



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη Συστήματος Αισθητήρων  
Μέτρησης Θερμοκρασίας και Υγρασίας  
του Εδάφους και Απομακρυσμένης  
Επιτήρησής του με τη Χρήση του  
Πρωτοκόλλου LoRa

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνα Ι. Στεργίου

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

# Ανάπτυξη Συστήματος Αισθητήρων Μέτρησης Θερμοκρασίας και Υγρασίας του Εδάφους και Απομακρυσμένης Επιτήρησής του με τη Χρήση του Πρωτοκόλλου LoRa

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνα Ι. Στεργίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16<sup>η</sup> Ιουλίου 2024.

.....  
Ευάγγελος

Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης

Γκόνος

Καθηγητή Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος

Πολιτόπουλος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνα Ι. Στεργίου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνα Ι. Στεργίου, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



# Περίληψη

Ο αγροτικός τομέας έχει ανάγκη από καινοτόμες ιδέες και τεχνολογίες, με σκοπό την αύξηση της παραγωγής στη χώρα και τον καταμερισμό των εισροών. Οι τεχνολογίες IoT είναι εκείνες που ανοίγουν το δρόμο, δίνοντας λύσεις χαμηλού κόστους για την έξυπνη διαχείριση των αγροτικών επιχειρήσεων. Αξιοποιώντας τη δύναμη του IoT, οι αγρότες είναι πλέον σε θέση να παρακολουθούν, να αναλύουν και να διαχειρίζονται καλύτερα τις δραστηριότητές τους. Αυτή η παρακολούθηση των αγροτικών προϊόντων σε πραγματικό χρόνο βοηθά στην πρόληψη ανεπιθύμητων συνεπειών, μειώνει σε μεγάλο βαθμό τους κινδύνους καταστροφών τους και διευκολύνει την αποτελεσματικότερη μεταφορά τους παγκοσμίως . Επιπλέον, μπορεί να μειώσει σημαντικά την χρήση χημικών, όπως τα φυτοφάρμακα και τα λιπάσματα, με αποτέλεσμα πιο υγιεινές καλλιέργειες και πιο βιώσιμες μεθόδους παραγωγής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία και με γνώμονα όλα τα παραπάνω αναπτύχθηκε ένα σύστημα παρακολούθησης βασικών συστατικών του εδάφους . Πιο συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα IoT σύστημα αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας. Τα δεδομένα των μετρήσεων μεταδίδονται με τη χρήση του πρωτοκόλλου LoRa και της πλατφόρμας Thingsboard.

**Λέξεις-κλειδιά:** *IoT, Αισθητήρες, LoRa32, Θερμοκρασία, Υγρασία, Απομακρυσμένη Παρακολούθηση*



# Abstract

The agricultural sector requires innovative ideas and technologies to increase production in the country and distribute resources efficiently. IoT technologies pave the way, offering cost-effective solutions for smart management of agricultural operations. By harnessing the power of IoT, farmers can now monitor, analyze, and manage their activities more effectively. Real-time monitoring of agricultural products helps prevent unwanted consequences, significantly reduces the risks of disasters, and facilitates more efficient global transportation. Additionally, it can substantially decrease the use of chemicals such as pesticides and fertilizers, resulting in healthier crops and more sustainable production methods.

In this thesis, considering the above, a system for monitoring key soil components was developed. Specifically, an IoT sensor system was created to measure temperature and humidity levels. Measurement data is transmitted using the LoRa protocol and the Thingsboard platform.

***Keywords:*** *IoT, Sensors, LoRa32, Temperature, Humidity, Remote Monitoring*





## Πρόλογος – Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα Γεωργία Στάμου, η οποία με υποστήριξε και με καθοδήγησε σε κάθε δυσκολία στη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να απευθύνω στην οικογένεια μου, τους γονείς μου Γιάννη και Γιούλα, και τον αδερφό μου Θάνο, για την ανελλιπή αγάπη τους και την πίστη τους σε εμένα η οποία με έχει βοηθήσει να εξελιχθώ σε όλη τη διάρκεια της ζωής μου και να κατακτήσω όλους τους στόχους μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το αγόρι μου, Μάριο, του οποίου η αγάπη και η υποστήριξη ήταν καθοριστική στο να καταφέρω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου εντός και εκτός της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, και ιδιαίτερα τη Φιλίππα Σουμπασάκου που με βοήθησε σε όποια δυσκολία αντιμετώπισα αυτά τα χρόνια και μου έδινε θάρρος να συνεχίζω. Οι εμπειρίες που μοιράστηκα με όλους και η βοήθεια τους μου έδωσαν ώθηση να φτάσω σε εδώ που είμαι.



# Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Αντικείμενο της Εργασίας	1
1.2	Σκοπός και Στόχος της Εργασίας	1
1.3	Δομή της Εργασίας	2
2	Θεωρητικό Μέρος	5
2.1	Τα IoT Συστήματα στην Γεωργία	5
2.1.1	Τα Συστατικά Στοιχεία του IoT στη Γεωργία	5
2.1.2	Εφαρμογές του IoT στη Γεωργία	6
2.1.3	Συγκεκριμένες Τεχνολογίες και Εφαρμογές	7
2.1.4	Οφέλη και Προκλήσεις	8
2.2	Ενσωματωμένα Συστήματα και IoT	8
2.2.1	Ενσωματωμένα Συστήματα	8
2.3	Μικροεπεξεργαστές - Μικροελεγκτές	11
2.3.1	LoRa32	12
2.3.2	Internet of Things	13
2.3.3	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	17
2.3.3.1	Wi-Fi	18
2.3.3.2	Bluetooth	18
2.3.3.3	LoRa	19
2.4	Αισθητήρες Θερμοκρασίας	20
2.4.1	Θερμοζεύγη	21
2.4.2	Αισθητήρες Τύπου Αντίστασης ή RTD	23
2.4.3	Θερμίστορ	25
2.4.4	Αισθητήρες Ημιαγωγών	27
2.4.5	Αισθητήρες Υπερύθρων (IR)	28
2.5	Αισθητήρες Υγρασίας	29

2.5.1	Αισθητήρες Μικροκυμάτων	30
2.5.2	Ωμικοί Αισθητήρες	31
2.5.3	Αισθητήρες Μέτρησης της Χωρητικότητας	32
2.5.4	Αισθητήρες Χρόνου Ανάκλασης	33
2.5.5	Αισθητήρες Σκέδασης Θερμότητας	34
2.5.6	Τενσιόμετρα	35
3	Πειραματικό Μέρος	37
3.1	Στοιχεία Πειραματικής Διάταξης	37
3.1.1	Αισθητήρας Υγρασίας	37
3.1.2	Αισθητήρας Θερμοκρασίας	38
3.1.3	Μικροελεγκτής LoRa32u4 II v1.3	39
3.1.4	Προστασία Συστήματος Hardware	41
3.1.5	Internet of Things Πλατφόρμα	44
3.2	Πειραματική Διαδικασία	49
3.2.1	Ανάπτυξη Λειτουργικού Πρωτοτύπου	49
3.3	Μετρήσεις και Αποτελέσματα	63
4	Συμπεράσματα	68
4.1	Αξιολόγηση του Συστήματος	68
4.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	69
5	Βιβλιογραφία	71

# Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Η προσφορά των IoT στη γεωργία[2] .....	7
Σχήμα 2: Τα χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων[4].....	9
Σχήμα 3: Είδη ενσωματωμένων συστημάτων[4]. .....	10
Σχήμα 4: Τα μέρη ενός μικροελεγκτή[8]. .....	12
Σχήμα 5: Διαδίκτυο των Πραγμάτων[11]. .....	13
Σχήμα 6: Τομείς εφαρμογών του IoT[12]. .....	14
Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική IoT τριών επιπέδων[13]. .....	15
Σχήμα 8: Αρχιτεκτονική IoT πέντε επιπέδων[13]. .....	16
Σχήμα 9: Πρωτόκολλα επικοινωνίας[15].....	17
Σχήμα 10: Λογότυπο Wi-Fi[17]. .....	18
Σχήμα 11: Λογότυπο Bluetooth[18]. .....	19
Σχήμα 12: Λογότυπο LoRa[21].....	20
Σχήμα 13: Αισθητήριο στοιχείο και επαφές σε κέλυφος[22]. .....	21
Σχήμα 14: Διάταξη RTD[24] . .....	24
Σχήμα 15: Διατάξεις θερμίστορ [22]. .....	25
Σχήμα 16: Διάγραμμα μεταβολής του λόγου $R_{TH}/R_{REF}$ σε θερμίστορ NTC με τη θερμοκρασία[22]. .....	26
Σχήμα 17: Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης PTC θερμίστορ με τη θερμοκρασία για τρία διαφορετικά στοιχεία [22]. .....	27
Σχήμα 18: Τύποι ολοκληρωμένων αισθητήρων θερμοκρασίας του εμπορίου[22]. .....	28
Σχήμα 19: Αισθητήρας μικροκυμάτων μέτρησης υγρασίας[32].....	31
Σχήμα 20: Κύβοι γύψου που χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες μέτρησης υγρασίας του εδάφους[22]. .....	31
Σχήμα 21: Πυκνωτής παράλληλων πλακών[33].....	32
Σχήμα 22: Αισθητήρας μέτρησης της υγρασίας του εδάφους μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς του[22]. .....	33
Σχήμα 23: Διάφοροι τύποι TDR[22].....	34
Σχήμα 24: Αισθητήρας σκέδασης θερμότητας[22]. .....	35
Σχήμα 25: Αρχή λειτουργίας και τυπικό δείγμα тенσιόμετρου[22]. .....	36

Σχήμα 26: Αισθητήρας υγρασίας SEN0308[35].....	37
Σχήμα 27: Σχηματικό διάγραμμα του αισθητήρα SEN0308.....	38
Σχήμα 28: Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20[36]. ....	39
Σχήμα 29: Διάγραμμα αντιστοίχισης των pin του LoRa32u4 II v1.3[37].....	41
Σχήμα 30: Άνοψη κουτιού. ....	42
Σχήμα 31: Το καπάκι του κουτιού. ....	42
Σχήμα 32: α)Πρόσοψη κουτιού. ....	43
Σχήμα 33: Πίσω όψη κουτιού. ....	43
Σχήμα 34: 3D αναπαράσταση κουτιού.....	43
Σχήμα 35: 3D αναπαράσταση του καπακιού. ....	43
Σχήμα 36: 3D αναπαράσταση κουτιού.....	44
Σχήμα 37: 3D αναπαράσταση κουτιού.....	44
Σχήμα 38: Αποτέλεσμα εκτύπωσης του κουτιού. ....	44
Σχήμα 39: Docker compose κώδικας για την φιλοξενία του Thingsboard .....	47
Σχήμα 40: Λεπτομέρειες της υπηρεσίας Thingboard στο Docker.....	48
Σχήμα 41: Προβολή συσκευής στην πλατφόρμα Thingsboard.....	48
Σχήμα 42: Παράδειγμα ταμπλό του Thingsboard. ....	49
Σχήμα 43: Δέκτης μετρήσεων.....	54
Σχήμα 44: Αισθητήρας NPK. ....	54
Σχήμα 45: Σύνδεση του πομπού με τους αισθητήρες στο breadboard.....	61
Σχήμα 46: Πείραμα λειτουργίας της διάταξης πάνω στο breadboard. ....	62
Σχήμα 47: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης.....	63
Σχήμα 48: Τελική μορφή κυκλώματος διάτρητης πλακέτας.....	63
Σχήμα 49: Περιβάλλον μετρήσεων.....	64
Σχήμα 50: Περιβάλλον μετρήσεων.....	65
Σχήμα 51: Η πλατφόρμα ThingsBoard κατά την διάρκεια των μετρήσεων .....	66
Σχήμα 52: Διάγραμμα θερμοκρασίας δωματίου .....	67
Σχήμα 53: Διάγραμμα υγρασίας δωματίου.....	67

# Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Εύρος τιμών θερμοκρασίας για κάθε τύπο θερμοζεύγους [22].....22





# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 Αντικείμενο της Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός συστήματος αισθητήρων για τη γεωργία, το οποίο καταγράφει τη θερμοκρασία και την υγρασία και επικοινωνεί μέσω της τεχνολογίας LoRa για τη συλλογή δεδομένων. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της έλλειψης ακριβών και συνεχών δεδομένων σχετικά με τις συνθήκες καλλιέργειας, που είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική διαχείριση των αγροτικών εκτάσεων.

Το σύστημα περιλαμβάνει αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και τα μεταδίδουν ασύρματα μέσω του δικτύου LoRa σε μια κεντρική πλατφόρμα για περαιτέρω ανάλυση. Η χρήση της τεχνολογίας LoRa επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το σύστημα ιδανικό για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές λειτουργώντας ακόμη και με μία μικρή μπαταρία.

Το σύστημα αυτό προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές στη γεωργία, όπως η παρακολούθηση των μικροκλιματικών συνθηκών στις καλλιέργειες, η βελτίωση της διαχείρισης της άρδευσης και η έγκαιρη ανίχνευση δυσμενών συνθηκών που μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη των φυτών. Με την ενσωμάτωση αισθητήρων NPK και τη χρήση ηλιακής ενέργειας για την τροφοδοσία του συστήματος, καθώς και με τον σχεδιασμό ενός μικρότερου και πιο εργονομικού κουτιού, το σύστημα φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα ευέλικτο και βιώσιμο εργαλείο για τους αγρότες.

## 1.2 Σκοπός και Στόχος της Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης δεδομένων για οποιαδήποτε καλλιέργεια, με τη χρήση της τεχνολογίας LoRa. Το σύστημα αυτό σχεδιάζεται να καταγράφει και να μεταδίδει δεδομένα υγρασίας και θερμοκρασίας από το αγροτικό περιβάλλον, παρέχοντας στους αγρότες πολύτιμες πληροφορίες για την καλύτερη διαχείριση των καλλιεργειών τους.

Ο στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και ακριβούς συστήματος αισθητήρων. Το σύστημα θα περιλαμβάνει αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας που θα μπορούν να καταγράψουν τις συνθήκες του περιβάλλοντος με ακρίβεια και συνέπεια. Η χρήση της τεχνολογίας LoRa για απομακρυσμένη επικοινωνία αποτελεί επίσης βασικό στόχο. Το σύστημα θα εκμεταλλεύεται την τεχνολογία LoRa για να μεταδίδει τα δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πρόσβαση σε παραδοσιακές πηγές ενέργειας είναι περιορισμένη.

Επιπλέον, η δημιουργία μιας κεντρικής πλατφόρμας συλλογής και ανάλυσης δεδομένων είναι απαραίτητη. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες θα μεταδίδονται σε μια κεντρική πλατφόρμα, όπου θα αποθηκεύονται και θα αναλύονται για να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στους αγρότες. Ένας ακόμα στόχος είναι η ευκολία εγκατάστασης και χρήσης. Το σύστημα θα σχεδιαστεί ώστε να είναι εύκολο στην εγκατάσταση και χρήση, επιτρέποντας στους αγρότες να το ενσωματώσουν εύκολα στις καθημερινές τους δραστηριότητες χωρίς να απαιτείται εξειδικευμένη γνώση.

Μέσω της επίτευξης αυτών των στόχων, η εργασία αυτή φιλοδοξεί να προσφέρει ένα εργαλείο που θα βελτιώσει σημαντικά την παρακολούθηση και τη διαχείριση των καλλιεργειών, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας στη γεωργία. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση των δεδομένων υγρασίας και θερμοκρασίας θα επιτρέψει στους αγρότες να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για την άρδευση, την προστασία των φυτών και άλλες σημαντικές πτυχές της διαχείρισης των καλλιεργειών.

