

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΑΝΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟ

Διπλωματική Εργασία

της

Κεσανίδου Όλγας

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2023

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΑΝΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕ ΦΩΤΟΔΙΟΔΟ

Κεσανίδου Όλγα

Πτυχίο Ηλεκτρονικών Μηχανικών, ΑΤΕΙΘ, 2016

Διπλωματική Εργασία

υποβαλλόμενη για τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων του

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΤΙΤΛΟΥ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

Επιβλέπων Καθηγητής
Ψάννης Κωνσταντίνος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1/11/2023

ΨΑΝΝΗΣ
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΚΑΣΚΑΛΗΣ
ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

.....

.....

.....

Κεσανίδου Όλγα

.....

Περίληψη

Η εργασία αυτή σκοπό έχει την μελέτη, τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός οργάνου το οποίο μετράει την ηλιακή ακτινοβολία σε μονάδες w/m^2 . Το όργανο αυτό ονομάζεται πυρανόμετρο. Το εύρος του οργάνου που θα υλοποιηθεί είναι από 0 έως $1500W/m^2$. Το κύριο εξάρτημα ενός τέτοιου οργάνου είναι το αισθητήριο που λαμβάνει την ακτινοβολία. Στην εργασία αυτή, το αισθητήριο το οποίο επιλέχτηκε είναι η φωτοδίοδος, η οποία είναι κατάλληλη για την εφαρμογή που εξετάζουμε. Θα γίνει αναφορά στα είδη ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία το πυρανόμετρο μπορεί να μετρήσει. Επίσης θα παρουσιαστούν και άλλα είδη πυρανόμετρων που κάνουν χρήση διαφορετικού τύπου αισθητήριων, όπως και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα αυτών. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί το σχέδιο και η μελέτη του αναλογικού αλλά και του ψηφιακού μέρους της κατασκευής του οργάνου. Στο τέλος θα υπάρχει παρουσίαση μετρήσεων των δοκιμών και συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά:

ADC, AES, I2C, LoRa, Pyranometer, SPI

Abstract

This work aims to study, design, and implement an instrument that measures solar radiation in units of w/m^2 . This instrument is called a pyranometer. The range of the instrument to be implemented is from 0 to 1500W/m^2 . The primary component of such an instrument is the sensor that detects the radiation. In this work, the selected sensor is the photodiode, which is suitable for the application under consideration. There will be a discussion of the types of solar radiation that the pyranometer can measure. Additionally, other types of pyranometers that use different types of sensors will be presented, along with their advantages and disadvantages.

Next, the design and study of the analog and digital parts of the instrument's construction will be presented. Finally, there will be a presentation of measurements from tests and conclusions.

Keywords:

ADC, AES, I2C, LoRa, Pyranometer, SPI

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Ψάννη Κωνσταντίνο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, γιατί την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα, και την αμέριστη και ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στον Καθηγητή κ. Μέμο Βασίλειο για την πολύ σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε.

Ακόμη ευχαριστώ όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος καθώς και τους καθηγητές του προπτυχιακού προγράμματος, που μου έδωσαν τα κατάλληλα κίνητρα και τις απαραίτητες γνώσεις για να φτάσω στο στάδιο παρουσίασης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης Κατά τη διάρκεια του προγράμματος Erasmus, είχα την τιμή να γνωρίσω τον καθηγητή Ramon Blasco-Gimenez ο οποίος αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για εμένα ,και με τη φράση του " dream big the sky is the limit " με έκανε να συνειδητοποιήσω ότι δεν υπάρχουν όρια στην γνώση και στο τι μπορούμε να επιτύχουμε. Αυτή η εμπειρία με έκανε να συνεχίσω τις σπουδές μου με ακόμη μεγαλύτερη αφοσίωση και πάθος.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην αδελφή μου Μαρία και στην υπόλοιπη οικογένεια και τους φίλους μου, για τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	5
1.1	Πρόβλημα – Σημαντικότητα του θέματος	5
1.2	Σκοπός – Στόχοι	5
1.3	Ερωτήματα	6
1.4	Συνεισφορά	7
1.5	Βασική Ορολογία	7
1.6	Διάρθρωση της μελέτης	9
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
2.1	Ηλιακή ακτινοβολία	10
2.1.1	Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας	10
2.1.2	Η μέτρηση της ακτινοβολίας	11
2.2	Το Πυρανόμετρο	12
2.2.1	Τι είναι το πυρανόμετρο	12
2.2.2	Κατηγορίες πυρανομέτρων	12
2.2.3	Τύποι πυρανόμετρων	13
2.2.3.1	Πυρανόμετρο θερμοστήλης	13
2.2.3.2	Πυρανόμετρο με Φωτοδίοδο Πυριτίου	14
2.2.3.3	Πυρανόμετρο Πυριτίου Κυψέλης	15
3	Μεθοδολογία	17
3.1	Επιλογή της διόδου	18
3.2	Επιλογή του περιβλήματος	19
3.3	Αναλογική επεξεργασία σήματος	21
3.4	Επίδραση της θερμοκρασίας	26
3.5	Ψηφιακή επεξεργασία	27
3.5.1	ESP32	27
3.6	Μετάδοση LoRa	28
4	Κατασκευή	29
4.1	Υλοποίηση	29
4.1.1	HARDWARE	30
4.1.1.1	Κύκλωμα Gateway	30
4.1.1.2	Κύκλωμα Αισθητήρα	31

4.1.1.3 Οθόνη LCD	32
4.2 Λειτουργία Κώδικα	32
4.2.1 Περιγραφή κώδικα Gateway	32
4.2.2 Περιγραφή κώδικα Αισθητήρα	36
5 Επίλογος	38
5.1 Ρυθμίσεις – Μετρήσεις	38
5.2 Σύνοψη και συμπεράσματα	40
5.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις	40
6 Βιβλιογραφία	41
6.1 Αρθρογραφία	41
6.2 Ιστοσελίδες	46
6.3 Κυρώσεις για λογοκλοπή	47
Παράρτημα Α – Κώδικας Gateway	48
Κώδικας Αισθητήρα	56
Παράρτημα Β - Datasheet	62
B.1 BPW21R Silicon PN photodiode	62
B.2 BME280 Sensor	67
B.3 2,4 Inch LCD Module	69
B.4 AD8646 Amplifier	70
B.5 LORA RA-02	73
B.6 ESP32	75
B.6.1 Features	75
B.6.2 ESP32 WROOM 32D Pinout	75
B.6.3 ESP32 WROOM 32D Pin Configuration	76
B.6.4 ESP32 WROOM 32D Technical features	77

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ηλεκτρικό φάσμα.....	11
Εικόνα 2: Απόκριση διαφορετικών ειδών πυρανομέτρων.....	13
Εικόνα 3: Πυρανόμετρο Θερμοστήλης.....	14
Εικόνα 4: Η Κατασκευαστική δομή του πυρανόμερου Θερμοστήλης.....	14
Εικόνα 5: Πυρανόμετρο με Φωτοδίοδο Πυριτίου.....	15
Εικόνα 6: Πυρανόμετρο Κυψέλης Πυριτίου.....	16
Εικόνα 7: Απόκριση συχνοτήτων της διόδου	18
Εικόνα 8: Σχέση ρεύματος διόδου με φωτεινότητας.....	18
Εικόνα 9: Διάγραμμα Πυρανόμετρου με Διαχύτη	19
Εικόνα 10: Γωνιακή Απόκριση ανάλογα με την γωνία κοπής του διαχύτη από Teflon ..	20
Εικόνα 11: Αρχιτεκτονική συστήματος.....	29
Εικόνα 12: Το κύκλωμα Gateway σε ραστερ	30
Εικόνα 13: Το κύκλωμα Αισθητήρα σε ράστερ.....	31
Εικόνα 14: Τι εμφανίζει η LCD οθόνη.....	32

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1:Κατηγορίες Πυρανόμετρων	16
Σχήμα 2:Μπλόκ Διάγραμμα Πυρανόμετρου.....	17
Σχήμα 3:Το κύκλομα του αναλογικού ενισχυτή	22
Σχήμα 4:Πλήρες κύκλωμα του αναλογικού ενισχυτή	26
Σχήμα 5:Οι συνδέσεις του κυκλώματος Gateway.....	30
Σχήμα 6: Οι συνδέσεις του κυκλώματος Αισθητήρα	31
Σχήμα 7: Η Απόκριση του πυρανόμετρου μέσω (thingspeak).....	39

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ανάστροφο ρεύμα διόδου για 1klx.....	19
---	----

1 Εισαγωγή

1.1 Πρόβλημα – Σημαντικότητα του θέματος

Τα πυρανόμετρα είναι όργανα που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση της θερμοκρασίας σε επιστημονικές έρευνες, τη βιομηχανία, σε φωτοβολταϊκά συστήματα[1], τη μετεωρολογία, τη μελέτη του κλίματος καθώς και στην καθημερινή ζωή γενικότερα. Τα πυρανόμετρα στον χώρο της επιστημονικής έρευνας, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των συνθηκών σε πειραματικές και ερευνητικές διαδικασίες, στη βιομηχανία βοηθούν στη ρύθμιση της θερμοκρασίας σε διάφορα είδη εξοπλισμού και μηχανημάτων, βελτιώνοντας σημαντικά πεδία όπως είναι η απόδοση και η ασφάλεια [2]. Στον τομέα του κλιματισμού, παρέχουν άνεση και αποτελεσματικότητα σε κτίρια και οχήματα. Στην ιατρική, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος βοηθώντας τη διάγνωση του πυρετού και άλλων νοσημάτων και τέλος, τα πυρανόμετρα είναι ενσωματωμένα και σε καταναλωτικά προϊόντα, όπως ψηφιακά θερμόμετρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στο σπίτι για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του σώματος. Η ύπαρξη πυρανομέτρων είναι απαραίτητη για την καταγραφή, τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας σε πολλούς τομείς της ζωής μας, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και την άνεση των ανθρώπων και βοηθώντας στη βελτίωση της απόδοσης και την πρόληψη προβλημάτων[3].

1.2 Σκοπός – Στόχοι

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός πυρανόμετρου που να είναι σε θέση να μετρήσει την ηλιακή ακτινοβολία. Τα πυρανόμετρα χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ακτινοβολίας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 300nm έως 2800nm, και όχι μόνο στο ορατό μέρος του φάσματος[4]. Υπάρχουν διάφορα είδη πυρανομέτρων τα οποία χρησιμοποιούν διάφορα είδη αισθητηρίων. Σε αυτήν την εργασία, επικεντρωνόμαστε σε ένα πυρανόμετρο που χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο πυριτίου ως αισθητήριο[5]. Συνήθως τα πυρανόμετρα τοποθετούνται σε οριζόντια θέση καθώς η μέτρηση της ακτινοβολίας, είναι σαφώς καλύτερη στον ελεύθερο ορίζοντα χωρίς εμπόδια που προκαλούν σκιάσεις[6]. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρέχονται συνήθως σε μονάδες W/m^2 . Μπορεί επίσης να απαιτηθεί να τοποθετηθεί το πυρανόμετρο υπό κλίση, ανάλογα με την εφαρμογή.

1.3 Ερωτήματα

Η υλοποίηση ενός πυρανόμετρου είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα διαδικασία που περιλαμβάνει πολλές τεχνικές, επιστημονικές και μηχανικές προκλήσεις[7]. Κατά τη διαδικασία υλοποίησης ενός πυρανόμετρου, δημιουργούνται μερικά ερωτήματα τα οποία στοχεύουν στην καλύτερη κατανόηση του θέματος, τέτοια όπως :

Ως αναφορά τον Σχεδιασμό :

Ποια υλικά πρέπει να επιλεγούν για την κατασκευή ενός πυρανομέτρου με φωτοδίοδο, και ποια κριτήρια πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή αυτών των υλικών;[8]

Πώς μπορεί να σχεδιαστεί η δομή του πυρανομέτρου για να είναι ανθεκτική σε περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως υγρασία, σκόνη και υψηλές θερμοκρασίες;

Ακρίβεια και Ανάλυση:

Πώς θα επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις της θερμοκρασίας;

Ποια είναι η αναλυτική ικανότητα του πυρανομέτρου και πώς θα μετατραπούν οι μετρήσεις σε αναγνώσιμη μορφή;

Μέθοδος Μέτρησης:

Ποια μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας θα χρησιμοποιηθεί ;

Πώς θα ελεγχθεί η σταθερότητα και η ακρίβεια της μεθόδου;

Συνδεσιμότητα και Διεπαφή:

Πώς θα συνδεθεί το πυρανόμετρο με άλλες συσκευές ή υπολογιστές;

Ποια διεπαφή θα χρησιμοποιηθεί για την προβολή και την αποθήκευση των μετρήσεων;

Αξιοπιστία και Συντήρηση:

Πώς θα ελεγχθεί η αξιοπιστία του πυρανομέτρου και πώς θα διασφαλιστεί η συντήρησή του;[10]

Ποια είναι τα ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν και πώς θα επιλυθούν;

Πιθανές Εφαρμογές:

Για ποιους σκοπούς θα χρησιμοποιηθεί το πυρανόμετρο; Ποιες είναι οι εφαρμογές του;

Ποιες είναι οι απαιτήσεις του πυρανομέτρου ανάλογα με την εφαρμογή;

1.4 Συνεισφορά

Μια εργασία με θέμα την κατασκευή ενός πυρανομέτρου είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την γνώμη μου καθώς συνεισφέρει στην επιστημονική γνώση, έχει πρακτικές εφαρμογές και παρέχει εκπαιδευτική αξία. Οι αναγνώστες που διαβάσουν την εργασία θα μπορούν να εμπνευστούν για περαιτέρω έρευνα ή να πειραματιστούν σε εφαρμογές στον τομέα της ηλεκτρονικής και της μέτρησης ακτινοβολίας

1.5 Βασική Ορολογία

ADC: Η συντομογραφία ADC αναφέρεται στο Analog-to-Digital Converter (Μετατροπέας Αναλογικού σε Ψηφιακό), το οποίο είναι ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα που χρησιμοποιείται για να μετατρέπει αναλογικά σήματα σε ψηφιακά.

AES: Το AES αναφέρεται στο πρότυπο κρυπτογράφησης Advanced Encryption Standard (Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης), που είναι ένα από τα πιο δημοφιλή και ασφαλή συστήματα κρυπτογράφησης που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως. Το AES προσφέρει ασφάλεια στην αποστολή και αποθήκευση δεδομένων, καθώς κρυπτογραφεί τα δεδομένα, καθιστώντας τα δυσανάγνωστα για άτομα ή συσκευές που δεν έχουν το κατάλληλο κλειδί για αποκρυπτογράφηση.

I2C: Το I2C σημαίνει Inter-Integrated Circuit και είναι μια συντομογραφία που αναφέρεται σε ένα διακρατικό πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτρονική για τη σύνδεση διαφόρων συσκευών μεταξύ τους, όπως αισθητήρες, επεξεργαστές, ενσωματωμένα συστήματα, και περιφερειακές συσκευές. Αυτό το πρωτόκολλο επικοινωνίας επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ διαφορετικών εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας μόνο δύο καλώδια, ένα για τη μεταφορά δεδομένων (SDA - Serial Data) και ένα για τη μεταφορά του ρολογιού (SCL - Serial Clock).

LoRa : LoRa (Long Range) είναι μια τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η τεχνολογία LoRa αναπτύχθηκε για να καλύψει το κενό μεταξύ των παραδοσιακών ασύρματων δικτύων όπως το Wi-Fi και τα κινητά δίκτυα, παρέχοντας μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας και εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Το LoRa λειτουργεί σε διάφορες συχνότητες ραδιοκυμάτων, ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή, και επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε αποστάσεις που μπορεί

να φτάσουν πολλά χιλιόμετρα. Αυτή η τεχνολογία βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως το Ίντερνετ των Πραγμάτων (IoT), αστική παρακολούθηση, αγροτική αυτοματοποίηση, και άλλους τομείς όπου απαιτείται αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε μεγάλες αποστάσεις. Ένα από τα πλεονεκτήματα του LoRa είναι η ικανότητά του να λειτουργεί με μπαταρίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις ή φόρτιση.

SPI: Το SPI αναφέρεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας Serial Peripheral Interface (Σειριακή Περιφερειακή Σύνδεση) και αποτελεί ένα δημοφιλές πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών εξαρτημάτων και μικροελεγκτών σε ένα σύστημα. Το SPI χρησιμοποιείται κυρίως για τη σύνδεση περιφερειακών συσκευών (όπως αισθητήρες, οθόνες, ενσωματωμένες μνήμες, κλπ.) με έναν κεντρικό μικροελεγκτή ή μια CPU.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου SPI περιλαμβάνουν:

1) **Πολλαπλές Γραμμές Επικοινωνίας:** Το SPI χρησιμοποιεί πολλαπλές γραμμές επικοινωνίας που συνήθως είναι οι ακόλουθες τέσσερις:

- **SCLK** (Serial Clock): Αυτή είναι η γραμμή ρολογιού που καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων.
- **MOSI** (Master Out Slave In): Αυτή η γραμμή χρησιμοποιείται από τον κεντρικό μικροελεγκτή για τη μετάδοση δεδομένων προς τις περιφερειακές συσκευές.
- **MISO** (Master In Slave Out): Αυτή η γραμμή χρησιμοποιείται από τις περιφερειακές συσκευές για τη μετάδοση δεδομένων προς τον κεντρικό μικροελεγκτή.
- **SS/CS** (Slave Select/Chip Select): Αυτή η γραμμή επιλέγει ποια περιφερειακή συσκευή θα επικοινωνήσει με τον κεντρικό μικροελεγκτή. Συνήθως, χρησιμοποιείται μια γραμμή επιλογής για κάθε περιφερειακή συσκευή.

1) **Αμφίδρομη Επικοινωνία:** Το SPI επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία, καθώς ο κεντρικός μικροελεγκτής μπορεί να στέλνει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα.

2) **Γρήγορη Ταχύτητα Μετάδοσης:** Το SPI είναι σχεδιασμένο για γρήγορη μετάδοση δεδομένων, και η ταχύτητα μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.

3) **Δεν Υποστηρίζει Πολλαπλούς Δέκτες:** Μόνο μία περιφερειακή συσκευή μπορεί να είναι επιλεγμένη για επικοινωνία με τον κεντρικό μικροελεγκτή χρησιμοποιώντας τη γραμμή επιλογής (SS/CS)

1.6 Διάρθρωση της μελέτης

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας ξεκινά από το δεύτερο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, γίνεται αναφορά στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και στη μέθοδο της μέτρησης της. Στη συνέχεια, γίνεται μια εκτενέστερη παρουσίαση των πυρανομέτρων, εστιάζοντας στις διάφορες κατηγορίες και τους τύπους που υπάρχουν. Αυτό είναι σημαντικό για την κατανόηση της ποικιλίας των πυρανομέτρων και των χρήσεών τους ώστε να γίνει η επιλογή του κατάλληλου πυρανομέτρου για την εφαρμογή. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιδέα και η μεθοδολογία της κατασκευής του συγκεκριμένου πυρανόμετρου καθώς και η λεπτομερής ανάλυση της επιλογής των υλικών και η διαδικασία επιλογής των πρωτόκολλων που απαιτούνται για την διασύνδεση και μεταφορά του αναλογικού σήματος. Στην συνέχεια γίνεται η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η μετάδοση των μετρήσεων σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LoRa και στη συνέχεια να γίνει η αποθήκευση των μετρήσεων σε μια online πλατφόρμα για περαιτέρω ανάλυση. Στο τέταρτο κεφάλαιο, χρησιμοποιείται ένα πυρανόμετρο ως πυρανόμετρο αναφοράς, τοποθετημένο κοντά στο πυρανόμετρο της μελέτης, για να βρεθεί η ίδια ένδειξη σε παρόμοιες συνθήκες. Κατόπιν, το πυρανόμετρο καλιμπράρεται για μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Τα δεδομένα καταγράφονται με συχνότητα 1 λεπτού και αποστέλλονται σε online πλατφόρμα για ανάλυση. Τέλος, γίνεται μια συζήτηση γύρω από τα συμπεράσματα που εξήχθησαν καθώς και προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Ηλιακής ακτινοβολίας

2.1.1 Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

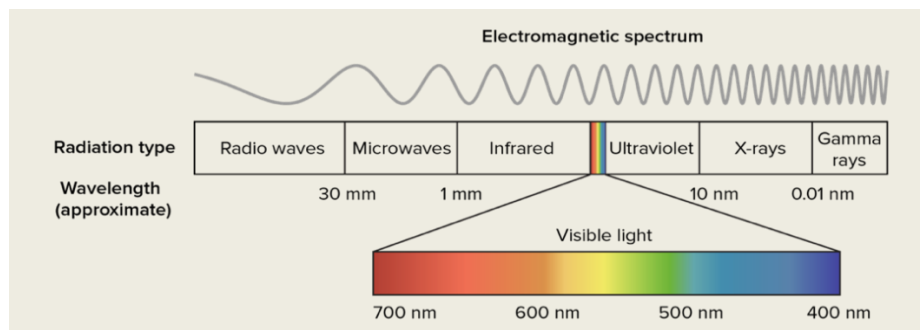
Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από τον συνδυασμό των επιδράσεων της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται από τον ήλιο που φτάνει απευθείας στην επιφάνεια του πλανήτη, περιλαμβάνοντας το πλήρες φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Ενώ η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία αναφέρεται στην ηλιακή ακτινοβολία που διασχίζει την ατμόσφαιρα της Γης και υπόκειται σε διάφορες διαδικασίες επιδράσεων από σωματίδια και μόρια της ατμόσφαιρας. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών, η ακτινοβολία διασκορπίζεται προς όλες τις κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να μην φτάνει στην επιφάνεια της Γης με την ίδια ένταση όπως στην περίπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Οι διαδικασίες επιδράσεων της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνουν την ανάκλαση και την απορρόφηση μέρους ηλιακής ενέργειας από τα ατμοσφαιρικά νέφη, την απορρόφηση μέρους ηλιακής ακτινοβολίας από ορισμένα αέρια στην ατμόσφαιρα, όπως είναι το οξυγόνο, το όζον και το διοξείδιο του άνθρακα. Την διάχυση και την σκέδαση λόγω μεγάλων σωματιδίων όπως είναι η σκόνη και ο καπνός, που επηρεάζουν κυρίως το μεγάλο μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και τέλος η σκέδαση από μικρά σωματίδια και μόρια αέρα, τα οποία επηρεάζουν κυρίως το μικρό μήκος κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή το ορατό φως.

