.2.1 Σύστημα παρακολούθησης μονού άξονα

Τα συστήματα παρακολούθησης μονού άξονα αντιπροσωπεύουν μια πρωτότυπη προσέγγιση στον τομέα των ηλιακών ιχνηλατών. Αυτά τα συστήματα προσφέρουν έναν βαθμό ελευθερίας, με τον άξονα περιστροφής να λειτουργεί ως κεντρικό στοιχείο. Χρησιμοποιούν βηματικό κινητήρα και αισθητήρες φωτός, αυξάνοντας την απόδοση συλλογής ενέργειας κατά 30% σε σταθερή οριζόντια διάταξη. Υπάρχουν τέσσερις τύποι ιχνηλατών ο οριζόντιος, κατακόρυφος, κεκλιμένος και πολικός.

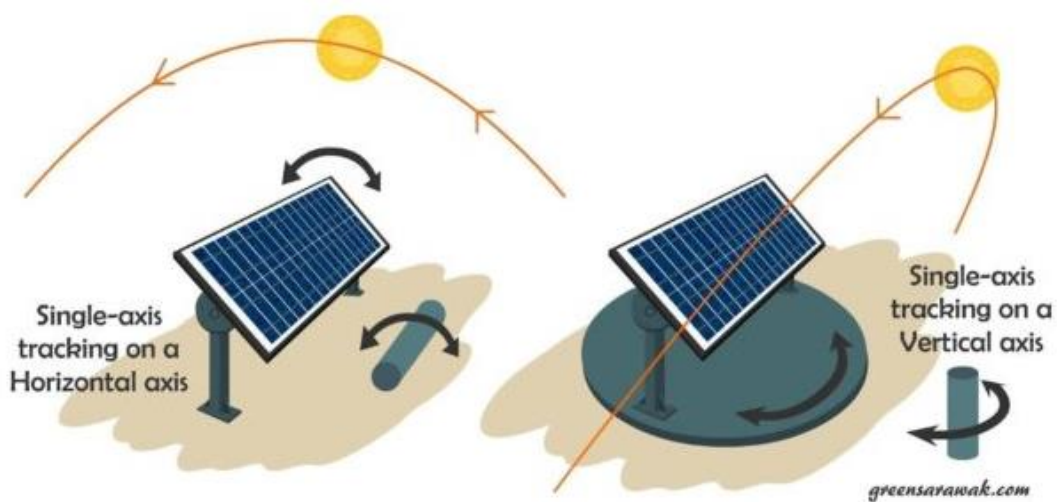
Πιο συγκεκριμένα, ο οριζόντιος ιχνηλατής μονού άξονα (HSAT) λειτουργεί με τον άξονα περιστροφής του τοποθετημένο οριζόντια σε σχέση με το έδαφος. Μία από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει είναι το backtracking, κατά τον υπολογισμό της κατάλληλης διάταξης των ηλιακών πάνελ. Η απόδοση του HSAT είναι ανάλογη με την κατεύθυνση του καθώς η ανατολής-δύσης εμφανίζει χαμηλότερη απόδοση, ενώ η κατακόρυφη τοποθέτηση βορρά-νότου παρουσιάζει αύξηση της απόδοσης κατά περίπου 36%.

Το κατακόρυφο σύστημα παρακολούθησης μονού άξονα (VSAT) γνωστό και ως παρακολούθηση αζιμουθίου, διαθέτει άξονα περιστροφής που είναι κατακόρυφος ως προς το έδαφος και περιστρέφεται από ανατολή προς δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Προσφέρει μεγάλο δυναμικό ενεργειακού κέρδους, με τη δυνατότητα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης κατά περίπου 40% ετησίως σε σύγκριση με τα κεκλιμένα σταθερά πάνελ.

Ο ανιχνευτής με κλίση μονού άξονα αντιπροσωπεύει έναν ανιχνευτή με δυνατότητα κλίσης μεταξύ οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης. Συχνά, οι γωνίες κλίσης περιορίζονται για να μειωθεί η επίδραση του ανέμου και να μειωθεί το προφίλ αντίστασης του συστήματος.

Το πολικό σύστημα παρακολούθησης μονού άξονα ονομάζεται έτσι καθώς, ο μονός άξονας της δομής ευθυγραμμίζεται με το πολικό αστέρα, καταλήγοντας σε έναν ιχνηλάτη. [34]

Τα συστήματα παρακολούθησης μονού άξονα παρουσιάζουν απλότητα και χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τα διπλού άξονα, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση, ιδίως σε συννεφιασμένες ημέρες. Παρόλα αυτά, έχουν ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η παραγωγή ηλιακής ενέργειας και η θέρμανση. [36]



Εικόνα 5.4: Οριζόντιος και κάθετος ηλιακός ανιχνευτής μονού άξονα (Πηγή: <https://t.ly/4J8S2>)

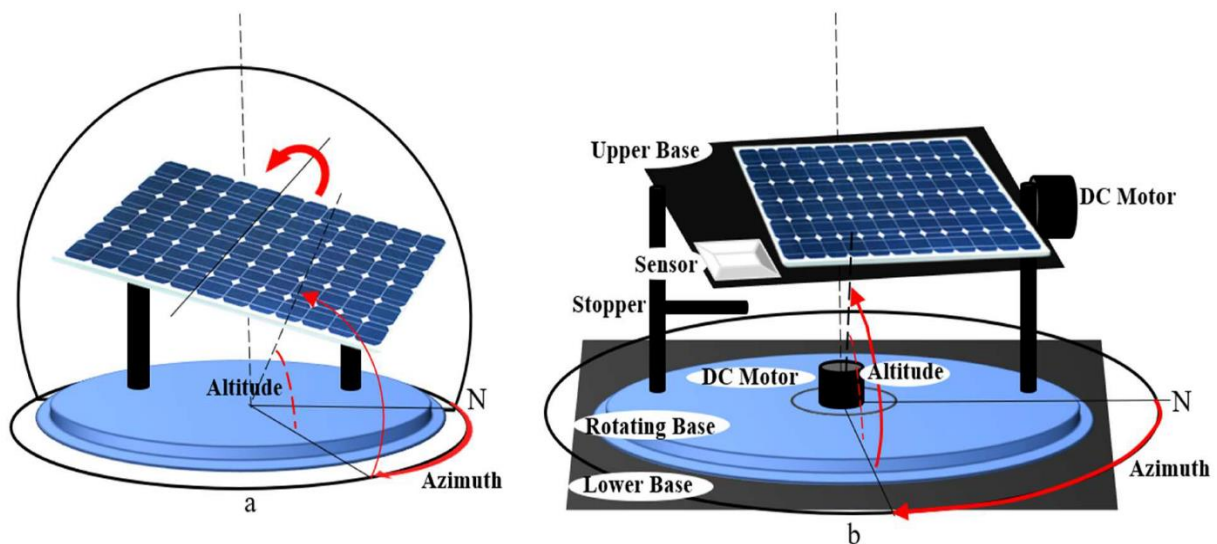
5.5.2.2 Σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα

Το ηλιακό σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα αναφέρεται στην παρακολούθηση του ήλιου σε δύο διαφορετικούς άξονες, χρησιμοποιώντας δύο σημεία περιστροφής για την ακριβή ρύθμιση του. Αυτό το είδος συστήματος συνήθως διαθέτει τόσο οριζόντιους όσο και κάθετους άξονες παρακολούθησης. Στα ενεργά συστήματα παρακολούθησης διπλού άξονα, συνήθως χρησιμοποιούνται τέσσερις αισθητήρες Light Dependent Resistor (LDR), δύο κινητήρες και ένας ελεγκτής. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε διαφορετικές κατευθύνσεις περιστροφής, ενώ οι κινητήρες ρυθμίζουν τη θέση του συστήματος όταν ο ελεγκτής ανιχνεύει τα σήματα από τους αισθητήρες. [36]

Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων παρακολούθησης διπλού άξονα, ο ανιχνευτής διπλού άξονα με κλίση κορυφής Tip-tilt και ο ανιχνευτής διπλού άξονα αξιμουθίου-ανύψωσης.

Ένας ανιχνευτής διπλού άξονα με κλίση κορυφής διαθέτει τον φωτοβολταϊκό στην κορυφή ενός στύλου. Η κίνηση ανατολής-δύσης συνήθως επιτυγχάνεται με την περιστροφή του πίνακα γύρω από την κορυφή του πόλου. Ο κατακόρυφος άξονας αζιμουθίου είναι τοποθετημένος έτσι ώστε να επιτρέπει μεγάλη ευελιξία στη σύνδεση του φορτίου με τον επίγειο εξοπλισμό, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συστολή της καλωδίωσης γύρω από τον πόλο. Οι ανιχνευτές Tip-tilt μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τη σκίαση που προκαλείται στον ήλιο, βοηθώντας έτσι στη μεγιστοποίηση της συνολικής ισχύος που συλλέγεται από το σύστημα.

Ένας ανιχνευτής διπλού άξονα αζιμουθίου-ανύψωσης έχει τον πρωτεύοντα άξονά του (άξονα αζιμουθίου) κατακόρυφο προς το έδαφος και τον δευτερεύοντα άξονα (άξονα ανύψωσης) κάθετο σε αυτόν. Σε αντίθεση με τον ανιχνευτή Tip-tilt, η συστοιχία δεν περιστρέφεται γύρω από έναν κεντρικό άξονα, αλλά χρησιμοποιεί έναν δακτύλιο στο έδαφος και κυλίνδρους για τη στήριξή της. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή του βάρους της συστοιχίας. Μελέτες έχουν εξετάσει τους παράγοντες που επηρεάζουν τον προσανατολισμό του συστήματος, όπως το χρονικό σφάλμα, το γεωγραφικό πλάτος και η γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού. [34]



Εικόνα 5.5: (a) Ανιχνευτής Tip-tilt , (b) Ανιχνευτής αζιμουθίου-ανύψωσης [37]

Σε προσπάθεια να γίνει η παρακολούθηση διπλού άξονα πιο απλή, ορισμένοι ερευνητές εστιάζουν στην ανάπτυξη ακριβών ελεγκτών αντί για τη χρήση αισθητήρων. Άλλοι εστιάζουν στη βελτίωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή του θερμικού κέρδους. Πολλές από αυτές τις μελέτες πραγματοποιούνται είτε πειραματικά είτε θεωρητικά, εστιάζοντας στην εξέλιξη μαθηματικών μοντέλων ή σε προηγμένες μεθόδους υπολογισμού βέλτιστων τροχιών. Αυτές οι προσεγγίσεις αναμένεται να βοηθήσουν στην αύξηση της απόδοσης των ηλιακών συστημάτων και στην εξέλιξη της τεχνολογίας παρακολούθησης διπλού άξονα. [36]

5.5.3 Χρονολογικό σύστημα ανίχνευσης ηλίου

Το χρονολογικό σύστημα ηλιακής παρακολούθησης λειτουργεί βάσει του χρόνου, κινώντας τη δομή με σταθερό ρυθμό και γωνία κατά τη διάρκεια της ημέρας και του μήνα. Ο ελεγκτής προωθεί την περιστροφή με αργό ρυθμό, επιτρέποντας στο σύστημα να λειτουργεί με μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, καθώς τα σφάλματα παρακολούθησης ελαχιστοποιούνται.

Μια εργαστηριακή κλίμακα του συστήματος αυτού σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε με βάση μια χρονολογική προσέγγιση, παρέχοντας υψηλή ακρίβεια και απόδοση συγκριτικά με άλλα ηλιακά συστήματα παρακολούθησης. Το σύστημα περιλάμβανε έναν αισθητήρα LDR, ένα κινητήριο πρόγραμμα οδήγησης, έναν μικροελεγκτή, έναν κινητήρα και έναν κωδικοποιητή για την επίτευξη των λειτουργιών του. Μέσω πειραμάτων, αξιολογήθηκε η απόδοση του συστήματος σε σύγκριση με διαφορετικές γωνίες περιστροφής, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η περιστροφή με 15° ανά ώρα είχε υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Παρόλα αυτά, το σύστημα αυτό δεν έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα. [37]

5.6 Επίλογος

Καθώς ολοκληρώνουμε την ανάλυση των συστημάτων παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας, είναι εμφανές ότι η κατανόηση της ηλιακής γεωμετρίας και των ποικίλων τύπων συστημάτων παρακολούθησης είναι κρίσιμες για τη βελτίωση της απόδοσης των ηλιακών εγκαταστάσεων. Η ενσωμάτωση παθητικών και ενεργών συστημάτων παρακολούθησης, καθώς και των συστημάτων μονού και διπλού άξονα, αντιπροσωπεύει ένα βήμα προς την αποδοτική εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Παράλληλα, η χρήση χρονολογικών συστημάτων ανίχνευσης ηλίου επιτρέπει την ακριβή προσαρμογή της γεωμετρίας του συστήματος στην θέση και την εποχή, μειώνοντας έτσι τις απώλειες και αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση.

Κεφάλαιο 6ο: Hardware

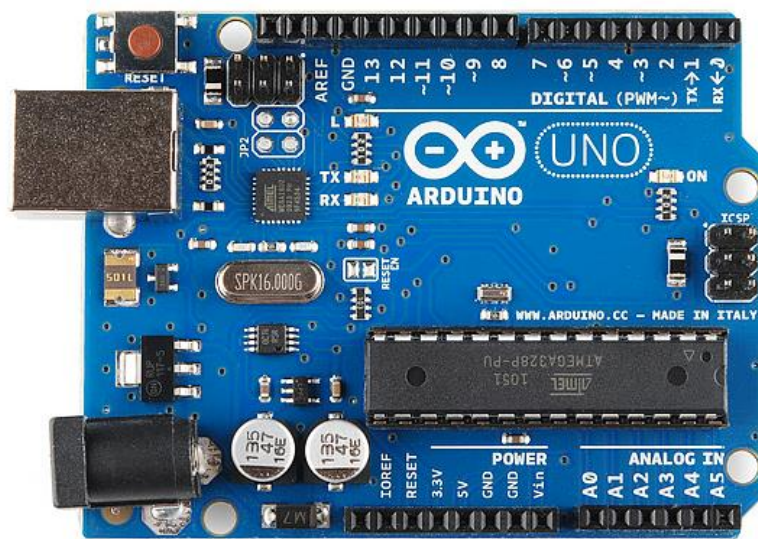
6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, θα εξετάσουμε το κατασκευαστικό κομμάτι της εργασίας με έμφαση στη συνδεσμολογία του κυκλώματος του Arduino. Το Arduino αναδεικνύεται ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη δημιουργία διάφορων ηλεκτρονικών συστημάτων. Στη διάρκεια αυτού του κεφαλαίου, θα εξετάσουμε τη συνδεσμολογία του κυκλώματος του Arduino, περιλαμβάνοντας τη σύνδεσή του με το ηλιακό πάνελ, αισθητήρες, κινητήρες, και άλλες συσκευές..

6.2 Arduino

Το Arduino αποτελεί μια πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα που εξυπηρετεί τη δημιουργία ηλεκτρονικών εργασιών. Συγκροτείται από μια φυσική προγραμματιζόμενη πλακέτα κυκλώματος, γνωστή και ως μικροελεγκτής, και ένα κομμάτι λογισμικού ή IDE (Integrated Development Environment) που εκτελείται στον υπολογιστή και χρησιμοποιείται για την εγγραφή και μεταφόρτωση κώδικα στη φυσική πλακέτα.

Η δημοφιλία του Arduino έγκειται στην ευκολία χρήσης και την ευελιξία που παρέχει στον τομέα της ηλεκτρονικής. Για τη φόρτωση νέου κώδικα απαιτείται απλώς ένα καλώδιο USB. Επιπλέον, το περιβάλλον προγραμματισμού Arduino χρησιμοποιεί μια ευανάγνωστη έκδοση της γλώσσας C++, καθιστώντας τον προγραμματισμό προσιτότερο. Τέλος, η πλατφόρμα παρέχει μια συνολική μορφή ανάλυσης των λειτουργιών του μικροελεγκτή σε μια εύκολα προσβάσιμη μορφή. [47]



Εικόνα 6.1: Arduino Uno [47]

Για την συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το Arduino Uno Rev3, διότι καλύπτει πλήρως τις ανάγκες μας για αυτό το έργο.