### **1.3 Δομή της Εργασίας**

Η εργασία αυτή είναι διαρθρωμένη σε πέντε κύρια κεφάλαια, το καθένα από τα οποία εστιάζει σε διαφορετικές πτυχές της μελέτης και ανάπτυξης του συστήματος αισθητήρων για τη γεωργία με σκοπό την απομακρυσμένη παρακολούθηση των καλλιεργειών. Παρακάτω παρατίθεται μια συνοπτική περιγραφή της δομής της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 1, το οποίο αποτελεί την Εισαγωγή, παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας, ο σκοπός και οι στόχοι της. Αποτελεί μια γενική εισαγωγή που προετοιμάζει τον αναγνώστη για τα θέματα που θα ακολουθήσουν.

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί το Θεωρητικό Μέρος και χωρίζεται σε διάφορες ενότητες που αναλύουν το θεωρητικό υπόβαθρο του έργου. Αρχικά, η ενότητα 2.1 εστιάζει στα IoT Συστήματα στην Γεωργία, εισάγοντας τις βασικές αρχές και τις εφαρμογές των IoT συστημάτων στη γεωργία, αναφέροντας τα συστατικά στοιχεία και παρουσιάζοντας τα οφέλη και τις προκλήσεις. Στην ενότητα 2.2, παρουσιάζονται τα Ενσωματωμένα Συστήματα και IoT, όπου αναλύονται τα ενσωματωμένα συστήματα, οι μικροεπεξεργαστές και οι μικροελεγκτές, με έμφαση στο LoRa32 και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Στην ενότητα 2.3, περιγράφονται οι διάφοροι τύποι Αισθητήρων Θερμοκρασίας, όπως θερμοζεύγη, RTD, θερμίστορ, ημιαγωγοί και υπέρυθροι αισθητήρες. Τέλος, στην ενότητα 2.4, παρουσιάζονται οι τύποι Αισθητήρων Υγρασίας, συμπεριλαμβανομένων των μικροκυμάτων, ωμικών αισθητήρων, αισθητήρων χωρητικότητας, χρονικής ανάκλασης, σκέδασης θερμότητας και τενσιόμετρων.

Το Κεφάλαιο 3 αφορά το Πειραματικό Μέρος και παρουσιάζει την πειραματική διαδικασία και τη διάταξη του συστήματος. Στην ενότητα 3.1, αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος, όπως οι αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας, ο μικροελεγκτής LoRa32u4 II v1.3, η προστασία του hardware και η IoT πλατφόρμα. Στην ενότητα 3.2, περιγράφεται η ανάπτυξη του λειτουργικού πρωτοτύπου και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων. Στην ενότητα 3.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 4, το οποίο περιλαμβάνει τα Συμπεράσματα, γίνεται η αξιολόγηση του συστήματος και παρουσιάζονται οι δυνατότητες μελλοντικών επεκτάσεων του συστήματος, όπως η ενσωμάτωση αισθητήρα NPK, η χρήση ηλιακής ενέργειας και η ανάπτυξη ενός πιο συμπαγούς σχεδιασμού.

Το Κεφάλαιο 5 περιέχει τη Βιβλιογραφία, στην οποία καταγράφονται όλες οι πηγές και οι αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής της εργασίας.

Η δομή της εργασίας έχει σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να προσφέρει μια σαφή και ολοκληρωμένη παρουσίαση του έργου, επιτρέποντας στον αναγνώστη να κατανοήσει τα στάδια ανάπτυξης και τα αποτελέσματα της έρευνας.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

### 2.1 ΤΑ ΙΟΤ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΓΕΩΡΓΙΑ

Η εφαρμογή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) στη γεωργία αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση που ενσωματώνει τεχνολογίες αυτοματοποίησης και εργαλεία λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας στους γεωργούς να βελτιώσουν την παραγωγικότητα, την ποιότητα και τα κέρδη τους. Τα συστήματα IoT συνδέουν τον φυσικό κόσμο με τον ψηφιακό μέσω του Διαδικτύου, παρέχοντας δυνατότητες ανταλλαγής πληροφοριών και αυτοματοποίησης χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.

Οι αγρότες πλέον μπορούν να παρακολουθούν απομακρυσμένα τις καλλιέργειες, τα ζώα, τα μηχανήματα, τα συστήματα άρδευσης και τον καιρό. Μέσω των αισθητήρων IoT παρακολουθείται κάθε στιγμή η υγεία του εδάφους, η ποιότητα του νερού και μπορούν ακόμη και να ανιχνευτούν ασθένειες και παράσιτα. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν τον αυτοματισμό και τις τεχνικές ακριβούς γεωργίας στα θερμοκήπια, βελτιώνοντας τελικά την αποδοτικότητα της γεωργίας.

#### 2.1.1 Τα Συστατικά Στοιχεία του IoT στη Γεωργία

Το οικοσύστημα του IoT στη γεωργία αποτελείται από τέσσερα βασικά συστατικά:

1. Συσσκευές IoT: Περιλαμβάνουν ενσωματωμένα συστήματα που αλληλεπιδρούν με αισθητήρες και ενεργοποιητές (actuators), απαιτώντας ασύρματη συνδεσιμότητα[1]. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και μέτρηση διαφόρων παραμέτρων του αγρού, όπως θρεπτικά συστατικά του εδάφους, δεδομένα καιρού, υγρασία και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή.

2. Τεχνολογία Επικοινωνιών: Η μετάδοση των δεδομένων από τις συσκευές IoT στον αγρό γίνεται μέσω διαφόρων τεχνολογιών επικοινωνιών, όπως δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, δίκτυα χαμηλής ενέργειας και δορυφορικά δίκτυα. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία των συστημάτων IoT.

3. Διαδίκτυο: Η σύνδεση των συσκευών IoT στο Διαδίκτυο επιτρέπει τη διαθεσιμότητα των δεδομένων οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Η πρόοδος στις ασύρματες επικοινωνίες και στις

κινητές συσκευές έχει επιτρέψει την εκτεταμένη συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο, καθιστώντας δυνατή τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω υπολογιστικού νέφους.

4. Αποθήκευση και Επεξεργασία Δεδομένων: Η συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τις συσκευές IoT γίνεται μέσω υπολογιστικού νέφους, όπου μεγάλα δεδομένα συγκεντρώνονται για ανάλυση και λήψη αποφάσεων .

### 2.1.2 Εφαρμογές του IoT στη Γεωργία

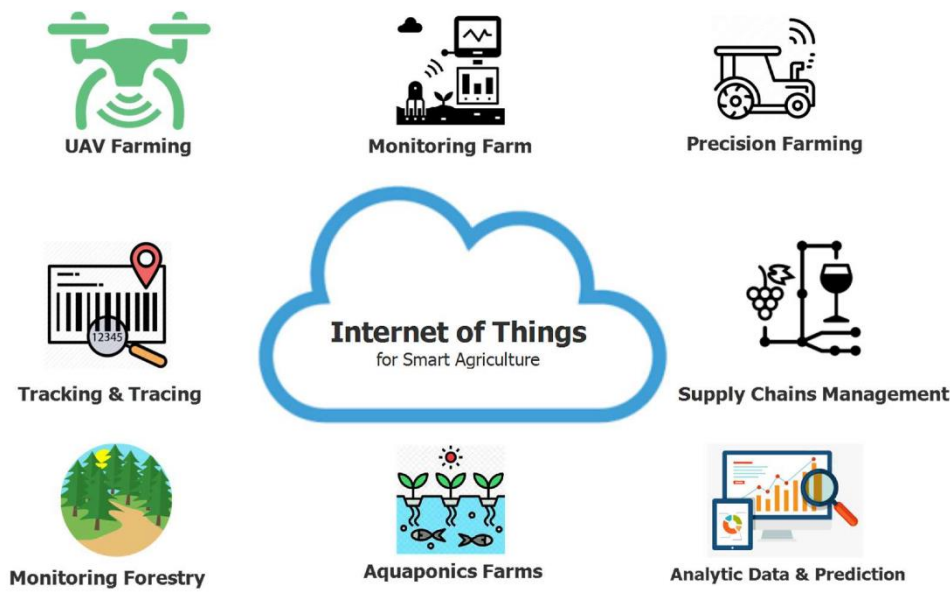
Το IoT προσφέρει προσφέρει στη γεωργία μέσα από πολλές εφαρμογές. Αρχικά, παρέχει στους αγρότες τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης των μικροκλιματικών συνθηκών μίας καλλιέργειας, με τη χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση των συνθηκών του εδάφους, των καλλιεργειών και των κλιματικών παραγόντων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει στους γεωργούς να λαμβάνουν έγκαιρες και ακριβείς πληροφορίες για τη διαχείριση των αγροτικών δραστηριοτήτων τους.

Η χρήση των συσκευών IoT σε γεωργικά μηχανήματα επιτρέπει την αυτοματοποίηση των εργασιών και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων, όπως νερό και ενέργεια, μειώνοντας τα κόστη και αυξάνοντας την αποδοτικότητα.

Άλλη μία εφαρμογή των IoT είναι στη γεωργία ακριβείας, η οποία βασίζεται στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων για τη λήψη αποφάσεων που βελτιώνουν την αποδοτικότητα των καλλιεργειών και μειώνουν τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η χρήση των δεδομένων αυτών

επιτρέπει την ακριβή εφαρμογή λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και άλλων αγροτικών εισροών.

Τέλος, στα θερμοκήπια, οι συσκευές IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η ένταση φωτός, επιτρέποντας την καλλιέργεια φυτών υπό βέλτιστες συνθήκες.



Σχήμα 1: Η προσφορά των IoT στη γεωργία[2].

### 2.1.3 Συγκεκριμένες Τεχνολογίες και Εφαρμογές

Οι τεχνολογίες IoT στη γεωργία περιλαμβάνουν αισθητήρες εδάφους, τηλεπισκόπηση, drones και άλλες προηγμένες τεχνολογίες που συλλέγουν και αναλύουν δεδομένα για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Οι αισθητήρες εδάφους παρακολουθούν παραμέτρους όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους, παρέχοντας στους γεωργούς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση του αγρού [9]. Τα drones χρησιμοποιούνται για την επιτήρηση μεγάλων εκτάσεων καλλιεργειών, παρέχοντας εικόνες υψηλής ανάλυσης και δεδομένα που βοηθούν στην ανίχνευση προβλημάτων όπως ασθένειες και παράσιτα.

Η τηλεπισκόπηση επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων από δορυφόρους και αεροσκάφη, παρέχοντας μια συνολική εικόνα της κατάστασης των καλλιεργειών και του εδάφους. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απόδοσης των καλλιεργειών και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την άρδευση, τη λίπανση και την προστασία των καλλιεργειών.

#### 2.1.4 Οφέλη και Προκλήσεις

Η χρήση του IoT στη γεωργία προσφέρει πολλά οφέλη, όπως η μείωση του κόστους, η αύξηση της παραγωγικότητας και η βελτίωση της ποιότητας των αγροτικών προϊόντων. Παράλληλα, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως η ασφάλεια των δεδομένων, η προστασία της ιδιωτικότητας, και η ανάγκη για κατάλληλα ρυθμιστικά πλαίσια.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση του IoT στη γεωργία μπορεί να συμβάλει στην αειφορία, μειώνοντας την κατανάλωση νερού και ενέργειας και βελτιώνοντας τη χρήση των φυσικών πόρων. Οι γεωργοί μπορούν να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται τις εισροές τους με μεγαλύτερη ακρίβεια, μειώνοντας τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των καλλιεργειών.

Παρά τις προκλήσεις, η υιοθέτηση του IoT στη γεωργία αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται, με νέες τεχνολογικές καινοτομίες να εισέρχονται στην αγορά και να προσφέρουν νέες ευκαιρίες για τους γεωργούς. Το IoT σε συνδυασμό με την ανάλυση δεδομένων (DA) αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την επίτευξη της "έξυπνης γεωργίας", η οποία υπόσχεται υψηλές αποδόσεις.

## 2.2 ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΙΟΤ

### 2.2.1 Ενσωματωμένα Συστήματα

Ο όρος ενσωματωμένα συστήματα αναφέρεται στην ύπαρξη κάποιου επεξεργαστή, ο οποίος είναι μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος και εκτελεί ένα συγκεκριμένο έργο, στο οποίο ο χρήστης έχει λίγη ή καθόλου πρόσβαση για να αλλάξει το πρόγραμμα ή την λειτουργία του συστήματος[3]. Ένα ενσωματωμένο σύστημα μπορεί να είναι ένας κοινός υπολογιστής ή ένα μικροελεγκτής.

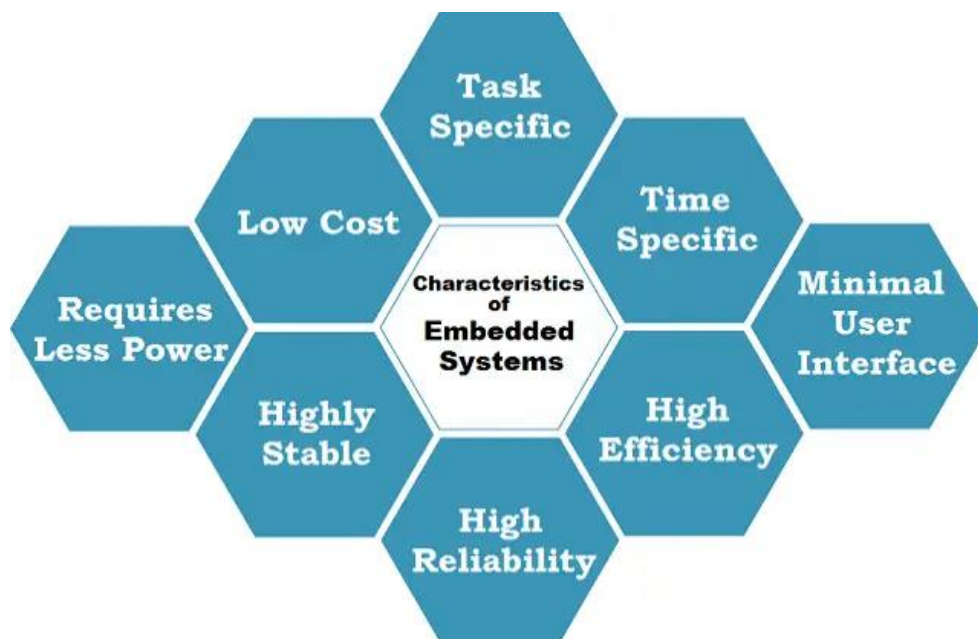
Τα ενσωματωμένα σύστημα είναι ένα συστήματα ειδικού σκοπού τα οποία επιτελούν μία προκαθορισμένη εργασία και έχουν κάποια βασικά χαρακτηριστικά[3],[4]. Αρχικά, βασική είναι η ύπαρξη ενός τουλάχιστον μικροελεγκτή, καθώς και το περιφερειακών συσκευών για είσοδο και έξοδο, το software και hardware που απαιτείται για να είναι λειτουργικό. Ο πυρήνας ενός ενσωματωμένου συστήματος αποτελείται από έναν ή περισσότερους μικροεπεξεργαστές ή μικροελεγκτές οι οποίοι είναι προγραμματισμένοι έτσι ώστε να



τρέχουν μία συγκεκριμένη software εφαρμογή με την κατάλληλη παραμετροποίηση. Επιπλέον χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων είναι το μικρό φυσικό μέγεθος, το χαμηλό κόστος και η ικανοποίηση διαφόρων περιορισμών, όπως η μικρή χρονική απόκριση, η αξιοπιστία τους και η αποδοτικότητα.