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκος κύματος από 700nm έως 1000μm.
- Ορατή ακτινοβολία με μήκος κύματος από 400nm έως 700nm.
- Υπεριώδη ακτινοβολία με μήκος κύματος από 10nm έως 400nm.

Η συνολική ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα των παραπάνω επιδράσεων και περιλαμβάνει αυτές τις τρεις κατηγορίες ακτινοβολίας.



Εικόνα 1. Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

2.1.2 Η μέτρηση της ακτινοβολίας

Η μέτρηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας επικεντρώνεται στο φάσμα από 300nm έως 3000nm, όπου συγκεντρώνεται το 96% της ενέργειας που εκπέμπεται από τον ήλιο. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μέτρηση, χρησιμοποιούνται πυρανόμετρα που τοποθετούνται συνήθως οριζόντια και σε σημεία όπου υπάρχει ανοιχτός ουρανός, ώστε να απορροφούν όσο το δυνατόν περισσότερη απευθείας ηλιακή ακτινοβολία.

Συγκεκριμένα, αυτή η μέτρηση περιλαμβάνει την καταγραφή της ακτινοβολίας που προέρχεται από τον ήλιο και φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Για να υπολογίσουμε τη συνολική ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη, πρέπει να λάβουμε υπόψη τόσο την άμεση ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ήλιο, όσο και τη διάχυτη ακτινοβολία είτε διασκορπίζεται από διάφορα αέρια και σωματίδια στην ατμόσφαιρα, είτε ανακλάται από επιφάνειες όπως είναι η γη και τα νέφη.

Για αυτόν τον λόγο, η τοποθέτηση των πυρανομέτρων σε κατάλληλες θέσεις είναι ζωτικής σημασίας, καθώς η σωστή θέση επιτρέπει την καταγραφή της συνολικής ενέργειας του ηλιακού φωτός που φτάνει στην επιφάνεια της Γης.

2.2 Το Πυρανόμετρο

2.2.1 Τι είναι το πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, το πυρανόμετρο μετρά την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που φτάνει σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια της Γης για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η μέτρηση που λαμβάνει μπορεί να βοηθήσει στον καθορισμό της ποσότητας της ηλιακής ενέργειας που είναι διαθέσιμη σε μια συγκεκριμένη περιοχή και να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές όπως είναι ο υπολογισμός της δυνατότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα ή για την παρακολούθηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε επιστημονικές έρευνες και περιβαλλοντικές μελέτες.

2.2.2 Κατηγορίες πυρανόμετρων

Τα πυρανόμετρα μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια:

Πυρανόμετρα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια:

Σε αυτήν την κατηγορία πυρανομέτρων μετά την συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται άμεσα η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια.

Πυρανόμετρα που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική ενέργεια και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική ενέργεια:

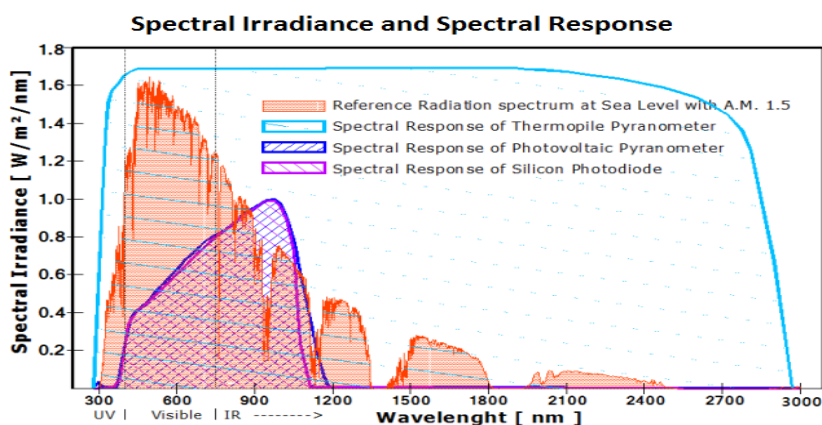
Σε αυτήν την κατηγορία πυρανομέτρων πρώτα απορροφάται η ηλιακή ακτινοβολία έπειτα μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, και στη συνέχεια χρησιμοποιείται αυτή η θερμική ενέργεια για την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαφοροποίηση στη λειτουργία των πυρανομέτρων επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση της ηλιακής ενέργειας με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τις ανάγκες και τις εφαρμογές τους. Αυτή η ευελιξία είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη βιώσιμων και αποδοτικών συστημάτων ενέργειας που βασίζονται στον ήλιο.

2.2.3 Τύποι πυρανομέτρων

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η απόκριση τριών διαφορετικών τύπων πυρανομέτρων, τα οποία θα εξετάσουμε ανάλογα με τον τύπο του αισθητηρίου που χρησιμοποιούν. Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε από την Εικόνα 2 είναι ότι τα πυρανόμετρα θερμοστήλης έχουν την καλύτερη απόκριση σε όλο το φάσμα που μας ενδιαφέρει. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα όργανα που χρησιμοποιούν κυψέλη ή φωτοδίοδο πυριτίου έχουν σχεδόν παρόμοια απόκριση.

Στην Εικόνα 2 το κόκκινο μέρος αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της Γης κατά τις μεσημεριανές ώρες, στο επίπεδο της θάλασσας. Αυτή η ακτινοβολία αποτελεί το σύνολο της ενέργειας που λαμβάνουμε από τον ήλιο και είναι το εύρος που μας ενδιαφέρει για μελέτη. Η αντίδραση των πυρανομέτρων σε αυτό το φάσμα είναι σημαντική, καθώς μας επιτρέπει να κατανοήσουμε το πώς ανταποκρίνονται στην ηλιακή ακτινοβολία υπό αυτές τις συγκεκριμένες συνθήκες.



Εικόνα 2. Απόκριση διαφορετικών ειδών πυρανομέτρων

2.2.3.1 Πυρανόμετρο θερμοστήλης

Τα πυρανόμετρα τύπου θερμοστήλης λειτουργούν με ένα ενδιαφέρον τρόπο. Το αισθητήριό τους είναι ένα είδος θερμοζεύγους με δύο πλάκες. Η πάνω πλάκα εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία και είναι μαύρου χρώματος, ενώ η κάτω πλάκα είναι προστατευμένη από την ακτινοβολία και συνδέεται θερμικά με το κέλυφος του πυρανομέτρου, το οποίο λειτουργεί σαν ψήκτρα. Αυτή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλακών μετατρέπεται σε διαφορά τάσης που ανέρχεται περίπου στα 10μV ανά W/m², και σε μια ηλιόλουστη μέρα, το πυρανόμετρο μας δίνει περίπου 10mV.

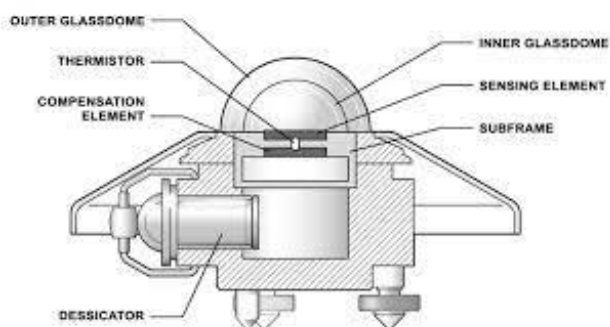
Ένα πλεονέκτημα αυτού του αισθητηρίου είναι ότι ανταποκρίνεται ομοιόμορφα σε όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς απορροφά την ενέργεια ομοιόμορφα σε όλα τα μήκη κύματος του φωτός. Επιπλέον, η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ενέργειας δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Ωστόσο, λόγω του τρόπου λειτουργίας του, αυτό το είδος πυρανόμετρου δεν ανταποκρίνεται γρήγορα σε γρήγορες μεταβολές, όπως παρουσία σύννεφων, καθώς η απόκριση εξαρτάται από την ικανότητα του θερμοζεύγους να μεταβάλλει τη θερμοκρασία του. Αυτό το είδος πυρανόμετρου είναι ακριβές και αξιόπιστο, και χρησιμοποιείται ευρέως σε επιστημονικές εφαρμογές, όπως η μετεωρολογία, η κλιματολογία, και η μελέτη της αλλαγής του κλίματος, καθώς και σε συστήματα φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ένα Πυρανόμετρο Θερμοστήλης ενώ στην Εικόνα 4 γίνεται αναφορά στην κατασκευαστική δομή του Πυρανόμετρου Θερμοστήλης.



Εικόνα 3. Πυρανόμετρο Θερμοστήλης



Εικόνα 4. Κατασκευαστική δομή του Πυρανόμετρου Θερμοστήλης

2.2.3.2 Πυρανόμετρο με Φωτοδίοδο Πυριτίου

Το πυρανόμετρο με φωτοδίοδο πυριτίου λειτουργεί διαφορετικά από το πυρανόμετρο θερμοστήλης, καθώς η φωτοδίοδος έχει ευαισθησία σε ένα πιο περιορισμένο φάσμα της ηλιακής ενέργειας, περιλαμβάνοντας περίπου από τα 400nm έως τα 1100nm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.

Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα συμβαίνει με παρόμοιο τρόπο όπως και στο πυρανόμετρο θερμοστήλης. Ένα πλεονέκτημα της φωτοδίοδου σε σχέση με το πυρανόμετρο θερμοστήλης είναι ότι ανταποκρίνεται αμέσως στις αλλαγές

της θερμοκρασίας. Ωστόσο, αυτή η ταχεία αντίδραση στις αλλαγές της θερμοκρασίας μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στις μετρήσεις. Για αυτόν τον λόγο, στην κατασκευή του πυρανομέτρου αυτού, πρέπει να περιλαμβάνεται ένα κύκλωμα που να διατηρεί τη θερμοκρασία σταθερή ή να λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και να προσαρμόζει ανάλογα την ένδειξη του οργάνου.

Η φωτοδίοδος έχει γραμμική σχέση ρεύματος εξόδου σε σχέση με την ένταση του φωτός, και το ρεύμα αυτό ενισχύεται από κατάλληλα κυκλώματα, μετατρέποντας το σε γραμμική μεταβολή τάσης ως προς τη μετρούμενη ακτινοβολία.

Τα πυρανόμετρα με φωτοδίοδο πυριτίου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η μέτρηση της έντασης του ορατού φωτός ή κάποιου τμήματος της υπερύθρου ακτινοβολίας, όπως σε φωτογραφικά στούντιο, κινηματογράφους, αλλά και σε συστήματα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Η φωτοδίοδος προστατεύεται από τη σκόνη και την υγρασία από ένα κομμάτι Teflon, το οποίο είναι ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία και εξασθενίζει ελαφρά την ηλιακή ακτινοβολία, αποτρέποντας την υπερβολική εκθέση της δίοδου. Τα πυρανόμετρα αυτά έχουν καλή ακρίβεια στις μετρήσεις τους, αν και όχι όσο τα πυρανόμετρα θερμοστήλης όπως προαναφέρθηκε. Επιπλέον, το κόστος τους είναι πολύ χαμηλότερο σε σχέση με άλλα είδη πυρανομέτρων.

Στην Εικόνα 5 εμφανίζεται ένα πυρανόμετρο με φωτοδίοδο πυριτίου της εταιρίας Kipp&Zonen.



Εικόνα 5. Πυρανόμετρο με φωτοδίοδο πυριτίου

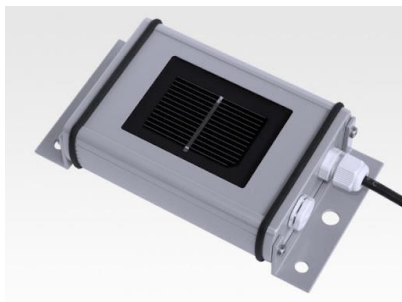
2.2.3.3 Πυρανόμετρο πυριτίου κυψέλης

Η τρίτη κατηγορία πυρανομέτρων περιλαμβάνει συσκευές που χρησιμοποιούν μια μικρή φωτοβολταϊκή κυψέλη ως αισθητήριο για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και τη

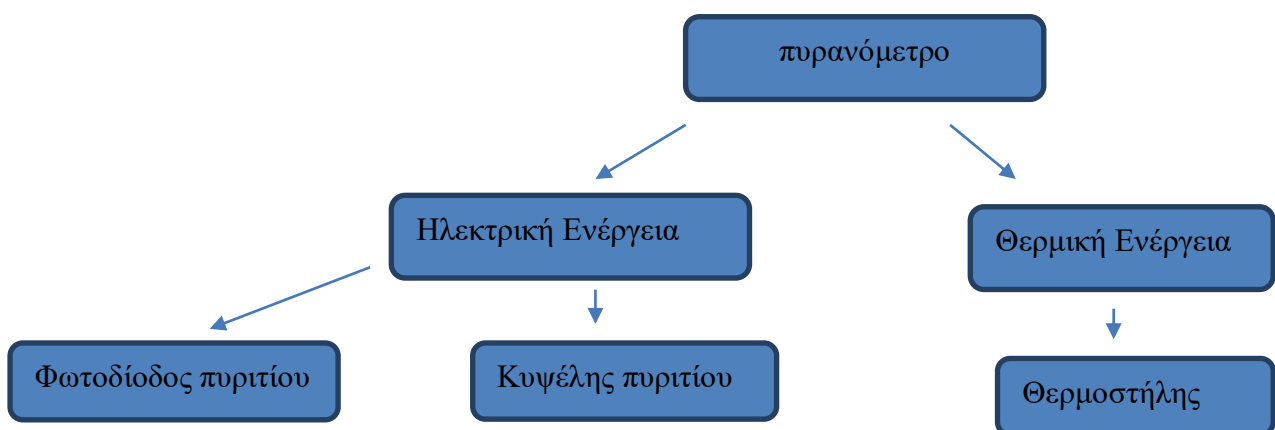
μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτός ο τύπος πυρανόμετρου αποτελεί μια περαιτέρω εξέλιξη των πυρανόμετρων φωτοδίοδου πυριτίου. Όπως και τα πυρανόμετρα με φωτοδίοδο πυριτίου, επηρεάζονται από την εξωτερική θερμοκρασία. Επομένως, απαιτούν κυκλώματα ελέγχου για τη διατήρηση της θερμοκρασίας ή την αντιστάθμιση των αποκλίσεων των μετρήσεων που οφείλονται στη θερμοκρασία.

Η ανταπόκρισή τους στην ακτινοβολία είναι πιο αργή από αυτήν των πυρανόμετρων φωτοδίοδου, αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα στις εφαρμογές όπου οι αλλαγές δεν είναι τόσο γρήγορες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, έχουν ελαφρώς καλύτερη απόκριση και ακρίβεια σε σχέση με τις φωτοδιόδους πυριτίου, αλλά συνήθως είναι ελαφρώς πιο δαπανηρά από τα πυρανόμετρα δίοδου πυριτίου.

Κυρίως χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πάρκων για τη μέτρηση της ακτινοβολίας. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται ένα πυρανόμετρο αυτού του τύπου.



Εικόνα 6 Πυρανόμετρο
Κυψέλης Πυριτίου

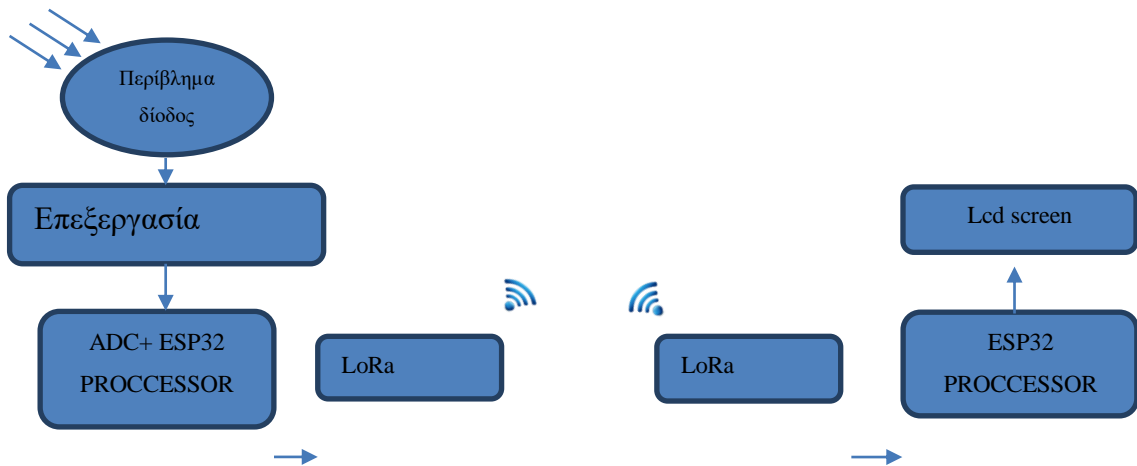


Σχήμα 1. Κατηγορίες πυρανόμετρων

3 Μεθοδολογία

Η ιδέα της συγκεκριμένης εργασίας είναι η κατασκευή ενός προσιτού πυρανόμετρου το οποίο θα έχει μία απόκριση από τα 400nm έως περίπου τα 800nm, και δυνατότητα μέτρησης από 0 έως 1500 W/m². Για την εφαρμογή αυτή, θα χρησιμοποιηθεί μια κατάλληλη φωτοδίοδος. Το σύστημα θα αποτελείται από δύο κύρια μέρη: το πρώτο με τον αισθητήρα και το δεύτερο με την LCD οθόνη. Αυτά τα δύο μέρη θα επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους. Το πρώτο μέρος θα τροφοδοτείται επίσης από επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου 3,6V, προσφέροντας τη δυνατότητα τοποθέτησής του σε περιοχές χωρίς πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα ή κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος .

Στο Σχήμα 2 φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 2. Μπλοκ Διάγραμμα Πυρανόμετρου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα η ηλιακή ενέργεια θα μετατρέπεται σε ηλεκτρική με την βοήθεια μιας φωτοδίοδου, θα ενισχύεται με τον κατάλληλο ενισχυτή ώστε να έχει σωστή στάθμη για τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό που ακολουθεί. Μετά το ψηφιακό σήμα θα επεξεργαστεί κατάλληλα ώστε να μας δίνει την επιθυμητή τιμή σε W/m² . Η πληροφορία αυτή θα μεταδίδεται ασύρματα μέσω ενός συστήματος LoRa, το οποίο μπορεί με μικρή κατανάλωση να μεταδώσει σήμα χαμηλής χωρητικότητας σε σχετικά μεγάλη απόσταση.[11] Το σήμα θα μεταδίδεται κρυπτογραφημένο με AES-cbc κρυπτογράφηση. Ο δέκτης αφού αποκωδικοποιήσει το σήμα θα το εμφανίζει σε μία οθόνη lcd σε μονάδες W/m².

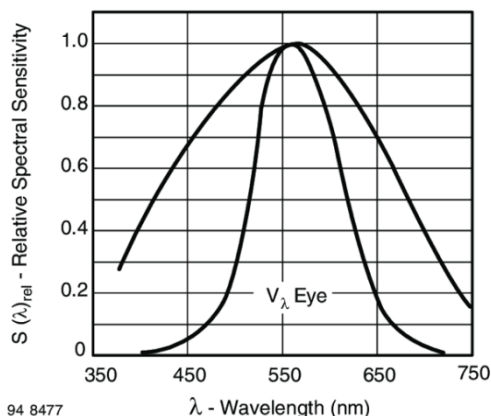
Επειδή η λειτουργία της φωτοδιόδου επηρεάζεται άμεσα από την εξωτερική θερμοκρασία, θα υπάρχει και ένα κύκλωμα ελέγχου της θερμοκρασίας της συσκευής ώστε αυτή να παραμένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων.