6.2.1 Arduino Uno

Το Arduino Uno βασίζεται σε έναν μικροελεγκτή ATmega328P και είναι εξαιρετικά εύχρηστη σε σύγκριση με άλλα μοντέλα. Διαθέτει 14 ψηφιακές ακίδες I/O, εκ των οποίων 6 υποστηρίζουν PWM, 6 αναλογικές είσοδοι, κουμπί επαναφοράς, υποδοχή τροφοδοσίας, θύρα USB και σύνδεση ICSP. Είναι έτοιμο για χρήση απλά συνδέοντάς το στον υπολογιστή μέσω καλωδίου USB και παρέχοντας τροφοδοσία μέσω προσαρμογέα AC-DC ή μπαταρίας. [48]

6.2.2 Arduino Modules

Τα Arduino modules είναι επιπλέον πλακέτες που συνδέονται απευθείας στο Arduino και προσφέρουν επιπλέον λειτουργίες και δυνατότητες στο σύστημα. Αυτά τα modules μπορεί να περιλαμβάνουν αισθητήρες, ενσωματωμένα κυκλώματα, πρόσθετες διεπαφές I/O, οθόνες, κινητήρες και άλλα. Συνδέονται στα αντίστοιχα pins του Arduino board και επεκτείνουν τις δυνατότητες του συστήματος, επιτρέποντας λειτουργίες όπως η ανάγνωση αισθητήρων, ο έλεγχος εξόδων και η επικοινωνία με άλλες συσκευές. Πολλά από αυτά τα modules συνοδεύονται από βιβλιοθήκες (libraries) που παρέχουν έτοιμο κώδικα για να επιτρέψουν εύκολη ανάπτυξη και χρήση μέσω του Arduino IDE. [51]

6.2.3 Arduino IDE

Το Arduino IDE (Integrated Development Environment) είναι μια πλατφόρμα προγραμματισμού που παρέχει ένα περιβάλλον στο οποίο οποιοσδήποτε μπορεί να γράψει, να επεξεργαστεί και να μεταγλωττίσει κώδικα για τα Arduino boards. Αυτό το περιβάλλον περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου, έναν μεταγλωττιστή που αναλαμβάνει την μετατροπή του κώδικα σε εκτελέσιμο πρόγραμμα, έναν αποσφαλματωτή (debugger) που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων και μια γραμμή εργαλείων με διάφορες λειτουργίες. [49]

Το IDE προσφέρει στον προγραμματιστή έξυπνες δυνατότητες όπως την αυτόματη συμπλήρωση κώδικα, έλεγχο σύνταξης, οπτική αναπαράσταση της δομής του προγράμματος και άλλες εργαλειοθήκες για την ανάπτυξη προγράμματος. Ο κώδικας λογισμικού γράφεται σε γλώσσα προγραμματισμού που βασίζεται στη C/C++ και παρέχονται διάφορες βιβλιοθήκες και λειτουργίες από την ίδια την εταιρία Arduino.

Το περιβάλλον παρέχει επίσης δυνατότητες για την παρακολούθηση της σύνδεσης της πλακέτας Arduino, την επεξεργασία του κώδικα μέσω του ενσωματωμένου κειμενογράφου, και την προβολή των

μηνυμάτων λάθους κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του προγράμματος. Συνολικά, το Arduino IDE αποτελεί το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιούν οι προγραμματιστές για τη δημιουργία και τη φόρτωση κώδικα στις πλακέτες Arduino. [50]

6.2.4 Libraries

Στον κλάδο της πληροφορικής, η έννοια της βιβλιοθήκης αναφέρεται σε μια συλλογή πόρων που χρησιμοποιούνται κατά την ανάπτυξη λογισμικού για την υλοποίηση ενός προγράμματος υπολογιστή. Αρχικά, μια βιβλιοθήκη αποτελούνταν κυρίως από συναρτήσεις. Σήμερα, η έννοια έχει επεκταθεί για να περιλαμβάνει διάφορες μορφές εκτελέσιμου κώδικα, όπως κλάσεις και μη εκτελέσιμα δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων εικόνων και κειμένου. [52]

Στο λογισμικό του Arduino, οι βιβλιοθήκες προσφέρουν επιπλέον λειτουργικότητα όπως η αλληλεπίδραση με τα εξαρτήματα ή η διαχείριση δεδομένων. Υπάρχει μια λίστα με διαθέσιμες βιβλιοθήκες στην αναφορά του Arduino. Ορισμένες από αυτές τις βιβλιοθήκες περιλαμβάνονται ήδη στο λογισμικό του Arduino, ενώ άλλες μπορούν να βρεθούν μέσω διαφόρων πηγών ή μέσω της Διαχείρισης Βιβλιοθήκης (Library Manager). [49]

6.3 Φωτοβολταϊκό Πάνελ

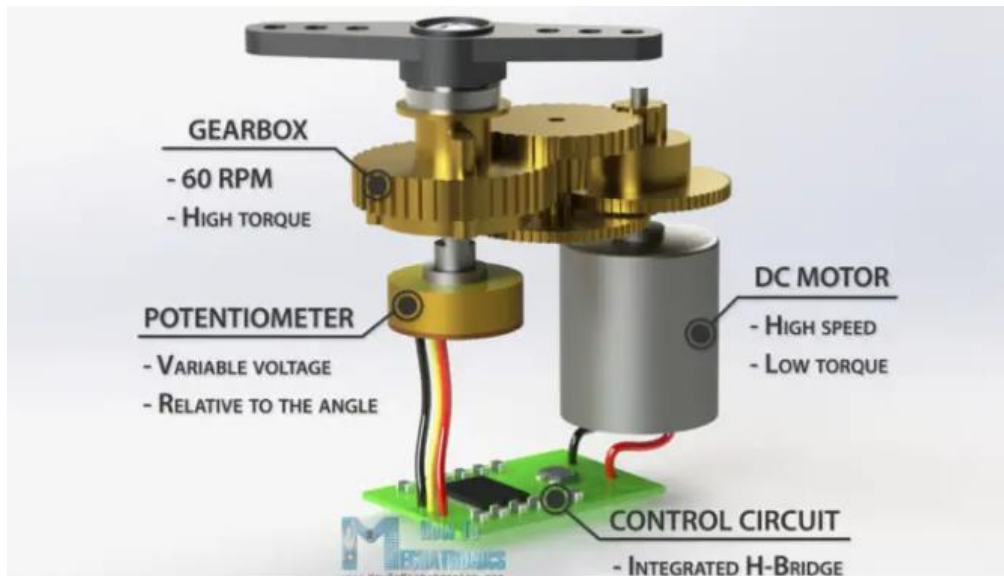
Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2ο: Φωτοβολταϊκά συστήματα, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα λειτουργούν ως μέσο μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια, δηλαδή μικρά σωματίδια ηλιακής ενέργειας. Αυτά τα φωτόνια φέρουν διαφορετικές ποσότητες ενέργειας, αντιστοιχούσες στις διαφορετικές περιοχές του ηλιακού φάσματος.

Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε φωτοβολταϊκό με τάση 3V και ισχύς 1W. Η συνδεσμολογία του φαίνεται στην Εικόνα 6.9.

6.4 Σερβοκινητήρες

Οι σερβοκινητήρες (servo motors) αποτελούν ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος κινητήρων που έχουν υιοθετηθεί σε διάφορες εφαρμογές εδώ και πολλά χρόνια. Αν και μικροί σε μέγεθος, διαθέτουν αξιοσημείωτη δύναμη και ενεργειακή απόδοση, καθιστώντας τους ιδανικούς για χρήση σε πολλές εφαρμογές, από την κίνηση τηλεκατευθυνόμενων οχημάτων μέχρι τη λειτουργία βιομηχανικών μηχανημάτων.

Η λειτουργία τους βασίζεται σε ένα σύστημα ελέγχου που ενσωματώνεται στη μονάδα του κινητήρα. Ένας άξονας με γρανάτζι συνήθως συνδέεται με έναν μικρό κινητήρα DC εντός της μονάδας. Αυτό το σύστημα ελέγχου λαμβάνει ηλεκτρικά σήματα που προσδιορίζουν την επιθυμητή κίνηση του άξονα, επιτρέποντας την ακριβή ρύθμιση της θέσης και της κατεύθυνσης.



Εικόνα 6.2: Εσωτερικό σερβοκινητήρα [Πηγή: <https://t.ly/OF05n>]

Με τη χρήση της ανάδρασης από ένα ποτενσιόμετρο, το σύστημα ελέγχου μπορεί να προσαρμόσει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του κινητήρα, επιτυγχάνοντας έτσι αναλογικό έλεγχο. Οι σερβοκινητήρες λαμβάνουν ηλεκτρικούς παλμούς (PWM) μέσω του καλωδίου ελέγχου, οι οποίοι καθορίζουν τη θέση τους και τη διάρκεια της κίνησής τους. Αυτό τους επιτρέπει να διατηρούν μια συγκεκριμένη θέση και να αντιστέκονται σε εξωτερικές δυνάμεις.

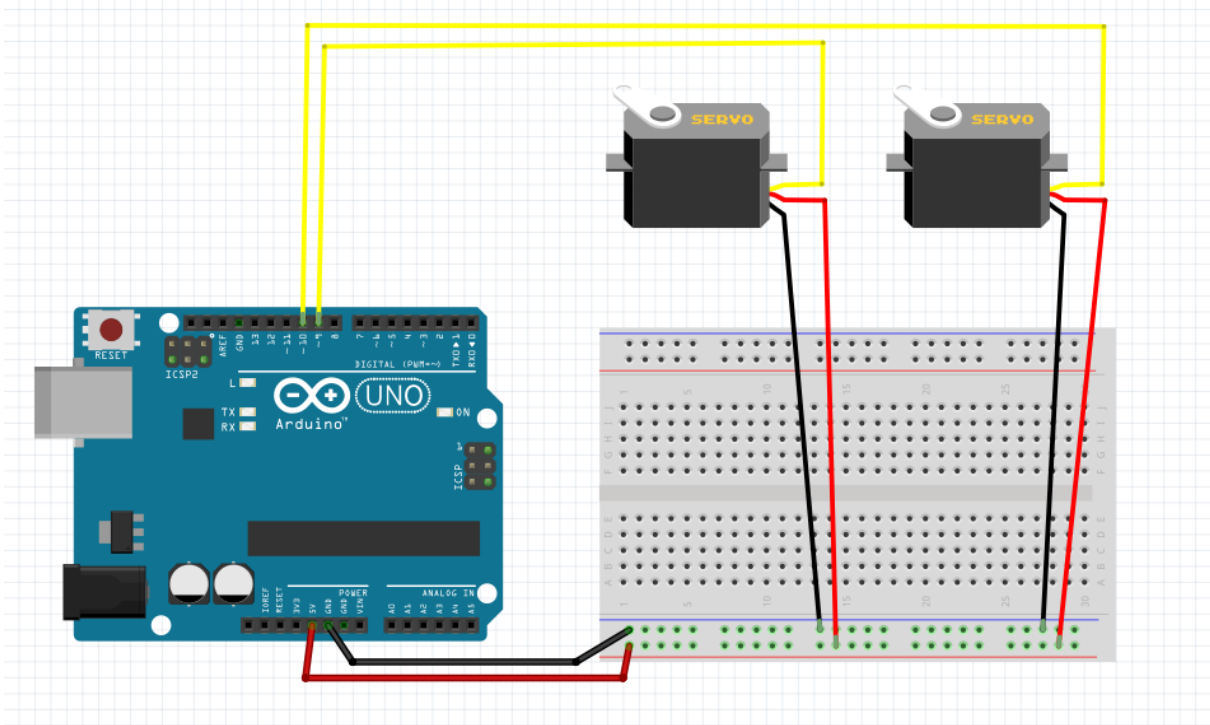
Διαθέτοντας διάφορους τύπους και μεγέθη, οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τη ρομποτική έως τη βιομηχανία και από την ψυχαγωγία μέχρι τον τομέα των τροφίμων και φαρμακευτικών προϊόντων. Οι δυνατότητές τους να προσφέρουν ακρίβεια και απόδοση τους καθιστούν ουσιαστικούς παράγοντες σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές. [42]

Για την κατασκευή της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν σερβοκινητήρες συνεχής περιστροφής 360 μοιρών για την αξιοποίηση όλων των πιθανών γωνιών ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν MG996R Continuous Rotation Servo Motor (360 deg).

Οι σερβοκινητήρες έχουν από 3 female pins και είναι τα εξής:

- VCC: Τροφοδοσία του σερβοκινητήρα 5V. Θα πρέπει να συνδεθεί με τα 5V από το Arduino.
- GND: Γείωση του σερβοκινητήρα. Θα πρέπει να συνδεθεί με την ακίδα γείωσης του Arduino.

- CONTROL: Σήμα PWM. Θα πρέπει να συνδεθεί με μια Digital ακίδα του Arduino.



Εικόνα 6.3: Συνδεσμολογία Arduino - Servo motors

6.5 Αισθητήρας DHT11

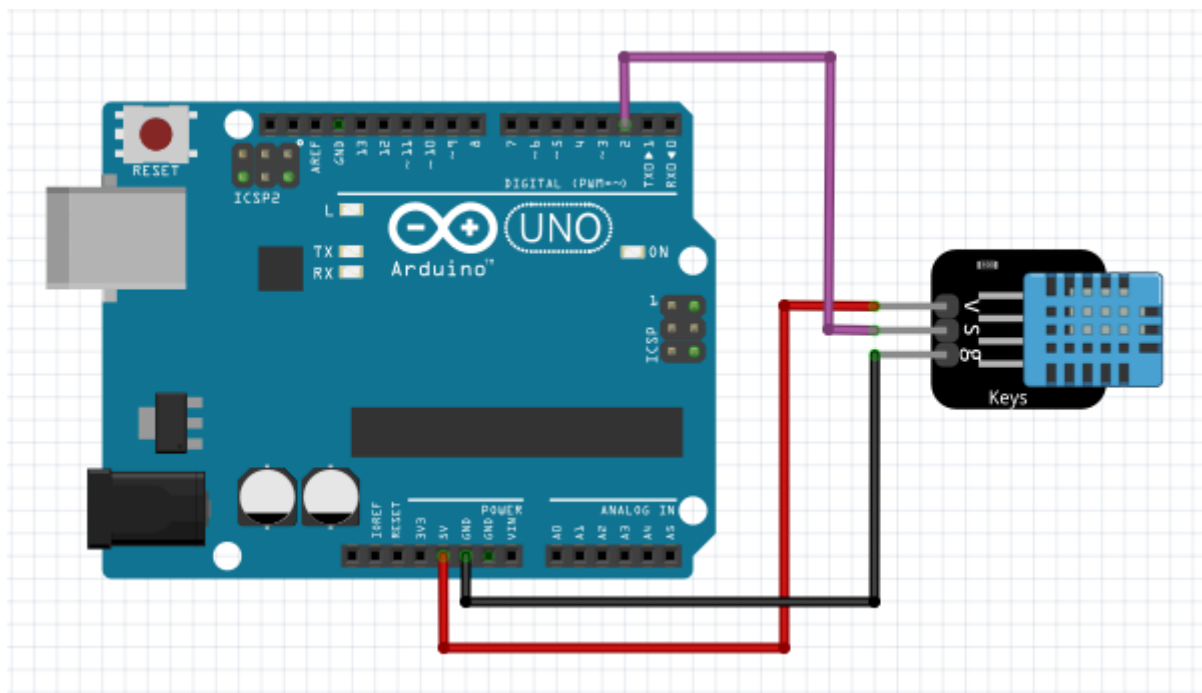
Ο αισθητήρας DHT11 είναι ένας ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας, που προσφέρει ακρίβεια και ευκολία σύνδεσης με μικροελεγκτές όπως το Arduino ή το Raspberry Pi για άμεση μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Ο αισθητήρας αυτός διατίθεται σε μορφή αισθητήρα ή module, με την κύρια διαφορά να είναι η παρουσία μιας αντίστασης έλξης και ενός LED ενεργοποίησης στο module. Χρησιμοποιεί έναν χωρητικό αισθητήρα για τη μέτρηση της υγρασίας και ένα θερμίστορ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Το εύρος λειτουργίας του DHT11 κυμαίνεται από 0 έως 50 βαθμούς Κελσίου με ακρίβεια 2 βαθμών για τη θερμοκρασία και από 20% έως 80% για την υγρασία με ακρίβεια 5%.