Βασικός στόχος των σχεδιαστών μέσα από την «εξειδίκευση» των ενσωματωμένων συστημάτων είναι βελτιστοποίηση τους έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές τους, ενώ ταυτόχρονα να υπάρχουν κέρδη σε επίπεδο μεγέθους, κόστους, χρόνου εκτέλεσης ή κατανάλωσης ισχύος. Σκοπός λοιπόν αυτών των συστημάτων είναι να εκτελούν σωστά και αποδοτικά την εφαρμογή για την οποία έχουν σχεδιαστεί.

Όσον αφορά τώρα στις αρχιτεκτονικές οι οποίες χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό ενσωματωμένων συστημάτων, ενδεικτικά αναφέρεται ότι ορισμένες από αυτές είναι οι: ARM, MIPS, PowerPC και X86[3].



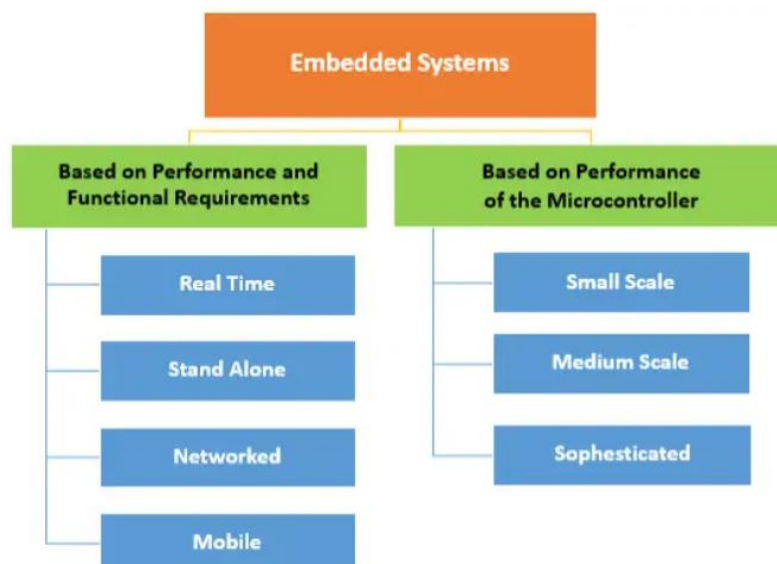
Σχήμα 2: Τα χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων[4].

Τα ενσωματωμένα συστήματα ελέγχουν πολλές από τις κοινές καθημερινές συσκευές που χρησιμοποιούμε και αποτελούν την ταχύτερη αναπτυσσόμενη βιομηχανία σήμερα, καθώς διεισδύουν παντού. Επίσης, συνιστούν τη βάση της τεχνολογίας που αναφέρεται ως διαδίκτυο πραγμάτων (Internet of Things).

Τα ενσωματωμένα συστήματα κατηγοριοποιούνται σε δύο βάσεις, με βάση την απόδοση του μικροελεγκτή και με βάση τις επιδόσεις και τις λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος[5]. Στο Σχήμα 2 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων.

Υπάρχουν τρεις τύποι ενσωματωμένων συστημάτων, με βάση τους μικροελεγκτές: τα ενσωματωμένα συστήματα μικρής κλίμακας, που χρησιμοποιούν μικροελεγκτές 8 ή 16 bit, τα ενσωματωμένα συστήματα μεσαίας κλίμακας, που χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους μικροελεγκτές 16 ή 32 bit, τα προηγμένα ενσωματωμένα συστήματα, με πολλαπλούς μικροελεγκτές 32 ή 62 bit.

Αντ' αυτού τα ενσωματωμένα συστήματα με βάση τις επιδόσεις και τις λειτουργικές τους απαιτήσεις, έχουν τις εξής κατηγορίες: τα αυτόνομα ενσωματωμένα συστήματα, που λειτουργούν ανεξάρτητα, καθώς περιέχουν όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα, τα ενσωματωμένα συστήματα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία δίνουν προτεραιότητα στην ταχύτητα απόκρισης σε περιστάσεις που απαιτούν ακρίβεια, τα ενσωματωμένα συστήματα δικτύου, τα οποία είναι συνδεδεμένα σε έναν κεντρικό διανομέα που ελέγχει τις ηλεκτρονικές συσκευές με τη βοήθεια LAN, WAN ή διαδικτύου, τα κινητά ενσωματωμένα συστήματα, που περιέχονται σε σύγχρονα κινητά τηλέφωνα και άλλες ψηφιακές συσκευές αυτής της λειτουργίας.



Σχήμα 3: Είδη ενσωματωμένων συστημάτων[4].

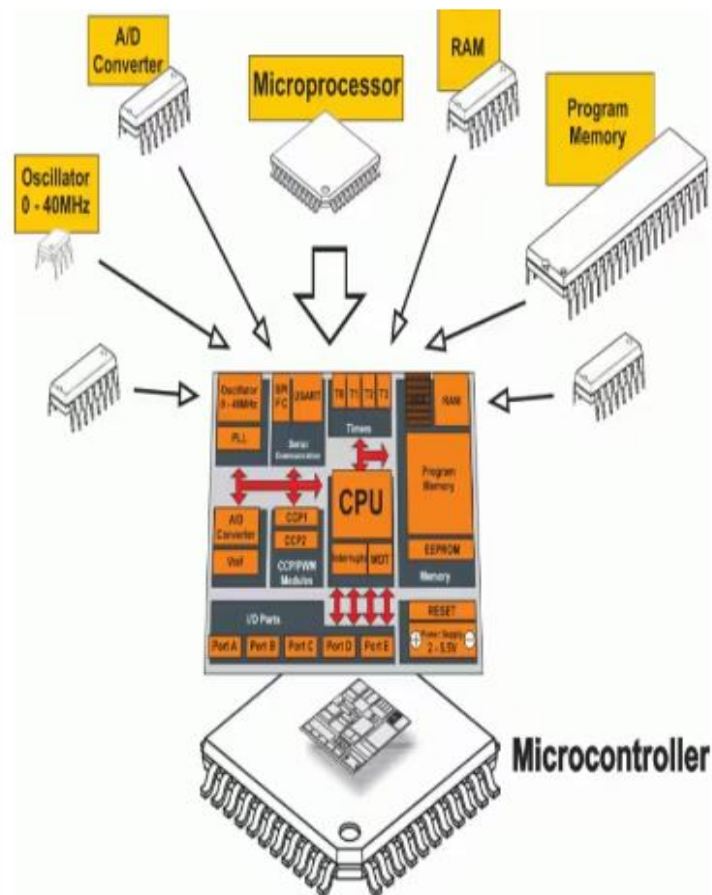
## 2.3 ΜΙΚΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΕΣ - ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΕΣ

Ένας μικροελεγκτής είναι ουσιαστικά ένας μικρός υπολογιστής σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα[6],[7]. Περιέχει μία ή περισσότερες CPU (πυρήνες επεξεργαστή) μαζί με τη μνήμη και προγραμματιζόμενες περιφερειακές συσκευές εισόδου/εξόδου. Αυτές οι συσκευές είναι βελτιστοποιημένες για να μπορούν να ενσωματωθούν σε εφαρμογές που απαιτούν τόσο λειτουργικότητα επεξεργασίας όσο και ευέλικτη αλληλεπίδραση με ψηφιακά, αναλογικά ή ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα. Λόγω του μικρού μεγέθους, της ευελιξίας και της οικονομικής τους αποδοτικότητας, οι μικροελεγκτές είναι παρόντες σε διάφορες εφαρμογές, από απλές συσκευές όπως θερμοστάτες έως πολύπλοκα συστήματα όπως ρομπότ και βιομηχανικοί αυτοματισμοί.

Οι μικροελεγκτές λειτουργούν με βάση έναν κύκλο ανάκτησης-αποκωδικοποίησης-εκτέλεσης, προγραμματισμένων εντολών από τον χρήστη για τον έλεγχο και την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του[8]. Ο μικροελεγκτής λαμβάνει εξωτερικά σήματα μέσω των περιφερειακών I/O του, όπως αισθητήρες, κουμπιά ή διεπαφές επικοινωνίας. Αυτά τα σήματα μπορεί να είναι σε διάφορες μορφές, συμπεριλαμβανομένων ψηφιακών (on/off) ή αναλογικών (συνεχή επίπεδα τάσης). Η CPU εντός του μικροελεγκτή ερμηνεύει τα λαμβανόμενα σήματα με βάση τις προγραμματισμένες οδηγίες. Αυτή η επεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει υπολογισμούς, χειρισμό δεδομένων, λήψη αποφάσεων ή εφαρμογή λογικής ελέγχου. Με βάση τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, ο μικροελεγκτής παράγει σήματα εξόδου μέσω των περιφερειακών I/O του. Αυτές οι έξοδοι μπορούν να ενεργοποιήσουν ενεργοποιητές όπως κινητήρες, LED ή να μεταδώσουν δεδομένα σε άλλες συσκευές.

Όσον αφορά τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά ενός μικροελεγκτή περιλαμβάνονται τα εξής[7], [8],[9]: Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), η οποία είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία και την εκτέλεση εντολών. Εκτελεί αριθμητικές και λογικές πράξεις, ελέγχει τη ροή των δεδομένων και διαχειρίζεται την εκτέλεση του προγράμματος. Η μνήμη, όπου υπάρχουν δύο τύποι, η RAM (Random Access Memory): πτητική μνήμη που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση προσωρινών δεδομένων κατά την εκτέλεση του προγράμματος και η ROM (Read-Only Memory): μη πτητική μνήμη που αποθηκεύει τον κώδικα του προγράμματος και τα βασικά δεδομένα που παραμένουν αμετάβλητα μετά τους κύκλους τροφοδοσίας. Το ρολόι, το οποίο παρέχει το σήμα χρονισμού με σκοπό τη συγχρονισμένη

λειτουργία διαφόρων εξαρτημάτων εντός του μικροελεγκτή. Τα περιφερειακά, όπως χρονόμετρα, μετρητές, μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC), μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (DAC), GPIO (Είσοδος/Εξοδος γενικού σκοπού), διεπαφές επικοινωνίας (UART, SPI, I2C) και άλλα. Αυτά τα περιφερειακά επεκτείνουν τις δυνατότητες του μικροελεγκτή και του επιτρέπουν να διασυνδέεται με άλλα εξαρτήματα και αισθητήρες. Ο δίαυλος δεδομένων, ο οποίος μεταφέρει πληροφορίες μεταξύ της CPU και της μνήμης και τον δίαυλος διευθύνσεων ο οποίος καθορίζει τη θέση στη μνήμη.



Σχήμα 4: Τα μέρη ενός μικροελεγκτή[8].

### 2.3.1 LoRa32

Το LoRa32 είναι μια πλακέτα ανάπτυξης που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT)[10]. Το LoRa32 αναφέρεται σε μια σειρά πλακετών ανάπτυξης που κατασκευάζονται από διάφορες εταιρείες. Αυτές οι πλακέτες μοιράζονται μια κοινή βασική λειτουργία: την ενσωμάτωση ενός μικροελεγκτή ESP32, που προσφέρει ισχύ κατά την επεξεργασία, συνδεσιμότητα Wi-Fi και Bluetooth, με ένα τσιπ LoRa SX1276,

επιτρέποντας την ασύρματη επικοινωνία μεγάλου εύρους, μέσω του πρωτοκόλλου LoRa, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το εύρος συχνοτήτων διαφέρει ανάλογα με το μοντέλο και την γεωγραφική περιοχή που θα χρησιμοποιηθεί, προσφέροντας συνήθως επιλογές των 868MHz(Ευρώπη), 915MHz(Βόρεια Αμερική, Αυστραλία και τμήματα της Ασίας) και 433MHz(Νότια Αμερική και Ασία).

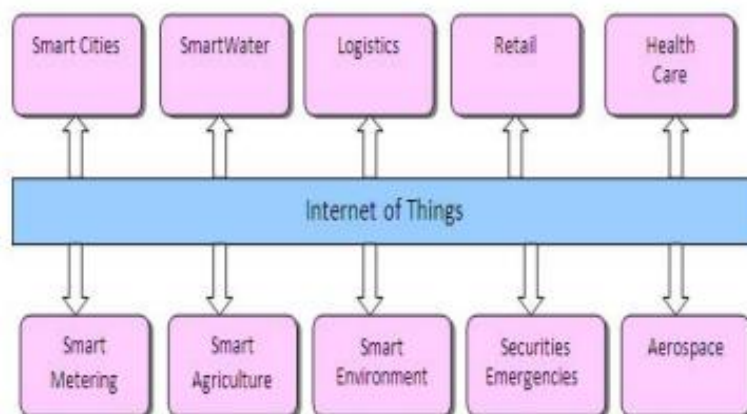
### 2.3.2 Internet of Things



Σχήμα 5: Διαδίκτυο των Πραγμάτων[11].

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων(Internet of things), όπως υποδηλώνει το όνομα του, είναι η συνδεσιμότητα των καθημερινών συσκευών μεταξύ τους[11]. Με την πρόοδο της τεχνολογία, πολλές συσκευές χρησιμοποιούν αισθητήρες, ενεργοποιητές, ενσωματωμένα συστήματα και υπολογιστικό νέφος. Με απλά λόγια, το Διαδίκτυο των πραγμάτων επιτρέπει στις συσκευές να αλληλεπιδρούν και να συντονίζονται μεταξύ τους, μειώνοντας έτσι την ανθρώπινη παρέμβαση στις βασικές καθημερινές εργασίες. Έτσι, εξοικονομείται χρόνος και οι καθημερινές εργασίες του ανθρώπου γίνονται ευκολότερες . Το IoT δίνει τη δυνατότητα σε φυσικά αντικείμενα να βλέπουν, να ακούν, να σκέφτονται και να εκτελούν δουλειές βάζοντάς τα να επικοινωνούν, να μοιράζονται πληροφορίες και να συντονίζονται κατά τις αποφάσεις. Ένα δίκτυο από οι ετερογενείς συσκευές/εφαρμογές έχουν το δικό τους σύνολο από προκλήσεις. Τόσο η επικοινωνία μεταξύ αυτών των συσκευών όσο και των σχετικών υπηρεσιών, αναμένεται να συμβεί οποτεδήποτε, οπουδήποτε, και γίνεται συχνά με ασύρματο, αυτόνομο και προσχεδιασμένο τρόπο.