3.1 Επιλογή της διόδου

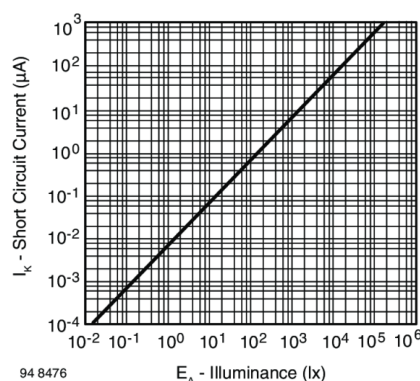
Η φωτοδιόδος είναι το εξάρτημα που μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια και αποτελεί ίσως το σημαντικότερο εξάρτημα του πυρανόμετρου φωτοδιόδου αφού είναι και αυτό που το χαρακτηρίζει. Η επιλογή της φωτοδιόδου έγινε με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- Διαθεσιμότητα – κόστος
- Απόκριση συχνοτήτων
- Θόρυβος
- Γραμμικότητα φωτεινής ενέργειας / ρεύματος εξόδου
- Μέγιστη Ικανότητα πρόσληψης φωτεινής ενέργειας

Μετά από συγκρίσεις μεταξύ μερικών διαθέσιμων προς αγορά μοντέλων τελικά επιλέχτηκε η διόδος BPW-21R της εταιρίας Vishey.[12][13] Το κόστος της διόδου είναι περίπου 12 ευρώ και υπάρχει διαθέσιμη προς αγορά. Η απόκριση συχνοτήτων της διόδου σε σχέση με την απόκριση του ανθρώπινου ματιού φαίνεται στην Εικόνα 7. Βλέπουμε ότι η μέγιστη ευαισθησία είναι παρόμοια με αυτή του ματιού.



Εικόνα 7. Απόκριση συχνοτήτων της διόδου



Εικόνα 8. Σχέση ρεύματος διόδου – φωτεινότητας

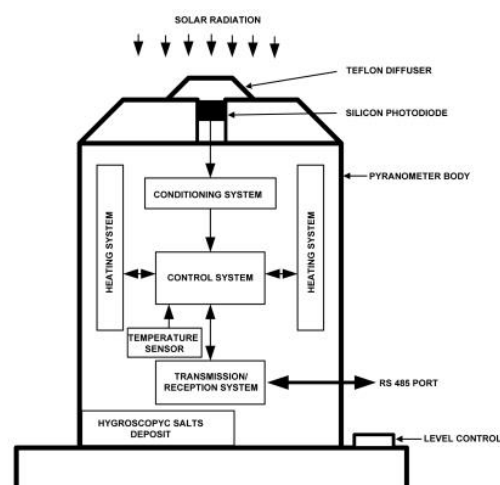
Επίσης η μεταβολή του ρεύματος εξόδου είναι ελάχιστη σε σχέση με την μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι από τους καλύτερους συγκρινόμενος με άλλες διόδους παρόμοιου κόστους.

Η ικανότητα της διόδου αυτής να προσλαμβάνει ηλιακή ενέργεια χωρίς να φτάνει σε κορεσμό είναι επίσης απαιτούμενο χαρακτηριστικό.

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζετε η χαρακτηριστική του ρεύματος της διόδου ως προς την ένταση της φωτεινής ενέργειας. Βλέπουμε ότι έχει μία γραμμική απόκριση κάτι το οποίο είναι απαραίτητο για την εφαρμογή μας. Για όλους τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διόδος BPW-21R. Η συγκεκριμένη διόδος, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, έχει επιφάνεια συλλογής ηλιακής ενέργειας 7.5mm^2 και ευαισθησία 9nA/lux .

3.2 Επιλογή του περιβλήματος

Μεγάλη σημασία έχει η σωστή επιλογή του περιβλήματος της διόδου. Εκτός από την προστασία που πρέπει να παρέχει για να μην εισέρχεται σκόνη και υγρασία στην διόδο, το περίβλημα πρέπει να αφήνει το προς μέτρηση φάσμα να περνάει προς την διόδο, πρέπει να είναι ανθεκτικό στην UV ακτινοβολία ώστε να μην αλλάζει η διαπερατότητα του φωτός με την πάροδο του χρόνου και να διαχέει ομοιόμορφα το ηλιακό φως στην διόδο. Ένα από τα καλύτερα υλικά, το οποίο πληροί τις προϋποθέσεις αυτές, είναι το Teflon. Τα οπτικά χαρακτηριστικά του υλικού αυτού παραμένουν σταθερά στο μετρούμενο μήκος κύματος της ηλιακής ενέργειας. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και γυάλινος θόλος αλλά είναι αρκετά ακριβότερος και προσελκύει ευκολότερα σκόνη σε σχέση με το Teflon. Στην Εικόνα 9 φαίνεται στο πάνω μέρος της συσκευής, ένας τέτοιος διαχύτης από Teflon (Teflondiffuser)



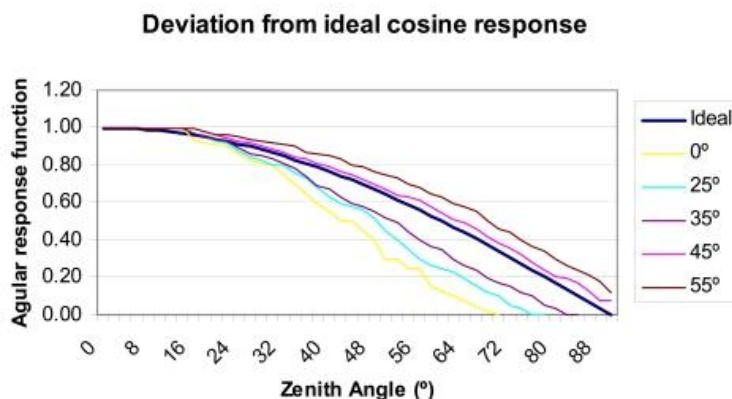
Εικόνα 9. Διάγραμμα Πυρανόμετρου φωτοδιόδου με Διαχύτη

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 9, ο διαχύτης αυτός δεν είναι επίπεδος αλλά το σχήμα του έχει μία κλίση περίπου 45 μοιρών. Αυτό γίνεται επειδή μετά από πειράματα η κλίση αυτή μας δίνει την καλύτερη γωνιακή απόκριση.

Η γωνιακή απόκριση είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των οργάνων μέτρησης της πυκνότητας ροής, της ηλιακής ενέργειας. Έστω ότι έχουμε μία δέσμη ακτινοβολίας με ροή $E(0)$ ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη προς την διάδοσή της. Η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας $E(\theta)$ που εναποθέτει η δέσμη σε μία οριζόντια επιφάνεια όταν πέφτει σε αυτήν υπό μία γωνία θ δίνεται από την σχέση :

$$E(\theta) = E(0) \cos\theta \quad (1)$$

Όπως λοιπόν φαίνεται από την παραπάνω σχέση, στην ιδανική περίπτωση, η μέτρηση ενός οργάνου θα είναι πάντα ανάλογη του συνημίτονου της γωνίας υπό την οποία προσπίπτει η δέσμη ακτινοβολίας στην επιφάνεια του αισθητηρίου που στην περίπτωση μας είναι μία φωτοδίοδος της οποίας η επιφάνεια συλλογής είναι 7.5mm^2 . Στην πράξη όμως όλοι οι συλλέκτες ακτινοβολίας δεν έχουν ιδανική συμπεριφορά κυρίως λόγω της ανάκλασης μέρους της ακτινοβολίας από το ίδιο το πλακίδιο διάχυσης η οποία είναι πιο έντονη όταν η γωνία είναι 90 μοίρες. Για το λόγο αυτό η πυκνότητα ροής που μετράνε τα όργανα αυτά είναι πάντα μικρότερη από το γινόμενο της σχέσης 1. Στην Εικόνα 10 μπορούμε να δούμε την ιδανική γωνιακή απόκριση του οργάνου (μαύρη γραμμή) σε σχέση με άλλες αποκρίσεις όταν το υλικό Teflon έχει κοπεί σε διαφορετικές γωνίες. Βλέπουμε ότι η πιο κοντινή γωνιακή απόκριση επιτυγχάνεται όταν η κλίση του υλικού είναι περίπου στις 45 μοίρες



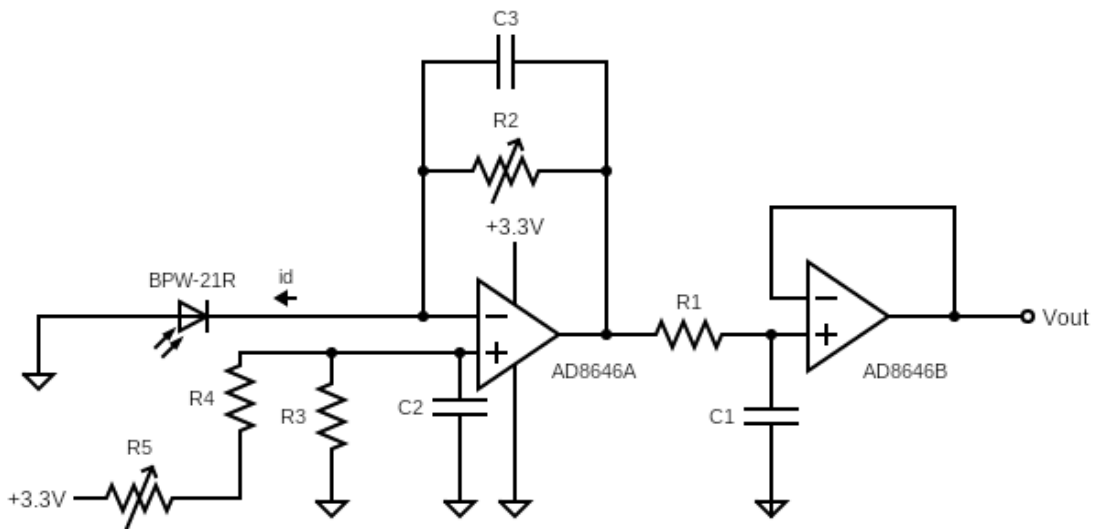
Εικόνα 10. Γωνιακή Απόκριση ανάλογα με την γωνία κοπής του διαχύτη από Teflon

3.3 Αναλογική επεξεργασία σήματος

Αφού λοιπόν η ηλιακή ενέργεια εισέρχεται μέσω του διαχύτη από το υλικό Teflon και προσπίπτει στην επιφάνεια συλλογής της διόδου, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως αναφέραμε παραπάνω το τυπικό ρεύμα της συγκεκριμένης διόδου είναι στα $9\text{nA} / \text{lux}$. Το ρεύμα αυτό μας το δίνει ο κατασκευαστής της διόδου και θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς μας. Στην πράξη βέβαια μπορεί να είναι λίγο διαφορετικό αλλά αυτό θα αντιμετωπιστεί αργότερα με την βοήθεια μιας μεταβλητής αντίστασης στο κύκλωμα ενίσχυσης. Για την ενίσχυση του ρεύματος της διόδου θα χρησιμοποιήσουμε τον τελεστικό ενισχυτή AD8646ARZ της Analog Devices. Ο τελεστικός αυτός είναι κατάλληλος για την εφαρμογή μας για τους παρακάτω λόγους:

- Τροφοδοσίας από μονή πηγή 2.7V έως 5.5V
- Η έξοδος είναι rail to rail
- Χαμηλή κατανάλωση
- Πολύ χαμηλός θόρυβος $8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Διαθεσιμότητα
- Χαμηλό ρεύμα πολώσεως $1\mu\text{A}$

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι απαραίτητα για την εφαρμογή μας καθώς η τροφοδοσία θα είναι από πηγή 5V ή μπαταρία 3,6V, η έξοδος του μπορεί να έχει εύρος σχεδόν όσο και η τροφοδοσία του και μπορεί άνετα να οδηγήσει τον επόμενο στάδιο που είναι ο μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό σήμα και ο οποίος βρίσκεται εντός του επεξεργαστή esp32. Το κύκλωμα της ενίσχυσης του σήματος φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα .3Το κύκλωμα του αναλογικού ενισχυτή

Στο σχήμα βλέπουμε την φωτοδίοδο να συνδέεται στην αρνητική είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Όταν στην φωτοδίοδο προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία αυτή διέρχεται από ανάστροφο ρεύμα id . Στην θετική είσοδο του τελεστικού έχουμε έναν διαιρέτη τάσης αποτελούμενο από τις αντιστάσεις $R3, R4, R5$ ο οποίος θα μας εξασφαλίσει μία ελάχιστη τάση εξόδου (offset) την οποία χρειαζόμαστε για την γραμμική λειτουργία του μετατροπέα ADC. Η τάση εξόδου του κυκλώματος του Σχήματος 3 δίνεται από την σχέση:

$$V_{out} = R2 \times id + \frac{3,3VR3}{R3+R4+R5} \quad (2)$$

Απ' ότι βλέπουμε στο Σχήμα 3 η αντίσταση $R2$ είναι μεταβλητή για να μπορούμε να ρυθμίσουμε την ενίσχυση έτσι ώστε να έχουμε την επιθυμητή τάση εξόδου για συγκεκριμένη ακτινοβολία. Ο πυκνωτής $C3$ υπάρχει για να αντισταθμίσει την χωρητικότητα της δίοδου και είναι απαραίτητος για την σταθερότητα του κυκλώματος. Ο πυκνωτής αυτός, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [1,2], έχει υπολογιστεί για την δίοδο αυτή να είναι στα 100pF. Για να διορθώσουμε το σφάλμα dc λόγω των ρευμάτων πολώσεως, υπάρχει η αντίσταση $R3$.

Η αντίσταση αυτή έχει τιμή 2KΩ και έχει καθοριστική επίδραση στον θόρυβο [2] ο οποίος ενισχύεται από τον τελεστικό ενισχυτή και για το λόγο αυτό συνδέουμε παράλληλα με αυτήν και τον πυκνωτή C2 του οποίου η τιμή είναι στα 100pF.

Η αντιστάσεις R3,R4,R5 σχηματίζουν έναν μεταβλητό διαιρέτη τάσης ώστε να μπορούμε να έχουμε μια ελάχιστη τάση offset στην έξοδο του ενισχυτή. Η τάση αυτή χρειάζεται επειδή ο ADC μετατροπέας αρχίζει να αντιλαμβάνεται την τάση εισόδου από τα περίπου 200mV. Όπως ήδη αναφέρθηκε η αντίσταση R3 είναι 2KΩ. Για να έχουμε την δυνατότητα ρύθμισης με ακρίβεια ενός ικανοποιητικού εύρους της τάσης offset από περίπου 0.14V έως 0.3V θα πρέπει η αντίσταση R4 να είναι 20KΩ και η μεταβλητή R5 στα 25KΩ. Οπότε με την πολύστροφη μεταβλητή αντίσταση R5 θα έχουμε τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε την τάση εξόδου του κυκλώματος, για ρεύμα διόδου $i_d=0$, έτσι ώστε το όργανο να μας δείχνει 0W/m². Στην έξοδο του ενισχυτή έχουμε και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο 1^{ης} τάξεως το οποίο έχει συχνότητα αποκοπής 3dB περίπου 8Hz για να αποτρέψει οποιονδήποτε πιθανό θόρυβο να εισέλθει στον μετατροπέα. Το φίλτρο αυτό αποτελείται από την αντίσταση R1 και τον πυκνωτή C1. Αν θεωρήσουμε την αντίσταση R1=20K τότε ο πυκνωτής υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση 3:

$$C1 = \frac{1}{2\pi R1 F_c} = \frac{1}{2\pi 20K\Omega \times 8Hz} \sim 1 \times 10^{-6} F = 1\mu F \quad (3)$$

Για την εφαρμογή μας το φίλτρο αυτό είναι αποδεκτό καθώς δεν πρόκειται να μετράμε γρήγορες μεταβολές ακτινοβολίας. Στην έξοδο του φίλτρου υπάρχει και ένας buffer ο οποίος απομονώνει τον ενισχυτή ρεύματος από την είσοδο του AD μετατροπέα. Ο buffer αυτός έχει απολαβή 1 και ο τελεστικός είναι κατάλληλος για την απολαβή αυτή σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που μας δίνει ο κατασκευαστής. Οι υπολογισμοί για να βρεθεί το ρεύμα της διόδου θα γίνουν για μέγιστη ροή 1500W/m². Στον παρακάτω πίνακα 1 φαίνεται το ανάστροφο ρεύμα διόδου που μας δίνει ο κατασκευαστής :

Diode type	Reverse light current (minimum)1klx	Reverse light current (typical) 1klx
BPW-21R	4.5μA	9 μA

Πίνακας 1. Ανάστροφο ρεύμα διόδου για 1klx

Οπότε γνωρίζουμε την σχέση της φωτεινότητας (lux) με το ρεύμα της διόδου. Όμως εμείς θέλουμε να μετρήσουμε την ροή της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²) οπότε θα πρέπει να έχουμε μία σχέση μεταξύ της ροής και της φωτεινότητας. Η ροή της ακτινοβολίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την συχνότητα του φωτός για το λόγο αυτό δεν υπάρχει άμεση δυνατότητα μετατροπής της φωτεινότητας(lux) σε ροή ακτινοβολίας (w/m²). Όμως προκειμένου να γίνουν οι υπολογισμοί μπορούμε να θεωρήσουμε κατά προσέγγιση, συγκεκριμένα για την ακτινοβολία του Ήλιου, ότι η ακτινοβολία 1000 W/m² αντιστοιχεί σε φωτεινότητα 126000 lux. Άρα για να υπολογίσουμε το ρεύμα της διόδου για την ακτινοβολία των 1500W/m² που είναι η μέγιστη μετρούμενη του οργάνου, και με τα δεδομένα του κατασκευαστή της διόδου του πίνακα 1, έχουμε:

$$i_d = \left(\frac{1500W/m^2}{1000W/m^2} \right) \times 126klx \times 9\mu A = 1.7mA \quad (4)$$

Για τον παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε το τυπικό ρεύμα που μας δίνει το κατασκευαστής το οποίο όμως, σύμφωνα με τον πίνακα 1, μπορεί να είναι μικρότερο έως και το μισό. Αυτό σημαίνει ότι η δυνατότητα ρύθμισης της απολαβής του ενισχυτή μέσω της αντίστασης R₂ θα πρέπει να έχει σχετικά μεγάλο εύρος. Γνωρίζοντας το ρεύμα της φωτοδιόδου το μόνο που χρειάζεται να μάθουμε προκειμένου να υπολογίσουμε την απολαβή του ενισχυτή, είναι η επιθυμητή τάση εξόδου του κυκλώματος για την μέγιστη ροή. Στο κύκλωμά μας θέλουμε η μέγιστη ροή να είναι 1500W/m². Όπως προαναφέραμε, η έξοδος του ενισχυτή θα οδηγηθεί σε έναν μετατροπέα ADC οπότε πρώτα πρέπει να εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά του.

Ο ADC που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ενσωματωμένος στον επεξεργαστή ESP32,[14] έχει ανάλυση 12bitπου μεταφράζεται σε 4095 βήματα και το εύρος της τάσης την οποία μπορεί να μετατρέψει, είναι από 0.2Vέως 3.096V.Οπότε ο ενισχυτής θέλουμε να έχει μέγιστη τάση εξόδου 3.096Vκαι offset 0.2V. Για τον υπολογισμό της R₂ θα χρησιμοποιηθεί το εύρος αυτό και το ρεύμα της διόδου για την μέγιστη ροή των

1500W/m² που σύμφωνα με την σχέση 4 είναι $i_d=1.7mA$. Συνεπώς μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την αντίσταση R2:

$$R2 = \frac{V_{outmax-offset}}{i_d} = \frac{2.896V}{1.7 \times 10^{-3}A} = 1700\Omega \quad (5)$$

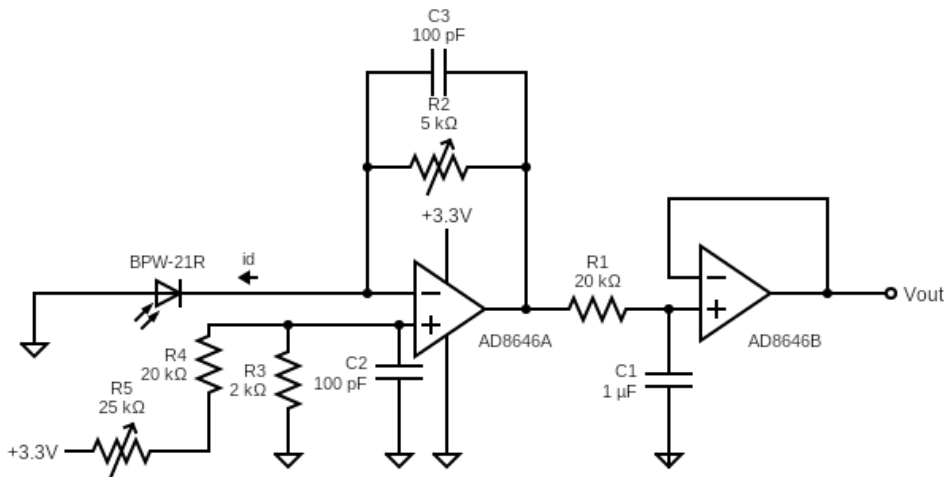
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με το τυπικό ρεύμα της διόδου των 9μΑ/1klx. Εάν πάρουμε το ελάχιστο ρεύμα τω 4.5μΑ/1 klx τότε το αποτέλεσμα της σχέσης 5 θα ήταν 3,4KΩ. Άρα η αντίσταση ρύθμισης της απολαβής του ενισχυτή θα πρέπει να καλύπτει σχετικά μεγάλο εύρος απολαβής. Ορίζουμε την τιμή της μεταβλητής αντίστασης ακριβείας στα 5KΩ. Με αυτήν την τιμή καλύπτουμε πλήρως όλες τις πιθανότητες και διακυμάνσεις ρεύματος διόδου. Όπως αναφέρθηκε ο μετατροπέας μας έχει ανάλυση 12bit. Η παρακάτω σχέση 6 μας δείχνει ότι ο επεξεργαστής προκειμένου να υπολογίσει την ροή της ακτινοβολίας, θα πολλαπλασιάσει το αποτέλεσμα της μετατροπής του ADC με την ροή ακτινοβολίας ανά βήμα η οποία είναι η μέγιστη των 1500W/m² προς 4095:

$$irradiance \left(\frac{W}{m^2} \right) = count \times \frac{1500 \left(\frac{W}{m^2} \right)}{4095} \quad (6)$$

Όλοι οι υπολογισμοί γίνονται για μέγιστη ροή 1500W/m² . Εάν θέλουμε μπορούμε πολύ εύκολα να ρυθμίσουμε τον ενισχυτή για μικρότερη απολαβή, σε συνδυασμό με την αλλαγή της μέγιστης ροής της σχέσης 6 οπότε και το όργανο θα μπορεί να μετράει και μεγαλύτερη ροή με όριο φυσικά τον κορεσμό της φωτοδιόδου. Επειδή τα βήματα του μετατροπέα ADC είναι συγκεκριμένα στα $2^{12}-1 = 4095$ όσο αυξάνουμε την μέγιστη μετρούμενη ροή τόσο χάνουμε στην ανάλυση. Για παράδειγμα για μέγιστη ροή 1000W/m² η ανάλυση που θα έχουμε θα είναι περίπου 0.25W/m² , ενώ για μέγιστη ροή 2000W/m² το βήμα μας θα είναι περίπου 0.5W/m².