Με τη δυνατότητα να πραγματοποιεί μια ανάγνωση κάθε δευτερόλεπτο, αποτελεί έναν εξαιρετικά χρήσιμο αισθητήρα για πολλές εφαρμογές, όπως στα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού, καθώς και σε μετεωρολογικούς σταθμούς και σε περιβάλλοντα όπου η υγρασία μπορεί να επηρεάσει την υγεία και την άνεση των ανθρώπων. [39]

Το module του αισθητήρα DHT11 περιλαμβάνει 3 ακίδες (pins), τα οποία είναι τα εξής:

- VCC: Τροφοδοσία 3,5V έως 5,5V

- DATA: Εξάγει θερμοκρασία και υγρασία μέσω σειριακών δεδομένων
- GND: Συνδεδεμένο με τη γείωση του κυκλώματος



Εικόνα 6.4: Συνδεσμολογία Arduino - DHT11

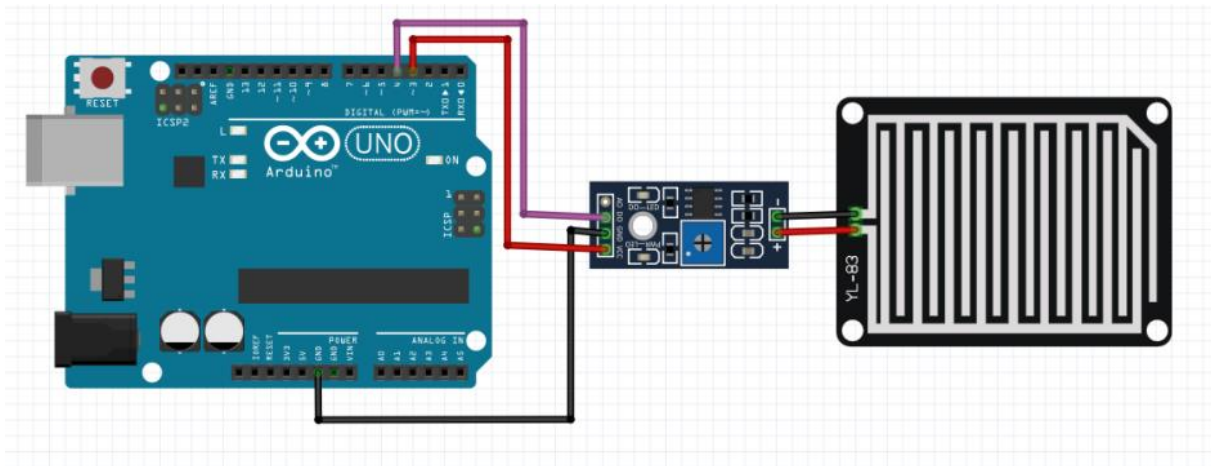
6.6 Αισθητήρας ανίχνευσης σταγόνων βροχής

Η λειτουργία του αισθητήρα βροχής είναι αρκετά απλή και βασίζεται στη μεταβολή της αντίστασής του ανάλογα με την ποσότητα του νερού που εκτίθεται σε αυτόν. Το αισθητήριο περιλαμβάνει μια σειρά από ίχνη χαλκού που αλλάζουν την αντίστασή τους ανάλογα με την υγρασία. Αυτή η αντίσταση είναι αντίστροφα ανάλογη με την ποσότητα του νερού: όσο περισσότερο νερό, τόσο χαμηλότερη η αντίσταση και αντίστροφα. [40]

Ο αισθητήρας ανίχνευσης βροχής αποτελείται από δύο βασικά μέρη: το PCB του αισθητήρα και τη μονάδα επεξεργασίας σήματος. Η μονάδα επεξεργασίας διαχειρίζεται τα δεδομένα από τον αισθητήρα και μπορεί να παρέχει ταυτόχρονα αναλογικά και ψηφιακά δεδομένα. Η μονάδα αισθητήρα διαθέτει ακίδες για τροφοδοσία και γη, καθώς και ακίδες για την έξοδο των δεδομένων. Επιπλέον, περιλαμβάνει δύο ενσωματωμένα LED για την ένδειξη της λειτουργίας και της τροφοδοσίας. Στο κύκλωμα υπάρχει επίσης ένας τελεστικός ενισχυτής (OP-Amp) που μετατρέπει το αναλογικό σήμα του αισθητήρα σε ψηφιακό. Τέλος, η πλακέτα περιλαμβάνει ένα ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της ευαισθησίας της συσκευής. [41]

Τα pins του αισθητήρα ανίχνευσης βροχής είναι τα εξής:

- VCC: Τροφοδοσία του αισθητήρα, συνιστάται μεταξύ 3,3V έως 5V. Η αναλογική έξοδος θα ποικίλλει ανάλογα με την τάση που παρέχεται στην τροφοδοσία.
- GND: Γείωση της πλακέτας. Θα πρέπει να συνδεθεί με την ακίδα γείωσης του Arduino.
- DO: Ψηφιακή ακίδα εξόδου της πλακέτας. Η χαμηλή έξοδος υποδηλώνει ανίχνευση βροχής και η υψηλή ότι δεν υπάρχει κατάσταση βροχής.
- AO: Αναλογική ακίδα εξόδου της πλακέτας που θα μας δώσει ένα αναλογικό σήμα μεταξύ VCC και GND.



Εικόνα 6.5: Συνδεσμολογία Arduino - Rain drop sensor

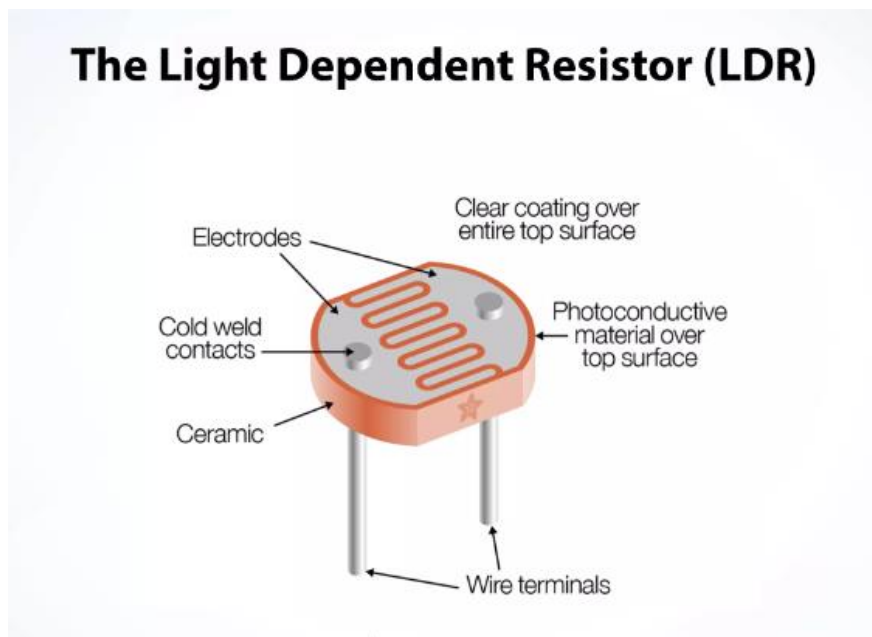
6.7 Φωτοαντιστάσεις (LDR)

Τα Light Dependent Resistors (LDR) αποτελούν μικροσκοπικές συσκευές ανίχνευσης φωτός, γνωστές επίσης ως φωτοαντιστάσεις. Η βασική λειτουργία τους βασίζεται στη μεταβολή της αντίστασής τους ανάλογα με την ποσότητα του φωτός που τους φωτίζει. Με άλλα λόγια, η αντίστασή τους μειώνεται όταν εκτίθενται σε μεγαλύτερη φωτεινότητα και αυξάνεται όταν η φωτεινότητα μειώνεται. Αυτή η ιδιότητα τους επιτρέπει να χρησιμοποιούνται ευρέως στη δημιουργία κυκλωμάτων που ανιχνεύουν τη φωτεινότητα.

Ο όρος LDR προέρχεται από τη φράση Light Dependent Resistor, δηλαδή αντίσταση εξαρτώμενη από το φως. Οι αντιστάσεις αυτές αποτελούν μη γραμμικές συσκευές, με την ευαισθησία τους να μεταβάλλεται ανάλογα με το φάσμα του φωτός που τις επηρεάζει. Τα LDR συνήθως κατασκευάζονται από ευαίσθητα ημιαγωγικά υλικά όπως το θειούχο κάδμιο, τα οποία υπόκεινται σε δραματικές μεταβολές στην ηλεκτρική τους αντίσταση όταν φωτίζονται.

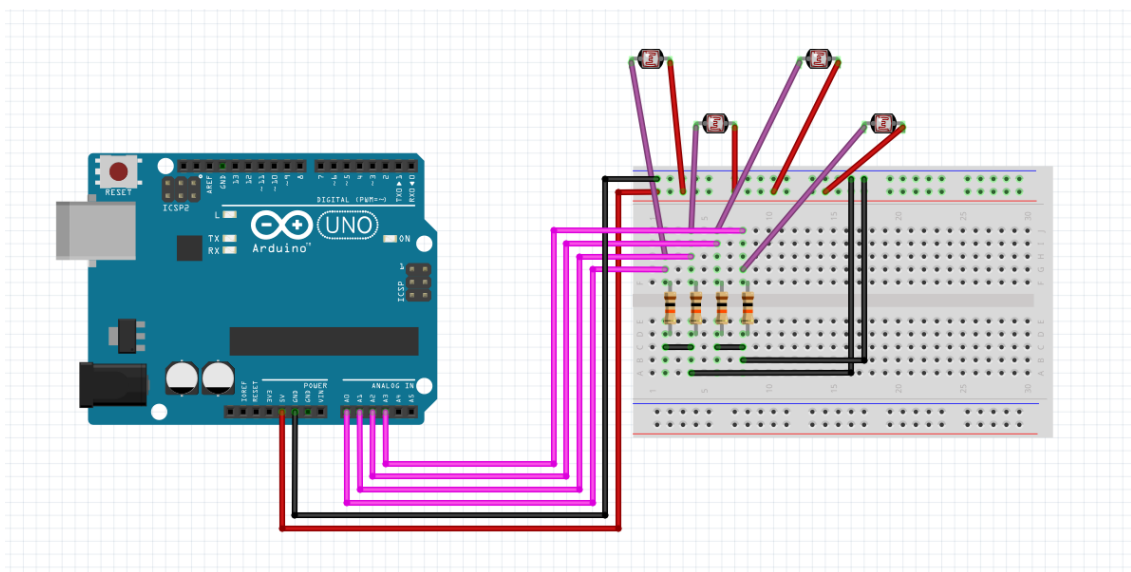
Επιπλέον, οι αισθητήρες φωτός μπορούν να αναλύσουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε διάφορα φάσματα, όπως τα υπέρυθρα, το ορατό και το υπεριώδες, παράγοντας σήματα που αντιπροσωπεύουν τη φωτεινότητα του περιβάλλοντος. Αυτά τα σήματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα από παθητικές

συσκευές που ονομάζονται αισθητήρες φωτός. Οι φωτοαντιστάσεις, με τη μετατροπή της ενέργειας του φωτός σε ηλεκτρικό σήμα, αναφέρονται επίσης ως φωτοηλεκτρικές συσκευές ή φωτοαισθητήρες.



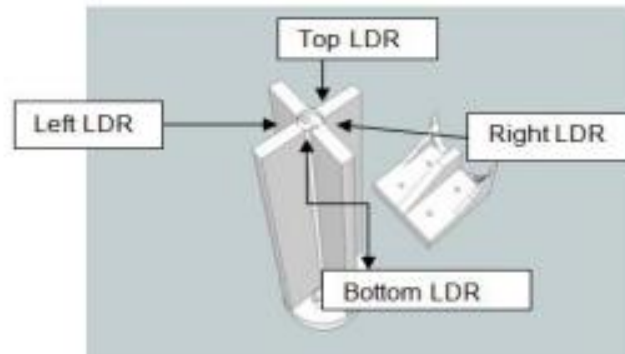
Εικόνα 6.6: Δομή φωτοαντίστασης [43]

Για να χρησιμοποιηθεί ένας LDR, συνήθως απαιτείται ένα κύκλωμα διαιρετή τάσης. Όταν η αντίσταση του LDR αυξάνεται σε σύγκριση με τη σταθερή αντίσταση, η τάση σε αυτό αυξάνεται επίσης. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως η αυτόματη ρύθμιση φωτισμού, ο έλεγχος φωτός και σκοταδιού σε φωτισμό δρόμων και φωτογραφικούς μετρητές έκθεσης. [44,45]



Εικόνα 6.7: Συνδεσμολογία Arduino - LDR

Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν LDR για την ακριβή παρακολούθηση της θέσης του ήλιου και τον αυτόματο προσανατολισμό του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η τοποθέτηση των LDR γίνεται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα καθώς η ακρίβεια του αισθητήρα καθορίζεται από την παρουσία σκιών, οι οποίες προκαλούνται από την κατακόρυφη ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 6.8: Διάταξη των LDR [46]

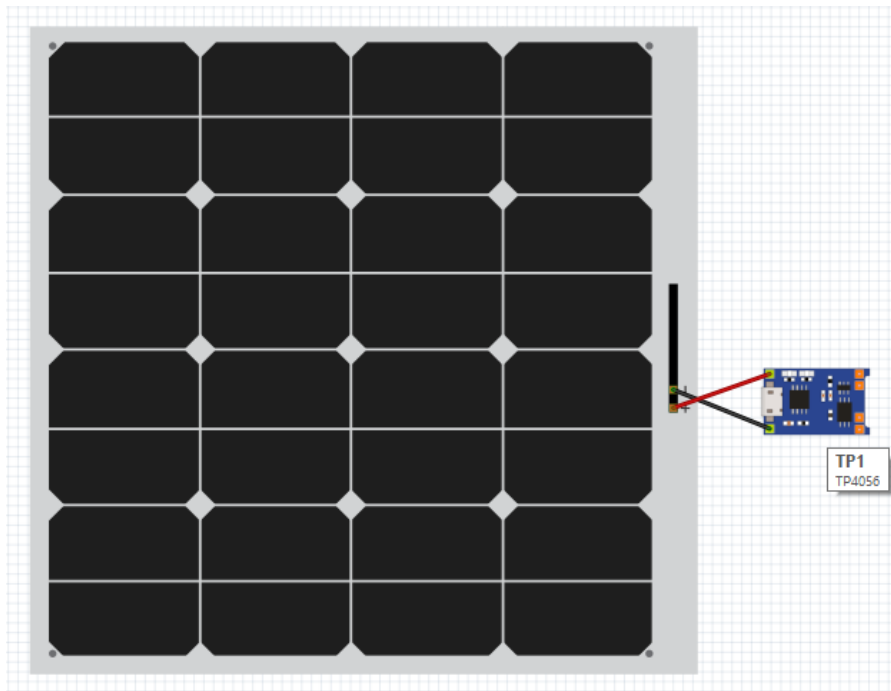
6.8 Ο Φορτιστής Micro Usb TP4056

Η μονάδα TP4056 αποτελεί ένα γραμμικό κύκλωμα φόρτισης που παρέχει σταθερό ρεύμα και τάση για μπαταρίες λιθίου 3,7 V. Παρακολουθεί διαρκώς την τάση της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης για να προστατεύσει από υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα. Λειτουργεί με τάση 5V και ρεύμα 1A DC και μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω καλωδίου USB A σε Micro-B, συνήθως από έναν προσαρμογέα smartphone.

Για την κατασκευή του ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα ο φορτιστής TP4056 θα τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκό 3V / 1W.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να εκραγούν εάν υπερφορτιστούν, βραχυκυκλωθούν ή εκφορτιστούν/φορτιστούν με υπερβολικά υψηλά ρεύματα. Η μονάδα TP4056 λειτουργεί ως φορτιστής και παρέχει προστασία για τις μπαταρίες λιθίου. Στο εσωτερικό της μονάδας, χρησιμοποιούνται τα τσιπ TP4056A, DW01A και FS8205A (Dual N-Channel MOSFET).