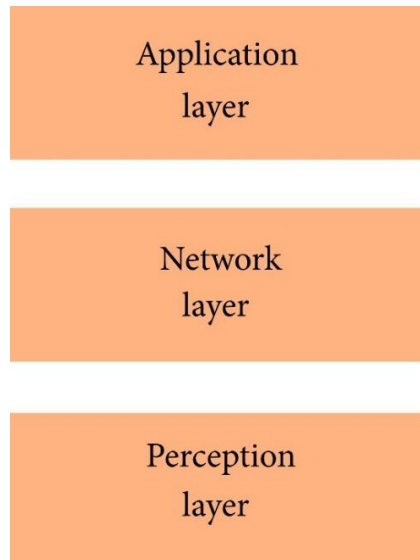
Μέσω της χρήσης ευφυών αλγορίθμων λήψης αποφάσεων σε εφαρμογές λογισμικού, μπορούν να δοθούν κατάλληλες γρήγορες απαντήσεις στη φυσική οντότητα με βάση τις πιο πρόσφατες πληροφορίες που συλλέγονται για τις φυσικές οντότητες και την εξέταση προτύπων στα ιστορικά δεδομένα, είτε για την ίδια οντότητα είτε για παρόμοιες οντότητες[12]. Το γεγονός αυτό ανοίγει μία νέα διάσταση της έννοιας του IoT σε τομείς όπως η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, οι μεταφορές, η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία, τα έξυπνα περιβάλλοντα (σπίτια, κτίρια, υποδομές), η ενέργεια, η άμυνα, η γεωργία, το λιανικό εμπόριο και άλλα. Το όραμα του IoT είναι να χρησιμοποιεί έξυπνες τεχνολογίες για την διασύνδεση των πραγμάτων οποιαδήποτε στιγμή, οπουδήποτε και για οτιδήποτε. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχει εξελιχθεί σε τεράστιο βαθμό κατά την τελευταία δεκαετία και το IoT εξακολουθεί να αναδύεται ως τάση τόσο στον ακαδημαϊκό χώρο όσο και στη βιομηχανία.



Σχήμα 6: Τομείς εφαρμογών του IoT[12].

Ένα πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση του IoT είναι ότι οι υπηρεσίες γίνονται πολύ πιο ρευστές, αποκεντρωμένες και πολύπλοκες[11]. Κατά συνέπεια, τα εμπόδια στην ασφάλεια των IoT γίνονται πολύ πιο περίπλοκα. Η αρχιτεκτονική του IoT, όπως και συνέβη και με το διαδίκτυο, θα αναπτυχθεί με εξελικτικό τρόπο από μια ποικιλία χωριστών συνεισφορών, παρά από ένα μεγάλο σχέδιο. Η ασφάλεια είναι μία μεγάλη ανησυχία κατά την ενασχόληση με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Οι περισσότερες συσκευές με δυνατότητα IoT δεν είναι πολύ ασφαλείς και μπορεί να είναι δώσουν εύκολα πρόσβαση σε τρίτους. Επομένως, υπάρχει σοβαρή ανάγκη για τυποποίηση και διασφάλιση του απορρήτου του χρήστη.

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική των IoT, δεν υπάρχει μία συγκεκριμένη μοναδική δομή, καθώς έχουν προταθεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές από διαφορετικούς ερευνητές[13]. Η πιο βασική αρχιτεκτονική είναι η αρχιτεκτονική των τριών επιπέδων, η οποία περιλαμβάνει το επίπεδο αντίληψης (perception layer), από το επίπεδο δικτύου (network layer) και από το επίπεδο εφαρμογής (application layer).



*Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική IoT τριών επιπέδων[13].*

Το επίπεδο αντίληψης είναι το φυσικό επίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει τους αισθητήρες για την ανίχνευση και τη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον, προσδιορίζει κάποιες φυσικές παραμέτρους και ταυτοποιεί άλλα έξυπνα αντικείμενα στο περιβάλλον.

Το επίπεδο δικτύου παίζει σημαντικό ρόλο στην ασφαλή μεταφορά και διατήρηση των ευαίσθητων πληροφοριών από τους αισθητήρες έως το σύστημα επεξεργασίας μέσω 3G, 4G, UMTS, Wi-Fi, WiMAX, RFID, υπέρυθρες, δορυφορικές κ.λπ. ανάλογα με τον τύπο του εκάστοτε αισθητήρα. Ως εκ τούτου, αυτό το επίπεδο είναι κυρίως υπεύθυνο για μεταφέροντας τις πληροφορίες από το επίπεδο αντίληψης στο επίπεδο εφαρμογής.

Το επίπεδο εφαρμογής είναι υπεύθυνο για την παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών στον χρήστη στην εκάστοτε εφαρμογή. Οι εφαρμογές στις οποίες μπορεί να αναπτυχθεί το Internet of Things, μπορούν να είναι τα έξυπνα σπίτια, η έξυπνη υγεία, τα έξυπνα αυτοκίνητα, τα έξυπνα γυαλιά, οι έξυπνες μεταφορές και άλλα.

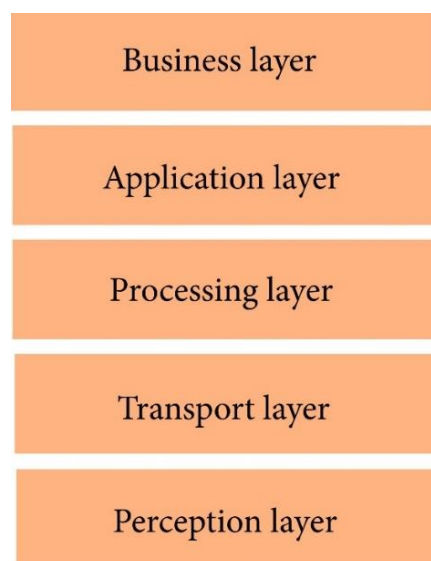
Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων καθορίζει την κύρια ιδέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αλλά δεν αρκεί για την έρευνα πάνω στα συστήματα IoT, καθώς η έρευνα συχνά

επικεντρώνεται με λεπτομέρεια στις διάφορες πτυχές του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Γι' αυτό, έχουν αναπτυχθεί πολλές περισσότερες και πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Μία από αυτές είναι η αρχιτεκτονική των πέντε επιπέδων, η οποία περιλαμβάνει το επιχειρηματικό επίπεδο (business layer), το επίπεδο εφαρμογής (application layer), το επίπεδο επεξεργασίας (processing layer), το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) και το επίπεδο αντίληψης (perception layer). Ο ρόλος των επιπέδων αντίληψης και εφαρμογής είναι ίδιος με την αρχιτεκτονική με τρία επίπεδα.

Το επίπεδο μεταφοράς μεταφέρει τα δεδομένα του αισθητήρα από το επίπεδο αντίληψης στο επίπεδο επεξεργασίας και αντίστροφα μέσω δικτύων όπως ασύρματα, 3G, LAN, Bluetooth, RFID και NFC.

Το επίπεδο επεξεργασίας είναι επίσης γνωστό ως στρώμα ενδιάμεσου λογισμικού. Αποθηκεύει, αναλύει και επεξεργάζεται τεράστιες ποσότητες δεδομένων που προέρχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Μπορεί να διαχειριστεί και να παρέχει ένα ποικίλο σύνολο υπηρεσιών στα κατώτερα στρώματα. Χρησιμοποιεί πολλές τεχνολογίες, όπως βάσεις δεδομένων, υπολογιστικό νέφος και ενότητες επεξεργασίας μεγάλων δεδομένων.

Το επιχειρηματικό επίπεδο διαχειρίζεται ολόκληρο το σύστημα IoT, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών, των μοντέλων επιχειρήσεων και κέρδους και του απορρήτου των χρηστών.

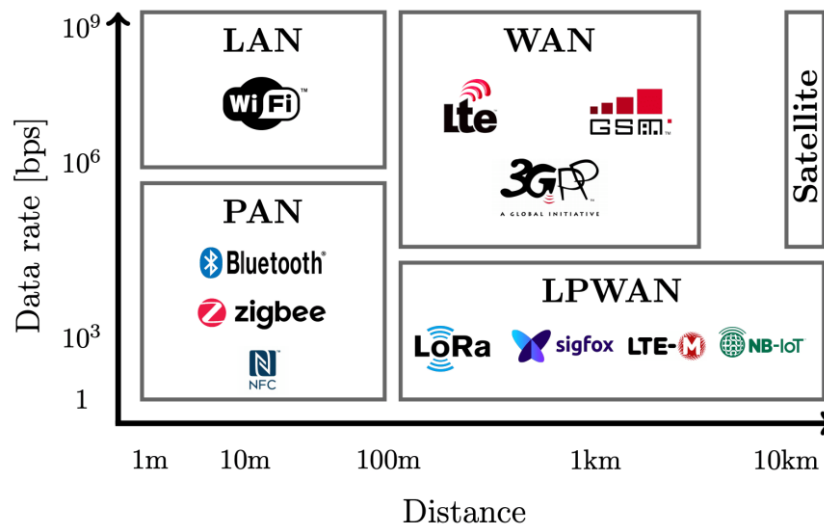


Σχήμα 8: Αρχιτεκτονική IoT πέντε επιπέδων[13].



### 2.3.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Η σωστή λειτουργία των συστημάτων IoT, απαιτεί την ασφαλή και αξιόπιστη διάδοση των δεδομένων που χρειάζεται κάθε στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των πρωτόκολλων επικοινωνίας δικτύου. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας ποικίλουν ανάλογα με το εύρος κάλυψης, το κόστος, την κατανάλωση ισχύος κτλ[14]. Το εκάστοτε πρωτόκολλο επικοινωνίας μίας εφαρμογής διαλέγεται με βάση ανάγκες της.



Σχήμα 9: Πρωτόκολλα επικοινωνίας[15].

Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας ορίζεται ως ένα σύνολο κανόνων που συμφωνούν αμοιβαία οι δύο εμπλεκόμενες πλευρές για τη διευκόλυνση της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ τους[16]. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας αποτελεί, επομένως, ένα σύνολο κανόνων στα οποία βασίζεται η επικοινωνία συσκευών σε ένα δίκτυο. Αυτοί οι κανόνες καθορίζουν τη μορφή, το χρονισμό και τη σειρά της μετάδοσης πληροφοριών στο δίκτυο. Επιπλέον, προβαίνουν σε έλεγχο και διόρθωση σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πληροφοριών. Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα οποία συχνά προκαλούν σύγχυση στους χρήστες. Μερικά από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα επικοινωνίας στα συστήματα IoT είναι τα MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), CoAP (Constrained Application Protocol), HTTP/HTTPS (Hypertext Transfer Protocol/Secure), AMQP (Advanced Message Queuing Protocol), DDS (Data Distribution Service), Bluetooth and BLE (Bluetooth Low Energy), Zigbee, LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), NFC (Near Field Communication), Thread. Παρακάτω θα αναλυθούν τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία.

### 2.3.3.1 Wi-Fi

Το Wi-Fi ανήκει στην οικογένεια των πρωτοκόλλων ασύρματου δικτύου, βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.11, και χρησιμοποιείται για την τοπική σύνδεση στο δίκτυο και την πρόσβαση στο διαδίκτυο για κοντινές ψηφιακές συσκευές μέσω ραδιοκυμάτων[17]. Οι κύριες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων στις οποίες λειτουργεί το Wi-Fi είναι οι 2,4 GHz και 5 GHz, ενώ τα νεότερα πρότυπα επεκτείνονται και στη ζώνη των 6 GHz.

Οι ζώνες αυτές χωρίζονται σε κανάλια, όπου κάθε κανάλι μπορεί να υποστηρίξει έναν πομπό τη φορά. Η εμβέλεια του Wi-Fi ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες, φτάνοντας έως 20 μέτρα σε εσωτερικούς χώρους και έως 150 μέτρα σε εξωτερικούς χώρους. Η χρήση τεχνολογιών όπως MIMO (Multiple Input Multiple Output) και Beamforming έχει συμβάλει στην αύξηση της εμβέλειας και της απόδοσης του Wi-Fi.

Με την πάροδο του χρόνου, η ταχύτητα και η αποδοτικότητα του Wi-Fi έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Το πρότυπο Wi-Fi 6 (802.11ax) επιτρέπει ταχύτητες έως 9,6 Gbit/s με κατάλληλο εξοπλισμό σε κοντινές αποστάσεις, ενώ το επερχόμενο Wi-Fi 7 (802.11be) υπόσχεται ακόμη υψηλότερες ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση.

Επιπλέον, το Wi-Fi έχει ενσωματωθεί σε μια πληθώρα συσκευών, από smartphones και laptops μέχρι έξυπνες οικιακές συσκευές και βιομηχανικά συστήματα, καθιστώντας το αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής μας ζωής και των σύγχρονων υποδομών δικτύων.



Σχήμα 10: Λογότυπο Wi-Fi[17].

### 2.3.3.2 Bluetooth

Το Bluetooth είναι ένα σημαντικό πρωτόκολλο για εφαρμογές IoT, ιδιαίτερα όταν δεν απαιτείται η μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων[15]. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που επιτρέπει την ασύρματη μετάδοση δεδομένων στη συχνότητα των 2,4 GHz.

Σχεδιάστηκε για εφαρμογές που απαιτούν μικρή εμβέλεια, χαμηλό εύρος ζώνης και μικρές καθυστερήσεις.

Όπως και το Wi-Fi, το Bluetooth ανήκει στην κατηγορία WPAN (Wireless Personal Area Network) και έχει μικρό εύρος διάδοσης, που κυμαίνεται από 10 έως 100 μέτρα. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι περίπου 1 έως 3 Mbps. Το βασικότερο πλεονέκτημά του είναι η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, καθιστώντας το ιδανικό για συσκευές που απαιτούν μακροχρόνια λειτουργία με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση.

Το Bluetooth χρησιμοποιείται ευρέως σε μια ποικιλία συσκευών και εφαρμογών, όπως ασύρματα ακουστικά, fitness trackers, έξυπνα ρολόγια, και συστήματα αυτοκινήτων. Οι νεότερες εκδόσεις του, όπως το Bluetooth 5 και το Bluetooth Low Energy (BLE), έχουν βελτιώσει την εμβέλεια, την ταχύτητα και την αξιοπιστία, καθιστώντας το ακόμα πιο αποδοτικό για χρήση σε σύγχρονες IoT εφαρμογές.



*Σχήμα 11: Λογότυπο Bluetooth[18].*

### 2.3.3.3 LoRa

Το LoRa είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που ανήκει στην κατηγορία των LPWA (low-power, wide-area) και σκοπός του είναι η ασύρματη σύνδεση συσκευών στο διαδίκτυο σε περιφερειακά, εθνικά ή παγκόσμια δίκτυα [19], [20], . Ο ρυθμός των δεδομένων μπορεί να φτάσει από 0,3kbps έως 50kbps. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η εμβέλεια καθώς η τεχνολογία LoRa μπορεί να μεταδώσει δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις, συνήθως 10-15 χιλιόμετρα σε αγροτικές περιοχές και 2-5 χιλιόμετρα σε αστικά περιβάλλοντα. Αυτό την καθιστά ιδανική για δίκτυα ευρείας περιοχής και εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Παράλληλα, οι συσκευές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία LoRa καταναλώνουν πολύ λίγη ενέργεια, επιτρέποντας σε συσκευές με μπαταρία να λειτουργούν για χρόνια χωρίς να χρειάζονται αντικατάσταση. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές IoT όπου οι συσκευές συνήθως αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες ή δύσκολες τοποθεσίες.

Το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας των δικτύων LoRa είναι σχετικά χαμηλό σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η τεχνολογία LoRa λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, εξαλείφοντας την ανάγκη για ακριβά δικαιώματα. Άλλο ένα πλεονέκτημα του LoRa είναι ότι μπορεί να υποστηρίξει εκατομμύρια συσκευές σε ένα μόνο δίκτυο. Αυτή η κλιμακωσιμότητα το καθιστά κατάλληλο για εκτεταμένη χρήση στα IoT, όπως έξυπνες πόλεις, γεωργία και βιομηχανικές εφαρμογές. Τα δίκτυα LoRa προσφέρουν ευελιξία, αφού μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν με υπάρχουσες υποδομές και άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας, παρέχοντας ευελιξία στην ανάπτυξη και διαχείριση.