Για την τελική ρύθμιση του οργάνου ιδανικό θα ήταν να έχουμε ένα πυρανόμετρο με μεγάλη ακρίβεια και να ρυθμιστεί η αντίστασης R2 ώστε να έχουμε παρόμοια ένδειξη με το όργανο αναφοράς.

Το τελικό κύκλωμα του Σχήματος 3, μαζί με τις τιμές των εξαρτημάτων, φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Πλήρες Κύκλωμα του Αναλογικού Ενισχυτή

3.4 Επίδραση της θερμοκρασίας

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα όλα τα αισθητήρια πυριτίου επηρεάζονται από την εξωτερική θερμοκρασία. Το πυρανόμετρο είναι ένα όργανο το οποίο μετράει την ροή της ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη την διάρκεια της μέρας και του έτους, είναι εκτεθειμένο απευθείας στον ήλιο, αέρα, ζέστη και κρύο.[15] Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, συνεπώς, υπάρχουν διακυμάνσεις της εξωτερικής θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι εάν θέλουμε οι τιμές των μετρήσεων μας να είναι αξιόπιστες και συγκρίσιμες μεταξύ τους καθ' όλη την διάρκεια της χρονιάς θα πρέπει να μην επηρεάζονται από τις μεταβολές αυτές. Για το λόγο αυτό ο επεξεργαστής εκτός από την φωτοδίοδο θα έχει και αισθητήρα θερμοκρασίας. Ο αισθητήρας που επιλέχθηκε είναι για λόγους ευκολίας ψηφιακός και επικοινωνεί απευθείας μέσω πρωτοκόλλου I2C με τον επεξεργαστή[16][17]. Το μοντέλο του αισθητήρα είναι BME280 και μπορεί να μετράει θερμοκρασίες από -40°C έως $+85^{\circ}\text{C}$. Ο επεξεργαστής από την στιγμή που θα γνωρίζει την θερμοκρασία του οργάνου, άρα και της φωτοδίοδου, θα μπορεί να διορθώσει ανάλογα την ένδειξη του αποτελέσματος των μετρήσεων. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά της δίοδου που μεταβάλλονται με την θερμοκρασία είναι το darkcurrent αλλά και το ανάστροφο ρεύμα. Το darkcurrent είναι το ρεύμα της δίοδου σε απόλυτο σκότος. Είναι δηλαδή μία μικρή διαρροή ρεύματος που μας δίνει ο κατασκευαστής. Στη συγκεκριμένη δίοδο είναι 2nA στους 25°C και πόλωση 5V.

Αν και το ρεύμα αυτό διπλασιάζεται για κάθε 10°C άνοδο της θερμοκρασίας τελικά δεν επηρεάζει τις μετρήσεις μας σε υπολογίσιμο βαθμό γιατί συνδέεται άμεσα με την τάση πολώσεως που στην περίπτωση μας είναι χαμηλή στα 0.2V. Οπότε το darkcurrent μας θα είναι αρκετά μικρότερο. Αλλά ακόμα και αν είχαμε 5V τάση πολώσεως στους 80°C το ρεύμα αυτό, σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή, θα ήταν περίπου 0.2μΑ. Σε ροή ακτινοβολίας 1000W/m², κατά την οποία θα είχαμε ρεύμα διόδου 1.13mA (Σχέση 4), η απόκλιση θα ήταν της τάξεως 0.02%. Σε μικρότερες ροές βέβαια η απόκλιση αυξάνεται αλλά παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς δεν χρειάζεται να ασχοληθούμε με το ρεύμα αυτό. Το δεύτερο μεταβαλλόμενο μέγεθος με την θερμοκρασία είναι το ανάστροφο ρεύμα διόδου το οποίο αυξάνει κατά 0.05% για κάθε βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Αν και αρχικώς η μεταβολή φαίνεται μικρή, είναι ικανή να μεταβάλλει το αποτέλεσμα σε μεγάλο βαθμό. Αυτό ακριβώς πρέπει να λάβει υπόψη του ο επεξεργαστής ώστε να διορθώσει την τιμή της μέτρησης μας.

3.5 Ψηφιακή επεξεργασία

3.5.1 ESP32

Ο επεξεργαστής αυτός είναι ένας ολοκληρωμένος υπολογιστής ο οποίος χρονίζεται στα 240Mhz τρέχει το λειτουργικό micropython, άρα όλο το πρόγραμμα είναι γραμμένο στην python, και έχει τα παρακάτω περιφερειακά που χρειαζόμαστε για την κατασκευή του οργάνου:

- Ενσωματωμένο WIFI module για σύνδεση στο ίντερνετ και καταγραφή των δεδομένων σε 24ωρη βάση
- AD converter για ψηφιοποίηση του αναλογικού σήματος
- I2c interface για σύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας[18][19][20][21][22]
- SPI interface για σύνδεση με την οθόνη lcd και LoRamodule

Για την κατασκευή του οργάνου θα χρειαστούμε 2 επεξεργαστές, ένας για την μετατροπή, επεξεργασία και μετάδοση των δεδομένων και τον δεύτερο για λήψη, εμφάνιση στην οθόνη και αποστολή στο thingspeak[23] (δωρεάν online πλατφόρμα απεικόνισης και αποθήκευσης δεδομένων σε διαγράμματα)για την καταγραφή των δεδομένων. Ο πρώτος επεξεργαστής μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό παίρνοντας 200 δειγματοληψίες ανά μέτρηση και υπολογίζοντας τον μέσο όρο. Αυτό γίνεται για την αποφυγή σφάλματος δειγματοληψίας. Ο AD converter του επεξεργαστή χρησιμοποιείται χωρίς το εσωτερικό attenuator γιατί μετά από δοκιμές βρέθηκε ότι η

γραμμικότητά του είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με το αν χρησιμοποιούσαμε τον attenuator.

Η γραμμικότητα του μετατροπέα είναι πολύ σημαντική για την εφαρμογή μας. Οπότε αφού κάνει τις 200 μετατροπές και υπολογίσει τον μέσο όρο το αναλογικό σήμα έχει μετατραπεί σε ψηφιακό και στην συνέχεια, και αφού έχει επικοινωνήσει με τον ψηφιακό αισθητήρα θερμοκρασίας, υπολογίζει το σφάλμα λόγω της θερμοκρασίας της διόδου και ανάλογα διορθώνει το τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης. Ο αισθητήρας BME280 εκτός από την θερμοκρασία μας δίνει και πληροφορίες για την υγρασία.

Η πληροφορία αυτή επίσης μεταδίδεται και εμφανίζεται στην οθόνη. Με αυτόν το τρόπο θα έχουμε ένδειξη της εσωτερικής υγρασίας του οργάνου, οπότε θα γνωρίζουμε εάν και πότε υπάρχει πιθανότητα να θολώσει λόγω της υγρασίας το οπτικό μέρος του οργάνου όπως ο διαχύτης ή η διόδος. Μέσα στο όργανο πρέπει να υπάρχει και κάποιο υλικό για απορρόφηση της υγρασίας οπότε με το τρόπο αυτό θα γνωρίζουμε πρακτικά πότε χρειάζεται να αντικατασταθεί.

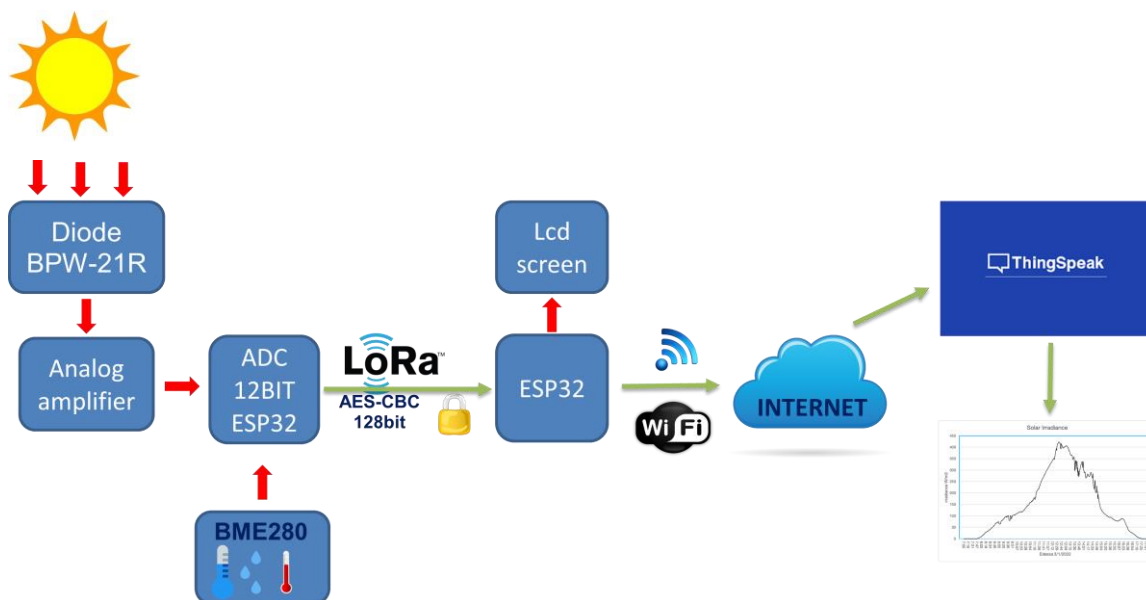
3.6 Μετάδοση LoRa

Αφού λοιπόν έχουμε μετατρέψει, διορθώσει την τιμή της ακτινοβολίας πρέπει να την μεταδώσουμε, μαζί με την θερμοκρασία και υγρασία του οργάνου, σε μεγάλη σχετικά απόσταση στον δεύτερο επεξεργαστή ο οποίος θα μας απεικονίσει και θα αποστείλει προς καταγραφή τα δεδομένα. Η μετάδοση αυτή γίνεται με το σύστημα LoRa[24][25][26]. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για μετάδοση δεδομένων χαμηλού bitrate, δηλαδή είναι ιδανικό για τιμές αισθητηρίων, σε μεγάλες αποστάσεις και με πολύ μικρή κατανάλωση ρεύματος. Στην Ευρώπη το φάσμα που χρησιμοποιείται για την μετάδοση αυτή είναι τα 433MHZ. Η απόσταση που μπορούν να μεταδοθούν τα δεδομένα φτάνει τα 10 χιλιόμετρα αναλόγως των κεραιών που έχουμε. Η μετάδοση στην εφαρμογή είναι κρυπτογραφημένη με κωδικοποίηση AEScbcmode στην οποία υπάρχει εκτός από ένα σταθερό κλειδί και ένα κυλιόμενο ανά μετάδοση.[27][28][29][30]

4 Κατασκευή

4.1 Υλοποίηση

Αφού έχουν πλέον ολοκληρωθεί οι αναγκαίες θεωρητικές μελέτες και οι υπολογισμοί, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στη σημαντική φάση της υλοποίησης του πυρανομέτρου. Το πρώτο βήμα είναι ο σχεδιασμός του κυκλώματος, το οποίο περιλαμβάνει την ενσωμάτωση του αισθητήρα φωτεινότητας, του ενισχυτή σήματος, του μικροελεγκτή και των απαραίτητων εξαρτημάτων. Στην Εικόνα 11, παρουσιάζετε η αρχιτεκτονική του συστήματος του πυρανομέτρου με μορφή διαγράμματος μπλοκ και αντιπροσωπεύει τη συνολική δομή του συστήματος.

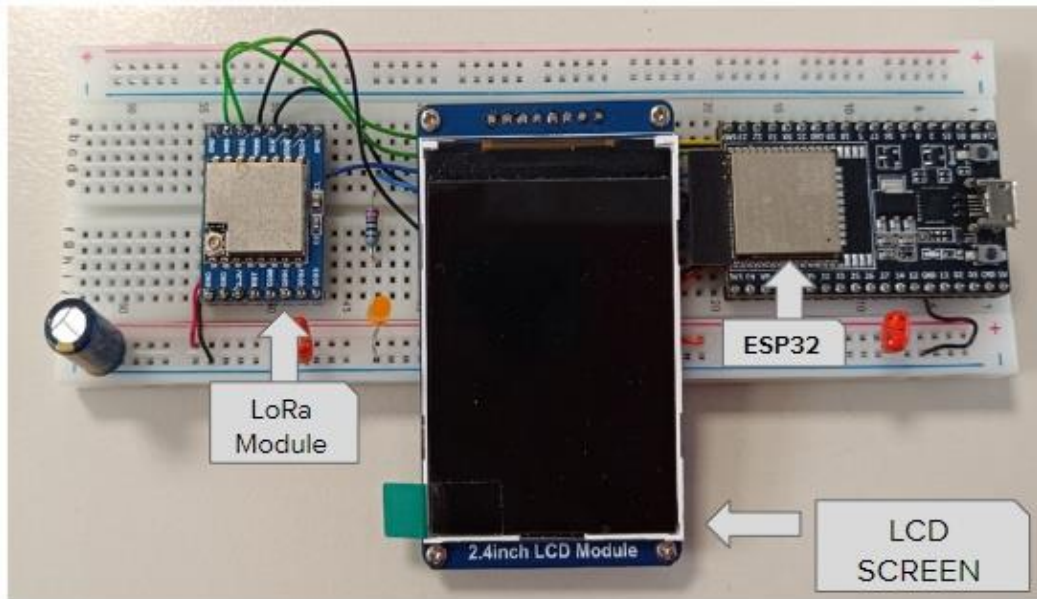


Εικόνα 11: Αρχιτεκτονική του συστήματος

4.1.1 HARDWARE

4.1.1.1 Κύκλωμα

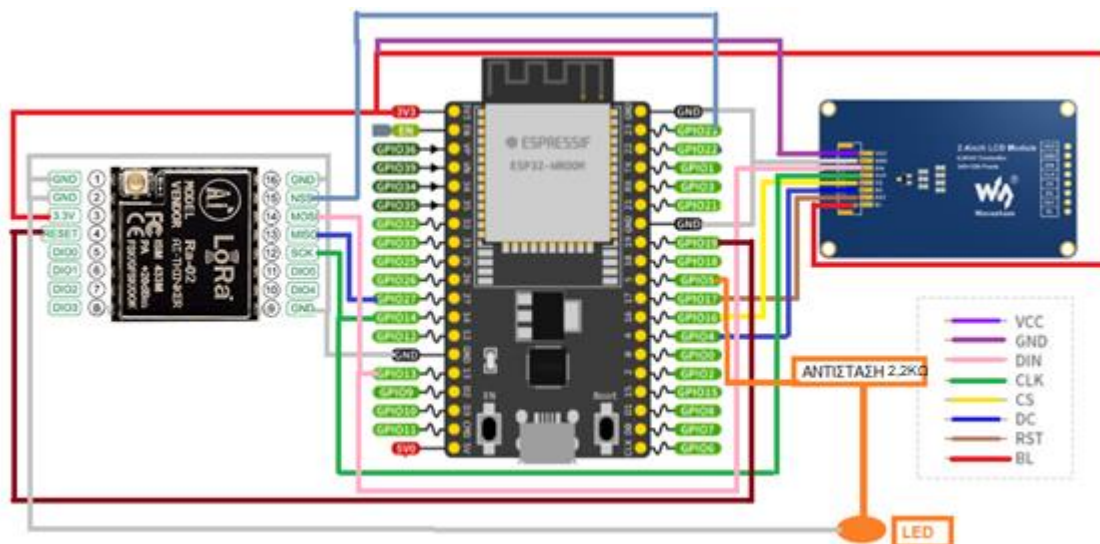
Gateway



Εικόνα 12 : Το Κύκλωμα Gateway σε ράστερ

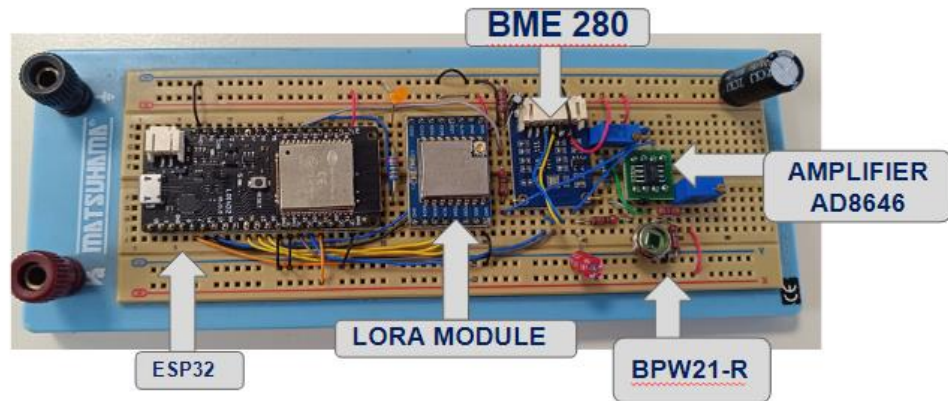
Το κύκλωμα Gateway αποτελείται από :

- LCD 320X244
- ESP32
- LORA MODULE
- WIFI



Σχήμα 5 :Οι συνδέσεις του κυκλώματος Gateway

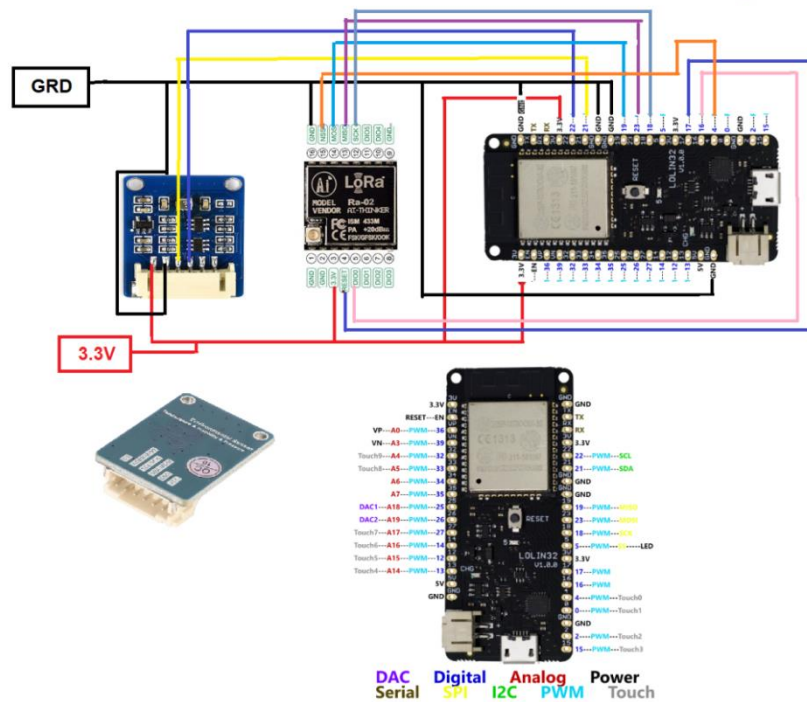
4.1.1.2 Κύκλωμα Αισθητήρα



Εικόνα13 : Το Κύκλωμα Αισθητήρα σε ράστερ

Το κύκλωμα αισθητήρα αποτελείτε από :

- BPW21-R
- AMPLIFIER AD8646
- ADC 12BIT
- ESP32
- BME 280
- LORA MODULE



Σχήμα 6 : Οι συνδέσεις του κυκλώματος Αισθητήρα

4.1.1.3 Οθόνη LCD



Εικόνα 14 :Τι εμφανίζει η LCD οθόνη

4.2 Λειτουργία Κώδικα

4.2.1 Περιγραφή κώδικα GATEWAY

Ο κώδικας αυτός είναι σχεδιασμένος για να διαχειρίζεται τη σύνδεση Wi-Fi, την ανάγνωση των αισθητήρων, την αποστολή των δεδομένων στην πλατφόρμα Thingspeak, και την επικοινωνία μέσω του LoRa [31][32] με άλλες συσκευές για τη μεταφορά και αποστολή των δεδομένων με κρυπτογράφηση AES.[33][34][35]

Οι βασικές λειτουργίες του κώδικα περιγράφονται παρακάτω

- Αρχικά δημιουργείται η σύνδεση SPI (Serial Peripheral Interface) [36][37][38]

```
SPI(1, baudrate=4000000, sck=Pin(14, Pin.OUT, Pin.PULL_DOWN),  
mosi=Pin(13, Pin.OUT, Pin.PULL_UP), miso=Pin(27, Pin.IN, Pin.PULL_UP),  
polarity=0, phase=0, bits=8, firstbit=SPI.MSB):
```

Αυτή η γραμμή κώδικα δημιουργεί μια νέα σύνδεση SPI. Ας αναλύσουμε τα κύρια ορίσματα:

SPI(1, ...): Αυτό καθορίζει τον αριθμό της σύνδεσης SPI που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται η σύνδεση SPI1.

baudrate=4000000: Αυτό καθορίζει το ρυθμό μετάδοσης στα 4 Mbps (4.000.000 bps).

sck=Pin(14, Pin.OUT, Pin.PULL_DOWN): Αυτό ορίζει τον ακροδέκτη (pin) που χρησιμοποιείται για το ρολόι (SCK) της σύνδεσης SPI. Ο ακροδέκτης είναι ο 14 και ρυθμίζεται ως έξοδος (OUT) με αντίσταση PULL_DOWN.

mosi=Pin(13, Pin.OUT, Pin.PULL_UP): Αυτό καθορίζει τον ακροδέκτη που χρησιμοποιείται για την έξοδο δεδομένων (MOSI) της σύνδεσης SPI. Ο ακροδέκτης είναι ο 13 και ρυθμίζεται ως έξοδος (OUT) με αντίσταση PULL_UP.

miso=Pin(27, Pin.IN, Pin.PULL_UP): Αυτό καθορίζει τον ακροδέκτη που χρησιμοποιείται για την είσοδο δεδομένων (MISO) της σύνδεσης SPI. Ο ακροδέκτης είναι ο 27 και ρυθμίζεται ως είσοδος (IN) με αντίσταση PULL_UP.

polarity=0, phase=0: Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν τη φάση και την πολιτική του ρολογιού για την επικοινωνία SPI. Στην προκειμένη περίπτωση, οι τιμές 0 αντιστοιχούν σε πολιτική 0 και φάση 0, που είναι οι πιο συνηθισμένες ρυθμίσεις.

bits=8: Αυτή η παράμετρος καθορίζει τον αριθμό των bits ανά byte που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών. Στην περίπτωση αυτής της σύνδεσης SPI, ανταλλάσσονται 8 bits ανά byte.

firstbit=SPI.MSB: Αυτή η παράμετρος καθορίζει τον τρόπο μεταφοράς των bits, με την τιμή ***SPI.MSB*** να υποδεικνύει ότι το πρώτο bit που ανταλλάσσεται είναι το πιο σημαντικό bit.