Η μονάδα περιλαμβάνει τέσσερα κύρια τμήματα, με κάθε ένα να εκτελεί διαφορετικές λειτουργίες. Το πρώτο τμήμα είναι το USB, το οποίο περιλαμβάνει μια θύρα micro USB Type-B για τη λήψη ρεύματος. Το δεύτερο τμήμα είναι το τμήμα παρακολούθησης φόρτισης, το οποίο ελέγχει την τάση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Το τρίτο τμήμα είναι η ενότητα ένδειξης κατάστασης, η οποία ενεργοποιεί κόκκινο LED κατά τη φόρτιση και μπλε LED όταν η φόρτιση ολοκληρωθεί. Τέλος, το τμήμα εκφόρτισης και προστασίας προστατεύει τη μπαταρία από υπερφόρτιση, υπερβολική εκφόρτιση και βραχυκύκλωμα. [38]



Εικόνα 6.9: Συνδεσμολογία Solar cell - TP4056

Το TP4056 περιλαμβάνει 6 ακίδες (pins), τα οποία είναι τα εξής:

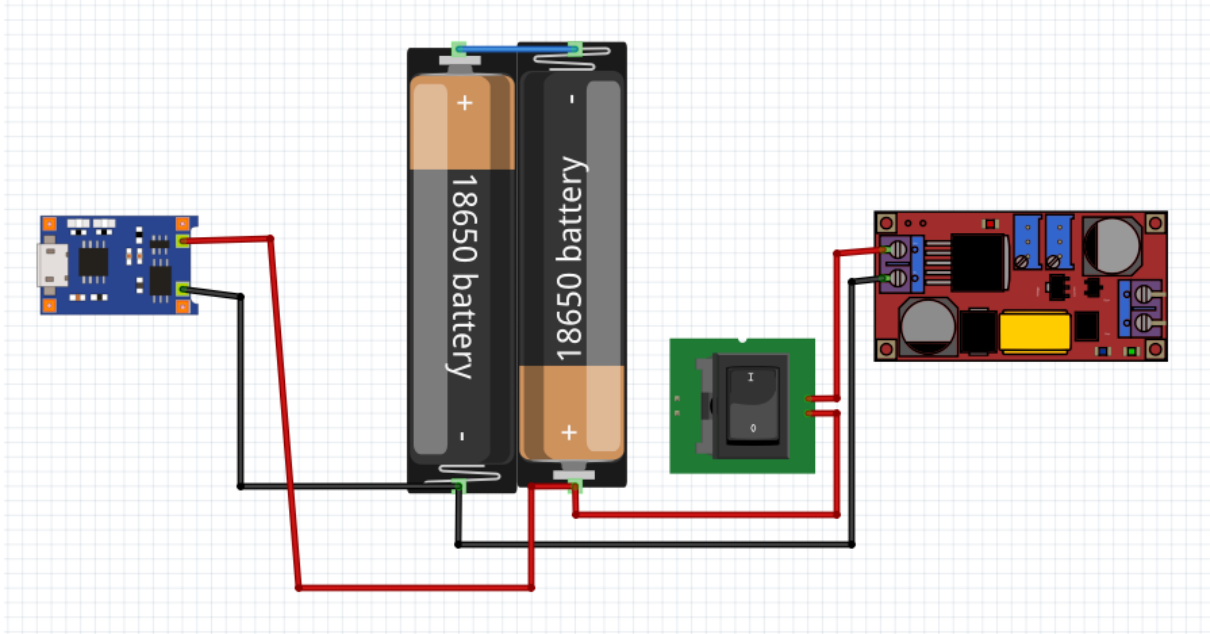
- IN+: Εναλλακτική τροφοδοσία εισόδου +5V στη συσκευή
- IN-: Γείωση συσκευής
- B+: Παροχή θετικής τροφοδοσίας εξόδου για φόρτιση μπαταρίας λιθίου 3,7V
- B-: Παροχή αρνητικής τροφοδοσίας εξόδου για φόρτιση μπαταρίας λιθίου 3,7V
- OUT+: Παροχή θετικής εξόδου από τη συνδεδεμένη κυψέλη λιθίου στο φορτίο
- OUT -: Γείωση στο φορτίο και ανίχνευση του βραχυκυκλώματος

6.9 Μετατροπέας Buck DC-DC

Όπως αναλύσαμε και στο Κεφάλαιο 4ο: Μετατροπείς Ισχύος, ο μετατροπέας Buck είναι ένας step-down μετατροπέας ο οποίος μειώνει την τάση εξόδου σε σχέση με την είσοδο. Η μονάδα XL4015 Step-Down Converter που θα χρησιμοποιήσουμε στην συγκεκριμένη εργασία, είναι μια ευέλικτη μονάδα ρυθμιστή τάσης που έχει σχεδιαστεί για να μειώνει τις τάσεις εισόδου που κυμαίνονται από 4V έως 38V σε ρυθμιζόμενη έξοδο 1,25V έως 36V. Ο μετατροπέας επίσης διαθέτει ρυθμιζόμενο ρεύμα έως 5A, που μας επιτρέπει την τροφοδότηση του Arduino, των σερβοκινητήρων και του υπόλοιπου κυκλώματος.

Το Buck Converter περιλαμβάνει 4 ακίδες (pins), τα οποία είναι τα εξής:

- IN+: Παροχή θετικής τροφοδοσίας από τη συνδεδεμένη μπαταρία λιθίου 3,7V
- IN-: Παροχή αρνητικής τροφοδοσίας από τη συνδεδεμένη μπαταρία λιθίου 3,7V
- OUT+: Παροχή θετικής τροφοδοσίας στο Arduino Uno
- OUT-: Παροχή αρνητικής τροφοδοσίας στο Arduino Uno



Εικόνα 6.10: Συνδεσμολογία TP4056 - Buck Converter

6.10 Μπαταρία

Η χρήση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας στο πλαίσιο αυτής της εργασίας προσφέρει πολλά οφέλη. Καταρχάς, η επαναφορτιζόμενη μπαταρία παρέχει αυτονομία στο σύστημα, επιτρέποντάς του να λειτουργεί ακόμα και κατά τις περιόδους χαμηλής ή απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, λειτουργεί ως αποθηκευτικός χώρος για την παραγόμενη ηλιακή ενέργεια, επιτρέποντας τη χρήση της και κατά τις νυχτερινές ή σκοτεινές περιόδους. Η επαναχρησιμοποίηση μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας συμβάλλει επίσης στην οικονομία χρημάτων μακροπρόθεσμα, καθώς δεν απαιτείται η αγορά νέων μπαταριών κάθε φορά που εξαντλείται η ενέργειά τους. Τέλος, η χρήση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας συνδυάζει την απόδοση, την αυτονομία, την οικονομία και την περιβαλλοντική φιλικότητα σε ένα ολοκληρωμένο πακέτο. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούμε δύο μπαταρίες 18650 3,7V, συνδεδεμένες σε σειρά.

6.11 LCD Οθόνη

Μια τυπική οθόνη LCD που χρησιμοποιεί την τεχνολογία I2C αποτελείται από δύο βασικά μέρη: την οθόνη LCD χαρακτήρων τύπου HD44780 και έναν προσαρμογέα LCD που υποστηρίζει την τεχνολογία I2C. Αυτές οι οθόνες χρησιμοποιούν μόνο δύο ακίδες εισόδου/εξόδου για την επικοινωνία, οι οποίες

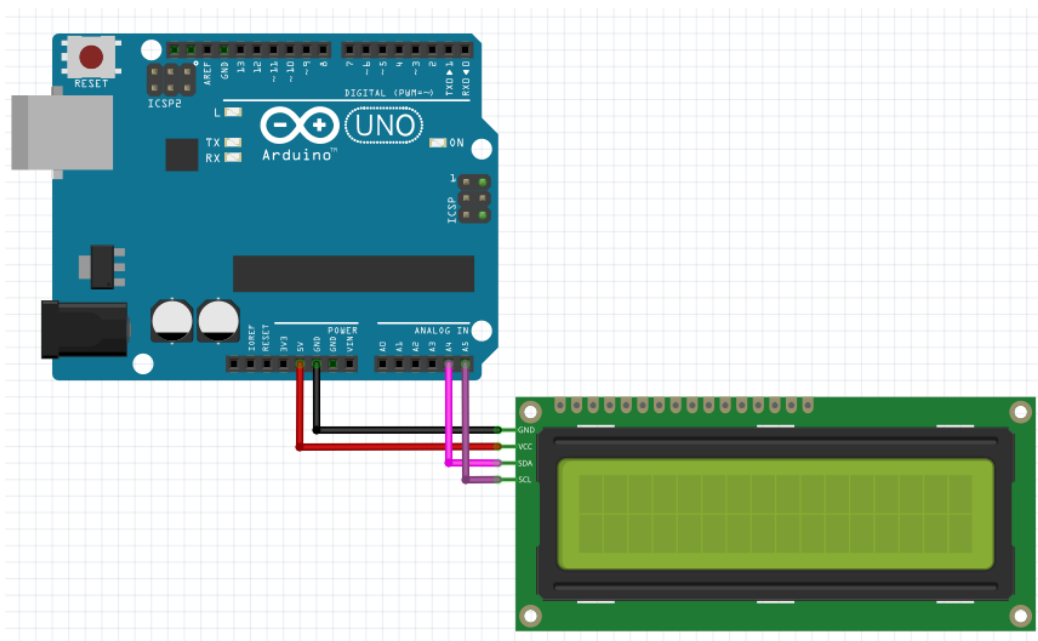
Κεφάλαιο 4

δεν ανήκουν στο σύνολο των ψηφιακών ακίδων I/O, και μπορούν να μοιραστούν με άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία I2C. Αυτές οι οθόνες είναι ιδανικές μόνο για την εμφάνιση χαρακτήρων.

Στην ουσία, η οθόνη LCD είναι ένα πλέγμα χαρακτήρων ASCII, όπου κάθε χαρακτήρας αποτελείται από μικροσκοπικά ορθογώνια, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από ένα πλέγμα 5x8 pixel. Ο προσαρμογέας LCD περιέχει ένα τσιπ επέκτασης I/O 8-bit, γνωστό ως PCF8574, το οποίο μετατρέπει τα δεδομένα που λαμβάνονται μέσω της τεχνολογίας I2C από ένα Arduino σε παράλληλα δεδομένα που απαιτούνται για την οθόνη LCD. Επιπλέον, η πλακέτα περιλαμβάνει ένα μικροσκοπικό εξάρτημα για την ρύθμιση της αντίθεσης της οθόνης και ένα jumper για τον έλεγχο της έντασης του οπίσθιου φωτισμού. [53]

Το I2C LCD Display περιλαμβάνει 4 ακίδες (pins), τα οποία είναι τα εξής:

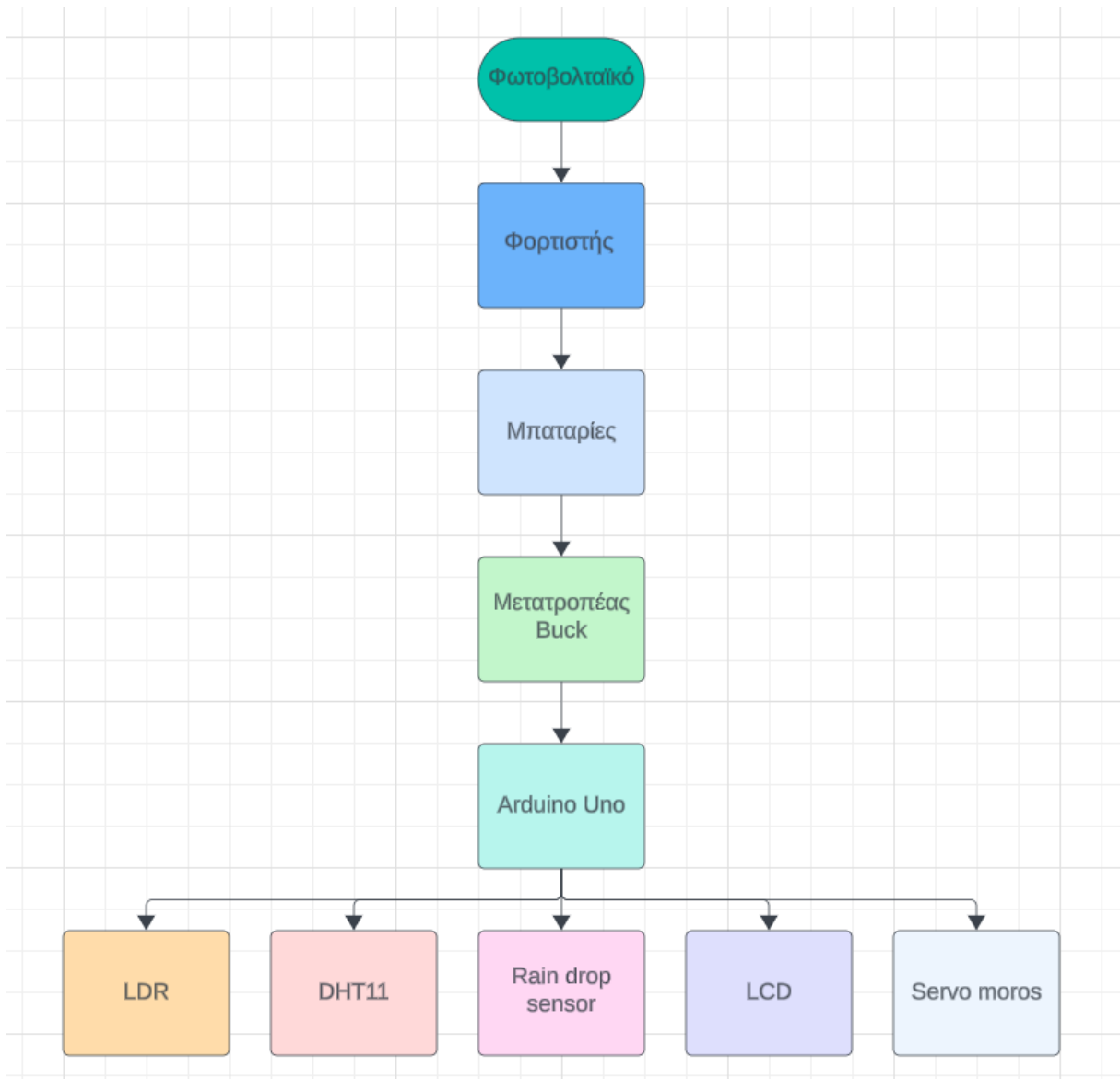
- VCC: Τροφοδοσία 5V. Συνδέεται στην έξοδο 5V του Arduino.
- GND: Γείωση της πλακέτας. Θα πρέπει να συνδεθεί με την ακίδα γείωσης του Arduino.
- SDA: Ακίδα δεδομένων I2C.
- SCL: Ακίδα ρολογιού I2C.



Εικόνα 6.11: Συνδεσμολογία Arduino - I2C LCD

6.12 Block Διάγραμμα Κυκλώματος

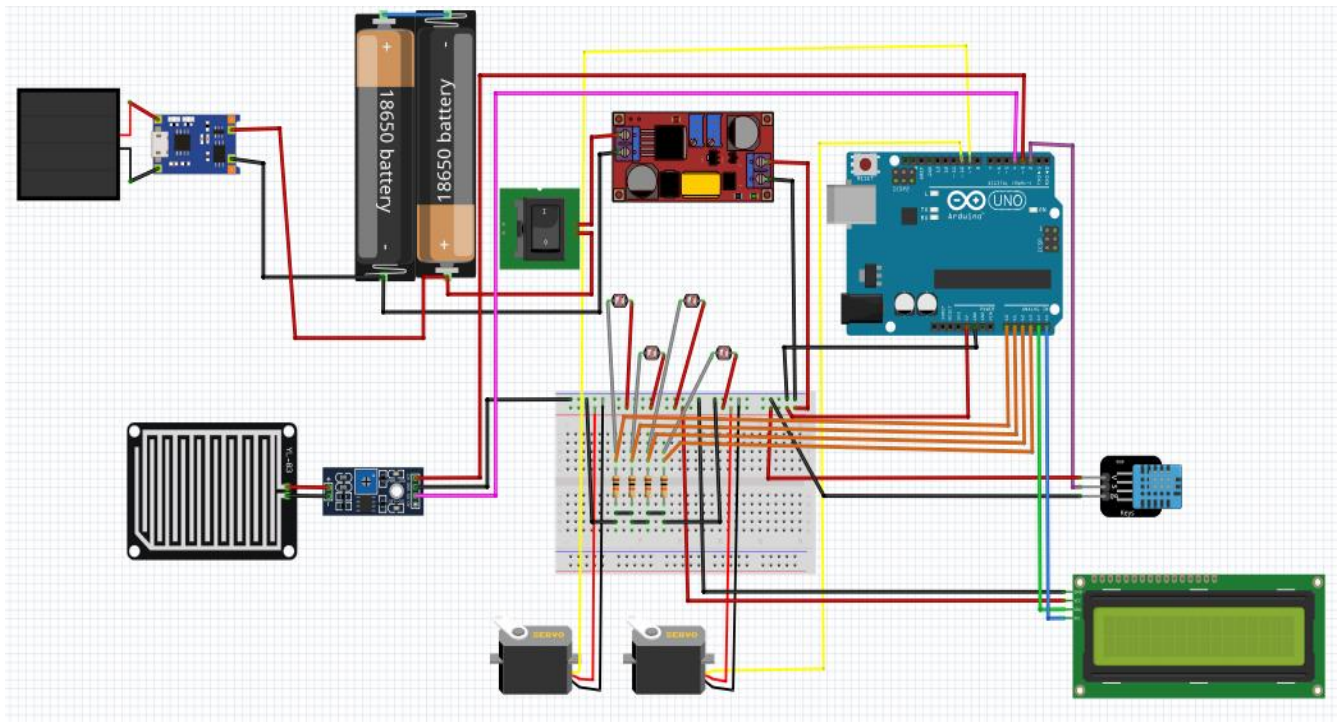
Στην Εικόνα 6.12 παρουσιάζονται γραφικά οι συνδέσεις των επιμέρους μονάδων του συστήματος.



Εικόνα 6.12: Block Διάγραμμα Κυκλώματος

6.13 Προσομοίωση Συστήματος

Στην Εικόνα 6.13 παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα της εργασίας μέσω του προγράμματος προσομοίωσης fritzing.