Το πρωτόκολλο LoRa είναι ένα ασφαλές περιβάλλον για τα δεδομένα διότι περιλαμβάνει κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο, αμοιβαία αυθεντικοποίηση και προστασία ακεραιότητας για να εξασφαλίσει ασφαλή επικοινωνία μεταξύ συσκευών και δικτύου. Η διαμόρφωση LoRa παρέχει ισχυρή αντίσταση στις παρεμβολές και την εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών. Αυτό εξασφαλίζει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ακόμα και σε περιβάλλοντα με υψηλά επίπεδα ραδιοσυχνοτικών παρεμβολών.



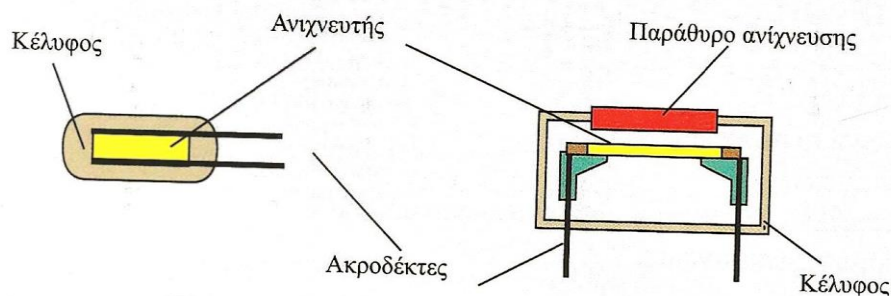
*Σχήμα 12: Λογότυπο LoRa[21].*

## 2.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μέτρηση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων και διατάξεων με υψηλή θερμική αγωγιμότητα[22]. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας διαθέτει ακροδέκτες που πρέπει να έχουν την ελάχιστη δυνατή ηλεκτρική αντίσταση και θερμική αγωγιμότητα, ώστε να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις. Οι ακροδέκτες λειτουργούν ως διεπαφή και συνδέονται με το αισθητήριο στοιχείο και το υποστηρικτικό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Το αισθητήριο στοιχείο τοποθετείται εντός ενός προστατευτικού κελύφους, το οποίο πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και να προστατεύει από παράγοντες που μπορούν να αλλοιώσουν τις μετρήσεις, διασφαλίζοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές μέτρησης θερμοκρασίας εκμεταλλεύονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Αυτές οι μεταβολές μπορεί να περιλαμβάνουν αλλαγές στις διαστάσεις, στην ωμική αντίσταση, στα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών, στην ακτινοβολούμενη ενέργεια, καθώς και στην παραγωγή διαφοράς δυναμικού σε ορισμένα μέταλλα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας.

Παρακάτω θα αναλυθούν διάφοροι τύποι ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμοκρασίας όπως τα Θερμοζεύγη, αισθητήρες που παράγουν ηλεκτρική τάση ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων, οι αντιστάσεις θερμοκρασίας (RTD) που είναι αισθητήρες που βασίζονται στην αλλαγή της ωμικής αντίστασης με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, τα θερμίστορ, αισθητήρες που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς των οποίων η αντίσταση αλλάζει σημαντικά με τη θερμοκρασία, οι αισθητήρες ημιαγωγών που είναι αισθητήρες που εκμεταλλεύονται τις θερμικές ιδιότητες των ημιαγωγών για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC) που είναι εξειδικευμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα σχεδιασμένα για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας και τέλος οι αισθητήρες υπέρυθρων (IR) που είναι αισθητήρες που μετρούν την εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία από τα αντικείμενα για την εκτίμηση της θερμοκρασίας τους.



Σχήμα 13: Αισθητήριο στοιχείο και επαφές σε κέλυφος[22].

#### 2.4.1 Θερμοζεύγη

Η λειτουργία των θερμοζευγών βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck. Σύμφωνα με το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, θερμαίνοντας ένα μέταλλο που οι δύο άκρες του βρίσκονται σε διαφορετικά περιβάλλοντα ( $T_2 > T_1$ ) αναπτύσσεται μικρή διαφορά δυναμικού σύμφωνα με την εξίσωση:

$$dV = S(T) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

όπου  $S(T)$  ο θερμοηλεκτρικός συντελεστής ή συντελεστής Seebeck του υλικού (Volts/K) [22].

Κατά τη διάρκεια του φαινομένου τα ηλεκτρόνια του μεταλλικού αγωγού με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία  $T_2$  διαχέονται προς της περιοχή με τη μικρότερη θερμοκρασία λόγω της υψηλότερης ενεργειακής στάθμης.

Τα θερμοζεύγη είναι το ζεύγος δύο μεταλλικών αγωγών, το οποίο για να είναι αξιοποιήσιμο πρέπει να αποτελείται από ανόμοια μέταλλα. Με την επαφή των μετάλλων αναπτύσσεται το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο με σκοπό της μέτρηση της θερμοκρασίας. Η τελευταία επιτυγχάνεται λόγω της συσσώρευσης ηλεκτρικών φορτίων εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων που καθιστά ικανή τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού.

Τροφοδοτώντας με τάση τα άκρα ενός θερμοζεύγους, στο άκρο της θερμής επαφής θα εμφανιστεί θερμική ενέργεια, ενώ στο άκρο της ψυχρής επαφής θα απορριφθεί θερμότητα σύμφωνα με το φαινόμενο Peltier και τη σχέση:

$$Q = \Pi_{xy} \cdot I \quad (2.2)$$

όπου  $\Pi_{xy}$ : ο συντελεστής Peltier για το θερμοζεύγος x,y και  $I$ : η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το θερμοζεύγος.

Υπάρχουν διάφορα μέταλλα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των θερμοζευγών και αναλόγως με τις φυσικές του ιδιότητες προσδιορίζονται και τα χαρακτηριστικά των θερμοζευγών. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών των διαφορετικών τύπων θερμοζευγών.

*Πίνακας 1: Εύρος τιμών θερμοκρασίας για κάθε τύπο θερμοζεύγους [22].*

Τύπος	Υλικό	Εύρος θερμοκρασιών	Δυναμικό ανά °C
<b>T</b>	Χαλκός – Κωνσταντάνη	-200 °C έως +350 °C	40 mV/°C
<b>J</b>	Σίδηρος – Κωνσταντάνη	95 °C έως 760 °C	50 μV/°C
<b>K</b>	Chromel – Alumel	95 °C έως 1260 °C	40 μV/°C
<b>E</b>	Chromel – Κωνσταντάνη	95 °C έως 900 °C	68 μV/°C

<b>R</b>	Ρόδιο 13% + Πλατίνα 87%	870 °C έως 1450 °C	11.5 μV/°C
<b>S</b>	Ρόδιο 10% + Πλατίνα 90%	980 °C έως 1450 °C	10 μV/°C

#### 2.4.2 Αισθητήρες Τύπου Αντίστασης ή RTD

Είναι γνωστό ότι η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων αλλάζει με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται και η ηλεκτρική αντίσταση του μετάλλου, ενώ όσο μειώνεται η θερμοκρασία μειώνεται και η ηλεκτρική αντίσταση του μετάλλου [22]. Η μεταβολή αυτή γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση της ηλεκτρικής αντίστασης:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

όπου  $\rho$  : η ειδική αντίσταση του υλικού,  $l$ : το μήκος του αγωγού και  $A$ : η επιφάνεια του. Η ειδική αντίσταση ενός αγωγού σχετίζεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας με την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \rho_0 [1 + a(T - T_0)] \quad (2.4)$$

όπου  $\rho$ : η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία  $T$ ,  $\rho_0$ : η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία  $T_0$  (0 ή 20°C),  $a$ : ο θερμικός συντελεστής του υλικού της ηλεκτρικής αντίστασης [22].

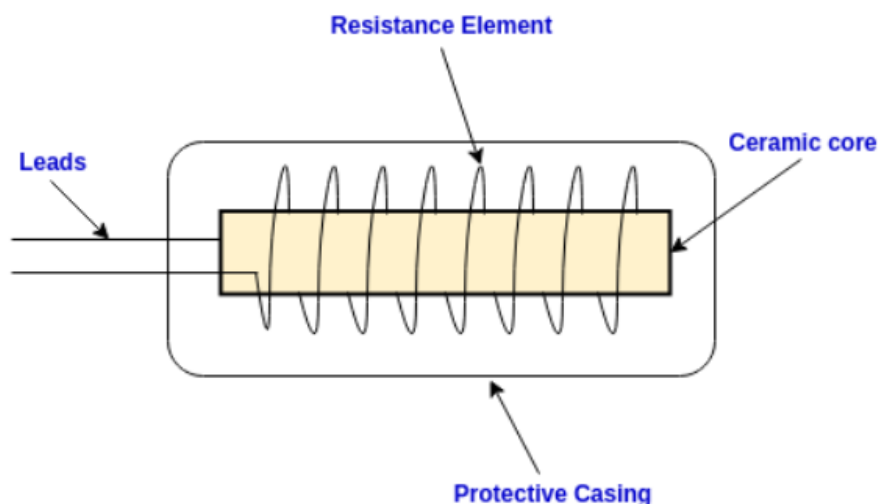
Σε αντίθεση με τα θερμοζεύγη, τα οποία μετρούν θερμοκρασίες άνω των 500°C, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις μετρούν θερμοκρασίες κάτω των 500°C [23]. Αυτό συμβαίνει διότι τα θερμοζεύγη δεν είναι ικανά να μετρήσουν με ακρίβεια θερμοκρασίες κάτω των 500°C διότι παρουσιάζουν λάθη στις μετρήσεις λόγω του μικρού θερμικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το μεγάλου θορύβου, αλλά και άλλων δυσκολιών.

Χρησιμοποιούνται διάφορα μέταλλα στην κατασκευή ανιχνευτών θερμοκρασίας ηλεκτρικής αντίστασης ή RTD (Resistance Temperature Detectors ή Resistance Thermal Devices) ανάλογα με τις τιμές θερμοκρασίας που πρόκειται να ανιχνευτούν, με πιο συνηθισμένα την πλατίνα και το χαλκό [22], [23]. Η πλατίνα ωστόσο αποτελεί την καλύτερη επιλογή λόγω κάποιων χαρακτηριστικών της, όπως ότι είναι χημικά αδρανής, ανθεκτική στην

οξειδωση αλλά και του εύρους τιμών θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργήσει [22]. Όταν για τον αισθητήρα χρησιμοποιείται ως μέταλλο η πλατίνα, τότε αυτός καλείται θερμόμετρο αντίστασης πλατίνας ή PRT (Platinum Resistance Thermometer). Από την άλλη ο χαλκός είναι φθηνότερος από την πλατίνα διαθέτει υψηλή καθαρότητα, καλή αναπαραγωγιμότητα, η γραμμικότητά του είναι δεύτερη μετά την πλατίνα, αλλά έχει μεγαλύτερη ευαισθησία από την αντίσταση πλατίνας. Το μειονέκτημα του χαλκού είναι ότι έχει χαμηλή ειδική αντίσταση και μπορεί να οξειδωθεί εύκολα, γι' αυτό και χρησιμοποιείται μόνο σε χαμηλές θερμοκρασίες και σε μετρήσεις χωρίς υγρασία και διαβρωτικά [23].

Η κατασκευή αυτού του τύπου αισθητήρων περιλαμβάνει τη δημιουργία σπειρωμάτων από υψηλής ποιότητας σύρμα, τα οποία τυλίγονται γύρω από μη αγώγιμο υλικό. Οι ακροδέκτες του αισθητήρα τοποθετούνται στο πίσω μέρος του και ένα προστατευτικό κέλυφος από μεταλλικό ή κεραμικό υλικό προστίθεται για να προστατεύσει το αισθητήριο στοιχείο από διαβρωτικούς παράγοντες[22]. Αυτή η διάταξη RTD απεικονίζεται στο Σχήμα 14.

Η μέτρηση της τιμής ενός αισθητήρα RTD μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο σταθερού ρεύματος ή σταθερής τάσης. Για πιο ακριβείς μετρήσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γέφυρα τύπου Wheatstone με τρεις ή τέσσερις ακροδέκτες. Γενικά, τα στοιχεία RTD επιδεικνύουν έντονη γραμμικότητα και σταθερότητα.



Σχήμα 14: Διάταξη RTD[24].

Οι αισθητήρες RTD (Resistance Temperature Detectors) διακρίνονται για την αξιοπιστία και την ακρίβειά τους στη μέτρηση της θερμοκρασίας. Η χρήση υψηλής ποιότητας σύρματος διασφαλίζει την ανθεκτικότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων, ενώ το προστατευτικό



κέλυφος προστατεύει από περιβαλλοντικούς παράγοντες που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα. Επιπλέον, η μέθοδος γέφυρας Wheatstone επιτρέπει ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις, ιδιαίτερα σημαντικές σε βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές[23].

### 2.4.3 Θερμίστορ

Τα θερμίστορ είναι ένας τύπος αντίστασης, η τιμή της οποίας αλλάζει με την αλλαγή της θερμοκρασίας. Τα θερμίστορ αποτελούνται από ημιαγωγικά υλικά που έχουν υποστεί επεξεργασία με οξείδια χρωμίου, κοβαλτίου, σιδήρου, μαγγανίου και νικελίου [22]. Έχουν συνήθως μικρό μέγεθος, ποικίλουν σε σχήματα και έχουν μικρούς χρόνους απόκρισης. Τα θερμίστορ έχουν αρνητικό θερμικό συντελεστή (Negative Temperature Coefficient, NTC), αλλά με τις κατάλληλες μορφές προσμίξεων μπορούν να κατασκευαστούν θερμίστορ με θετικό θερμικό συντελεστή (Positive Temperature Coefficient, PTC).

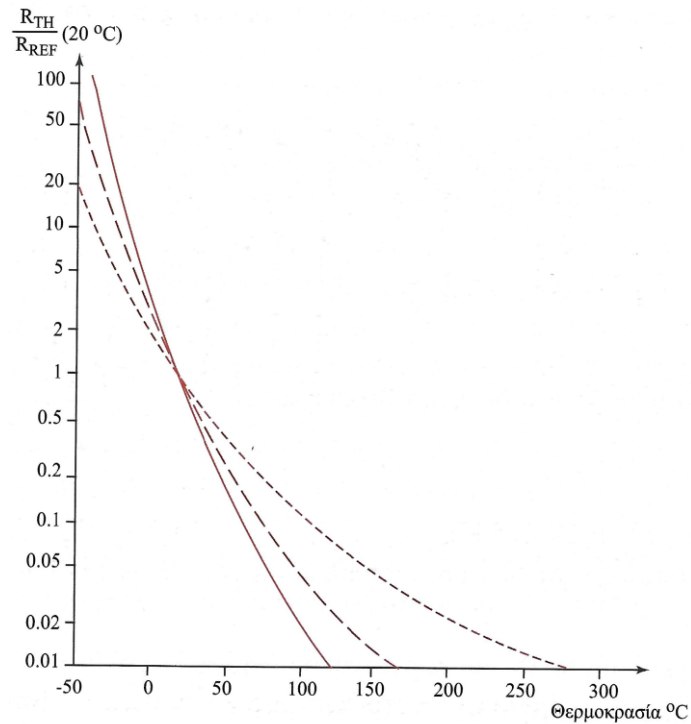


Σχήμα 15: Διατάξεις θερμίστορ [22].