- Στη συνέχεια ορίζεται η αρχικοποίηση επικοινωνία με το LoRa module

```
lora = SX127x(spi, pins=device_config, parameters=lora_parameters)
print("LoRa Communication")
```

Αυτός ο κώδικας διαμορφώνει τη συσκευή για την επικοινωνία μέσω LoRa, χρησιμοποιώντας ρυθμίσεις για τη σύνδεση και ενεργοποιεί την επικοινωνία LoRa μεταξύ της συσκευής και άλλων συσκευών που χρησιμοποιούν το ίδιο πρωτόκολλο.

Ας αναλύσουμε τις βασικές λειτουργίες του κώδικα:

lora = SX127x(spi, pins=device_config, parameters=lora_parameters): Αυτή η γραμμή κώδικα δημιουργεί μια νέα συνάρτηση LoRa με βάση τα παραμετροποιημένα χαρακτηριστικά. Ας δούμε τα ορίσματα:

spi: Αυτό είναι το αντικείμενο σύνδεσης SPI που περιγράφηκε στον προηγούμενο κώδικα. Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ο μεταδότης LoRa θα επικοινωνήσει με τον μικροελεγκτή μας.

pins=device_config: Αυτό είναι ένα αντικείμενο που περιέχει τις παραμετροποιήσεις για τους ακροδέκτες που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία LoRa. Αυτό περιλαμβάνει τους ακροδέκτες για τη μετάδοση, τη λήψη, το RST (επαναφορά) και το DIO0 (Digital Input/Output 0).

parameters=lora_parameters: Αυτή η παράμετρος περιέχει τις ρυθμίσεις για το μεταδότη LoRa, όπως οι συχνότητες, οι ρυθμοί μετάδοσης και άλλες ρυθμίσεις που επηρεάζουν την επικοινωνία LoRa.

print("LoRa Communication"): Αυτή η εντολή απλά εκτυπώνει το μήνυμα "LoRa Communication" στο τερματικό, ώστε να γνωρίζετε ότι η επικοινωνία LoRa έχει αρχίσει.

- Εδώ γίνεται η αρχικοποίηση της LCD οθόνης:

```
display = Display(spi, dc=Pin(4), cs=Pin(16), rst=Pin(17))
```

Αυτός ο κώδικας δημιουργεί μια σύνδεση με την οθόνη χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SPI και ρυθμίζει τους ακροδέκτες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της

Συγκεκριμένα:

display = Display(spi, dc=Pin(4), cs=Pin(16), rst=Pin(17)): Αυτή η γραμμή κώδικα δημιουργεί ένα αντικείμενο οθόνης (display) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SPI. Ας δούμε τα ορίσματα:

spi: Αυτό είναι το αντικείμενο σύνδεσης SPI που προηγουμένως δημιουργήθηκε και διαμορφώθηκε για την επικοινωνία με το display module. Αυτή η σύνδεση SPI χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων προς την οθόνη.

dc=Pin(4): Αυτός είναι ο ακροδέκτης (pin) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λειτουργίας "Data/Command" (DC) της οθόνης. Ο DC αναγνωρίζει αν τα δεδομένα που αποστέλλονται προς την οθόνη είναι δεδομένα εμφάνισης (data) ή εντολές ρύθμισης (command).

cs=Pin(16): Αυτός είναι ο ακροδέκτης (pin) που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του επιλογέα (chip select) CS της οθόνης. Ο CS επιλέγει την οθόνη που θα αλληλεπιδρά με τη σύνδεση SPI όταν υπάρχουν πολλές συσκευές στον ίδιο δίαυλο SPI.

rst=Pin(17): Αυτός είναι ο ακροδέκτης (pin) που χρησιμοποιείται για την επαναφορά (reset) της οθόνης. Η επαναφορά μπορεί να χρειαστεί για να επανέλθει η οθόνη σε μια κατάσταση αρχικής ρύθμισης.

➤ Ο παρακάτω κώδικας ορίζει ένα κλειδί AES (Advanced Encryption Standard) για χρήση σε λειτουργίες κρυπτογράφησης. Το AES είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους κρυπτογράφησης και χρησιμοποιείται για την ασφαλή προστασία των δεδομένων.

```
#AES encryption key  
key = b"r7jgKY6#v.*pU(nN"
```

Συγκεκριμένα:

key = b"r7jgKY6#v.*pU(nN": Αυτή είναι η μεταβλητή key που περιέχει το κλειδί AES. Το κλειδί είναι μια σειρά από χαρακτήρες (bytes) που χρησιμοποιούνται για την κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση δεδομένων με τον αλγόριθμο AES.

➤ Αυτός ο κώδικας ορίζει τα διαπιστευτήρια του δικτύου Wi-Fi, που χρησιμοποιούνται για να συνδεθεί σε ένα συγκεκριμένο ασύρματο δίκτυο. Αναλυτικότερα:

```
#WIFI credentials  
ssid="kesanidou"  
password="kesanidou"
```

ssid = "kesanidou": Αυτή είναι η μεταβλητή **ssid** που περιέχει το όνομα του δικτύου Wi-Fi (SSID) που επιθυμεί να συνδεθεί. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, το όνομα του δικτύου είναι "kesanidou".

password = "kesanidou": Αυτή είναι η μεταβλητή **password** που περιέχει τον κωδικό πρόσβασης (password) για το συγκεκριμένο δίκτυο Wi-Fi.

- Αυτός ο κώδικας ορίζει ένα κλειδί που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με την πλατφόρμα ThingSpeak.

```
#Thingspeak credentials  
WRITE_API_KEY = "0ZHDJ222NB2D1AOX"
```

Συγκεκριμένα:

WRITE_API_KEY = "0ZHDJ222NB2D1AOX": Αυτή είναι η μεταβλητή **WRITE_API_KEY** που περιέχει το κλειδί API για εγγραφή (write API key) της πλατφόρμας ThingSpeak. Το κλειδί αυτό χρησιμοποιείται για την αποστολή δεδομένων από την συσκευή μας στην πλατφόρμα ThingSpeak.

Το ThingSpeak είναι μια πλατφόρμα IoT (Internet of Things) που επιτρέπει τη συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων από διάφορες συσκευές και αισθητήρες[39][40]. Το κλειδί API για εγγραφή χρησιμοποιείται για να επιτρέψει στις συσκευές να ανεβάζουν δεδομένα στην πλατφόρμα ThingSpeak.

- Ανάγνωση Αισθητήρων και Αποστολή στο Thingspeak:

```
while True:  
    #display the data on Display  
    display.draw_text(40, 90, '{:>5}'.format(str(client1temp)), unispace, color565(255,  
255, 255), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)  
    display.draw_text(100, 85, '{:>4}'.format(str(client1hum)), unispace, color565(255,  
255, 255), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)  
    display.draw_text(160, 135, '{:>6}'.format(str(client1irr))+ ' ', unispace, color565(255,  
0, 0), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)  
    #send the data to thingspeak  
    if coun == 1:  
        payload1 =  
"&field4="+str(client1temp)+"&field5="+str(client1hum)+"&field6="+str(client1pres)+"  
&field7="+str(client1irr)  
        try:
```



```

    result =
requests.get("https://api.thingspeak.com/update?api_key="+WRITE_API_KEY+payload1)

    data = result.text
except:
    print('thingspeak server communication error')
else:
    print('thingspeak respond: '+data)
coun = 1

```

Ο βρόχος while περιλαμβάνει την ανάγνωση των δεδομένων από τους αισθητήρες και την αποστολή τους στην υπηρεσία Thingspeak. Αυτό είναι σημαντικό για τη συλλογή και την προβολή των δεδομένων των μετρήσεων .

4.2.2 Περιγραφή κώδικα Αισθητήρα

Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, την κρυπτογράφηση των δεδομένων, την αποστολή τους μέσω της τεχνολογίας LoRa, τη λήψη επιβεβαίωσης, και τον έλεγχο της συσκευής με βάση την απάντηση που λαμβάνει.

Οι βασικές λειτουργίες του κώδικα περιγράφονται παρακάτω:

➤ Μετά την αρχικοποίηση της σύνδεσης SPI, του LoRa module και της κρυπτογράφησης AES όπως ακριβώς ορίστηκαν και στο κώδικα Gateway, γίνεται η αρχικοποίηση του ADC (Analog-to-Digital Converter)

```

#define the ADC
irradiance = ADC(Pin(33))      #pin 33 as analog input from opamp
irradiance atten(ADC.ATTN_0DB) #attenuation 0db
ADC.width(ADC.WIDTH_12BIT)    #12 bit resolution

```

Αυτό το τμήμα κώδικα χρησιμοποιείται για την μέτρηση των αναλογικών τάσεων. προετοιμάζοντας τον ADC για την ανάγνωση των αναλογικών σημάτων από τον ακροδέκτη 33 και ορίζει την ανάλυση του ADC σε 12 bits, δηλαδή το ADC θα μετρά τιμές από 0 έως 4095.

➤ Στη συνέχεια γίνεται ο καθορισμός των pins που θα χρησιμοποιηθούν για τις εξόδους (heaterout, coolerout, humidifierout) και την είσοδο του αισθητήρα ακτινοβολίας (irradiance).

```
heaterout = Pin(25,Pin.OUT)
coolerout = Pin(26,Pin.OUT)
humidifierout = Pin(27,Pin.OUT)
```

➤ Έπειτα γίνεται ο ορισμός του βρόγχου while, όπου τα εξής βήματα επαναλαμβάνονται:

1.Λήψη μετρήσεων από τον αισθητήρα BME280 για θερμοκρασία, υγρασία και πίεση. Οι μετρήσεις από τον αναλογικό αισθητήρα υπολογίζονται μέσω πολλαπλών δειγμάτων (200) για να ληφθεί ο μέσος όρος και να μετατροπή σε W/m^2 . Ο μέσος όρος μετατρέπεται σε ηλιακή ακτινοβολία (irradiance) και η καλιμπράριση της τιμής της ακτινοβολίας γίνεται με βάση τη θερμοκρασία.

2.Στη συνέχεια δημιουργείται ένα πακέτο δεδομένων που περιλαμβάνει την ταυτότητα του πελάτη (ID), τη θερμοκρασία, την υγρασία, την πίεση και την ακτινοβολία.

3.Κρυπτογράφηση του πακέτου δεδομένων με το AES κλειδί. Τα κρυπτογραφημένα δεδομένα σειριοποιούνται σε ένα πακέτο δεδομένων που θα μεταδοθεί μέσω LoRa.

4. Η μετάδοση γίνεται επαναληπτικά (έως 5 φορές) μέχρι να ληφθεί επιβεβαίωση (acknowledgment) από τον αποδέκτη.

5.Αν ληφθεί επιβεβαίωση με έγκυρα δεδομένα, τότε εκτελούνται ενέργειες όπως η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση με βάση τα δεδομένα που λήφθηκαν.

Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει αναμονή για ένα διάστημα (20 δευτερολέπτων το οποίο ορίστηκε με βάση το χρόνο αναμονής του Thingspeak)πριν το επόμενο κύκλο μέτρησης και μετάδοσης δεδομένων.

5 Επίλογος

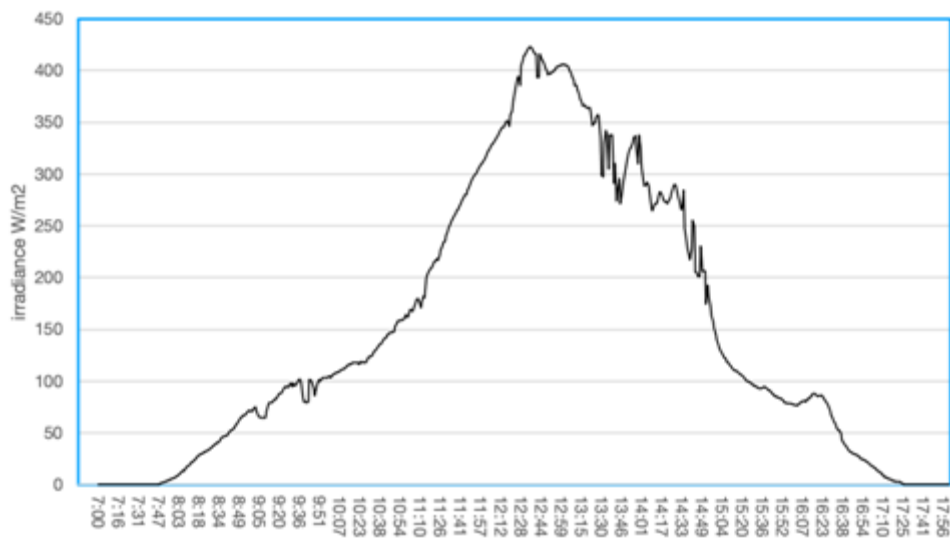
5.1 Ρυθμίσεις-μετρήσεις

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το πυρανόμετρο πρέπει να ρυθμιστεί με την βοήθεια της πολύτροφης αντίστασης ακριβείας R2 η οποία μεταβάλλει την απολαβή του ενισχυτή μας. Πρώτα όμως πρέπει να ρυθμίσουμε την αντίσταση R5 έτσι ώστε να έχουμε offset στα 200mV ακριβώς στην έξοδο του ενισχυτή μας. Αυτό γίνεται επειδή ο μετατροπέας ad αρχίζει να αντιλαμβάνεται την αναλογική τάση από τα 200mV. Οπότε ρυθμίζουμε πρώτα το offset και συνεχίζουμε με την ρύθμιση της απολαβής. Για να γίνει αυτό όμως ιδανικά θα έπρεπε να έχουμε ένα πυρανόμετρο αναφοράς, οπότε σε αυτή τη περίπτωση θα το τοποθετούσαμε στο ίδιο σημείο σε οριζόντια θέση και θα ρυθμίζαμε το πυρανόμετρο μας έτσι ώστε να έχει την ίδια ένδειξη με αυτό της αναφοράς. Επειδή όμως δεν έχουμε πρόσβαση σε ένα τέτοιο πυρανόμετρο η δεύτερη καλύτερη επιλογή είναι να το συγκρίνουμε με ένα πυρανόμετρο σε λειτουργία το οποίο να βρίσκεται σε κοντινή σχετικά απόσταση από εμάς και σε ίδιες, όσο το δυνατόν, συνθήκες όπως ηλιοφάνεια, υψόμετρο κτλ. Τέτοια πυρανόμετρα έχουν κάποιοι μετεωρολογικοί σταθμοί του meteo.gr στους οποίους έχουμε πρόσβαση online 24 ώρες το 24ωρο. Το πυρανόμετρο μας βρίσκεται στο Καλοχώρι και από το site του meteo.gr βλέπουμε ότι υπάρχουν 2 διαθέσιμα κοντινά πυρανόμετρα στην πόλη του Θεσσαλονίκης και στην Σίνδο [41]. Οπότε μία ημέρα χωρίς σύννεφα στο Καλοχώρι ρυθμίζουμε το όργανό μας μεταβάλλοντας την αντίσταση R5 για παρόμοια ένδειξη με το πυρανόμετρο της Σίνδου από το meteo.gr.

Η τελική τιμή της αντίστασης R5, μετά το καλιμπράρισμα, καταλήγει να είναι στα 2,4KΩ. Εμείς όμως είχαμε υπολογίσει ότι η αντίσταση θα έπρεπε να ήταν σύμφωνα με την σχέση 5 περίπου 1,7KΩ. Αυτό μας δείχνει ότι τελικά η φωτοδίοδος μας δεν δίνει 9μΑ ρεύμα ανά 1klx αλλά λιγότερο, αφού χρειαζόμαστε μεγαλύτερη απολαβή, αλλά παραμένει στα πλαίσια που δίνει ο κατασκευαστής (πίνακας 1). Αφού λοιπόν ολοκληρώθηκε το βήμα του καλιμπραρίσματος, θα καταγράψουμε με το πυρανόμετρο μία ολόκληρη ημέρα για να δούμε τις μεταβολές της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας. Στο παρακάτω σχήμα 15 μπορούμε να δούμε το διάγραμμα της ηλιακής ακτινοβολίας όπως την κατέγραψε το όργανο μας στο Καλοχώρι στις 15/9/2023. Το όργανο τοποθετήθηκε σε υψόμετρο 6m, σε οριζόντια θέση, τοποθετημένο ψηλά ώστε να

μην υπάρχουν σκιάσεις από γειτονικά κτήρια καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, δηλαδή σε σημείο με ελεύθερο τον ορίζοντα.

Κατά την διάρκεια της ημέρας υπήρχαν αρκετά περιστασιακά σύννεφα, κάτι το οποίο φαίνεται από τις αρκετές αυξομειώσεις της ακτινοβολίας. Η καταγραφή γινόταν με συχνότητα του ενός λεπτού. Βέβαια η συχνότητα αυτή είναι μεγάλη για τα δεδομένα αυτά και η καταγραφή ανά 10 λεπτά θα ήταν αρκετή και η γραμμή του γραφήματος θα ήταν πιο ομαλή. Τα δεδομένα αποστέλλονταν στην πλατφόρμα του thingspeak από την οποία έγινε με την βοήθεια του Matlab η εξαγωγή του γραφήματος.