Εικόνα 6.13: Ολοκληρωμένο κύκλωμα

Κεφάλαιο 7ο: Software

7.1 Εισαγωγή

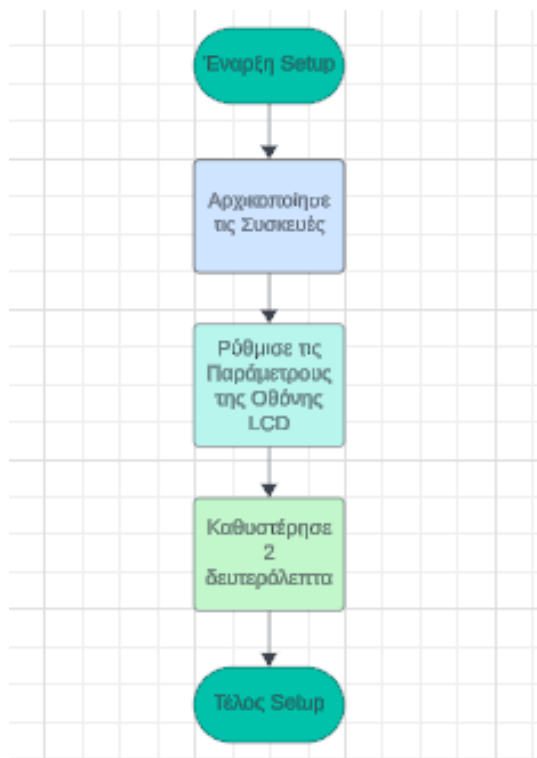
Στο πλαίσιο της εργασίας με θέμα το σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα με αισθητήρα καιρού, ο προγραμματισμός του Arduino αποτελεί το κλειδί για τη λειτουργία του συστήματος. Αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσει λεπτομερώς τον τρόπο προγραμματισμού του Arduino. Θα εξετάσουμε τον κώδικα που πρέπει να γραφεί για το κάθε εξάρτημα που θα χρησιμοποιηθεί όπως για τους αισθητήρες και τους σερβοκινητήρες.

Ο κώδικας που θα ακολουθήσει αποτελεί προσαρμογή ενός υπάρχοντος κώδικα, ο οποίος προέρχεται από βιβλιοθήκες που παρέχονται δωρεάν στο διαδίκτυο.

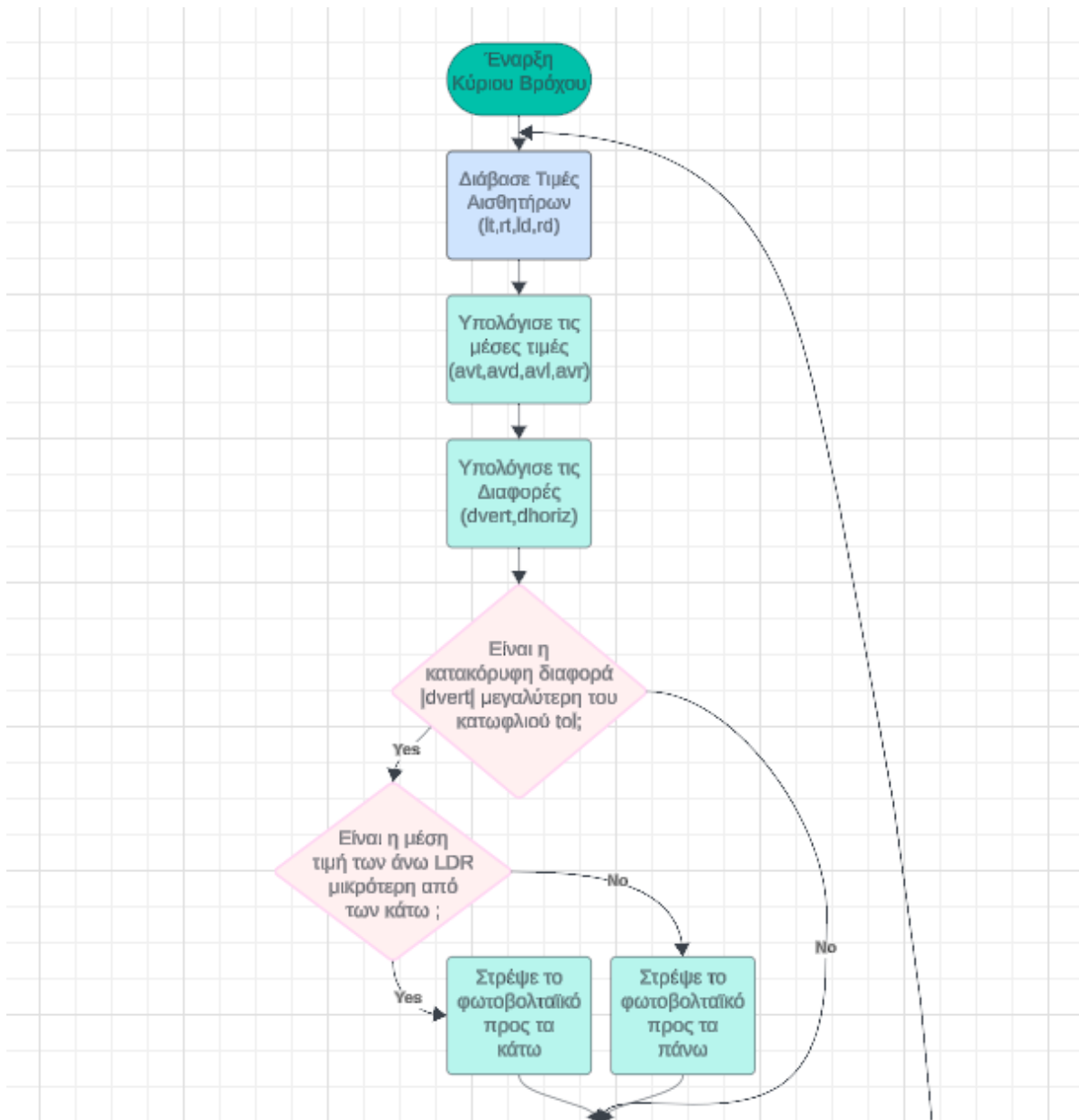
7.2 Arduino Code

7.2.1 Διάγραμμα Ροής Προγράμματος (Flowchart)

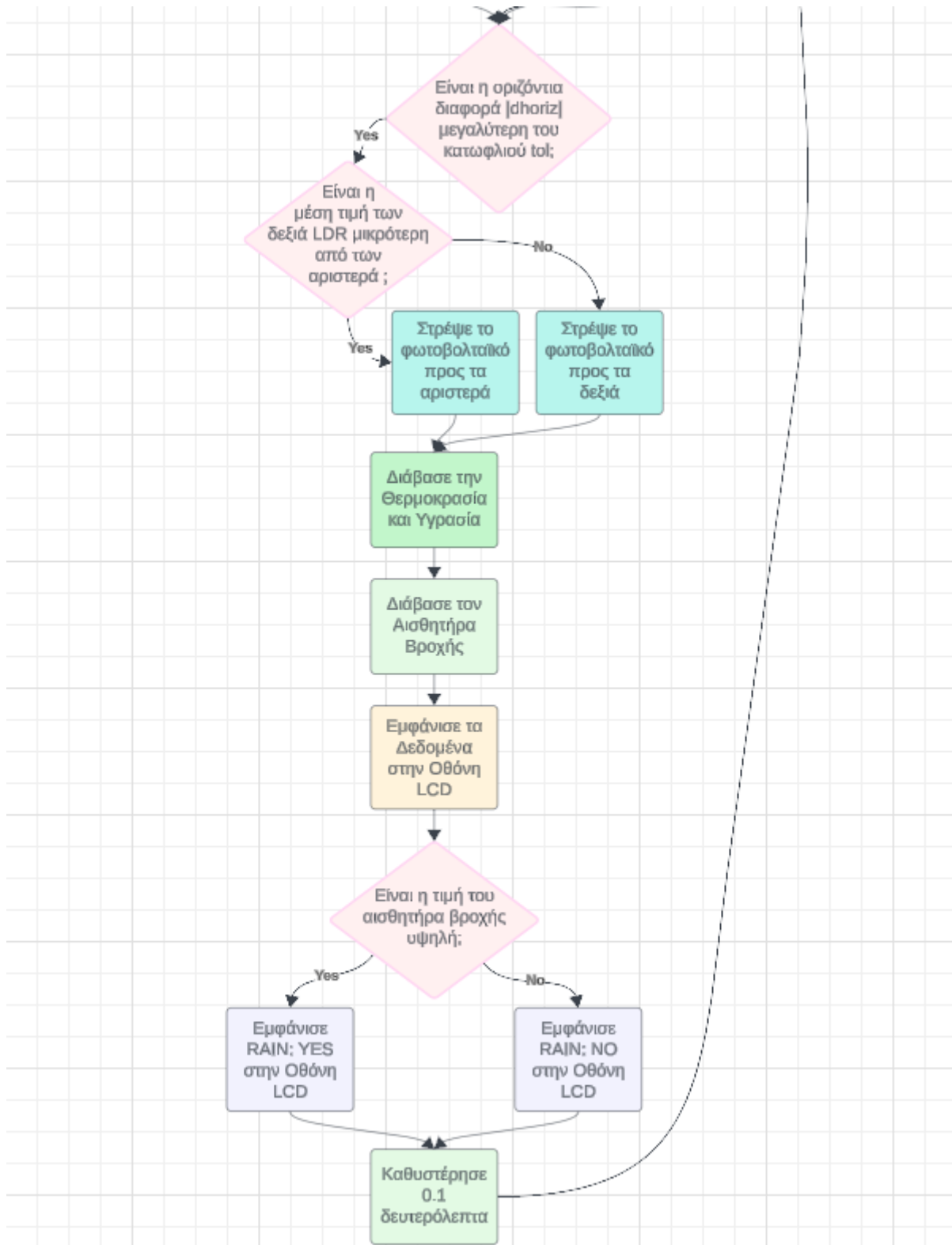
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται γραφικά το διάγραμμα ροής του προγράμματος. Στην Εικόνα 7.1 φαίνεται η λογική πορεία του setup και την συνέχεια στις Εικόνες 7.2 , 7.3 γίνεται υπόδειξη της λογικής πορείας του void loop του προγράμματος.



Εικόνα 7.1: Setup Flowchart



Εικόνα 7.2: Main loop Flowchart 1



Εικόνα 7.3: Main loop Flowchart 2

7.2.2 LDR Code

Αυτό το τμήμα του κώδικα διαβάζει αναλογικές τιμές από τέσσερα LDR (πάνω αριστερά, πάνω δεξιά, κάτω αριστερά, κάτω δεξιά) συνδεδεμένα σε αναλογικές ακίδες του Arduino. Υπολογίζει τις μέσες τιμές για τις μετρήσεις πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά, καθώς και τις διαφορές μεταξύ των μέσων όρων από πάνω-κάτω και αριστερά-δεξιά. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού των πηγών φωτός σε σχέση με τη διάταξη LDR.

```
int lt = analogRead(0); // Read analog value from top left
int rt = analogRead(1); // Read analog value from top right
int ld = analogRead(2); // Read analog value from down left
int rd = analogRead(3); // Read analog value from down right
int avt = (lt + rt) / 2; // Calculate average value for top readings
int avd = (ld + rd) / 2; // Calculate average value for down readings
int avl = (lt + ld) / 2; // Calculate average value for left readings
int avr = (rt + rd) / 2; // Calculate average value for right readings
int dvert = avt - avd; // Calculate difference between top and down readings
int dhoriz = avl - avr; // Calculate difference between left and right readings
```

Εικόνα 7.4: Κώδικας ενδείξεων LDR

7.2.3 Servo Code

Σε αυτό το μέρος του κώδικα, το Arduino ελέγχει δύο σερβοκινητήρες (οριζόντιο και κάθετο) με βάση τις μετρήσεις από τα LDR. Προσαρμόζει τη θέση των σερβομηχανισμών για να ευθυγραμμίσει το φωτοβολταϊκό (το οποίο περιλαμβάνει τη διάταξη των LDR) με την κατεύθυνση της μέγιστης έντασης του φωτός. Οι θέσεις του σερβομηχανισμού προσαρμόζονται σταδιακά με βάση τις διαφορές μεταξύ των ενδείξεων, διασφαλίζοντας ακριβή ευθυγράμμιση με τις πηγές φωτός.

```

#include <Servo.h>

Servo horizontal; // Horizontal servo
Servo vertical;   // Vertical servo

// Servo position limits
int servoh = 90;
int servov = 45;
int servohLimitHigh = 180;
int servohLimitLow = 0;
int servovLimitHigh = 180;
int servovLimitLow = 0;

void setup() {
  horizontal.attach(9);
  vertical.attach(10);
  horizontal.write(90);
  vertical.write(45);
  delay(2000);
}

```

Εικόνα 7.5: Κώδικας δήλωσης μεταβλητών σερβοκινητήρων

Ο κώδικας της Εικόνας 7.5 αποτελεί επεξεργασία του κώδικα της βιβλιοθήκης Servo.h που διατίθεται δωρεάν στο επίσημο site του Arduino. Η βιβλιοθήκη Servo.h χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των σερβοκινητήρων και με το Servo horizontal, Servo vertical δηλώνουμε τον έλεγχο οριζόντιων και κάθετων σερβοκινητήρων. Στην συνέχεια, δηλώνουμε μεταβλητές για τις θέσεις και τα όρια των σερβοκινητήρων και στο setup δηλώνουμε τις λειτουργίες που θα εκτελούνται μία φορά κατά την ενεργοποίηση του Arduino.

Στην Εικόνα 7.6 φαίνεται το μέρος του κώδικα που αφορά τον έλεγχο των σερβοκινητήρων. Το πρώτο κομμάτι προσαρμόζει τον κατακόρυφο σερβομηχανισμό με βάση τη διαφορά μεταξύ των μέσων ενδείξεων επάνω και μέσου όρου κάτω. Το δεύτερο κομμάτι προσαρμόζει τον οριζόντιο σερβομηχανισμό με βάση τη διαφορά μεταξύ των μέσων μετρήσεων αριστερά και μέσης δεξιάς ένδειξης. Το tol από το tolerance έχει σκοπό να θέσει μια ανοχή για αποδεκτές διαφορές μεταξύ των θέσεων των σερβοκινητήρων πριν από τη λήψη διορθωτικών κινήσεων. Έτσι, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του πότε η διαφορά μεταξύ των ενδείξεων LDR είναι αρκετά σημαντική για να ενεργοποιήσει την λειτουργία των σερβοκινητήρων.

```

// Servo Control
if (-1 * tol > dvert || dvert > tol) {
  if (avt < avd) {
    servov++; // Increment vertical servo position
    if (servov > servovLimitHigh) {
      servov = servovLimitHigh; // Limit servo position to upper bound
    }
    vertical.write(servov); // Set vertical servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  } else if (avt > avd) {
    servov--; // Decrement vertical servo position
    if (servov < servovLimitLow) {
      servov = servovLimitLow; // Limit servo position to lower bound
    }
    vertical.write(servov); // Set vertical servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  }
}

if (-1 * tol > dhoriz || dhoriz > tol) {
  if (avl > avr) {
    servoh--; // Decrement horizontal servo position
    if (servoh < servohLimitLow) {
      servoh = servohLimitLow; // Limit servo position to lower bound
    }
    horizontal.write(servoh); // Set horizontal servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  } else if (avl < avr) {
    servoh++; // Increment horizontal servo position
    if (servoh > servohLimitHigh) {
      servoh = servohLimitHigh; // Limit servo position to upper bound
    }
    horizontal.write(servoh); // Set horizontal servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  }
}
}

```

Εικόνα 7.6: Έλεγχος σερβομηχανισμού

7.2.4 DHT11 Code

Αυτή η ενότητα χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα DHT11 για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Το Arduino διαβάζει τα δεδομένα του αισθητήρα χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες `readTemperature()` και `readHumidity()` που παρέχονται από τη βιβλιοθήκη DHT, την οποία βρίσκουμε έτοιμη από το site του Arduino. Οι λαμβανόμενες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας χρησιμοποιούνται για περιβαλλοντική παρακολούθηση και στην συνέχεια μπορούν να εμφανιστούν στην LCD οθόνη.

```

#include <DHT.h>

// Define the pins for the devices
#define DHT_PIN 2           // DHT11 sensor pin

// Define the DHT sensor type
#define DHT_TYPE DHT11

DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE); // Initialize DHT sensor

void setup() {
  dht.begin(); // Initialize DHT sensor
  delay(2000);
}

void loop() {
  // Read Temperature and Humidity Reading
  float temperature = dht.readTemperature();
  float humidity = dht.readHumidity();
}

```

Εικόνα 7.7: Κώδικας ένδειξης Θερμοκρασίας-Υγρασίας

Ο κώδικας της Εικόνας 7.7 αποτελεί επεξεργασία του κώδικα της βιβλιοθήκης DHT.h που διατίθεται δωρεάν στο επίσημο site του Arduino. Η βιβλιοθήκη DHT.h προορίζεται για την χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας DHT. Στη συνέχεια, ορίζεται το pin και ο τύπος αισθητήρα DHT που θα χρησιμοποιηθεί στο Arduino. Έπειτα αρχικοποιείται ο αισθητήρας DHT με τον αριθμό pin και τον τύπο του αισθητήρα. Τέλος, οι εντολές που υπάρχουν μέσα στο void loop διαβάζουν τη θερμοκρασία και την υγρασία από τον αισθητήρα DHT.