Στα θερμίστορ με αρνητικό θερμικό συντελεστή, η αντίσταση μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$R_{TH} = R_{REF} e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{REF}} \right)} \quad (2.5)$$

όπου  $R_{TH}$ : η αντίσταση του θερμίστορ,  $R_{REF}$ : η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς,  $T$ : η θερμοκρασία,  $T_{REF}$ : η θερμοκρασία αναφοράς του θερμίστορ και  $\beta$ : ο συντελεστής βαθμονόμησης του θερμίστορ.

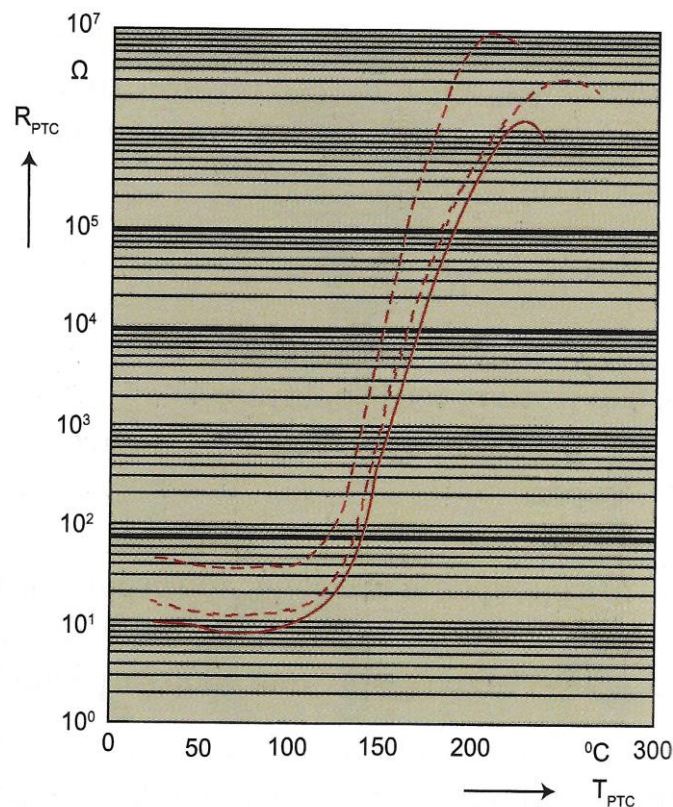


Σχήμα 16: Διάγραμμα μεταβολής του λόγου  $R_{TH}/R_{REF}$  σε θερμίστορ NTC με τη θερμοκρασία[22].

Στα θερμίστορ με θετικό θερμικό συντελεστή η σχέση αντίστασης θερμοκρασίας προκύπτει από την εξίσωση Steinhart & Hart που φαίνεται παρακάτω:

$$T = \frac{B}{\ln(R) - A} - C \quad (2.6)$$

όπου  $T$ : η θερμοκρασία (K) σε θερμοκρασία αναφοράς ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $R$ : η αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) και  $A, B, C$ : οι συντελεστές του θερμίστορ ( $\text{K}^{-1}$ ) οι οποίοι συνήθως δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρεία.



Σχήμα 17: Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης PTC θερμίστορ με τη θερμοκρασία για τρία διαφορετικά στοιχεία [22].

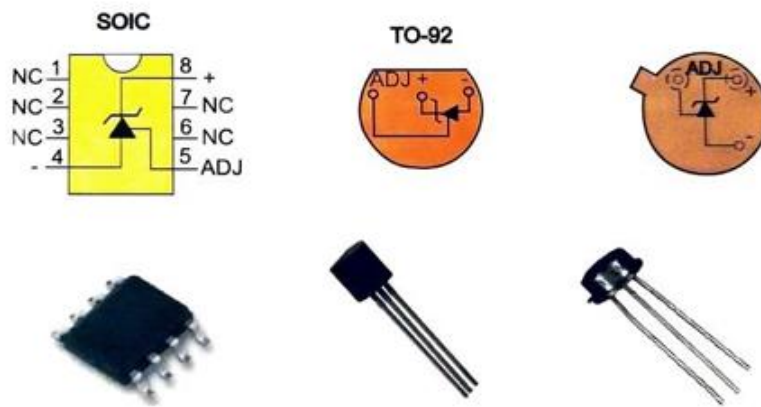
#### 2.4.4 Αισθητήρες Ημιαγωγών

Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ημιαγωγών, γνωστός και ως αισθητήρας θερμοκρασίας στερεάς κατάστασης, είναι μια ηλεκτρονική συσκευή ενσωματωμένη σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits-ICs) ικανή να μετράει θερμοκρασίες με ακρίβεια σε ένα εύρος τιμών από  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25]. Εκμεταλλεύεται τις διακυμάνσεις που προκαλούν οι θερμοκρασιακές αλλαγές λόγω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των ημιαγωγών, παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις, σταθερότητα και γρήγορους χρόνους απόκρισης.

Ο αισθητήρας λειτουργεί μετρώντας την πτώση τάσης που εξαρτάται από τη θερμοκρασία σε μια ορθά πολωμένη επαφή PN ή τη διακύμανση της τάσης στην επαφή μίας διόδου[25]. Το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας στους ημιαγωγούς αλλάζει με τη θερμοκρασία, επηρεάζοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα[26]. Όταν μια διόδος πολώνεται ορθά, η τάση στην επαφή αλλάζει γραμμικά με τη θερμοκρασία, επιτρέποντάς της να λειτουργεί ως αισθητήρας θερμοκρασίας.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας ημιαγωγών δεν απαιτούν πολύπλοκα κυκλώματα σύνδεσης και μπορούν να υλοποιηθούν με χρήση διόδων ή τρανζίστορ[25]. Θέτοντας σε λειτουργία δύο πανομοιότυπα τρανζίστορ σε διαφορετική αλλά σταθερή πυκνότητα ρεύματος συλλέκτη, η διαφορά στις τάσεις βάσης-εκπομπού είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία. Αυτή η διαφορά τάσης στη συνέχεια μετατρέπεται σε ρεύμα, συχνά με μετατόπιση για τη μετατροπή του σήματος σε Φαρενάιτ ή Κελσίου.

Για να υπάρχει ακρίβεια στις μετρήσεις, ένας αισθητήρας ημιαγωγών μπορεί να απαιτεί βαθμονόμηση σε ένα συγκεκριμένο σημείο θερμοκρασίας, συνήθως 25 °C. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος ή πρόσθετα σημεία βαθμονόμησης για μεγαλύτερη ακρίβεια σε ένα ευρύτερο εύρος θερμοκρασίας.



Σχήμα 18: Τύποι ολοκληρωμένων αισθητήρων θερμοκρασίας του εμπορίου[22].

#### 2.4.5 Αισθητήρες Υπερύθρων (IR)

Ένας αισθητήρας υπερύθρων θερμοκρασίας είναι ένας ανέπαφος αισθητήρας που μετρά τη θερμοκρασία ενός αντικειμένου ανιχνεύοντας τη θερμική του ενέργεια[27]. Λειτουργεί ανιχνεύοντας και μετατρέποντας την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από το αντικείμενο σε ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας[28].

Η υπέρυθη ακτινοβολία εκπέμπεται από όλα τα αντικείμενα και είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του αντικειμένου[28] και δίνεται από τη σχέση:

$$W = \sigma \cdot T^4 \quad (2.7)$$

όπου  $\sigma$  : σταθερά Stefan-Boltzmann[22]. Ο αισθητήρας ανιχνεύει και μετρά αυτήν την ακτινοβολία για να καθορίσει τη θερμοκρασία χωρίς να έρχεται φυσικά σε επαφή με το αντικείμενο. Αυτή η μη επεμβατική και αποτελεσματική μέθοδος για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, όπως η σάρωση της θερμοκρασίας, η αίσθηση της θερμότητας και η παρακολούθηση της θερμοκρασίας.

Η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα υπέρυθρων θερμοκρασίας βασίζεται στο γεγονός ότι η θερμότητα μεταφέρεται από το ένα σώμα στο άλλο μέσω αγωγής, συναγωγής ή ακτινοβολίας[29]. Η ακτινοβολία είναι μια διαδικασία όπου η θερμική ενέργεια στη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εκπέμπεται από ένα ζεστό αντικείμενο και απορροφάται από ένα πιο κρύο αντικείμενο. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ακτινοβολίας βρίσκεται στην υπέρυθη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αλλά κάποια επεκτείνονται και στη ζώνη του ορατού φωτός.

Η ακρίβεια ενός αισθητήρα υπέρυθρων θερμοκρασίας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της εκπομπής του αντικειμένου που μετράται. Η εκπομπή αναφέρεται στην ικανότητα του αντικειμένου να εκπέμπει υπέρυθη ακτινοβολία[28]. Διάφορα υλικά έχουν διάφορες τιμές εκπομπής, και αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Ορισμένοι αισθητήρες επιτρέπουν την προσαρμογή της εκπομπής για να βελτιώσουν την ακρίβεια.

## 2.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Ένας αισθητήρας υγρασίας είναι μία ηλεκτρονική συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του νερού ή των υδρατμών σε ένα στερεό ή αέριο μέσο[30], [31]. Η υγρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας σε διάφορους τομείς της ζωής, από τη διατήρηση των συνθηκών της καθημερινότητας του ανθρώπου έως τη βιομηχανία. Οι αισθητήρες υγρασίας είναι εκείνοι που με τη μέτρηση και παρακολούθηση αυτού του μεγέθους βοηθάνε στη βελτίωση της ζωής. Χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς, όπως η μετεωρολογία, η γεωργία, η ιατρική και η αρχαιολογία.

Οι αισθητήρες υγρασίας λειτουργούν παρακολουθώντας τις αλλαγές στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως η αντίσταση και χωρητικότητα, που προκαλούνται παρουσία των

υδρατμών και του νερού. Αυτές οι αλλαγές μεταφράζονται σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία επεξεργάζονται για να καθοριστούν τα ποσοστά της υγρασίας.

Η περιεκτικότητα ενός μέσου σε υγρασία μπορεί να εκφραστεί με τρεις τρόπους[22]. Ο πρώτος τρόπος είναι ως απόλυτη τιμή, δηλαδή ως τον όγκο ή το βάρος του νερού ανά μονάδα βάρους ή όγκου του μέσου στο οποίο περιέχεται, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με σύστημα δύο θερμίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας. Ο δεύτερος τρόπος είναι ως σχετική υγρασία, και συγκεκριμένα ως η ποσοστιαία περιεκτικότητα του μέσου σε νερό σε σχέση με το σημείο κορεσμού στην ίδια θερμοκρασία, και μπορεί να μετρηθεί με ειδικούς αισθητήρες από πολυμερή υλικά που μεταβάλουν την αντίστασή τους ή τη χωρητικότητά τους συναρτήσει της υγρασίας. Τέλος, στα αέρια μέσα η υγρασία μπορεί να αποδοθεί και ως το σημείο δρόσου, δηλαδή ως τη θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση στην οποία οι υδρατμοί ξεκινούν να υγροποιούνται, η μέτρηση του οποίου γίνεται με εξειδικευμένους αισθητήρες οι οποίοι μεταβάλουν τη χωρητικότητα ή την αντίστασή τους όταν επιτυγχάνεται υγροποίηση των υδρατμών πάνω σε μία ειδική επιφάνεια του αισθητήρα.

Η ακρίβεια των μετρήσεων στους αισθητήρες υγρασίας ποικίλει ανάλογα με το είδος του αισθητήρα. Παρακάτω θα αναλυθεί η λειτουργία κάποιων αισθητήρων υγρασίας για στερεά μέσα, όπως το έδαφος με το οποίο ασχολείται η παρούσα εργασία.

### 2.5.1 Αισθητήρες Μικροκυμάτων

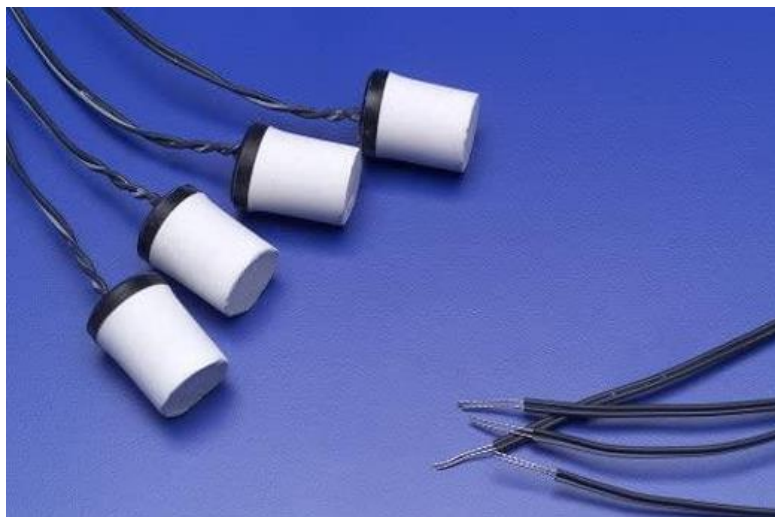
Η χρήση αυτών των αισθητήρων γίνεται σε στερεά υλικά με μικρό πάχος, και η μέτρηση γίνεται με την παραγωγή μικροκυμάτων από ένα ταλαντωτή ισχύος 1mW, ο οποίος είναι σε επαφή με το υλικό, και το διαπερνούν[22]. Γνωρίζοντας ότι το νερό έχει τη μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τα υπόλοιπα υλικά, η μείωση της έντασης του σήματος μπορεί να συσχετιστεί με την περιεκτικότητα του υλικού σε νερό και με το κατάλληλο αισθητήρα να γίνει η μέτρηση της υποβάθμισης και να προσδιοριστεί η υγρασία του. Το προνόμιο αυτών των αισθητήρων είναι ότι τα μικροκύματα διαπερνούν την ύλη του δείγματος και μπορούν να μετρήσουν την υγρασία σε ετερογενή υλικά.



Σχήμα 19: Αισθητήρας μικροκυμάτων μέτρησης υγρασίας[32].

### 2.5.2 Ωμικοί Αισθητήρες

Οι ωμικοί αισθητήρες αποτελούνται από ένα κύβο από πορώδες υλικό, το οποίο συνήθως είναι γύψος ή fiberglass, και στο οποίο έχουν τοποθετηθεί δύο ηλεκτρόδια[22]. Τοποθετώντας τον αισθητήρα στο υλικό, μία ποσότητα νερού μετακινείται από ή προς τον αισθητήρα μέχρι να εξισωθεί η πίεση και στις δύο πλευρές. Όταν φτάσει στο σημείο ισορροπίας, μετράται η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού με μία γέφυρα αντιστάσεων με μεταβλητή τιμή και έπειτα με βαθμονόμηση των τιμών δίνεται η υγρασία του υλικού.



Σχήμα 20: Κύβοι γύψου που χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες μέτρησης υγρασίας του εδάφους[22].