Σχήμα 7: Απόκριση πυρανόμετρου μέσω thingspeak

5.2 Σύνοψη και συμπεράσματα

Από τις δοκιμές και μετρήσεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 5 φαίνεται ότι το πυρανόμετρο μας ανταποκρίνεται επιτυχώς στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας. Βέβαια για να είναι δυνατή πρακτικά η χρήση του θα πρέπει να τοποθετηθεί σε περίβλημα. Το περίβλημα αυτό θα πρέπει να είναι στεγανό ώστε να μην μπορέσει να εισχωρήσει η υγρασία, παράδειγμα σε περίπτωση βροχής ή χιονιού, θα πρέπει να έχει κάποιο υλικό για την απορρόφηση της υγρασίας σε περίπτωση που αυτή σχηματιστεί και η οποία θα μπορούσε να μας θολώσει το οπτικό σύστημα της διόδου. Ιδανικά, θα πρέπει να υπάρχει και ο διαχύτης που αναφέραμε στην αρχή. Στην περίπτωση αυτή θα χρειαζόταν να επαναληφθεί η ρύθμιση της απολαβής του αναλογικού ενισχυτή λόγο του ότι ένα μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας δεν θα έφτανε στην δίοδο εξαιτίας του διαχύτη. Οπότε η τιμή της αντίστασης R5 και συνεπώς της απολαβής θα έπρεπε να αυξηθεί. Η μετρήσεις του οργάνου μας δεν επηρεάζονται από διάφορους πιθανούς θορύβους, όπως η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, γιατί η μετάδοση γίνεται με ψηφιακό τρόπο και όχι με αναλογικό. Εάν η μετάδοση του σήματος ήταν αναλογική ή ψηφιακή ενσύρματη θα χρειαζόμασταν καλής ποιότητας θωρακισμένο καλώδιο το οποίο θα είχε περιορισμό ως προς το μήκος του. Με την δική μας υλοποίηση ο αισθητήρας μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά γιατί τα δεδομένα μεταφέρονται ασύρματα. Οπότε τοποθετώντας το πρώτο κομμάτι της κατασκευής, δηλαδή τον αισθητήρα, σε οριζόντια θέση σε ανοικτό μέρος χωρίς σκιάσεις από γειτονικά κτήρια ή δέντρα και το δεύτερο μέρος σε χώρο όπου υπάρχει κάλυψη internet τα δεδομένα μπορούν, εκτός από το να εμφανίζονται στην οθόνη, να μεταδίδονται στην πλατφόρμα του thingspeak για πλήρη ημερήσια σε 24 βάση καταγραφή και απεικόνιση. Με τον τρόπο αυτό έχουμε υλοποιήσει ένα πλήρες σύστημα πυρανόμετρου

5.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Με την ανάπτυξη αυτού του πρωτότυπου προσιτού πυρανομέτρου, έχει γίνει το πρώτο σημαντικό βήμα προς τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας με ακρίβεια. Για να ενισχυθούν περαιτέρω οι δυνατότητές του και να αντιμετωπιστούν μελλοντικές ανάγκες, μπορεί να δημιουργηθεί ένας Server-Client ο οποίος θα επιτρέψει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την απομακρυσμένη παρακολούθηση, έχοντας την δυνατότητα της απομακρυσμένης παρέμβασης όπου αυτή κριθεί αναγκαία. Επιπλέον, η

έρευνα τρόπων για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της ανθεκτικότητας του, ιδιαίτερα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, θα το καθιστούσε πιο αξιόπιστη και βιώσιμη λύση για μακροπρόθεσμες εγκαταστάσεις. Τέλος, η ενσωμάτωση πιο προηγμένων αλγορίθμων ανάλυσης δεδομένων θα μπορούσε να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες και προβλέψεις τάσεων από τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγονται, καθιστώντας το ακόμα πιο αναγκαίο εργαλείο για ερευνητές και επαγγελματίες στον τομέα της ηλιακής ενέργειας και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

6 Βιβλιογραφία

6.1 Βιβλιογραφία

1. Amakoromo, T. (2023). DEVELOPMENT OF A LOW-COST SOLAR PYRANOMETER. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 10(3), 42–48.
<https://doi.org/10.29121/ijetmr.v10.i3.2023.1316>
2. F. S. A. Aziz, S. I. Sulaiman and H. Zainuddin, "A prototype of an integrated pyranometer for measuring multi-parameters," 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp. 73-77, doi: 10.1109/CSPA.2013.6530017.
3. F. Vignola, C. -Y. Chiu, J. Peterson, M. Dooraghi and M. Sengupta, "Comparison and Analysis of Instruments Measuring Plane of Array Irradiance for One-Axis Tracking PV Systems," 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Washington, DC, USA, 2017, pp. 1169-1174, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366337.
4. F. Vignola, J. Peterson, R. Kessler, M. Dooraghi, M. Sengupta and F. Mavromatakis, "Evaluation of Photodiode-based Pyranometers and Reference Solar Cells on a Two-Axis Tracking System," 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), Waikoloa, HI, USA, 2018, pp. 2376-2381, doi: 10.1109/PVSC.2018.8547299.
5. Graeme J. *Photodiode amplifiers. Op amp solutions*. Mc-Graw Hill; New York, NY, USA: 1996. pp. 24–59.

6. Frank Vignola, Zachary Derocher, Josh Peterson, Laurent Vuilleumier, Christian Félix, Julian Gröbner, Natalia Kouremeti, "Effects of changing spectral radiation distribution on the performance of photodiode pyranometers", *Solar Energy*, Volume 129, 2016, Pages 224-235, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.047>.
7. Y. Matsumoto et al., "Performance comparisons of a PV system by monitoring Solar irradiance with different pyranometers," 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Washington, DC, USA, 2017, pp. 632-637, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366375.
8. Espinosa-Gavira, M.J.; Agüera-Pérez, A.; Sierra-Fernández, J.M.; González de-la-Rosa, J.J.; Palomares-Salas, J.C.; Florencias-Oliveros, O. Design and Test of a High-Performance Wireless Sensor Network for Irradiance Monitoring. *Sensors* 2022, 22, 2928. <https://doi.org/10.3390/s22082928>
9. Mubarak, R.; Schilke, H.; Seckmeyer, G. Improving the Irradiance Data Measured by Silicon-Based Sensors. *Energies* 2021, 14, 2766. <https://doi.org/10.3390/en14102766>
10. Walter-Shea, E.A., Hubbard, K.G., Mesarch, M.A. et al. Improving the calibration of silicon photodiode pyranometers. *Meteorol Atmos Phys* 131, 1111–1120 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0624-3>.
11. D. Eridani, E. D. Widiyanto, R. D. O. Augustinus and A. A. Faizal, "Monitoring System in Lora Network Architecture using Smart Gateway in Simple LoRa Protocol," 2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 200-204, doi: 10.1109/ISRITI48646.2019.9034612.
12. Feresu ZTT, Mashonjowa E, Matandirotya E (2023) A Low-Cost Photodiode Based Solar Radiation Measuring System. *J Electr Eng Electr Technol* 12:1.
13. M. E. Haque, M. M. Alvi, M. F. Rahman, M. H. Ali and A. K. M. M. Haque, "Cost Effective Alternative of Pyranometer: Solar Radiation Prediction Using Artificial Intelligence," 2022 International Conference on Recent Progresses in Science, Engineering and Technology (ICRPSET), Rajshahi, Bangladesh, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRPSET57982.2022.10188547.

14. Iqbal and T. Iqbal, "Low-cost and Secure Communication System for Remote Micro-grids using AES Cryptography on ESP32 with LoRa Module," 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Toronto, ON, Canada, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPEC.2018.8598380.
15. M. Taha, M. Omar, S. Khan, M. Usman, S. Larkin, M. Imran, "A Low-Cost IoT-Enabled Pyranometer; Based on the Peltier Element," International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 71, no. 2, pp. 334-340, 2023. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I2P235>
16. Dawoud Shenouda Dawoud; Peter Dawoud, "1 Inter-integrated Circuits (IIC/I2C)," in Microcontroller and Smart Home Networks , River Publishers, 2020, pp.1-54.
17. F. Leens, "An introduction to I2C and SPI protocols," in IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 12, no. 1, pp. 8-13, February 2009, doi: 10.1109/MIM.2009.4762946.
18. F. Zhao, Z. Wang, D. Deng and H. Liu, "Design of Schematic Mapping System Based on I2C and USB Bus," 2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Beijing, 2011, pp. 180-183, doi: 10.1109/IMCCC.2011.54.
19. J. -C. Lee, T. -O. Kim and J. -H. Chae, "Module Implementation and Simulation of Timing Constraint Check Function of I2C Protocol Using Verilog," 2023 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Singapore, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEIC57457.2023.10049891.
20. J. Chen and S. Huang, "Analysis and Comparison of UART, SPI and I2C," 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), Changchun, China, 2023, pp. 272-276, doi: 10.1109/EEBDA56825.2023.10090677.
21. J. Salazar Escobar, J. M. da Silva and M. Correia, "An I2C based mixed-signal test and measurement infrastructure," 19th Annual International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop Proceedings, Porto Alegre, Brazil, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/IMS3TW.2014.6997396.

22. J. Zidar, I. Aleksi and T. Matić, "Analysis of energy consumption for SPI and I2C communications in ultra-low power embedded systems," 2023 46th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO), Opatija, Croatia, 2023, pp. 213-217, doi: 10.23919/MIPRO57284.2023.10159889.
23. Πλατφόρμα thingspeak: <https://thingspeak.com>
24. D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita and I. Tinnirello, "Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance," in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 4, pp. 796-799, April 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2018.2797057.
25. F. A. R. Mu'amar Wildan, E. A. Z. Hamidi and T. Juhana, "The Design of Application for Smart Home Base on LoRa," 2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Yogyakarta, Indonesia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICWT50448.2020.9243648.
26. P. Edward, S. Elzeiny, M. Ashour and T. Elshabrawy, "On the Coexistence of LoRa- and Interleaved Chirp Spreading LoRa-Based Modulations," 2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, Spain, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WiMOB.2019.8923211.
27. Aiden A. Bruen; Mario A. Forcinito; James M. McQuillan, "Modes of Operation for AES and Symmetric Algorithms," in Cryptography, Information Theory, and Error-Correction: A Handbook for the 21st Century , Wiley, 2021, pp.109-123, doi: 10.1002/9781119582397.ch5.
28. Steve Kilts, "Appendix A: Pipeline Stages for AES Encryption," in Advanced FPGA Design: Architecture, Implementation, and Optimization , IEEE, 2007, pp.289-302, doi: 10.1002/9780470127896.app1.
29. G. -l. Guo, Q. Qian and R. Zhang, "Different Implementations of AES Cryptographic Algorithm," 2015 IEEE 17th International Conference on High

- Performance Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems, New York, NY, USA, 2015, pp. 1848-1853, doi: 10.1109/HPCC-CSS-ICCESS.2015.215.
30. W. Chanwattanapong, S. Hongdumnuen, B. Kumkhet, S. Junon and P. Sangmahamad, "LoRa Network Based Multi-Wireless Sensor Nodes and LoRa Gateway for Agriculture Application," 2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C), Bangkok, Thailand, 2021, pp. 133-136, doi: 10.1109/RI2C51727.2021.9559804.
31. Z. J. R. Kamoona and M. Ilyas, "Investigating the Performance of LoRa Communication for Nominal LoRa and Interleaved Chirp Spreading LoRa," 2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things (ICAIoT), Istanbul, Turkey, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICAIoT57170.2022.10121818.
32. "IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment Defining Support for Advanced Encryption Standard (AES)-256 Encryption and Security Extensions," in IEEE P802.15.4y/ D2, October 2020 , vol., no., pp.1-20, 16 Dec. 2020.
33. P. A. Windya, V. Suryani and A. A. Wardana, "Sniffing Prevention in LoRa Network Using Combination of Advanced Encryption Standard (AES) and Message Authentication Code (MAC)," 2021 International Conference Advancement in Data Science, E-learning and Information Systems (ICADEIS), Bali, Indonesia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICADEIS52521.2021.9702081.
34. Aiden A. Bruen; Mario A. Forcinito; James M. McQuillan, "Modes of Operation for AES and Symmetric Algorithms," in Cryptography, Information Theory, and Error-Correction: A Handbook for the 21st Century , Wiley, 2021, pp.109-123, doi: 10.1002/9781119582397.ch5.
35. Steve Kilts, "Appendix A: Pipeline Stages for AES Encryption," in Advanced FPGA Design: Architecture, Implementation, and Optimization , IEEE, 2007, pp.289-302, doi: 10.1002/9780470127896.app1.

36. M. Kuhrmann and J. Muench, "SPI is Dead, isn't it? Clear the Stage for Continuous Learning!," 2019 IEEE/ACM International Conference on Software and System Processes (ICSSP), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 9-13, doi: 10.1109/ICSSP.2019.00012.
37. M. Blanco, P. Gutierrez and G. Satriani, "SPI patterns: learning from experience," in IEEE Software, vol. 18, no. 3, pp. 28-35, May-June 2001, doi: 10.1109/52.922722.
38. O. M. Passos, A. C. Dias-Neto and R. da Silva Barreto, "Organizational Culture and Success in SPI Initiatives," in IEEE Software, vol. 29, no. 3, pp. 97-99, May-June 2012, doi: 10.1109/MS.2012.52.
39. C., Rus-Casas, Hontoria L., Fernández-Carrasco J.I., Jiménez-Castillo G., and Muñoz-Rodríguez F. 2019. "Development of a Utility Model for the Measurement of Global Radiation in Photovoltaic Applications in the Internet of Things (IoT)" Electronics 8, no. 3: 304. <https://doi.org/10.3390/electronics8030304>
40. Rocha, Á.B.d.; Fernandes, E.d.M.; Santos, C.A.C.d.; Diniz, J.M.T.; Junior, W.F.A. Development of a Real-Time Surface Solar Radiation Measurement System Based on the Internet of Things (IoT). Sensors 2021, 21, 3836. <https://doi.org/10.3390/s21113836>
41. Θεσσαλονίκης (Σίνδος): <http://penteli.meteo.gr/stations/sindos/>

6.2 Ιστοσελίδες

Τεχνική αναφορά από τον Bonnie C. της Texas Instruments

https://www.ti.com/lit/an/slyt703/slyt703.pdf?ts=1696504005940&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F

Τεχνική αναφορά από τον Ron Mancini της Texas Instruments

https://web.mit.edu/6.101/www/reference/op_amps_everyone.pdf

Τεχνική αναφορά της BURR-BROWN

<https://www.chem.uci.edu/~unicorn/243/papers/BurrBrown.pdf>

Τεχνική αναφορά της Texas Instruments

https://www.ti.com/lit/ml/slap085/slap085.pdf?ts=1696521511710&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

6.3 Κυρώσεις για λογοκλοπή

Η λογοκλοπή είναι ένα πολύ σοβαρό παράπτωμα. Με απόφαση της ΓΣΕΣ φοιτητής που διαπιστώνεται ότι υποπίπτει σε λογοκλοπή κατά την εκπόνηση της διπλωματικής του εργασίας αποβάλλεται από το ΠΜΣ. Εάν έχει ήδη αποφοιτήσει ανακαλείται το Μεταπτυχιακό δίπλωμα Ειδίκευσης και προωθείται το θέμα στο Δικαστικό Γραφείο του Πανεπιστημίου για την έναρξη των ανάλογων νομικών διαδικασιών.

Παράρτημα Α - Κώδικας GATEWAY

```
import network
import BME280
from machine import SoftI2C, Pin, SoftSPI, SPI
from time import sleep
from ili9341 import Display, color565
from xglcd_font import XglcdFont
#import uftpd
from umqtt.robust import MQTTClient
#for LoRa module
from sx127x import SX127x
from config import *
import machine
import ubinascii
import os
import time
from array import array
import maes
import urequests
#define SPI
spi = SPI(1,baudrate=4000000, sck=Pin(14), Pin.OUT, Pin.PULL_DOWN),
mosi=Pin(13, Pin.OUT, Pin.PULL_UP),
    miso=Pin(27, Pin.IN, Pin.PULL_UP), polarity = 0, phase = 0, bits = 8, firstbit =
SPI.MSB)
#define parameters for Lora module
sleep(2)
lora = SX127x(spi, pins=device_config, parameters=lora_parameters)
print("LoRa Communication")

#define parameters for display module
display = Display(spi, dc=Pin(4), cs=Pin(16), rst=Pin(17))
```

```

#client ID's
client1ID = 10
client2ID = 20

#AES encryption key
key = b"r7jgKY6#v.*pU(nN"

#WIFI credentials
ssid="kesanidou"          #"kesanidou"
password="kesanidou"      #"kesanidou"

#Thingspeak credentials

WRITE_API_KEY = "6MR9THAC1MYKBN0H"
#define pins, load lcd fonts
redled=Pin(18, Pin.OUT)
print('Loading fonts...')
unispace = XglcdFont('fonts/Unispace12x24.c', 12, 24)
font1 = XglcdFont('fonts/Bally5x8.c', 5, 8)
font2 = XglcdFont('fonts/ArcadePix9x11.c', 9, 11)
print('Fonts loaded.')

sensor1rssi=sensor2rssi=payload="
client2irr=client2UV = 0
client1irr=client1UV = 0
heater=heater1=heater2=0
cooler=cooler1=cooler2=0
humidifier=humidifier1=humidifier2=0
client2temp=client2hum=client2pres= 0
client1temp=client1hum=client1pres= 0
coun = 0                    #counter for thingspeak sending (after reset don't send to
thingspeak - only after reading the sensors)

```

```

def array_tostring(array_data):
    _string = ""
    for _array in array_data:
        _string = _string + chr(_array)
    return _string

#connect to WIFI Network
station = network.WLAN(network.STA_IF)
station.active(True)
station.connect(ssid, password)
t_end = time.time() + 10          #wait for 10 seconds wifi to connect
while time.time() < t_end:
    if station.isconnected():
        break
print(station.ifconfig())
ip, mask, gw, dns = station.ifconfig()

#start FTP server
#uftp.start

#display on lcd if WIFI is connected
if station.isconnected()==True:
    display.draw_text(60, 320, 'Wi-Fi connected to:', unispace, color565(255, 255, 255),
color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)
    display.draw_text(100, 320, ssid, unispace, color565(255, 233, 0), color565(0,0,0),
landscape=True, spacing=1)
    display.draw_text(140, 320, 'FTP server:'+ ip + ':23', unispace, color565(255, 233, 0),
color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)
else:
    display.draw_text(108, 320, 'Wi-Fi not connected', unispace, color565(255, 0, 0),
color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)

```

```

sleep(3)
display.clear()

display.draw_rectangle(0, 0, 240, 320, color565(0, 0, 255))
display.draw_rectangle(2, 2, 236, 316, color565(0, 0, 255))
display.draw_text(40, 315, 'Sensor temperature:          C', unispace, color565(255, 255,
255), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=0)
display.draw_text(100, 315,'Sensor humidity:          %', unispace, color565(255, 255,
255), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=0)
display.draw_text(160, 315,'Irradiance:          W/m2', unispace, color565(255, 0, 0),
color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)

while True:
    #display the data on Display
    display.draw_text(40, 90, '{:>5}'.format(str(client1temp)), unispace, color565(255,
255, 255), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)
    display.draw_text(100, 85, '{:>4}'.format(str(client1hum)), unispace, color565(255,
255, 255), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)
    display.draw_text(160, 135, '{:>6}'.format(str(client1irr))+ ' ', unispace, color565(255,
0, 0), color565(0,0,0), landscape=True, spacing=1)
    #send the data to thingspeak
    if coun == 1:
        payload1 =
"&field4="+str(client1temp)+"&field5="+str(client1hum)+"&field6="+str(client1pres)+"
&field7="+str(client1irr)
        try:
            result =
urequests.get("https://api.thingspeak.com/update?api_key="+WRITE_API_KEY+payload1)
            data = result.text
        except:
            print('thingspeak server communication error')
        else:

```



```

    print('thingspeak respond: '+data)
coun = 1

#check if LoRa data received

t_end = time.time() + 20 #check for + x seconds, after x second the first while loop
will be executed
while time.time() < t_end:
    if lora.received_packet():
        lora.blink_led()
        print('packet received')
        payload = lora.read_payload() #payload in bytes
        #decode LoRa payload
        try:
            payload = payload.decode("utf-8") #decode to string
            payload = payload.split(', ') #split the string
            a0,a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10,\
            a11,a12,a13,a14,a15,a16,a17,a18,a19,\
            a20,a21,a22,a23,a24,a25,a26,a27,a28,\
            a29,a30,a31,a32,a33 = payload
        except:
            print('LoRa decode exception')

# get the iv data
a0 = a0[3:19] #from payload header keep only the valid iv data
iv = a0.encode("utf-8") #encode the iv to bytes - original iv is regenerated

a2 = a2.replace('[', '') #clear the first encoded payload string
a33 = a33.replace(']')', ') #clear the last encoded payload string
ciphertext = array('B', [int(a2),int(a3),int(a4),int(a5),int(a6),int(a7),int(a8),\
                        int(a9),int(a10),int(a11),int(a12),int(a13),int(a14),\
                        int(a15),int(a16),int(a17),int(a18),int(a19),int(a20),\
                        int(a21),int(a22),int(a23),int(a24),int(a25),int(a26),\

```

```

int(a27),int(a28),int(a29),int(a30),int(a31),int(a32),int(a33)])

#we have the original iv and ciphertext - continue with AES decrypting
decryptor = maes.new(key, maes.MODE_CBC, IV=iv)
result = (array_tostring(decryptor.decrypt(ciphertext))) #string with the results
(ID, temp, humidity, pressure)
#AES decryption completed
print(result)
print('iv:', iv)
print('Rssi:', lora.packet_rssi())

result = result.split(' ') #split the string
try:
    clientID,clienttemp,clienthum,clientpres,clientirr,clientUV = result
except:
    clientID=clienttemp=clienthum=clientpres=clientirr=clientUV= " #expection
occured
    print('invalid data received')
else:
    clientID = int(clientID) #convert string to integer
    if clientID == client1ID: #check if we have client1 ID
        #send acknowledgment back to client
        load = clientID, heater1, cooler1, humidifier1
        load = str(load) #send the data with LoRa
        print("Sending:", load)
        load = load.replace('(', ')') #remove the ,( unnecessary characters
        load = load.replace(')', '(')
        load = '{:<32}'.format(load) #lenght must be multiple of 16 - i
want 32, so add until 32
        load = load.encode('utf-8') #convert to bytes
        iv = ubinascii.hexlify(os.urandom(8)) #generate random iv. iv is in
format : b"1234567890abcdef"
        cryptor = maes.new(key, maes.MODE_CBC, IV=iv)