7.2.5 Rain State Detection Code

Στο παρακάτω τμήμα του κώδικα, το Arduino παρακολουθεί την κατάσταση ενός αισθητήρα σταγόνων βροχής για να ανιχνεύσει τη βροχόπτωση. Χρησιμοποιείται η ψηφιακή ακίδα εξόδου του αισθητήρα σταγόνων για να διαβάσει τα δεδομένα και να προσδιοριστεί εάν βρέχει ή όχι. Το Arduino ενεργοποιεί για λίγο τον αισθητήρα, διαβάζει την έξοδο του και, στη συνέχεια, απενεργοποιεί τον αισθητήρα για εξοικονόμηση ενέργειας. Στη συνέχεια, η πληροφορία κατάστασης της βροχής εμφανιστεί στην LCD οθόνη.

```
// Define the pins for the devices
#define POWER_PIN 3          // The Arduino pin that provides power to the rain sensor
#define DO_PIN 4            // The Arduino's pin connected to DO pin of the rain sensor

void setup() {
  pinMode(POWER_PIN, OUTPUT); // Configure the power pin as an OUTPUT
  pinMode(DO_PIN, INPUT);
  delay(2000);
}

void loop() {
  // Read raindrop sensor
  digitalWrite(POWER_PIN, HIGH); // Turn the rain sensor's power ON
  delay(10);                      // Wait 10 milliseconds

  int rain_state = digitalRead(DO_PIN);

  digitalWrite(POWER_PIN, LOW); // Turn the rain sensor's power OFF
}
```

Εικόνα 7.8: Κώδικας ένδειξης κατάστασης βροχής

Στην Εικόνα 7.8 φαίνεται το μέρος του κώδικα που αφορά την κατάσταση της βροχής. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται και αρχικοποιούνται τα pin τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο Arduino. Τέλος, οι εντολές που υπάρχουν μέσα στο void loop διαβάζουν την κατάσταση βροχής από τον αισθητήρα σταγόνων βροχής.

7.2.6 LCD Code

Αυτό το τμήμα του κώδικα χειρίζεται την εμφάνιση δεδομένων των αισθητήρων σε μια οθόνη LCD. Χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη hd44780, που την βρίσκουμε έτοιμη από το site του Arduino, για τον έλεγχο της οθόνης LCD μέσω επικοινωνίας I2C. Οι ενδείξεις θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και η κατάσταση βροχής, διαμορφώνονται και εμφανίζονται στην οθόνη LCD. Η οθόνη LCD παρέχει ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο για τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την κατάσταση βροχόπτωσης.

```

#include <Wire.h>
#include <hd44780.h>
#include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h> // include i/o class header

hd44780_I2Cexp lcd;

// Define the LCD properties
#define LCD_ADDRESS 0x27 // I2C address of the LCD
#define LCD_COLS 16 // Number of columns in the LCD
#define LCD_ROWS 2 // Number of rows in the LCD

void setup() {
  dht.begin(); // Initialize DHT sensor
  lcd.init(); // Initialize LCD
  lcd.backlight(); // Turn on backlight
  lcd.clear(); // Clear LCD screen
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Initializing...");
  delay(2000);
}

void loop() {
  // Display temperature and humidity on the first row of LCD
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(temperature);
  lcd.print("C ");
  lcd.print(humidity);
  lcd.print("%");

  // Display rain state on the second row of LCD
  lcd.setCursor(0, 1);
  if (rain_state == HIGH)
    lcd.print("Rain: YES");
  else
    lcd.print("Rain: NO");
}

```

Εικόνα 7.9: Κώδικας οθόνης LCD

Ο κώδικας της Εικόνας 7.9 αποτελεί επεξεργασία του κώδικα των βιβλιοθηκών Wire.h, hd44780.h, που διατίθενται δωρεάν στο επίσημο site του Arduino και hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h που έχει συντάξει ο χρήστης duinoWitchery και διατίθεται στο επίσημο site του Arduino. Η βιβλιοθήκη Wire.h χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το I2C και οι βιβλιοθήκες hd44780.h και hd44780_I2Cexp.h προορίζονται για τον έλεγχο των οθονών LCD. Το hd44780_I2Cexp lcd δηλώνει το lcd του τύπου hd44780_I2Cexp, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την αλληλεπίδραση με την οθόνη LCD. Στην συνέχεια, ορίζουμε τα pins που θα χρησιμοποιηθούν και στο setup αρχικοποιείται η οθόνη. Τέλος, στο void loop βρίσκεται το κομμάτι του κώδικα το οποίο εμφανίζει τη θερμοκρασία, την υγρασία και την κατάσταση βροχής στην οθόνη LCD.

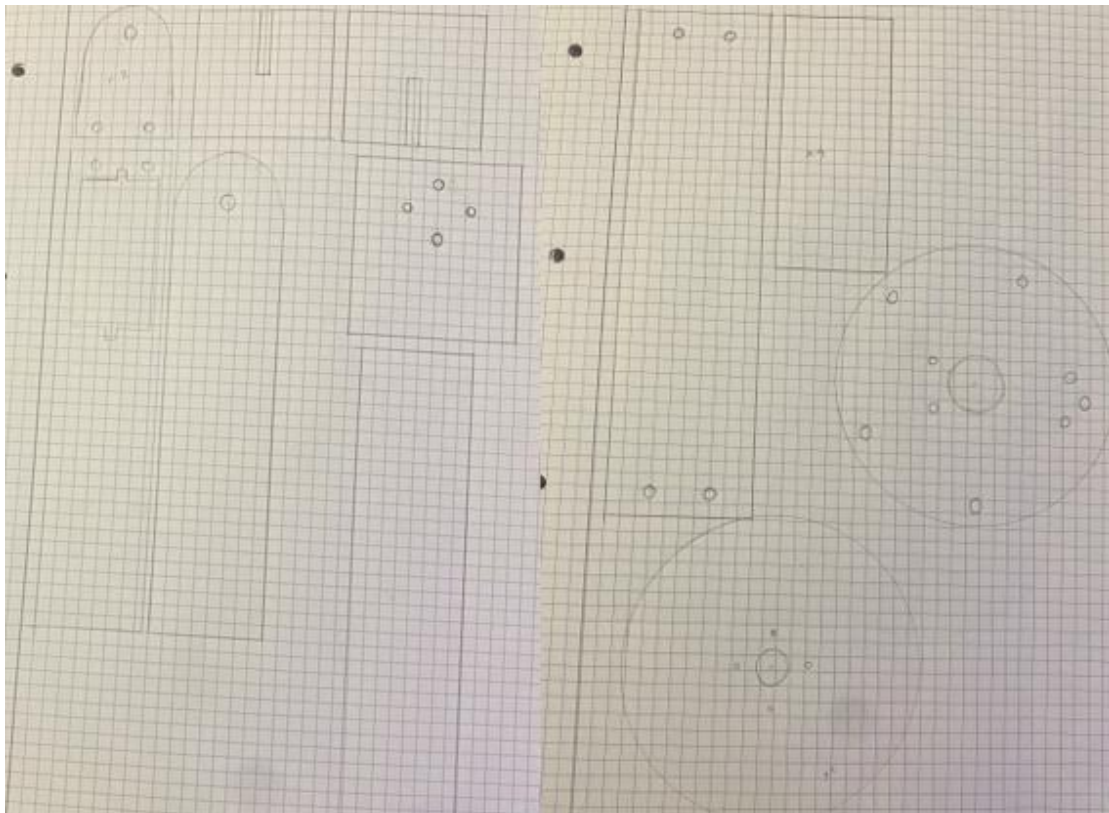
Κεφάλαιο 8ο: Η κατασκευή

8.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή έχει ως σκοπό την δημιουργία του ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα με αισθητήρα καιρού. Το μηχανικό κομμάτι της κατασκευής θα γίνει μέσω μακετόχαρτου και διαφόρων μεγεθών βιδών. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό θα υπάρξει λίστα με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια αυτής της εργασίας μαζί και με την κοστολόγηση της κατασκευής. Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί συλλογή μετρήσεων σε επίπεδο φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς και μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω του ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα. Τέλος, θα γίνει μια σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο, με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης και της ακρίβειας του συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα, με το σταθερό φωτοβολταϊκό πάνελ.

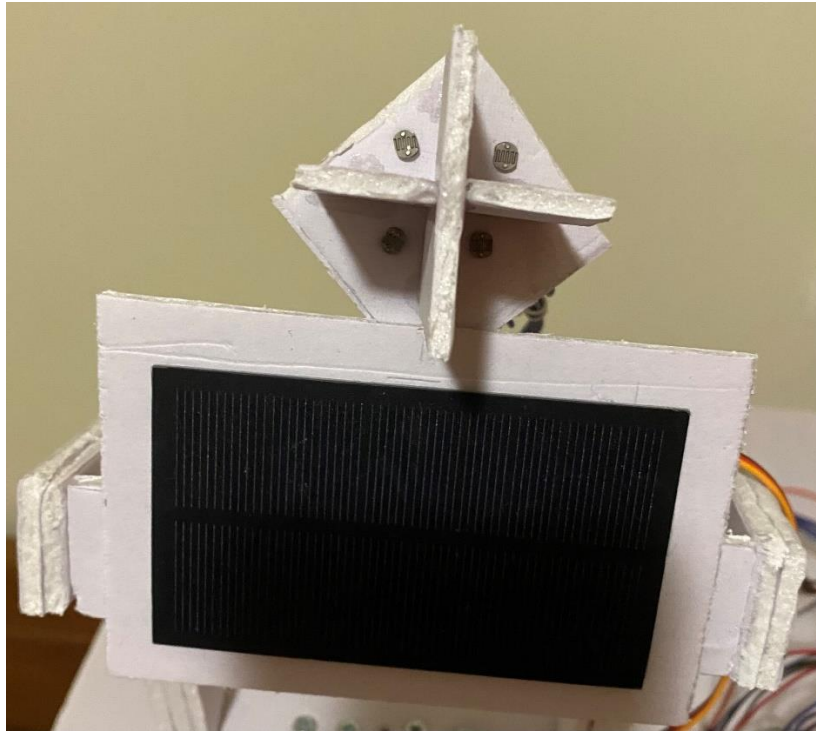
8.2 Κατασκευή μακέτας

Για την κατασκευή της μακέτας σχεδιάστηκαν σε χαρτί τα κομμάτια που χρησιμοποιήθηκαν στον μηχανισμό κίνησης του συστήματος.



Εικόνα 8.1: Σχεδίαση κομματιών μακέτας

Στην συνέχεια, σημειώθηκαν πάνω στο μακετόχαρτο και κόπηκαν. Για την βάση χρησιμοποιήθηκε η μακέτα 5mm και στο υπόλοιπο μηχανισμό η 3mm. Έπειτα κολλήθηκαν μεταξύ τους τα κομμάτια που χρειαζόταν παραπάνω στήριγμα για την καλύτερη ισορροπία του συστήματος και ενώθηκαν μεταξύ τους αλλά και με τους σερβοκινητήρες με την χρήση βιδών. Στο φωτοβολταϊκό πάνελ κολλήθηκαν καλώδια με το κολλητήρι και έπειτα κολλήθηκε πάνω σε μακετόχαρτο. Τα LDR τοποθετήθηκαν με σκοπό την παρουσία σκιών για την ακρίβεια του αισθητήρα και στο πίσω μέρος του μακετόχαρτου κολλήθηκαν με καλάι οι 10k αντιστάσεις για τον διαιρέτη τάσης.

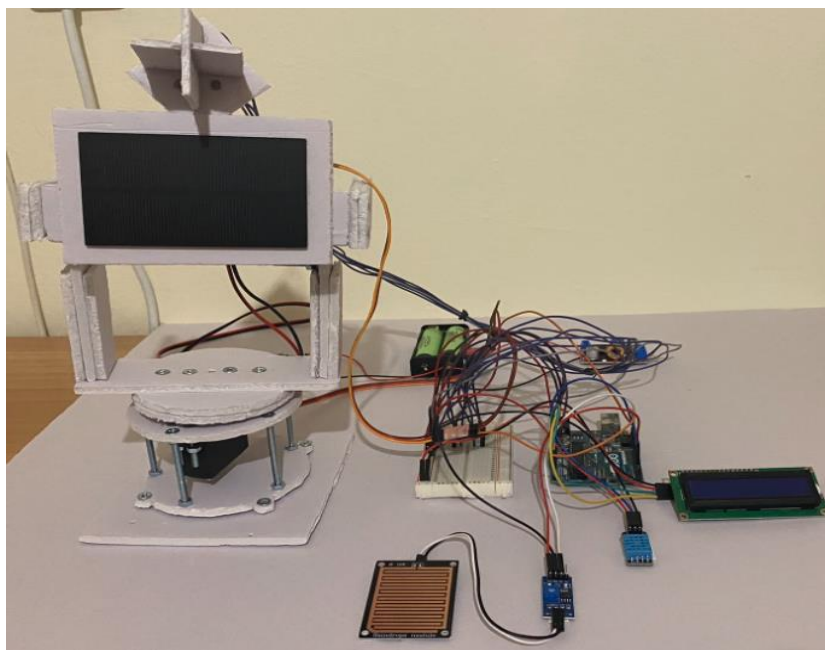


Εικόνα 8.2: Διάταξη των LDR και φωτοβολταϊκού

Τέλος κολλήθηκαν τα υπόλοιπα υλικά επάνω στην μακέτα και έγιναν οι συνδέσεις μέσω jumper καλωδίων.



Εικόνα 8.3: Ολοκληρωμένο σύστημα 1



Εικόνα 8.4: Ολοκληρωμένο σύστημα 2

8.3 Λίστα υλικών

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και την κοστολόγηση της κατασκευής:

Υλικά	Κόστος
Arduino Uno Rev3 Board	32.60€
2 × MG996R Continuous Rotation Servo	12.40€
2 × Rechargeable Battery 18650 3.7V 3400mAh	9.80€
LCD Display Module with I2C	7.90€
DC-DC Step down Converter 5A	7€
Ηλιακό Πάνελ 1W 5V	6.10€
Mini Breadboard 400-Contacts	3€
DHT11 Temperature and Humidity Sensor	2.60€
Raindrops Detection Sensor	2€
Μακετόχαρτο Λευκό 5mm - 70x50cm	2€
Μακετόχαρτο Λευκό 3mm - 70x50cm	1.80€
Battery Case Holder 2x18650 3.7V	1.80€
TP4056 Lithium Battery Charging Module	1.40€
Jumper Cables (m-m, m-f)	1€
4 × GL5516 5mm Photoresistor LDR	0.60€
Red Rocker Switch 6A/250V ON/OFF	0.60€
10K Ohms Resistors 1/4W 5%	0.20€
Σύνολο	92.80€

Πίνακας 1: Κοστολόγηση κατασκευής

8.4 Σύγκριση μετρήσεων επίπεδου φωτοβολταϊκού και συστήματος διπλού άξονα

Με την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης της κατασκευής ξεκίνησε η διαδικασία των μετρήσεων. Οι μετρήσεις των φωτοβολταϊκών συστημάτων πάρθηκαν στις 15 Ιουλίου 2024 από τις 6:30πμ μέχρι τις 8:15πμ στην περιοχή της Χαλκιδικής. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δυο φωτοβολταϊκά πάνελ 3V / 1W με μέγιστο ρεύμα 330mA, ένα φορτίο κατανάλωσης που υπολογίστηκε από την μέγιστη παραγόμενη ισχύς και δυο πολύμετρα. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν στο σύστημα διπλού άξονα καθώς και στο σταθερό φωτοβολταϊκό ήταν οι εξής:

- V_{load} (τάση υπό φορτίο)
- I_{load} (ρεύμα υπό φορτίο)
- V_{OC} (τάση ανοιχτού κυκλώματος)
- I_{SC} (ρεύμα βραχυκυκλώσεως)