Τα υπέρ αυτού του τύπου των αισθητήρων είναι ότι έχουν μικρό κόστος και δυνατότητα μέτρησης της υγρασίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς τη μετακίνηση τους, ενώ κατά είναι η μεγάλη χρονική διάρκεια στην εξισορρόπηση της υγρασίας μέσα και έξω από

τον αισθητήρα, με αποτέλεσμα να γίνονται λάθος μετρήσεις αφού κάθε υλικό απαιτεί διαφορετική βαθμονόμηση.

### 2.5.3 Αισθητήρες Μέτρησης της Χωρητικότητας

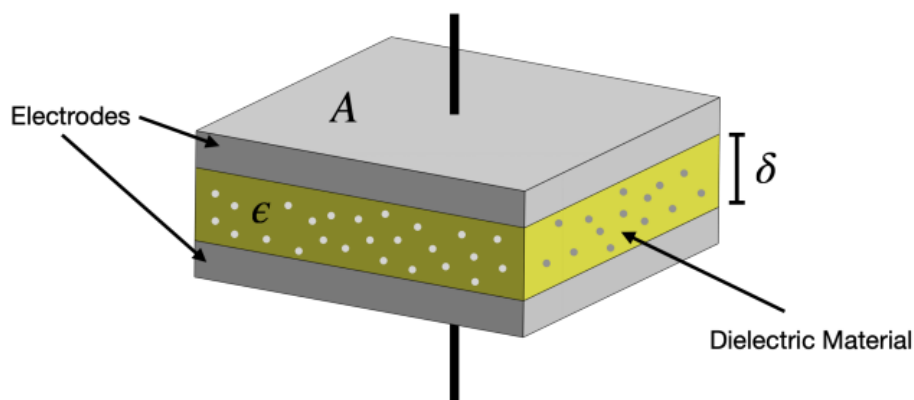
Οι αισθητήρες μέτρησης της χωρητικότητας λειτουργούν μετρώντας την ηλεκτρική χωρητικότητα ενός συγκεκριμένου όγκου υλικού με συγκεκριμένη διηλεκτρική σταθερά, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων[22]. Η χωρητικότητα καθορίζεται ως το φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει ένα υλικό υπό δεδομένο ηλεκτρικό δυναμικό[33]. Συνήθως, οι πυκνωτές απεικονίζονται ως παράλληλες πλάκες και η χωρητικότητα μπορεί να γραφτεί ως το πηλίκο μεταξύ φόρτισης και δυναμικού:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.8)$$

όπου  $C$ : η χωρητικότητα,  $Q$ : το ηλεκτρικό φορτίο και  $V$ : το ηλεκτρικό δυναμικό [10]. Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Gauss, η χωρητικότητα μπορεί να προσδιοριστεί ευρύτερα με την παρακάτω ολοκληρωτική μορφή:

$$C = \frac{\oint_s \epsilon E \cdot ds}{\int E \cdot dl} \quad (2.9)$$

όπου  $\epsilon$ : η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του υλικού μεταξύ των ηλεκτροδίων και  $E$ : το ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα 21: Πυκνωτής παράλληλων πλακών[33].



Το αισθητήριο στοιχείο λειτουργεί σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, ώστε να μπορεί να μετρήσει τη διηλεκτρική σταθερά[22]. Η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LCt}} \quad (2.10)$$

όπου  $L$ : ο συντελεστής αυτεπαγωγής του συστήματος και  $C$ : η συνολική χωρητικότητα του συστήματος [33].

Η μετρούμενη τιμή σε ένα χωρητικό αισθητήρα υγρασίας δεν είναι γραμμικά ανάλογη της υγρασίας του υλικού και εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και τη θερμοκρασία του[22].



*Σχήμα 22: Αισθητήρας μέτρησης της υγρασίας του εδάφους μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς του[22].*

#### 2.5.4 Αισθητήρες Χρόνου Ανάκλασης

Η μέτρηση ενός αισθητήρα χρόνου ανάκλασης (Time Domain Reflectometers - TDR) βασίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού παλμού ή ενός σήματος διαμέσου του υλικού[22]. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από τον τύπο του υλικού, την περιεκτικότητά του σε υγρασία και την αγωγιμότητά του.

Για την μέτρηση της υγρασίας, αρχικά ο αισθητήρας τοποθετείται στο υλικό που πρόκειται να δοκιμαστεί[34]. Ο αισθητήρας περιέχει έναν κυματοδηγό που αποτελείται από δύο, τρία ή περισσότερα παράλληλα καλώδια που συνδέονται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου με έναν γεννήτορα παλμών τάσης που στέλνει καθορισμένους παλμούς τάσης στον αισθητήρα. Καθώς ο παλμός ταξιδεύει κατά μήκος του κυματοδηγού, η πορεία του αλλάζει ανάλογα με την υγρασία του υλικού που εξετάζεται. Όταν ο παλμός φτάνει στο τέλος του κυματοδηγού,

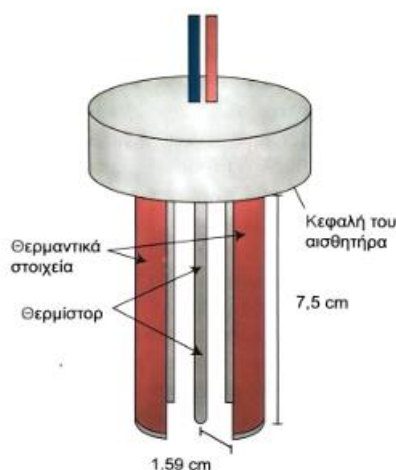
αντανακλάται και οπτικοποιείται χρησιμοποιώντας έναν παλμογράφο ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον αισθητήρα. Ο ρυθμός που αντανακλάται ο παλμός στη συσκευή μετριέται και σχετίζεται με το ποσοστό υγρασίας, όσο πιο αργή η κίνηση τόσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία. Με τον χρόνο ανάκλασης μπορεί να υπολογιστεί το μέσο ποσοστό υγρασίας και η σχετική επιτρεπτότητα του δείγματος χρησιμοποιώντας έναν ισοδύναμο κύκλωμα ως αναφορά.



Σχήμα 23: Διάφοροι τύποι TDR[22].

### 2.5.5 Αισθητήρες Σκέδασης Θερμότητας

Οι αισθητήρες σκέδασης θερμότητας (Heat Dissipating Sensors-HDR) χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της υγρασίας του εδάφους μέσω θερμικής αγωγιμότητας, αντί για ηλεκτρική αγωγιμότητα[22]. Αυτό που τους ξεχωρίζει είναι ότι παρέχουν μια ακριβή τιμή μέτρησης υγρασίας ανεξάρτητα από το μέγεθος της αγωγιμότητας, η οποία μεταβάλλεται με την προσθήκη λιπασμάτων στο έδαφος. Η δομή ενός αισθητήρα διάχυσης θερμότητας φαίνεται στο Σχήμα 24. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης, η θερμοκρασία ενός υλικού μετριέται πριν την εφαρμογή ενός θερμικού παλμού στον αισθητήρα. Η διαφορά μεταξύ της αρχικής θερμοκρασίας στο πορώδες υλικό και της τελικής τιμής μετά την εφαρμογή του θερμικού παλμού αντιστοιχεί στην υγρασία που κρατείται από το πορώδες υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της υγρασίας οδηγεί σε μικρότερη διακριτή θερμοκρασιακή διαφορά. Η αυξημένη αυτή θερμοκρασία υπολογίζεται με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας ακριβείας που βρίσκεται στην άκρη του αισθητήρα. Όσον αφορά τα μειονεκτήματά τους, επικεντρώνονται στις απαιτήσεις ισχύος σε σύγκριση με άλλους τύπους αισθητήρων λόγω της ανάγκης δημιουργίας θερμικού παλμού.

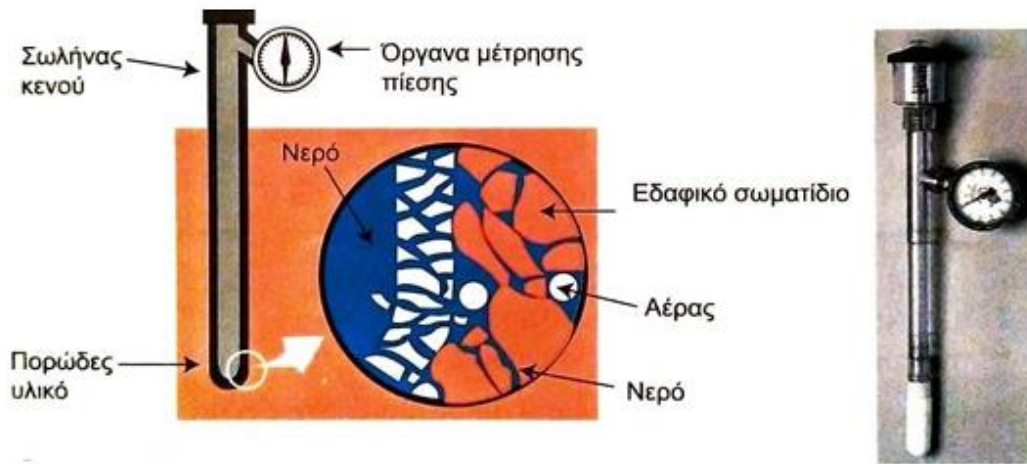


Σχήμα 24: Αισθητήρας σκέδασης θερμότητας[22].

### 2.5.6 Τενσιόμετρα

Το τενσιόμετρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25, λειτουργεί ως τεχνητή ρίζα για τη μέτρηση της δύναμης που οι ρίζες των φυτών πρέπει να υπερνικήσουν για να έχουν πρόσβαση στο νερό που κρατείται στο έδαφος κατά την καλλιέργεια[22]. Το τενσιόμετρο αποτελείται από έναν σωλήνα, είτε γυάλινο είτε πλαστικό, που περιέχει νερό και ένα κεραμικό διάφραγμα στη βάση του που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, ενώ στην κορυφή του διαθέτει έναν αισθητήρα πίεσης κενού. Η εξίσωση της πίεσης καθορίζεται μέσω ενός κεραμικού πορώδους υλικού στην άκρη του σωλήνα, το οποίο τοποθετείται εντός του υλικού που μετριέται. Σε περιπτώσεις επαρκώς ξηρού εδάφους γύρω από το τενσιόμετρο, το νερό από τον σωλήνα διαφεύγει μέσω του κεραμικού διαφράγματος προς το έδαφος. Ως εκ τούτου, το τενσιόμετρο καταγράφει τη διαφορά στην πίεση του κενού μέσα στον σωλήνα, παρέχοντας ένα μέτρο που υποδηλώνει σημαντική καταπόνηση στις ρίζες των φυτών για τη συγκράτηση του νερού από το έδαφος. Έτσι, σε συνθήκες υγρού εδάφους, η ανάγνωση του οργάνου τείνει να είναι χαμηλή λόγω της μειωμένης διαφυγής νερού από τον σωλήνα προς το έδαφος. Τα τενσιόμετρα χρησιμοποιούν τη μονάδα μέτρησης σε κιλοπασκάλ (KPa). Όσο μεγαλύτερη η καταπόνηση στις ρίζες των φυτών για τη διατήρηση του υδάτινου υλικού από το έδαφος, τόσο υψηλότερη είναι η ανάγνωση του οργάνου. Οι βέλτιστες τιμές άγχους κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 2-10 KPa για την ανθοκομική παραγωγή. Οι αδυναμίες αυτών των τενσιόμετρων περιλαμβάνουν την περιορισμένη κλίμακα μέτρησης και την αδυναμία χρήσης τους σε υλικά με χοντρόκοκκο κόκκο, όπου δεν υπάρχει καλή επαφή μεταξύ του οργάνου και του υλικού. Το νερό εντός του τενσιόμετρου απαιτεί συχνή αναπλήρωση όταν

χρησιμοποιούνται σε ξηρά περιβάλλοντα, όπου γίνονται πηγή διαρροής νερού λόγω ξηρότητας. Σε ένα εύρος τιμών 0-15 KPa, το νερό στον σωλήνα του τενσιόμετρου θα πρέπει να αναπληρώνεται κάθε τρεις με τέσσερις εβδομάδες.



Σχήμα 25: Αρχή λειτουργίας και τυπικό δείγμα τενσιόμετρου[22].

## 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

### 3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα σύστημα αισθητήρων υγρασίας και θερμοκρασίας. Η επικοινωνία του συστήματος γίνεται με το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRa, με τη χρήση δύο μικροελεγκτών LoRa32u4 II v1.3, όπου ο ένας λειτουργεί ως πομπός και ο άλλος ως δέκτης. Έπειτα, ένα πρόγραμμα διαβάζει τα δεδομένα που λαμβάνει ο δέκτης και τα αποστέλει στην υπηρεσία Thingsboard και το οποίο τα αποθηκεύει και τα οπτικοποιεί. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα στοιχεία της διάταξης, καθώς και ο λόγος που επιλέχθηκαν, και θα αναλυθούν τα στάδια της υλοποίησης του συστήματος.

#### 3.1.1 Αισθητήρας Υγρασίας

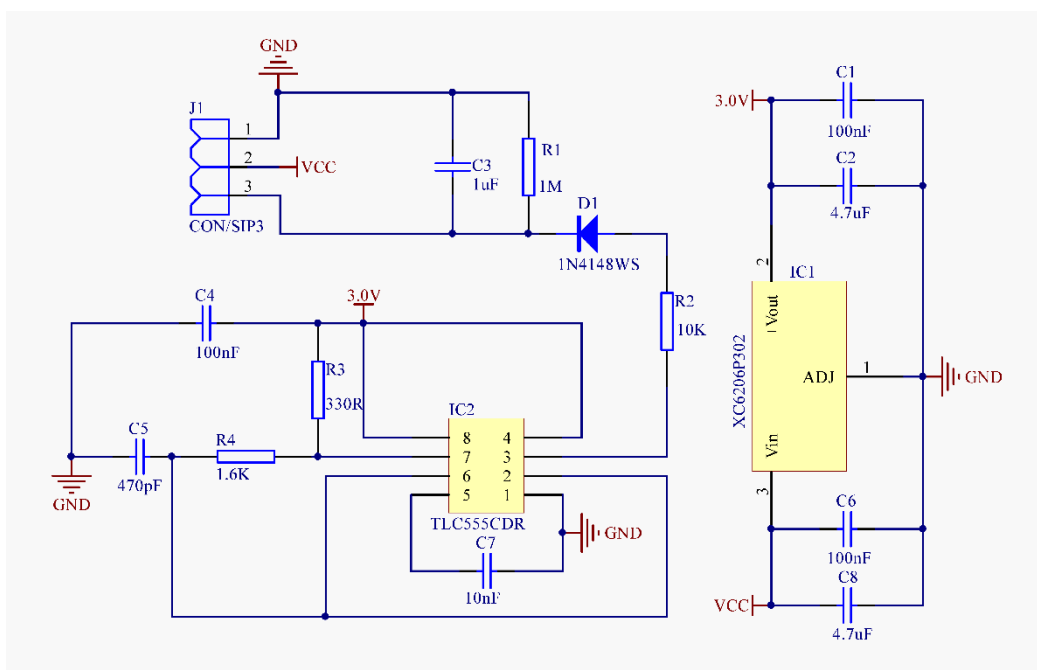
Για τη μέτρηση της υγρασίας χρησιμοποιήθηκε ο χωρητικός αισθητήρας SEN0308. Αυτός ο αισθητήρας επιλέχθηκε, διότι σε αντίθεση με τους ωμικούς αισθητήρες που μπορούν να διαβρωθούν με την πάροδο του χρόνου λόγω άμεσης επαφής με το έδαφος, μετρά τη υγρασία του εδάφους ανιχνεύοντας τις αλλαγές στη διηλεκτρική σταθερά του εδάφους, όντας με αυτό τον τρόπο πιο ανθεκτικός. Επίσης, παρέχει σταθερές και αξιόπιστες μετρήσεις, η αδιαβροχοποίηση του είναι ενισχυμένη και μπορεί ακόμα και να βυθιστεί στο νερό και δεν απαιτεί συχνή αντικατάσταση και βαθμονόμηση.