```

```

ciphertext = cryptor.encrypt(load)          #AES encryption
data = iv, ciphertext                       #data ready for LoRa
payload = str(data)                         #send the data with LoRa
print("Sending packet: \n{ }\n".format(payload))
lora.println(payload)                       #send it
lora.blink_led()

```

```

client1temp = "{:.1f}".format(int(clienttemp)/10) #convert string to integer
and restore 1 decimal value

```

```

client1hum = "{:.1f}".format(int(clienthum)/10)
client1pres = "{:.1f}".format(int(clientpres)/10)

```

```

client1irr = int(clientirr)
client1irr = client1irr/10                 #restore the irradiance decimal
client1UV = int(clientUV)/10
print('Sensor 1 irradiance:', client1irr, 'W/m2')
#print('Sensor 1 UV:', client1UV)

```

```

print('Sensor 1 Temperature:',client1temp,'C')
print('Sensor 1 Humidity:',client1hum,'% ')
print('Sensor 1 Pressure:',client1pres,'hPa')
sensor1rssi = lora.packet_rssi()
sensor1rssi = str(sensor1rssi)
sensor1rssi = ('{:>4}').format(sensor1rssi) #left padding to 4 characters

```

for correct display on lcd

```

print ()

```

```

elif clientID == client2ID:

```

```

    #send acknowledgment back to client

```

```

    load = clientID, heater2, cooler2, humidifier2

```

```

    load = str(load)                         #send the data with LoRa

```

```

    print("Sending:", load)

```

```

    load = load.replace('(', ")")           #remove the ),( unnecessary characters

```

```

    load = load.replace(')', ")")

```

```

        load = '{:<32}'.format(load)                #length must be multiple of 16 - i
want 32, so add until 32
        load = load.encode('utf-8')                #convert to bytes
        iv = ubinascii.hexlify(os.urandom(8))      #generate random iv. iv is in
format : b"1234567890abcdef"
        cryptor = maes.new(key, maes.MODE_CBC, IV=iv)
        ciphertext = cryptor.encrypt(load)          #AES encryption
        data = iv, ciphertext                        #data ready for LoRa
        payload = str(data)                         #send the data with LoRa
        print("Sending packet: \n{ }\n".format(payload))
        lora.println(payload)                       #send it
        lora.blink_led()

        client2temp = "{:.1f}".format(int(clienttemp)/10) #convert string to integer
and restore 1 decimal value
        client2hum = "{:.1f}".format(int(clienthum)/10)
        client2pres = "{:.1f}".format(int(clientpres)/10)
        client2irr = int(clientirr)
        client2UV = int(clientUV)/10
        print('Sensor 2 irradiance:', client2irr)
        #print('Sensor 2 UV:', client2UV)
        print('Sensor 2 Temperature:',client2temp,'C')
        print('Sensor 2 Humidity:',client2hum,'% ')
        print('Sensor 2 Pressure:',client2pres,'hPa')
        sensor2rssi = lora.packet_rssi()
        sensor2rssi = str(sensor2rssi)
        sensor2rssi = ('{:>4}').format(sensor2rssi)    #left padding to 4 characters
for correct display on lcd
        print ()
else:
        print('wrong client ID received')

```

Κώδικας Αισθητήρια

```
import machine
import network
import BME280
from machine import SoftI2C, Pin, SoftSPI, ADC
from time import sleep
from sx127x import SX127x
from config import *
import maes
import ubinascii
import os
from array import array
import time
import math

#define I2C for BME280 sensor
i2c = SoftI2C(sda=Pin(21), scl=Pin(22), freq=400000)
sensor = BME280.BME280(i2c=i2c, address=119)

#define SPI
spi = SoftSPI(baudrate=10000000, sck=Pin(18, Pin.OUT, Pin.PULL_DOWN),
mosi=Pin(19, Pin.OUT, Pin.PULL_UP),
    miso=Pin(23, Pin.IN, Pin.PULL_UP), polarity = 0, phase = 0, bits = 8, firstbit =
SoftSPI.MSB)

#define parameters for Lora module
lora = SX127x(spi, pins=device_config, parameters=lora_parameters)

#define the ADC
irradiance = ADC(Pin(33))          #pin 33 as analog input from opamp
irradiance atten(ADC.ATTN_0DB)    #attenuation 0db
ADC.width(ADC.WIDTH_12BIT)       #12 bit resolution
```

```

#AES encryption key
key = b"r7jgKY6#v.*pU(nN"
#client ID
ID = 10

#define outputs
heaterout = Pin(25,Pin.OUT)
coolerout = Pin(26,Pin.OUT)
humidifierout = Pin(27,Pin.OUT)

def array_tostring(array_data):
    _string = ""
    for _array in array_data:
        _string = _string + chr(_array)
    return _string

while True:
    temp= "{:.1f}".format(sensor.temperature) #1 decimal of temperature sensor value
    hum= "{:.1f}".format(sensor.humidity)    #1 decimal of humidity sensor value
    pres= "{:.1f}".format(sensor.pressure/100) #convert to hPa and 1 decimal
    print('Temperature:',temp,'C')
    print('Humidity:',hum,'%')
    print('Pressure:',pres,'hPa')
    temp = int((float(temp))*10)             #convert to integer for lora transfer
    hum  = int((float(hum))*10)
    pres = int((float(pres))*10)

    uv = 0
    irr = 0
    for _ in range(200):                    #take 200 adc readings and get average value
        irr = irr + irradiance.read()
    irr = int(irr/200)                      #get the average of 200 readings

```

```

    print("adc output : ",irr)          #print the digital number (0-4095) so i can set the
offset voltage for 0 output
    #irr = (irr * (0.965/4095))+0.067    #get the voltage on adc pin 0db att - from
0.067-1.032V - best linearity (Voltmeter)
    irr = (irr/4095)*1500              #convert to irradiance in W/m2 - 1500W/m2 is the
maximum
    print("irradiance: ",irr, "w/m2")
    irr1 = round(irr,1)
    irr1 = math.trunc(irr1*10)
    print("irradiance without temp correction: ",irr1, "w/m2")

    sensortemp = temp/10               #regenerate the temperature
    tempdrift = sensortemp - 25        #calculate the drift from 25C
    irrdrift = tempdrift*0.05         #percentage of temperature drift (0.05% per C)
    irr = (100/(100+irrdrift))*irr    #the real irr is calculated
    irr = round(irr,1)                #round to 1 decimal
    irr = math.trunc(irr*10)          #keep only the integer - keep 1 decimal by
multiplying by 10
    print("irradiance with temp correction: ",irr, "w/m2")

    load = ID,temp,hum,pres,irr,uv    #max wm2 lenght is 5 digits, ID 1 digit,
load = str(load)                      #convert to string
    load = load.replace(',', '')      #remove the ,( characters from the string so the
info fits to 32 lenght
    load = load.replace(')', '')
    load = '{:<32}'.format(load)      #lenght must be multiple of 16 - this is 32, so
add until 32
    load = load.encode('utf-8')      #convert to bytes

    i = 0
    while i < 5:                      #send 5 times if valid ack not received
        #break

```

```

    iv = ubinascii.hexlify(os.urandom(8))    #generate random iv. iv is in format :
b"1234567890abcdef"
    cryptor = maes.new(key, maes.MODE_CBC, IV=iv)
    ciphertext = cryptor.encrypt(load)      #AES encryption
    data = iv, ciphertext                   #data ready for LoRa

    payload = str(data)                    #send the data with LoRa
    print("Sending packet: \n{ }\n".format(payload))
    #lora.standby()                        #LoRa module wake-up
    #sleep(0.01)                           #wait 10ms
    lora.println(payload)                   #send it
    lora.blink_led()

    #waiting for acknowledgment from server
    t_end = time.time() + 4                #wait 4 seconds for acknowledgment
    while time.time() < t_end:
        if lora.received_packet():
            lora.blink_led()
            print('data received')
            payload = lora.read_payload()   #payload in bytes
            #decode LoRa payload
            try:
                payload = payload.decode("utf-8") #decode to string
                payload = payload.split(', ')    #split the string
                a0,a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9,a10,\
                a11,a12,a13,a14,a15,a16,a17,a18,a19,\
                a20,a21,a22,a23,a24,a25,a26,a27,a28,\
                a29,a30,a31,a32,a33 = payload
                # get the iv data
                a0 = a0[3:19]                #from payload header keep only the valid iv
data
                iv = a0.encode("utf-8")      #encode the iv to bytes - original iv is
regenerated

```



```

a2 = a2.replace('[', " )      #clear the first encoded payload string
a33 = a33.replace(']'),' "    #clear the last encoded payload string
ciphertext = array('B', [int(a2),int(a3),int(a4),int(a5),int(a6),int(a7),int(a8),\
                        int(a9),int(a10),int(a11),int(a12),int(a13),int(a14),\
                        int(a15),int(a16),int(a17),int(a18),int(a19),int(a20),\
                        int(a21),int(a22),int(a23),int(a24),int(a25),int(a26),\
                        int(a27),int(a28),int(a29),int(a30),int(a31),int(a32),int(a33)])

except:
    print('error when receiving packets')
else:
    #we have the original iv and ciphertext - continue with AES decrypting
    decryptor = maes.new(key, maes.MODE_CBC, IV=iv)
    result = (array_tostring(decryptor.decrypt(ciphertext))) #string with the
results (ID, temp, humidity, pressure)
    #AES decryption completed
    print(result)
    print('iv:', iv)
    print('Rssi:', lora.packet_rssi())
    result = result.split(', ') #split the string

try:
    clientID,heater,cooler,humidifier = result
except:
    print('invalid data received') #if exception occurs then continue and send
data again
else:
    clientID = int(clientID)
    if clientID == ID:
        print('valid ack received')
        heater = int(heater)
        cooler = int(cooler)
        humidifier = int(humidifier)

```

```

if heater == 0:
    heaterout.off()
    print('heater is OFF')
if heater == 1:
    heaterout.on()
    print('heater is ON')
if cooler == 0:
    coolerout.off()
    print('cooler is OFF')
if cooler == 1:
    coolerout.on()
    print('cooler is ON')
if humidifier == 0:
    humidifierout.off()
    print('humidifier is OFF')
if humidifier == 1:
    humidifierout.on()
    print('humidifier is ON')

i = 5
break
else:
    print('invalid ack received')

i = i + 1

print('waiting 20 seconds for the next send')
lora.sleep() #put the LoRa in sleep mode for lower energy
consumption
sleep(60) #waiting time after valid ack or 5 times send and
act not received - next sending
#machine.deepsleep(1000) #deepsleep for lowest energy consumption
(ms) you cannot upload when in deepsleep

```

Παράρτημα Β - Datasheet

B.1 BPW21R Silicon PN photodiode



BPW21R
Vishay Telefunken

Silicon PN Photodiode

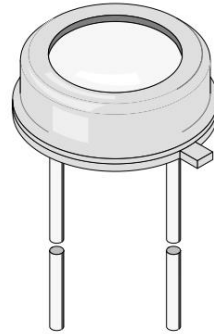
Description

BPW21R is a planar Silicon PN photodiode in a hermetically sealed short TO-5 case, especially designed for high precision linear applications.

Due to its extremely high dark resistance, the short circuit photocurrent is linear over seven decades of illumination level.

On the other hand, there is a strictly logarithmic correlation between open circuit voltage and illumination over the same range.

The device is equipped with a flat glass window with built in color correction filter, giving an approximation to the spectral response of the human eye.



94 8394

Features

- Hermetically sealed TO-5 case
- Flat glass window with built-in color correction filter for visible radiation
- Cathode connected to case
- Wide viewing angle $\theta = \pm 50^\circ$
- Large radiant sensitive area ($A=7.5 \text{ mm}^2$)
- Suitable for visible radiation
- High sensitivity
- Low dark current
- High shunt resistance
- Excellent linearity
- For photodiode and photovoltaic cell operation

Applications

Sensor in exposure and color measuring purposes

BPW21R

Vishay Telefunken



Absolute Maximum Ratings

$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage		V_R	10	V
Power Dissipation	$T_{amb} \leq 50^{\circ}\text{C}$	P_V	300	mW
Junction Temperature		T_j	125	$^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range		T_{amb}	-55...+125	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range		T_{stg}	-55...+125	$^{\circ}\text{C}$
Soldering Temperature	$t \leq 5\text{ s}$	T_{sd}	260	$^{\circ}\text{C}$
Thermal Resistance Junction/Ambient		R_{thJA}	250	K/W

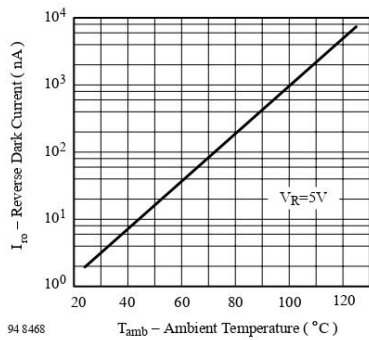
Basic Characteristics

$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

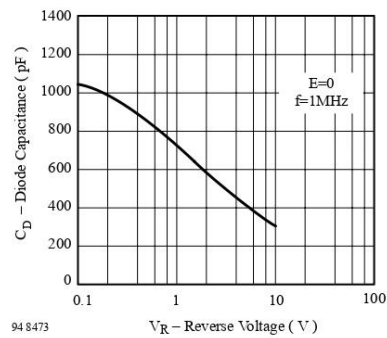
Parameter	Test Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward Voltage	$I_F = 50\text{ mA}$	V_F		1.0	1.3	V
Breakdown Voltage	$I_R = 20\text{ }\mu\text{A}, E = 0$	$V_{(BR)}$	10			V
Reverse Dark Current	$V_R = 5\text{ V}, E = 0$	I_{r0}		2	30	nA
Diode Capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}, E = 0$	C_D		1.2		nF
	$V_R = 5\text{ V}, f = 1\text{ MHz}, E = 0$	C_D		400		pF
Dark Resistance	$V_R = 10\text{ mV}$	R_D		38		$\text{G}\Omega$
Open Circuit Voltage	$E_A = 1\text{ klx}$	V_o	280	450		mV
Temp. Coefficient of V_o	$E_A = 1\text{ klx}$	TK_{V_o}		-2		mV/K
Short Circuit Current	$E_A = 1\text{ klx}$	I_k	4.5	9		μA
Temp. Coefficient of I_k	$E_A = 1\text{ klx}$	TK_{I_k}		-0.05		%/K
Reverse Light Current	$E_A = 1\text{ klx}, V_R = 5\text{ V}$	I_{ra}	4.5	9		μA
Sensitivity	$V_R = 5\text{ V}, E_A = 10^{-2} \dots 10^5\text{ lx}$	S		9		nA/lx
Angle of Half Sensitivity		θ		± 50		deg
Wavelength of Peak Sensitivity		λ_p		565		nm
Range of Spectral Bandwidth		$\lambda_{0.5}$		420...675		nm
Rise Time	$V_R = 0\text{ V}, R_L = 1\text{ k}\Omega,$ $\lambda = 660\text{ nm}$	t_r		3.1		μs
Fall Time	$V_R = 0\text{ V}, R_L = 1\text{ k}\Omega,$ $\lambda = 660\text{ nm}$	t_f		3.0		μs



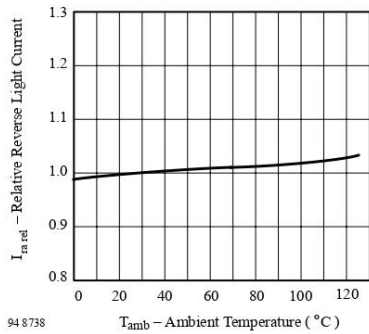
Typical Characteristics ($T_{amb} = 25^{\circ}C$ unless otherwise specified)



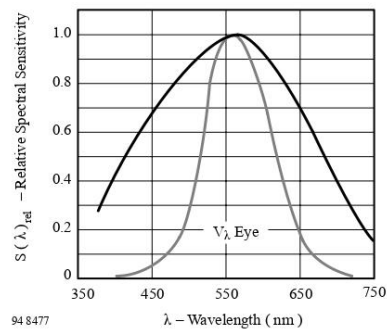
94 8468
Figure 1. Reverse Dark Current vs. Ambient Temperature



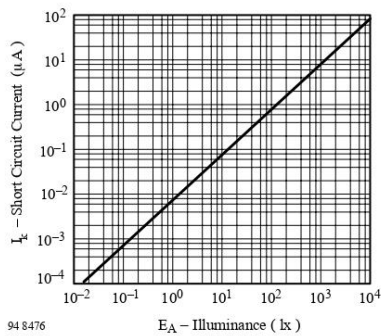
94 8473
Figure 4. Diode Capacitance vs. Reverse Voltage



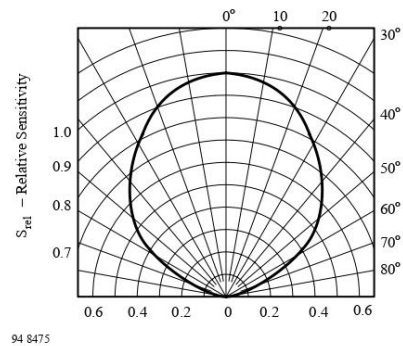
94 8738
Figure 2. Relative Reverse Light Current vs. Ambient Temperature



94 8477
Figure 5. Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength



94 8476
Figure 3. Short Circuit Current vs. Illuminance



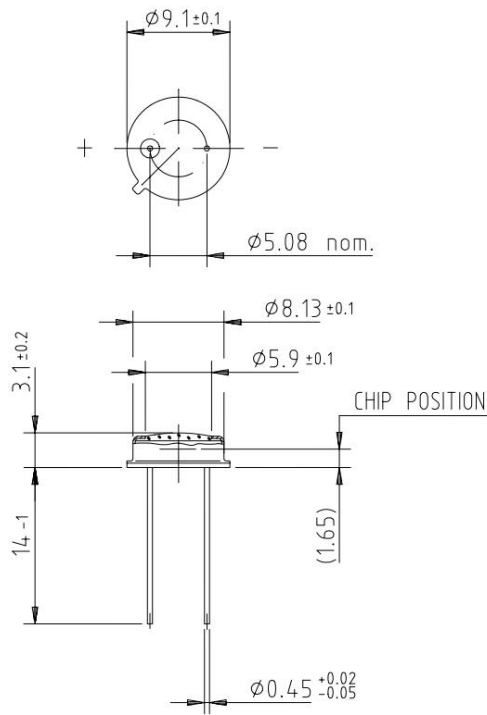
94 8475
Figure 6. Relative Radiant Sensitivity vs. Angular Displacement

BPW21R

Vishay Telefunken



Dimensions in mm



96 12181

technical drawings
according to DIN
specifications



Ozone Depleting Substances Policy Statement

It is the policy of **Vishay Semiconductor GmbH** to

1. Meet all present and future national and international statutory requirements.
2. Regularly and continuously improve the performance of our products, processes, distribution and operating systems with respect to their impact on the health and safety of our employees and the public, as well as their impact on the environment.

It is particular concern to control or eliminate releases of those substances into the atmosphere which are known as ozone depleting substances (ODSs).

The Montreal Protocol (1987) and its London Amendments (1990) intend to severely restrict the use of ODSs and forbid their use within the next ten years. Various national and international initiatives are pressing for an earlier ban on these substances.

Vishay Semiconductor GmbH has been able to use its policy of continuous improvements to eliminate the use of ODSs listed in the following documents.

1. Annex A, B and list of transitional substances of the Montreal Protocol and the London Amendments respectively
2. Class I and II ozone depleting substances in the Clean Air Act Amendments of 1990 by the Environmental Protection Agency (EPA) in the USA
3. Council Decision 88/540/EEC and 91/690/EEC Annex A, B and C (transitional substances) respectively.

Vishay Semiconductor GmbH can certify that our semiconductors are not manufactured with ozone depleting substances and do not contain such substances.

We reserve the right to make changes to improve technical design and may do so without further notice. Parameters can vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by the customer. Should the buyer use Vishay-Telefunken products for any unintended or unauthorized application, the buyer shall indemnify Vishay-Telefunken against all claims, costs, damages, and expenses, arising out of, directly or indirectly, any claim of personal damage, injury or death associated with such unintended or unauthorized use.

Vishay Semiconductor GmbH, P.O.B. 3535, D-74025 Heilbronn, Germany
Telephone: 49 (0)7131 67 2831, Fax number: 49 (0)7131 67 2423

B.2 BME280 Sensor

BME280 Environmental Sensor User Manual

OVERVIEW

The BME280 is as combined digital humidity, pressure and temperature sensor. Its small dimensions, low power consumption, high precision and stability allow the implementation in environmental monitor, whether forecast, altitude detection and IOT application.