Κεφάλαιο 4

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	Dual Axis Tracker					Fixed Solar Panel			
Time	Vload	Iload	Isc	Voc	Vload	Iload	Isc	Voc	
6:30 AM	0.582	0.025	0.026	1.98	0.16	0.003	0.003	1.79	
6:45 AM	0.695	0.029	0.031	1.98	0.36	0.012	0.013	1.93	
7:00 AM	1.02	0.042	0.044	1.97	0.41	0.012	0.014	1.94	
7:15 AM	1.23	0.048	0.052	1.97	0.48	0.013	0.016	1.94	
7:30 AM	1.36	0.055	0.059	1.96	0.59	0.021	0.024	1.97	
7:45 AM	1.44	0.057	0.055	1.95	0.68	0.025	0.028	1.97	
8:00 AM	1.51	0.058	0.07	1.94	0.85	0.03	0.033	1.97	
8:15 AM	1.53	0.06	0.073	1.93	0.97	0.033	0.038	1.96	
8:30 AM	1.56	0.06	0.077	1.93	1.13	0.039	0.043	1.95	
8:45 AM	1.59	0.061	0.081	1.93	1.26	0.045	0.048	1.95	
9:00 AM	1.6	0.061	0.082	1.93	1.36	0.05	0.053	1.95	
9:15 AM	1.6	0.061	0.084	1.92	1.41	0.053	0.056	1.93	
9:30 AM	1.61	0.061	0.083	1.93	1.48	0.055	0.061	1.95	
9:45 AM	1.61	0.061	0.084	1.93	1.54	0.056	0.065	1.93	
10:00 AM	1.61	0.062	0.085	1.92	1.57	0.058	0.068	1.93	
10:15 AM	1.61	0.062	0.084	1.93	1.58	0.059	0.073	1.94	
10:30 AM	1.61	0.062	0.086	1.92	1.58	0.06	0.078	1.93	
10:45 AM	1.61	0.062	0.086	1.93	1.58	0.06	0.08	1.93	
11:00 AM	1.61	0.061	0.087	1.9	1.59	0.06	0.083	1.91	
11:15 AM	1.61	0.061	0.087	1.9	1.59	0.06	0.085	1.91	
11:30 AM	1.61	0.061	0.085	1.9	1.6	0.061	0.087	1.9	
11:45 AM	1.61	0.061	0.087	1.9	1.6	0.061	0.087	1.9	
12:00 PM	1.62	0.06	0.089	1.89	1.61	0.061	0.088	1.9	
12:15 PM	1.61	0.061	0.088	1.9	1.61	0.061	0.087	1.9	
12:30 PM	1.61	0.061	0.09	1.9	1.61	0.061	0.088	1.9	
12:45 PM	1.61	0.062	0.089	1.9	1.62	0.061	0.087	1.9	
1:00 PM	1.61	0.062	0.089	1.9	1.63	0.061	0.088	1.9	

1:15 PM	1.61	0.062	0.089	1.9	1.63	0.061	0.087	1.9
1:30 PM	1.61	0.062	0.089	1.9	1.63	0.061	0.088	1.9
1:45 PM	1.62	0.062	0.088	1.91	1.64	0.061	0.088	1.9
2:00 PM	1.622	0.062	0.089	1.92	1.64	0.06	0.085	1.9
2:15 PM	1.64	0.062	0.09	1.94	1.66	0.061	0.086	1.9
2:30 PM	1.65	0.063	0.09	1.94	1.68	0.062	0.086	1.93
2:45 PM	1.63	0.062	0.088	1.93	1.68	0.062	0.085	1.92
3:00 PM	1.627	0.062	0.088	1.94	1.7	0.06	0.075	1.91
3:15 PM	1.63	0.062	0.087	1.94	1.71	0.058	0.071	1.92
3:30 PM	1.634	0.061	0.086	1.948	1.71	0.056	0.068	1.94
3:45 PM	1.633	0.061	0.086	1.948	1.71	0.054	0.064	1.94
4:00 PM	1.634	0.061	0.086	1.945	1.72	0.051	0.06	1.94
4:15 PM	1.63	0.061	0.086	1.945	1.71	0.048	0.055	1.935
4:30 PM	1.63	0.061	0.086	1.943	1.7	0.044	0.049	1.935
4:45 PM	1.63	0.061	0.086	1.94	1.67	0.04	0.045	1.935
5:00 PM	1.624	0.061	0.083	1.935	1.64	0.036	0.039	1.94
5:15 PM	1.61	0.061	0.083	1.935	1.52	0.03	0.033	1.94
5:30 PM	1.609	0.06	0.082	1.935	1.41	0.026	0.029	1.943
5:45 PM	1.6	0.06	0.081	1.93	1.29	0.021	0.024	1.93
6:00 PM	1.567	0.059	0.079	1.918	1.04	0.016	0.019	1.916
6:15 PM	1.55	0.058	0.076	1.92	0.85	0.011	0.013	1.89
6:30 PM	1.522	0.058	0.071	1.95	0.628	0.007	0.008	1.851
6:45 PM	1.475	0.056	0.067	1.95	0.374	0.005	0.0055	1.79
7:00 PM	1.426	0.055	0.061	1.95	0.123	0.0048	0.0049	1.76
7:15 PM	1.342	0.051	0.055	1.95	0.105	0.004	0.0042	1.731
7:30 PM	1.201	0.046	0.049	1.95	0.089	0.0035	0.0036	1.71
7:45 PM	1.024	0.039	0.041	1.95	0.08	0.0032	0.0033	1.688
8:00 PM	0.772	0.03	0.031	1.95	0.075	0.0029	0.003	1.65
8:15 PM	0.25	0.011	0.011	1.86	0.071	0.0025	0.0028	1.61

Πίνακας 2: Μετρήσεις Dual axis tracker- Fixed solar panel

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορούμε να υπολογίσουμε την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης που επιτυγχάνεται με τη χρήση του συστήματος διπλού άξονα. Αρχικά, θα υπολογίσουμε την ισχύ που παράγει σε κάθε χρονική στιγμή μέτρησης το σύστημα διπλού άξονα και το σταθερό φωτοβολταϊκό πάνελ χρησιμοποιώντας τη σχέση $P_{load} = V_{load} \times I_{load}$. Στη συνέχεια, θα κάνουμε μια προσέγγιση της παραγόμενης ενέργειας, θεωρώντας ότι η ισχύς παραμένει σταθερή από τη στιγμή κάποιας μέτρησης μέχρι την επόμενη.

Η παραγόμενη ενέργεια υπολογίζεται από τον τύπο $E = I_{load} \times t$, έχει μονάδα μέτρησης την kWh (κιλοβατώρα). Επειδή οι μετρήσεις που πάρθηκαν ήταν ανά 15 λεπτά, ο τύπος της ενέργειας γίνεται:

$$E = \sum (P_{load} \times \frac{15min}{60min}) = \frac{1}{4} \times \sum P_{load} \quad (8.1)$$

Τα αποτελέσματα της ισχύος και της ενέργειας ανά μέτρηση, καθώς και η συνολική παραγόμενη ενέργεια, του συστήματος διπλού άξονα και του σταθερού φωτοβολταϊκού πάνελ, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

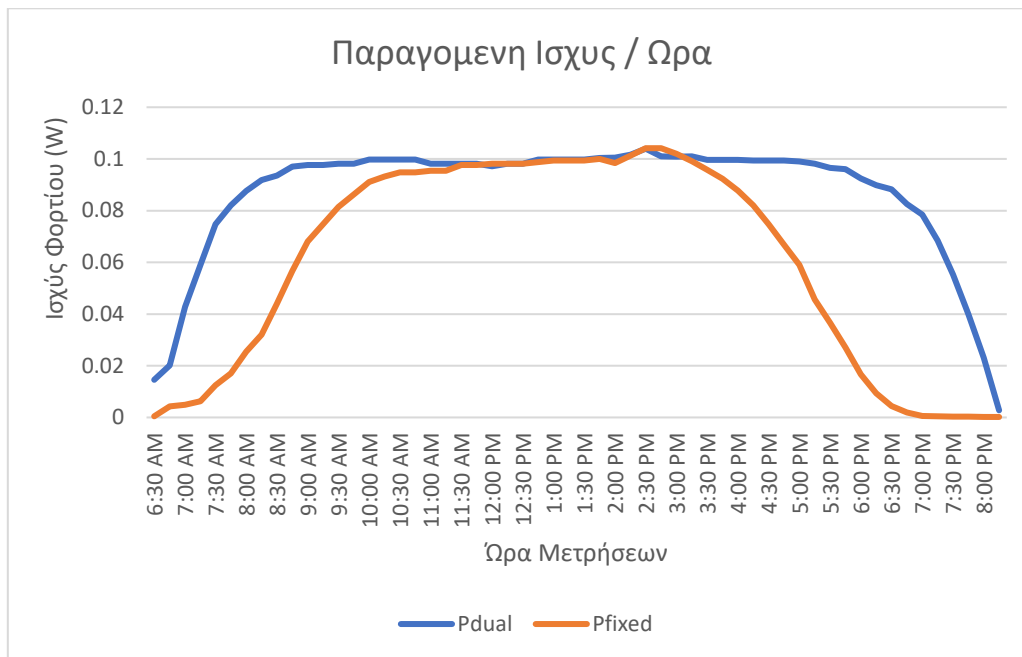
Time	Dual Axis Tracker				Fixed Solar Panel			
	V	I	P	E	V	I	P	E
6:30 AM	0.582	0.025	0.01455	0.0036375	0.16	0.003	0.00048	0.00012
6:45 AM	0.695	0.029	0.020155	0.00503875	0.36	0.012	0.00432	0.00108
7:00 AM	1.02	0.042	0.04284	0.01071	0.41	0.012	0.00492	0.00123
7:15 AM	1.23	0.048	0.05904	0.01476	0.48	0.013	0.00624	0.00156
7:30 AM	1.36	0.055	0.0748	0.0187	0.59	0.021	0.01239	0.0030975
7:45 AM	1.44	0.057	0.08208	0.02052	0.68	0.025	0.017	0.00425
8:00 AM	1.51	0.058	0.08758	0.021895	0.85	0.03	0.0255	0.006375
8:15 AM	1.53	0.06	0.0918	0.02295	0.97	0.033	0.03201	0.0080025
8:30 AM	1.56	0.06	0.0936	0.0234	1.13	0.039	0.04407	0.0110175
8:45 AM	1.59	0.061	0.09699	0.0242475	1.26	0.045	0.0567	0.014175
9:00 AM	1.6	0.061	0.0976	0.0244	1.36	0.05	0.068	0.017
9:15 AM	1.6	0.061	0.0976	0.0244	1.41	0.053	0.07473	0.0186825
9:30 AM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.48	0.055	0.0814	0.02035
9:45 AM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.54	0.056	0.08624	0.02156
10:00 AM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.57	0.058	0.09106	0.022765
10:15 AM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.58	0.059	0.09322	0.023305
10:30 AM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.58	0.06	0.0948	0.0237
10:45 AM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.58	0.06	0.0948	0.0237
11:00 AM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.59	0.06	0.0954	0.02385
11:15 AM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.59	0.06	0.0954	0.02385

11:30 AM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.6	0.061	0.0976	0.0244
11:45 AM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.6	0.061	0.0976	0.0244
12:00 PM	1.62	0.06	0.0972	0.0243	1.61	0.061	0.09821	0.0245525
12:15 PM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.61	0.061	0.09821	0.0245525
12:30 PM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.61	0.061	0.09821	0.0245525
12:45 PM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.62	0.061	0.09882	0.024705
1:00 PM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.63	0.061	0.09943	0.0248575
1:15 PM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.63	0.061	0.09943	0.0248575
1:30 PM	1.61	0.062	0.09982	0.024955	1.63	0.061	0.09943	0.0248575
1:45 PM	1.62	0.062	0.10044	0.02511	1.64	0.061	0.10004	0.02501
2:00 PM	1.622	0.062	0.100564	0.025141	1.64	0.06	0.0984	0.0246
2:15 PM	1.64	0.062	0.10168	0.02542	1.66	0.061	0.10126	0.025315
2:30 PM	1.65	0.063	0.10395	0.0259875	1.68	0.062	0.10416	0.02604
2:45 PM	1.63	0.062	0.10106	0.025265	1.68	0.062	0.10416	0.02604
3:00 PM	1.627	0.062	0.100874	0.0252185	1.7	0.06	0.102	0.0255
3:15 PM	1.63	0.062	0.10106	0.025265	1.71	0.058	0.09918	0.024795
3:30 PM	1.634	0.061	0.099674	0.0249185	1.71	0.056	0.09576	0.02394
3:45 PM	1.633	0.061	0.099613	0.02490325	1.71	0.054	0.09234	0.023085
4:00 PM	1.634	0.061	0.099674	0.0249185	1.72	0.051	0.08772	0.02193
4:15 PM	1.63	0.061	0.09943	0.0248575	1.71	0.048	0.08208	0.02052
4:30 PM	1.63	0.061	0.09943	0.0248575	1.7	0.044	0.0748	0.0187
4:45 PM	1.63	0.061	0.09943	0.0248575	1.67	0.04	0.0668	0.0167
5:00 PM	1.624	0.061	0.099064	0.024766	1.64	0.036	0.05904	0.01476
5:15 PM	1.61	0.061	0.09821	0.0245525	1.52	0.03	0.0456	0.0114
5:30 PM	1.609	0.06	0.09654	0.024135	1.41	0.026	0.03666	0.009165
5:45 PM	1.6	0.06	0.096	0.024	1.29	0.021	0.02709	0.0067725
6:00 PM	1.567	0.059	0.092453	0.02311325	1.04	0.016	0.01664	0.00416
6:15 PM	1.55	0.058	0.0899	0.022475	0.85	0.011	0.00935	0.0023375
6:30 PM	1.522	0.058	0.088276	0.022069	0.628	0.007	0.004396	0.001099
6:45 PM	1.475	0.056	0.0826	0.02065	0.374	0.005	0.00187	0.0004675
7:00 PM	1.426	0.055	0.07843	0.0196075	0.123	0.0048	0.0005904	0.0001476
7:15 PM	1.342	0.051	0.068442	0.0171105	0.105	0.004	0.00042	0.000105
7:30 PM	1.201	0.046	0.055246	0.0138115	0.089	0.0035	0.0003115	0.000077875
7:45 PM	1.024	0.039	0.039936	0.009984	0.08	0.0032	0.000256	0.000064
8:00 PM	0.772	0.03	0.02316	0.00579	0.075	0.0029	0.0002175	0.000054375
8:15 PM	0.25	0.011	0.00275	0.0006875	0.071	0.0025	0.0001775	0.000044375
				1.21449025				0.844234725

Πίνακας 3: Μετρήσεις ισχύος και ενεργείας

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 3, η ολική ενέργεια που παράχθηκε κατά την διάρκεια της ημέρας από τα φωτοβολταϊκά είναι για το dual axis tracker 1.21449025Wh και για το fixed solar panel 0.844234725Wh. Η χρήση του dual axis tracker αύξησε την απόδοση κατά:

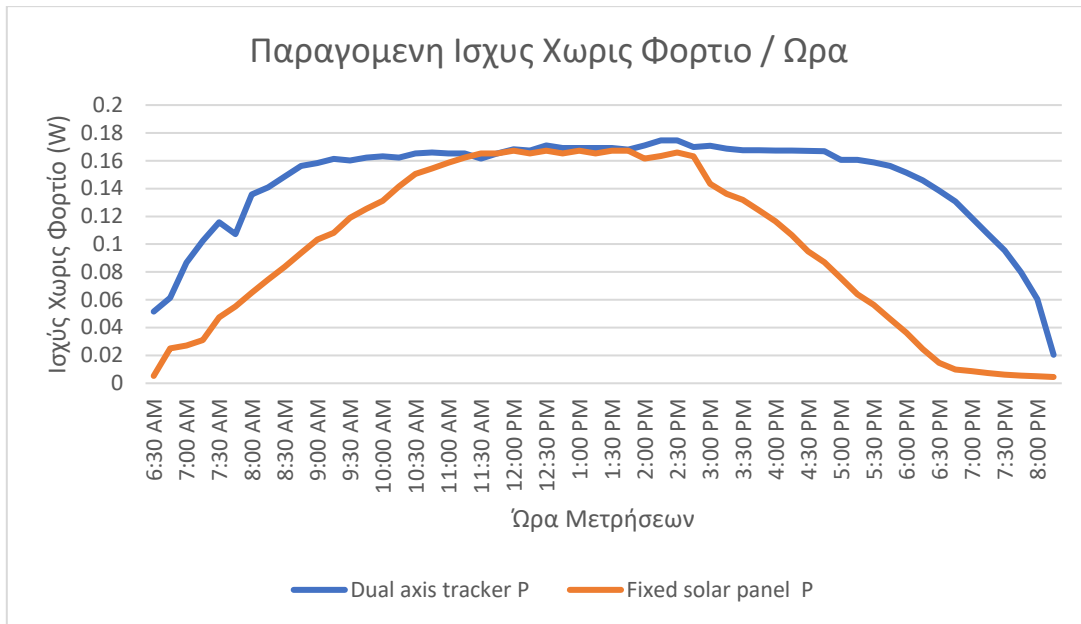
$$\frac{1.21449025\text{Wh} - 0.844234725\text{Wh}}{0.844234725\text{Wh}} \times 100 = 43.85694097\% \quad (8.2)$$



Εικόνα 8.5: Διαγραμμα της παραγομενης ισχυος

Από το διάγραμμα της Εικόνας 8.5 καταλαβαίνουμε ότι η παραγομένη ισχύς από το dual axis tracker υπερτερεί σε σχέση με το fixed solar panel.