FEATURES

- Support I2C interface, I2C device address could be set by changing I/O or welds
- Supports SPI interface. Default I2C, you can change to SPI by change I/O
- Integrated Level convert circuit, compatible with 3.3V/5V
- Provide examples and user guide (Raspberry Pi/Arduino/STM32)

SPECIFICATION

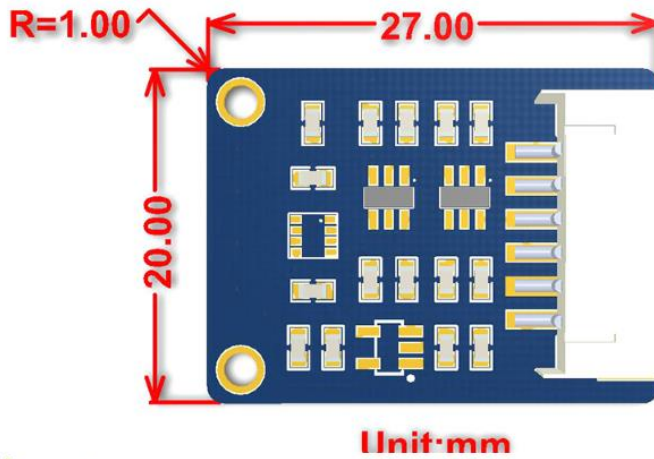
Operating voltage:	5V/3.3V
Interface:	I2C/SPI
Temperature range:	-40~85°C (Resolution 0.1°C, tolerance $\pm 1^\circ\text{C}$)
Humidity range:	0~100%rh (Resolution 0.008%RH, tolerance $\pm 1^\circ\text{C}$)
Pressure range:	300~1100hPa(Resolution 0.18Pa, tolerance $\pm 1\text{hPa}$)
Dimensions:	27mmx20mm
Holes size:	2.0mm

INTERFACES

Pinouts

PIN	I2C	SPI
VCC	3.3V/5V power supply	
GND	Ground	
SDA/MOSI	I2C data	SPI data master output/slave input
SCL/SCK	I2C clock	SPI clock input
ADDR/MISO	I2C address chip selection, high level (default) address: 0x77; low level address: 0x76	SPI data master input/slave output
CS	NC	SPI chip selection, low active

Dimensions



Sensor Parameters Comparison

MODEL		BME280	BME680	BME688
DETECTION SUPPORT		Barometric pressure, Environmental temperature, Relative humidity	Barometric pressure, Environmental temperature, Relative humidity, VOC gas change detection (supports IAQ calculation in combination with the software package)	Barometric pressure, Environmental temperature, Relative humidity, VOC and VSC gas change detection (supports IAQ calculation in combination with the software package, and integrated AI function)
COMMUNICATION INTERFACES		I2C and SPI		
TEMPERATURE SENSING	RANGE	-40~85°C		
	ACCURACY	±1.0°C (0~65°C)		±0.5°C (0~65°C)
HUMIDITY SENSING	RANGE	0~100%RH		
	ACCURACY	±3%RH		
BAROMETRIC PRESSURE SENSING	RANGE	300~1100 hPa		
	ACCURACY	±1.0hPa (0~65°C)	±0.6hPa (0~65°C)	
GAS SENSING		-	supports VOC gas change detection	supports VOC and VSC gas change detection
DIMENSIONS		27 × 20mm		

B.3 2.4 Inch LCD Module

2.4inch LCD Module

Overview

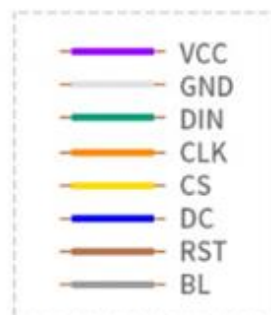
Introduction

As a 2.4inch TFT display module with a resolution of 240 * 320, it uses the SPI interface for communication. LCD has an internal controller with basic functions, which can be used to draw points, lines, circles, and rectangles, and can display English, Chinese as well as pictures.

We provide complete supporting Raspberry Pi demos (BCM2835 library, WiringPi library, and python demos), STM32 demos, and Arduino demos.

Specification

- Operating voltage: 3.3V/5V
- Interface: SPI
- LCD Type: TFT
- Controller: IL9341
- Resolution: 240(V) x 320(H)RGB
- Display Size: 36.72 (H) x 48.96 (V) mm
- Pixel Size: 0.153 (H) x 0.153 (V) mm
- Dimension: 70.5 x 43.3(mm)



B.4 AD8646 Amplifier



24 MHz Rail-to-Rail Dual Amplifier

AD8646

FEATURES

Offset voltage: 2.5 mV maximum
Single-supply operation: 2.7 V to 5.5 V
Low noise: 8 nV/√Hz
Wide bandwidth: 24 MHz
Slew rate: 12 V/μs
Short-circuit output current: 150 mA
No phase reversal
Low input bias current: 1 pA
Low supply current: 2 mA maximum
Unity gain stable

APPLICATIONS

Battery-powered instruments
Multipole filters
ADC front ends
Sensors
Barcode scanners
ASIC input or output amplifiers
Audio amplifiers
Photodiode amplifiers
Datapath/mux/switch control

GENERAL DESCRIPTION

The AD8646 is a dual, rail-to-rail, input and output, single-supply amplifier featuring low offset voltage, wide signal bandwidth, low input voltage, and low current noise.

The combination of 24 MHz bandwidth, low offset, low noise, and very low input bias current makes these amplifiers useful in a wide variety of applications. Filters, integrators, photodiode amplifiers, and high impedance sensors all benefit from the combination of performance features. AC applications benefit from the wide bandwidth and low distortion. This amplifier

PIN CONFIGURATION



Figure 1.

offers high output drive capability, which is excellent for audio line drivers and other low impedance applications.

Applications include portable and low powered instrumentation, audio amplification for portable devices, portable phone headsets, barcode scanners, and multipole filters. The ability to swing rail to rail at both the input and output enables designers to buffer CMOS ADCs, DACs, ASICs, and other wide output swing devices in single-supply systems.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2007 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

SPECIFICATIONS

$V_{DD} = 5\text{ V}$, $V_{CM} = V_{DD}/2$, $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
INPUT CHARACTERISTICS						
Offset Voltage	V_{OS}	$V_{CM} = 2.5\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		0.6	2.5	mV
Offset Voltage Drift	$\Delta V_{OS}/\Delta T$	$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		1.8	7.5	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	I_B	$-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		0.3	1	pA
Input Offset Current	I_{OS}	$-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$			50	pA
		$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$			550	pA
		$-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		0.1	0.5	pA
Input Voltage Range	V_{CM}		0		5	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = 0\text{ V to }5\text{ V}$	67	84		dB
Large Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L = 2\text{ k}\Omega$, $V_O = 0.5\text{ V to }4.5\text{ V}$	104	116		dB
OUTPUT CHARACTERISTICS						
Output Voltage High	V_{OH}	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$	4.98	4.99		V
		$I_{OUT} = 10\text{ mA}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$	4.90	4.92		V
		$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$	4.70			V
Output Voltage Low	V_{OL}	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		8.4	20	mV
		$I_{OUT} = 10\text{ mA}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		78	145	mV
		$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$			200	mV
Output Current	I_{OUT}	Short circuit		± 120		mA
Closed-Loop Output Impedance	Z_{OUT}	At 1 MHz, $A_V = 1$		5		Ω
POWER SUPPLY						
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{DD} = 2.7\text{ V to }5.0\text{ V}$	63	80		dB
Supply Current per Amplifier	I_{SY}	$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		1.5	1.9	mA
					2.25	mA
DYNAMIC PERFORMANCE						
Slew Rate	SR	$R_L = 2\text{ k}\Omega$		11		V/ μs
Gain Bandwidth Product	GBP			27		MHz
Phase Margin	ϕ_m			77		Degrees
NOISE PERFORMANCE						
Peak-to-Peak Noise	$e_{n,p-p}$	0.1 Hz to 10 Hz		2.3		μV
Voltage Noise Density	e_n	$f = 1\text{ kHz}$		8		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
		$f = 10\text{ kHz}$		6		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
Channel Separation	CS	$f = 10\text{ kHz}$		-129		dB
		$f = 100\text{ kHz}$		-119		dB
Total Harmonic Distortion Plus Noise	THD+N	$V_{p-p} = 0.1\text{ V}$, $R_L = 600\ \Omega$, $f = 25\text{ kHz}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$				
		$A_V = +1$		0.010		%
		$A_V = -10$		0.021		%

AD8646

$V_{DD} = 2.7\text{ V}$, $V_{CM} = V_{DD}/2$, $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
INPUT CHARACTERISTICS						
Offset Voltage	V_{OS}	$V_{CM} = 1.35\text{ V}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		0.6	2.5	mV
Offset Voltage Drift	$\Delta V_{OS}/\Delta T$	$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		1.5	7.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	I_B	$-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		0.2	1	pA
Input Offset Current	I_{OS}	$-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		0.1	0.5	pA
Input Voltage Range	V_{CM}		0		2.7	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = 0\text{ V to } 2.7\text{ V}$	62	79		dB
Large Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L = 2\text{ k}\Omega$, $V_O = 0.5\text{ V to } 2.2\text{ V}$	95	107		dB
OUTPUT CHARACTERISTICS						
Output Voltage High	V_{OH}	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$	2.65	2.68		V
Output Voltage Low	V_{OL}	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$ $-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$	2.60	11	25	mV
Output Current	I_{OUT}	Short circuit		± 63		mA
Closed-Loop Output Impedance	Z_{OUT}	At 1 MHz, $A_V = 1$		5		Ω
POWER SUPPLY						
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_{DD} = 2.7\text{ V to } 5.0\text{ V}$	63	80		dB
Supply Current per Amplifier	I_{SR}	$-40^\circ\text{C} < T_A < +125^\circ\text{C}$		1.6	1.9	mA
					2.25	mA
DYNAMIC PERFORMANCE						
Slew Rate	SR	$R_L = 2\text{ k}\Omega$ $R_L = 10\text{ k}\Omega$		11		V/ μs
Gain Bandwidth Product	GBP			26		MHz
Phase Margin	ϕ_m			53		Degrees
NOISE PERFORMANCE						
Peak-to-Peak Noise	e_n p-p	0.1 Hz to 10 Hz		2.3		μV
Voltage Noise Density	e_n	$f = 1\text{ kHz}$ $f = 10\text{ kHz}$		8		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Channel Separation	CS	$f = 10\text{ kHz}$ $f = 100\text{ kHz}$		-129		dB
				-121		dB

AD8646

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	6 V
Input Voltage	GND to V_{DD}
Differential Input Voltage	$\pm 3\text{ V}$
Output Short Circuit to GND	Indefinite
Storage Temperature Range	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range	-40°C to $+125^\circ\text{C}$
Lead Temperature (Soldering 60 sec)	300°C
Junction Temperature	150°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

THERMAL RESISTANCE

θ_{JA} is specified for the worst-case conditions, that is, a device soldered in a circuit board for surface-mount packages.

Table 4. Thermal Resistance

Package Type	θ_{JA}	θ_{JC}	Unit
8-Lead SOIC	121	43	$^\circ\text{C}/\text{W}$
8-Lead MSOP	210	45	$^\circ\text{C}/\text{W}$

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

B.5 LORA RA-02

LORA RA-02 433MHZ LONG RANGE WIRELESS TRANSRECEIVER - SX1278

Description

Developed by Ai-Thinker company, the manufacturer of the ESP32S, this Ra-02 LoRa (Long-range Radio) module will take your IoT projects the distance with communication over a long-range spread spectrum. This form of wireless communication results in a larger bandwidth, increasing interference resistance, minimizing current consumption, and increasing security.

This module uses SX1278 IC and works on a 433MHz frequency. Frequency hopping—which gives you that sweet balance of quality signal transmission—will cover a range of 420-450MHz. This long range wireless capability is packed into a small (17 x 16mm) package and delivered without an antenna.

With the LoRa Ra-02, you don't have to compromise in the balance of range, interference immunity, or energy consumption. The technology behind this IC means that it's perfect for those projects requiring range and strength.

Features:

- LoRa™ spread spectrum communication
- +20dBm - 10mW. Stable RF output power when input voltage changed
- Half-duplex SPI communication
- Programmable bit rate can reach to 300kbps
- Support FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ and OOK Modulation Mode
- 127dB RSSI wave range.
- Automatically detect RF signal, CAD mode and super high speed AFC
- With CRC 256 bytes data engine
- Half hole (castellated hole) SMD package
- With metal shielding case

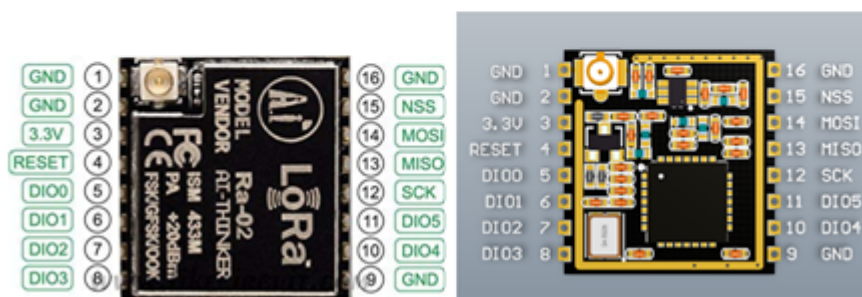
Specifications:

- Wireless Standard: 433MHz
- Frequency range: 420 - 450MHz
- Port: SPI/GPIO
- Operating Voltage: 1.8 - 3.7V, default 3.3V

- Working Current, receive: less than 10.8mA(LnaBoost closed, Band 1)
transmit: less than 120mA(+20dBm),
Sleep model: 0.2uA
- Working temperature: -40- +85 degrees
- Pin pitch: 2.0 mm

Pins Explanation

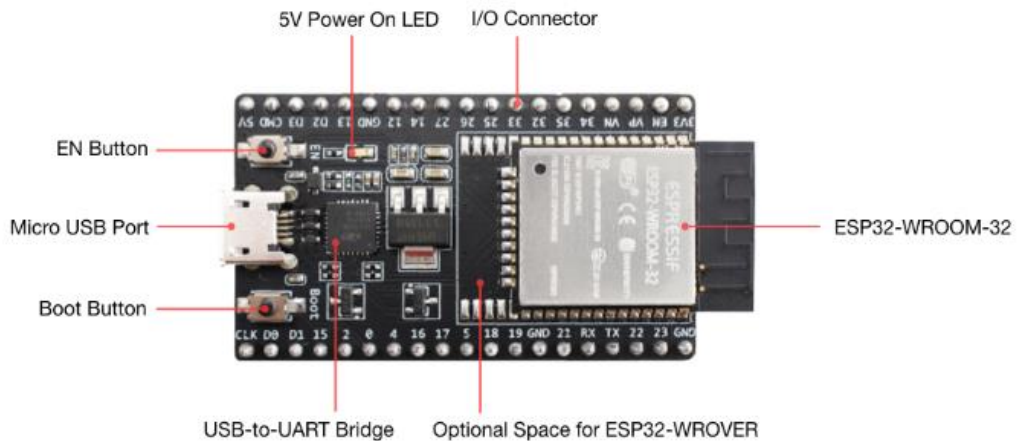
Ra-01	Ra-02	Pin	Description
1	-	ANT	Antenna
2	1, 2	GND	GND
3	3	3.3V	3.3V Power in
4	4	RESET	Reset
5	5	DIO0	Digital IO0, software setting
6	6	DIO1	Digital IO1, software setting
7	7	DIO2	Digital IO2, software setting
8	8	DIO3	Digital IO3, software setting
9	9	GND	GND
10	10	DIO4	Digital IO4, software setting
11	11	DIO5	Digital IO5, software setting
12	12	SCK	SPI Clock input
13	13	MISO	SPI data output
14	14	MOSI	SPI data input
15	15	NSS	SPI Selected-IN
16	16	GND	GND



B.6 ESP32

ESP32 WROOM 32D Pinout, Features, and specifications

B.6.1 Features




- 11b/g/n (802.11n, speed up to 150Mbps)
- WIFI Frequency Range 2.4GHz ~ 2.5GHz
- Clock frequency adjustment range from 80 MHz to 240 MHz, support for RTOS
- Built-in 2-channel 12-bit high-precision ADC with up to 18 channels
- Support UART/GPIO/ADC/DAC/SDIO/SD card/PWM/I2C/I2S interface
- Support multiple sleep modes, ESP32 chip sleep current is less than 5 μ A
- Embedded Lwip protocol stack
- Supports STA/AP/STA + AP operation mode
- Supports remote firmware upgrade (FOTA)
- General AT commands can be used quickly
- Support secondary development, integrated Windows, Linux development environment

B.6.2 ESP32 WROOM 32D Pinout:

Name	No.	Type	Function
GND	1	P	Ground
3.3V	2	P	Power Supply
EN	3	I	Module enable signal, Active High
SENSOR_VP	4	I	GPIO36, ADC1_CH0, RTC_GPIO0
SENSOR_VN	5	I	GPIO39, ADC1_CH3, RTC_GPIO3
IO34	6	I	GPIO34, ADC1_CH6, RTC_GPIO4
IO35	7	I	GPIO35, ADC1_CH7, RTC_GPIO5
IO32	8	I/O	GPIO32, XTAL_32K_P (32.768 kHz crystal oscillator input), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9
IO33	9	I/O	GPIO33, XTAL_32K_N (32.768 kHz crystal oscillator output), ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8
IO25	10	I/O	GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, EMAC_RXD0
IO26	11	I/O	GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, EMAC_RXD1
IO27	12	I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17, EMAC_RX_DV
IO14	13	I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK, HS2_CLK, SD_CLK, EMAC_TXD2
IO12	14	I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPIQ, HS2_DATA2, SD_DATA2, EMAC_TXD3

GND	15	P	Ground
IO13	16	I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, HS2_DATA3, SD_DATA3, EMAC_RX_ER
SHD/SD2*	17	I/O	GPIO9, SD_DATA2, SPIHD, HS1_DATA2, U1RXD
SWP/SD3*	18	I/O	GPIO10, SD_DATA3, SPIWP, HS1_DATA3, U1TXD
SCS/CMD*	19	I/O	GPIO11, SD_CMD, SPICS0, HS1_CMD, U1RTS
SCK/CLK*	20	I/O	GPIO6, SD_CLK, SPICLK, HS1_CLK, U1CTS
SDO/SD0*	21	I/O	GPIO7, SD_DATA0, SPIQ, HS1_DATA0, U2RTS
SDI/SD1*	22	I/O	GPIO8, SD_DATA1, SPID, HS1_DATA1, U2CTS
IO15	23	I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, MTDO, HSPICS0, RTC_GPIO13, HS2_CMD, SD_CMD, EMAC_RXD3
IO2	24	I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPWP, HS2_DATA0, SD_DATA0
IO0	25	I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1, EMAC_TX_CLK
IO4	26	I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPHD, HS2_DATA1, SD_DATA1, EMAC_TX_ER
IO16	27	I/O	GPIO16, HS1_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT
IO17	28	I/O	GPIO17, HS1_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180
IO5	29	I/O	GPIO5, VSPICS0, HS1_DATA6, EMAC_RX_CLK
IO18	30	I/O	GPIO18, VSPICLK, HS1_DATA7
IO19	31	I/O	GPIO19, VSPIQ, U0CTS, EMAC_TXD0
NC	32	-	-
IO21	33	I/O	GPIO21, VSPHD, EMAC_TX_EN
RXD0	34	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
TXD0	35	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2
IO22	36	I/O	GPIO22, VSPWP, U0RTS, EMAC_TXD1
IO23	37	I/O	GPIO23, VSPID, HS1_STROBE
GND	38	P	Ground

B.6.3 ESP32-WROOM-32 Pin Configuration

Pin Category	Pin Name	Details
Power	Micro-USB, 3.3V, 5V, GND	<p>Micro-USB: ESP32 can be powered through USB port</p> <p>5V: Regulated 5V can be supplied to this pin which is we be again regulated to 3.3V by on board regulator, to power the board.</p> <p>3.3V: Regulated 3.3V can be supplied to this pin to power the board.</p> <p>GND: Ground pins.</p>
Enable	En	The pin and the button  resets the microcontroller.
Analog Pins	ADC1_0 to ADC1_5 and ADC2_0 to ADC2_9	Used to measure analog voltage in the range of 0-3.3V. 12-bit 18 Channel ADC
DAC pins	DAC1 and DAC2	Used for Digital to analog Conversion
Input/output Pins	GPIO0 to GPIO39	Totally 39 GPIO pins, can be used as input or output pins. 0V (low) and 3.3V (high). But pins 34 to 39 can be used as input only

		be used as input only
Capacitive Touch pins	T0 to T9	These 10 pins can be used a touch pins normally used for capacitive pads
RTC GPIO pins	RTCIO0 to RTCIO17	These 18 GPIO pins can be used to wake up the ESP32 from deep sleep mode.
Serial	Rx, Tx	Used to receive and transmit TTL serial data.
External Interrupts	All GPIO	Any GPIO can be use to trigger an interrupt.

PWM	All GPIO	16 independent channel is available for PWM any GPIO can be made to work as PWM though software
VSPI	GPIO23 (MOSI), GPIO19(MISO), GPIO18(CLK) and GPIO5 (CS)	Used for SPI-1 communication.
HSPI	GPIO13 (MOSI), GPIO12(MISO), GPIO14(CLK) and GPIO15 (CS)	Used for SPI-2 communication.
IIC	GPIO21(SDA), GPIO22(SCL)	Used for I2C communication.
AREF	AREF	To provide reference voltage for input voltage.

B.6.4 ESP32-WROOM-32 Technical features

Microprocessor	Tensilica Xtensa LX6
Maximum Operating Frequency	240MHz
Operating Voltage	3.3V
Analog Input Pins	12-bit, 18 Channel
DAC Pins	8-bit, 2 Channel
Digital I/O Pins	39 (of which 34 is normal GPIO pin)
DC Current on I/O Pins	40 mA
DC Current on 3.3V Pin	50 mA
SRAM	520 KB
Communication	SPI(4), I2C(2), I2S(2), CAN, UART(3)
Wi-Fi	802.11 b/g/n
Bluetooth	V4.2 – Supports BLE and Classic Bluetooth