Αν θέλουμε να ανεξαρτοποιήσουμε τις μετρήσεις από την τιμή της αντίστασης φορτίου, μπορούμε να υπολογίσουμε το γινόμενο $V_{OC} \times I_{SC}$. Το γινόμενο αυτών των δύο μεγεθών σε σχέση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μια συνάρτηση που αυξάνεται σταθερά. Έτσι, το γινόμενο αυτό μπορεί να δώσει μια εκτίμηση της διαφοράς στις εντάσεις ακτινοβολίας που δέχονται οι δύο διατάξεις, το dual axis tracker και το fixed solar panel.



Εικόνα 8.6: Διαγραμμα της παραγομενης ισχυος χωρις φορτιο

Τέλος, από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στις 11:30πμ μέχρι τις 3:30μμ το σταθερό ηλιακό πάνελ έχει σχεδόν ίδια ισχύ με το tracker. Από τις 8πμ μέχρι τις 6:30μμ το dual axis solar tracker βρίσκεται στην μεγαλύτερη ισχύς του ενώ το σταθερό πάνελ βρίσκεται στην μεγαλύτερη ισχύς του στις 10πμ μέχρι τις 3:45μμ. Από τις 6:30πμ μέχρι τις 8:30μμ και από τις 5:15μμ μέχρι τις 8:15μμ το σταθερό ηλιακό πάνελ παράγει ισχύ κάτω από το 50% ενώ το tracker δεν επηρεάζεται τόσο.

8.5 Σύγκριση με προϊόν εμπορίου

Ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας εστιάζεται στην αποτύπωση της διαδικασίας και της λογικής πίσω από την κατασκευή ενός ηλιακού συστήματος παρακολούθησης διπλού άξονα, παρά στην ανάπτυξη ενός εμπορικού προϊόντος. Έτσι, ο στόχος δεν ήταν η κατασκευή ενός έτοιμου προϊόντος που θα πωλείται στην αγορά, αλλά η αποσαφήνιση των βημάτων και των απαιτήσεων που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος. Κατά συνέπεια, η έρευνα και η πρακτική εφαρμογή επικεντρώνονται στη διαδικασία και τη μεθοδολογία, αντί να αποβλέπουν στην εμπορική κυκλοφορία ενός τελικού προϊόντος.

Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα

9.1 Εισαγωγή

Κατά την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, έχουμε φτάσει σε ένα σημείο όπου μπορούμε να συνοψίσουμε τα ευρήματά μας, να αναγνωρίσουμε τις προκλήσεις που αντιμετωπίσαμε και να εξετάσουμε πιθανές βελτιώσεις για το μέλλον. Με τις κατάλληλες τροποποιήσεις και αναβαθμίσεις, η πρακτική αξία αυτού του έργου μπορεί να ενισχυθεί ακόμα περισσότερο καθώς πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με ευρεία εφαρμογή στον κλάδο της ηλιακής ενέργειας.

9.2 Προβλήματα

Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης αντιμετωπίσαμε ορισμένα προβλήματα, όπως η ακρίβεια της παρακολούθησης και η σταθερότητα του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπήρξε δυσκολία στην ανάπτυξη του λογικού τμήματος του κώδικα όσον αφορά την ρύθμιση της θέσης της φωτοβολταϊκής μονάδας μέσω των LDR και σερβοκινητήρων. Το πρόβλημα της σταθερότητας του συστήματος αντιμετωπίστηκε με την χρήση μεγαλύτερου πάχους μακέτας και περισσότερων βιδών. Τέλος, στο κύκλωμα αυτοτροφοδότησης υπήρξε δυσκολία στην αναζήτηση του κατάλληλου για την εργασία μετατροπέα, ο οποίος να παρέχει αρκετό ρεύμα και με αρκετή αποδοτικότητα ώστε να λειτουργεί σωστά το σύστημα.

9.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Για να βελτιώσουμε την απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος, μπορούμε να εξετάσουμε την υιοθέτηση πιο προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου και τη χρήση πιο ακριβών αισθητήρων. Μία επιπλέον βελτίωση θα ήταν η σχεδίαση 3D μοντέλου για τον μηχανισμό στήριξης και κίνησης του φωτοβολταϊκού αντί για την χρήση μακέτας. Τέλος, η ενσωμάτωση μετρητή ενέργειας μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στο σύστημα. Ένας μετρητής ενέργειας μπορεί να παρέχει ακριβέστερα δεδομένα σχετικά με την παραγωγή ενέργειας του ηλιακού συστήματος, την κατανάλωση ενέργειας και την απόδοσή του. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματική παρακολούθηση της απόδοσής του συστήματος με την πάροδο του χρόνου. Με τη χρήση των παραπάνω, το ηλιακό σύστημα παρακολούθησης διπλού άξονα θα μπορούσε να επιτύχει ακόμα μεγαλύτερη απόδοση, ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. V. Herzog, T. E. Lipman, D. M. Kammen, "Renewable Energy Sources," University of California, Berkeley, USA, 2001.
- [2] M. Dario, "Advantages and disadvantages of renewable energy sources," *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 11, no. 3, pp. 176-183, Feb. 2021.
- [3] Kerry Thoubboron, "The advantages and disadvantages of renewable energy", *Energysage*, Nov 2, 2022.[Online]. Available: <https://www.energysage.com/about-clean-energy/advantages-and-disadvantages-of-renewable-energy/>. [Accessed 10. 01. 2024].
- [4] Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894–900.
- [5] S. Ashok, "solar energy," *Encyclopædia Britannica*, 30 Nov. 2022. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/solar-energy>. [Accessed 10. 01. 2024].
- [6] N. Kannan, D. Vakeesan, "Solar energy for future world: - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1092-1105, Sep. 2016.
- [7] Shubbak, M. H. (2019). Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109383.
- [8] Goswami, D. Y., Vijayaraghavan, S., Lu, S., & Tamm, G. (2004). New and emerging developments in solar energy. *Solar Energy*, 76(1-3), 33–43.
- [9] Małgorzata Stec and Mariola Grzebyk (2022). "Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union"
- [10] IEA, World total energy supply by source, 1971-2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-energy-supply-by-source-1971-2019>, IEA. Licence: CC BY 4.0 . [Accessed 15. 01. 2024].
- [11] Fabio Struckmann, "Analysis of a Flat-plate Solar Collector," Dept. of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lund University, Box 118, 22100 Lund, Sweden, May 08, 2008
- [12] Solak EK, Irmak E. Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance. *RSC Adv.* 2023 Apr 19;13(18):12244-12269.
- [13] R E.L, Tolbert, and J C, Arnett, "Design, installation and performance of ARCO solar photovoltaic power plants," in *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, Orlando, FL, USA, 1984.
- [14] Rappaport, P. (1959). The photovoltaic effect and its utilization. *Solar Energy*, 3(4), 8–18.
- [15] Beddiaf Zaidi, "Solar Panels and Photovoltaic Materials" book, July 11, 2018
- [16] Wolfe, P. R. (2018). Utility-Scale Solar Power. *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, 1073–1093.
- [17] Guerra, N., Guevara, M., Palacios, C., & Crupi, F. (2018). Operation and physics of photovoltaic solar cells: an overview. *I+D Tecnológico*.
- [18] Al-Ezzi AS, Ansari MNM. Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*. 2022; 5(4):67.

- [19] R. A. Marques Lameirinhas, J. P. N. Torres, and J. P. de Melo Cunha, "A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications," *Energies*, vol. 15, no. 5, p. 1823, Mar. 2022.
- [20] A. Bhatia, *Design and Sizing of Solar Photovoltaic Systems*, Woodcliff Lake: Continuing Education and Development, Inc, n.d..
- [21] Meral, M. E., & Dinçer, F. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2176–2184.
- [22] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1499–1511.
- [23] Venkateswari, R., & Sreejith, S. (2019). Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 376–394.
- [24] "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Charge Controller Working Principle," *Electrical Academia*, n.d. [Online]. Available: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/maximum-power-point-tracking-mppt-charge-controller-working-principle/>. [Accessed 18. 02. 2024].
- [25] Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018–1034.
- [26] Reza Reisi, A., Hassan Moradi, M., & Jamasb, S. (2013). Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 433–443.
- [27] F. Sedaghati et al., "PV Maximum Power-Point Tracking by Using Artificial Neural Network," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, p. 10, Mar 2012.
- [28] ESRAM, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- [29] Ahmed, J., & Salam, Z. (2015). An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 150, 97–108.
- [30] Rajesh, R., & Carolin Mabel, M. (2015). A comprehensive review of photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 231–248.
- [31] Raghavendra KVG, Zeb K, Muthusamy A, Krishna TNV, Kumar SVSVP, Kim D-H, Kim M-S, Cho H-G, Kim H-J. A Comprehensive Review of DC–DC Converter Topologies and Modulation Strategies with Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems. *Electronics*. 2020; 9(1):31.
- [32] Frank Vignola, Fotis Mavromatakis, Jim Krumsick (2008). *Performance of PV inverters*. American Solar Energy Society
- [33] Suneetha Racharla & K. Rajan (2017) Solar tracking system – a review, *International Journal of Sustainable Engineering*, 10:2, 72-81
- [34] A.R. Amelia et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 767 012052
- [35] Prinsloo, G.J., Dobson, R.T. (2015). *Solar Tracking*. Stellenbosch: SolarBooks. ISBN 978-0-620-61576-1, p 1-542.
- [36] Hafez, A. Z., Yousef, A. M., & Harag, N. M. (2018). Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 754–782.

- [37] Musa A, Alozie E, Suleiman SA, Ojo JA, Imoize AL. A Review of Time-Based Solar Photovoltaic Tracking Systems. *Information*. 2023; 14(4):211.
- [38] Subhajit Barman, "TP4056 Lithium Cell Charger Module Circuit Working Explanation", 08 Feb. 2024. [Online]. Available: <https://www.electrothinks.com/2024/02/tp4056-lithium-cell-charger-module.html> . [Accessed 26. 03. 2024].
- [39] "DHT11 Sensor and Its Working", Elprocus. [Online]. Available: <https://www.elprocus.com/brief-on-dht11-sensor/>. [Accessed 27. 03. 2024].
- [40] "How Rain Sensor Works and Interface it with Arduino", LastMinuteEngineers. [Online]. Available: https://lastminuteengineers.com/rain-sensor-arduino-tutorial/#google_vignette . [Accessed 29. 03. 2024].
- [41] Debashis Das, " How Does a Rain Sensor Work and how to Interface it with Arduino?", *Circuitdigest*, March 28, 2022.[Online]. Available: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-rain-sensor-with-arduino> . [Accessed 29. 03. 2024].
- [42] " How Servo Motors Work", Jameco,.[Online]. Available: <https://www.jameco.com/Jameco/workshop/Howitworks/how-servo-motors-work.html> . [Accessed 04. 04. 2024].
- [43] Syed Zain Nasir, " Interfacing a Light Sensor (LDR) with Raspberry Pi 4", *The Engineering Projects*, January 19, 2023.[Online]. Available: <https://www.theengineeringprojects.com/2023/01/interfacing-a-light-sensor-ldr-with-raspberry-pi-4.html> . [Accessed 04. 04. 2024].
- [44] " Light Dependent Resistors (LDR) with evive", *Stempedia*.[Online]. Available: <https://ai.thestempedia.com/docs/evive/evive-tutorials/what-is-ldr-photoresistor/>. [Accessed 05. 04. 2024].
- [45] Syedzainnasir, " Interfacing a Light Sensor (LDR) with Raspberry Pi 4", *Theengineeringprojects*, January 19, 2023.[Online]. Available: <https://www.theengineeringprojects.com/2023/01/interfacing-a-light-sensor-ldr-with-raspberry-pi-4.html> . [Accessed 05. 04. 2024].
- [46] Singh, Purnima, et al. "Dual Axis Solar Tracking System for Solar Panel." *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 5, no. 4, 1 Dec. 2016, pp. 403-411
- [47] " What is an Arduino?". [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-an-arduino/all> . [Accessed 08. 04. 2024].
- [48] " What are the Different Types of Arduino Boards", Elprocus.[Online]. Available: <https://www.elprocus.com/different-types-of-arduino-boards/>. [Accessed 08. 04. 2024].
- [49] " Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1".[Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics/> . [Accessed 09. 04. 2024].
- [50] " What is an IDE (Integrated Development Environment)?".[Online]. Available: <https://aws.amazon.com/what-is/ide/> . [Accessed 09. 04. 2024].
- [51] " Arduino Shields".[Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/arduino-shields> . [Accessed 09. 04. 2024].
- [52] " Library (computing)", *Wikipedia*.[Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Library_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Library_(computing)) . [Accessed 09. 04. 2024].

[53] " Interface an I2C LCD with Arduino", LastMinuteEngineers.[Online]. Available: https://lastminuteengineers.com/i2c-lcd-arduino-tutorial/#google_vignette . [Accessed 10. 04. 2024].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```
#include <Servo.h>
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <hd44780.h>
#include <hd44780ioClass/hd44780_I2Cexp.h> // include i/o class header

hd44780_I2Cexp lcd;
// Define the pins for the devices
#define DHT_PIN 2 // DHT11 sensor pin
#define POWER_PIN 3 // The Arduino pin that provides power to the rain sensor
#define DO_PIN 4 // The Arduino's pin connected to DO pin of the rain sensor

// Define the LCD properties
#define LCD_ADDRESS 0x27 // I2C address of the LCD
#define LCD_COLS 16 // Number of columns in the LCD
#define LCD_ROWS 2 // Number of rows in the LCD

// Define the DHT sensor type
#define DHT_TYPE DHT11

DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE); // Initialize DHT sensor

Servo horizontal; // Horizontal servo
Servo vertical; // Vertical servo

// Servo position limits
int servoh = 90;
int servov = 45;
int servohLimitHigh = 180;
int servohLimitLow = 0;
int servovLimitHigh = 180;
int servovLimitLow = 0;

void setup() {
  horizontal.attach(9);
  vertical.attach(10);
  horizontal.write(90);
  vertical.write(45);

  pinMode(POWER_PIN, OUTPUT); // Configure the power pin as an OUTPUT
  pinMode(DO_PIN, INPUT);

  dht.begin(); // Initialize DHT sensor
  lcd.init(); // Initialize LCD
  lcd.backlight(); // Turn on backlight
  lcd.clear(); // Clear LCD screen
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Initializing...");
  delay(2000);
}
```

```

void loop() {
  int tol = 50;
  int lt = analogRead(0); // Read analog value from top left
  int rt = analogRead(1); // Read analog value from top right
  int ld = analogRead(2); // Read analog value from down left
  int rd = analogRead(3); // Read analog value from down right
  int avt = (lt + rt) / 2; // Calculate average value for top readings
  int avd = (ld + rd) / 2; // Calculate average value for down readings
  int avl = (lt + ld) / 2; // Calculate average value for left readings
  int avr = (rt + rd) / 2; // Calculate average value for right readings
  int dvert = avt - avd; // Calculate difference between top and down readings
  int dhoriz = avl - avr; // Calculate difference between left and right readings

  // Read Temperature and Humidity Reading
  float temperature = dht.readTemperature();
  float humidity = dht.readHumidity();

  // Read raindrop sensor
  digitalWrite(POWER_PIN, HIGH); // Turn the rain sensor's power ON
  delay(10); // Wait 10 milliseconds

  int rain_state = digitalRead(DO_PIN);

  digitalWrite(POWER_PIN, LOW); // Turn the rain sensor's power OFF

  // Display temperature and humidity on the first row of LCD
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(temperature);
  lcd.print("C ");
  lcd.print(humidity);
  lcd.print("%");

  // Display rain state on the second row of LCD
  lcd.setCursor(0, 1);
  if (rain_state == HIGH)
    lcd.print("Rain: YES");
  else
    lcd.print("Rain: NO");

  // Servo Control
  if (-1 * tol > dvert || dvert > tol) {
    if (avt < avd) {
      servov++; // Increment vertical servo position
      if (servov > servovLimitHigh) {
        servov = servovLimitHigh; // Limit servo position to upper bound
      }
      vertical.write(servov); // Set vertical servo position
      delay(20); // Delay for servo movement
    } else if (avt > avd) {
      servov--; // Decrement vertical servo position
      if (servov < servovLimitLow) {
        servov = servovLimitLow; // Limit servo position to lower bound
      }
    }
  }
}

```

```

    vertical.write(servov); // Set vertical servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  }
}

if (-1 * tol > dhoriz || dhoriz > tol) {
  if (av1 > avr) {
    servoh--; // Decrement horizontal servo position
    if (servoh < servohLimitLow) {
      servoh = servohLimitLow; // Limit servo position to lower bound
    }
    horizontal.write(servoh); // Set horizontal servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  } else if (av1 < avr) {
    servoh++; // Increment horizontal servo position
    if (servoh > servohLimitHigh) {
      servoh = servohLimitHigh; // Limit servo position to upper bound
    }
    horizontal.write(servoh); // Set horizontal servo position
    delay(20); // Delay for servo movement
  }
}

delay(100);
}

```