Σχήμα 26: Αισθητήρας υγρασίας SEN0308[35].

Χαρακτηριστικά αισθητήρα:

- Ακρίβεια:  $\pm 3\%$
- Απαιτούμενη τροφοδοσία: από 3.3V έως 5V
- Τάση εξόδου: από 0 έως 2.9V
- Ρεύμα λειτουργίας: μικρότερο των 20mA.
- Είδος αισθητήρα: Αναλογικός.
- Πρωτόκολλο Επικοινωνίας: Dallas 1-Wire.
- Κόστος: 17,63€



Σχήμα 27: Σχηματικό διάγραμμα του αισθητήρα SEN0308.

### 3.1.2 Αισθητήρας Θερμοκρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε μία αγροτική καλλιέργεια είναι αναγκαία η επιλογή ενός αδιάβροχου αισθητήρα, ο οποίος θα διαθέτει μεγάλη ακρίβεια. Γι' αυτό το σκοπό επιλέχθηκε ο αισθητήρας DS18B20 (Σχήμα 28), ο οποίος είναι ένας αισθητήρας ολοκληρωμένου κυκλώματος (ή ημιαγωγών) με ενσωματωμένο μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC). Ο αισθητήρας αυτό είναι εύκολος στη χρήση, καθώς έχει ενσωματωμένη αντίσταση 4,7kΩ μεταξύ σήματος και τροφοδοσίας και διαθέτει διεπαφή ενός καλωδίου, οπότε χρειάζεται μόνο ένα καλώδιο για να συνδεθεί

με το μικροελεγκτή. Η έξοδός του είναι ψηφιακή με τη δυνατότητα επιλογής στα 9 είτε στα 12 bits.



*Σχήμα 28: Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20[36].*

Χαρακτηριστικά αισθητήρα:

- Εύρος Μετρούμενης θερμοκρασίας: από  $-55^{\circ}\text{C}$  έως  $+125^{\circ}\text{C}$  ( $-67^{\circ}\text{F}$  έως  $+257^{\circ}\text{F}$ ).
- Ακρίβεια Μετρούμενης θερμοκρασίας:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  στο εύρος από  $-10^{\circ}\text{C}$  έως  $+85^{\circ}\text{C}$ .
- Απαιτούμενη τροφοδοσία: από 3.0V έως 5.5V.
- Ρεύμα λειτουργίας στα 1,5mA.
- Είδος αισθητήρα: Ψηφιακός.
- Πρωτόκολλο Επικοινωνίας: Dallas 1-Wire.
- Κόστος: 7€

### 3.1.3 Μικροελεγκτής LoRa32u4 II v1.3

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο μικροελεγκτής LoRa32u4 II v1.3 της BSFrance[11],[12]. Η συγκεκριμένη πλακέτα είναι ιδανική για εφαρμογές IoT, καθώς έχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος και μεγάλη εμβέλεια που μπορεί να ξεπεράσει τα 2,4GHz, είναι πιο ευέλικτο από το Bluetooth LE και δεν απαιτεί υψηλή ισχύ σε αντίθεση με το WiFi. Ο LoRa32u4 βασίζεται στον επεξεργαστή Atmega32u4, τον HPD13 868MHz LoRa module και διαθέτει ένα κύκλωμα φόρτισης μπαταρίας USB. Επίσης, επιτρέπει την ασύρματη επικοινωνία μέσω της μονάδας SX1276 για το LoRaWAN.

Ο ATmega32u4 λειτουργεί στα 8 MHz και 3.3 V, έχοντας 32K flash, 2K μνήμη RAM και ενσωματωμένη υποστήριξη USB σε σειριακή επικοινωνία, για αποσφαλμάτωση και προγραμματισμό χωρίς την ανάγκη εξωτερικού τσιπ FTDI.

Η πλακέτα διαθέτει ξεχωριστή κεραία LoRa που συνδέεται μέσω ενός μικροσκοπικού καλωδίου στην ενσωματωμένη υποδοχή IPEX/U.FL. Η υποδοχή της μπαταρίας είναι μια υποδοχή JST-PH 2 ακίδων και η τάση της μπαταρίας μπορεί να παρακολουθηθεί μέσω αναλογικής ακίδας. Η πλακέτα αυτή είναι συμβατή με το Arduino και είναι εξοπλισμένη με κύκλωμα φόρτισης LiPo και Liion και τυπική διασύνδεση μπαταρίας.

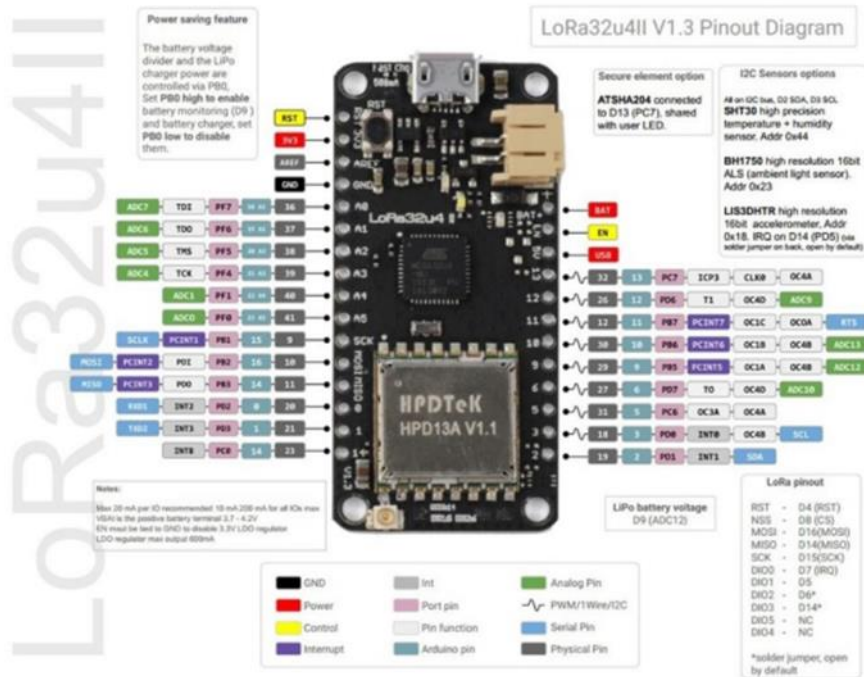
Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή:

- MCU: Atmega 32u4 3.3V @ 8MHz
- Μνήμη ROM: 32KB
- Μνήμη RAM: 2KB
- Απαιτούμενη τροφοδοσίας: από 3.3V έως 5.0V
- LoRa chip: Semtech SX1276
- Κόστος: 18.65 €

Χαρακτηριστικά Chipset Semtech SX1276:

- Διαμορφώσεις: FSK, MSK, GFSK, GMSK, LoRa, OOK
- Διεπαφή SPI για επικοινωνία με την MCU
- Ισχύς μετάδοσης: +20dBm
- Συχνότητα λειτουργίας: 868 MHz – 915 MHz
- Λειτουργία RSSI (Received Signal Strength Indication)





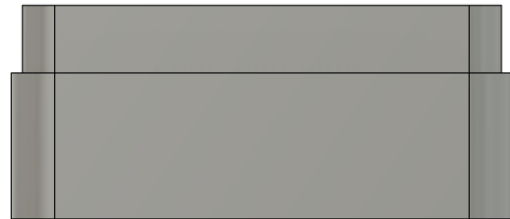
Σχήμα 29: Διάγραμμα αντιστοίχισης των pin του LoRa32u4 II v1.3[37].

### 3.1.4 Προστασία Συστήματος Hardware

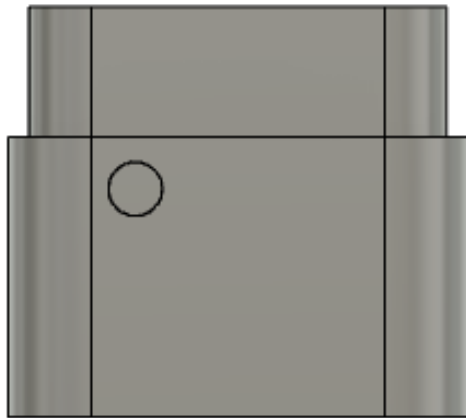
Για την προστασία του συστήματος σχεδιάστηκε ένα κουτί με το εργαλείο Autodesk Fusion. Το κουτί αυτό σχεδιάστηκε με σκοπό την προστασία του συστήματος από τη διάβρωση του χρόνου και οποιαδήποτε επαφή με υγρό διάλυμα, καθώς η γεωργία έχει ως βασικό παράγοντα διάφορα υγρά διαλύματα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Η κατασκευή αυτή περιλαμβάνει το βασικό μέρος του κουτιού και το καπάκι αυτού. Επίσης, σχεδιάστηκε με βάση τις ανάγκες του συστήματος, γι' αυτό και διαθέτει δύο τρύπες στο κάτω μέρος για τους δύο αισθητήρες και μία τρύπα στο πάνω μέρος για τη κεραία του μικροελεγκτή. Στα Σχήμα 30 έως και Σχήμα 37 φαίνεται η αρχική σχεδίαση του κουτιού στο Autodesk Fusion, ενώ το τελικό αποτέλεσμα αυτού, μετά την εκτύπωση του στο 3D printer με τη χρήση του υλικού PLA, παρουσιάζεται στο Σχήμα 38.



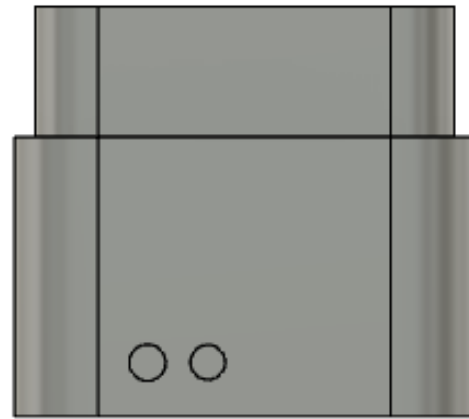
*Σχήμα 30: Άνοψη κουτιού.*



*Σχήμα 31: Το καπάκι του κουτιού.*



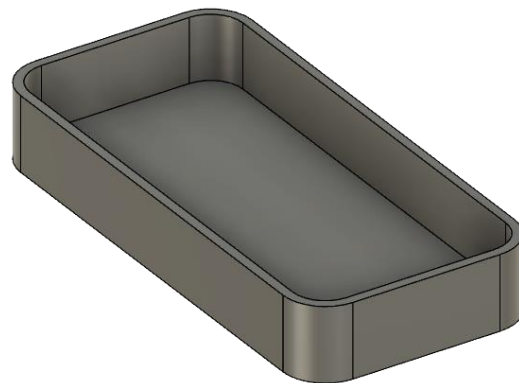
Σχήμα 32: Πρόσοψη κουτιού.



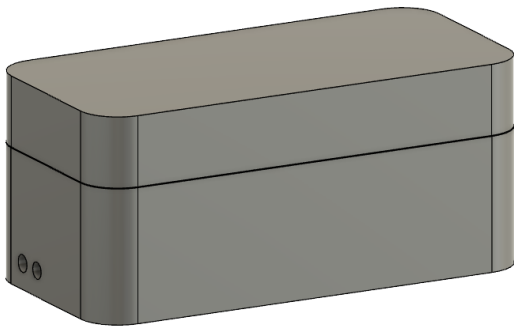
Σχήμα 33: Πίσω όψη κουτιού.



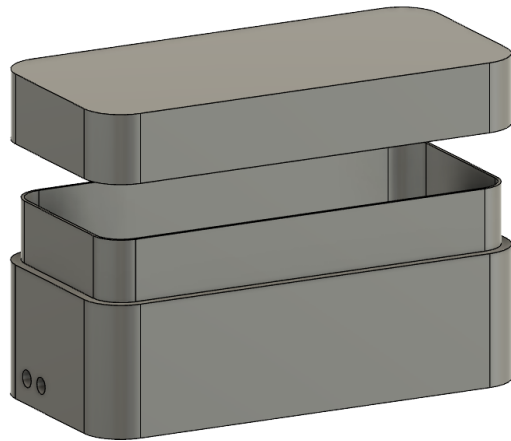
Σχήμα 34: 3D αναπαράσταση κουτιού.



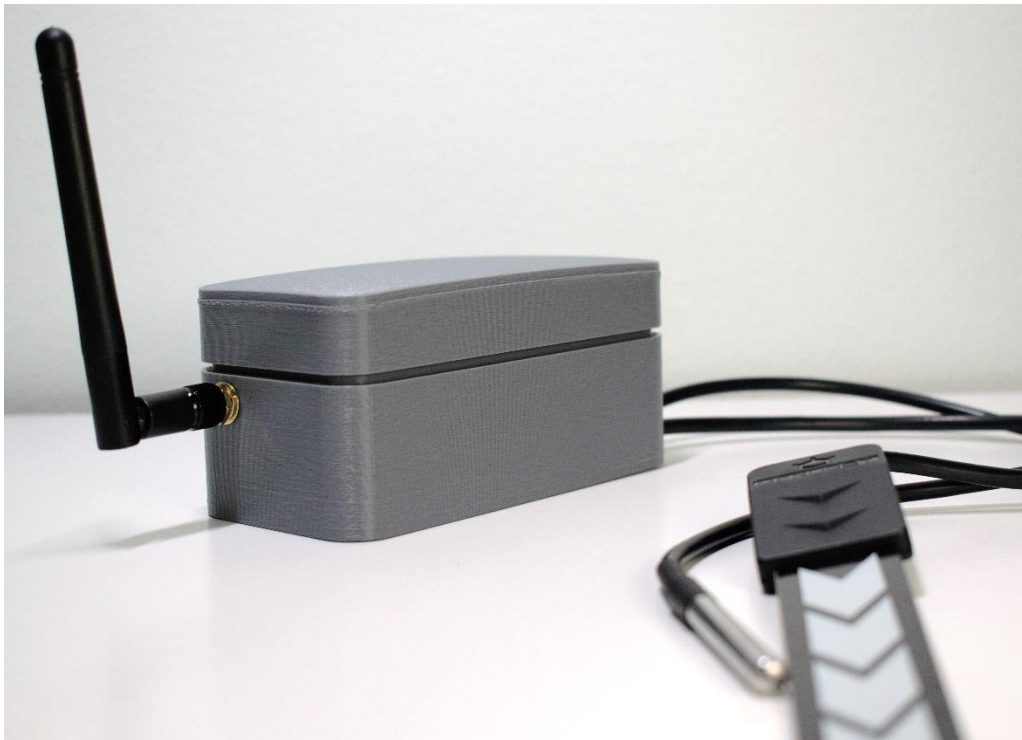
Σχήμα 35: 3D αναπαράσταση του καπακιού.



Σχήμα 36: 3D αναπαράσταση κουτιού.



Σχήμα 37: 3D αναπαράσταση κουτιού.



Σχήμα 38: Αποτέλεσμα εκτύπωσης του κουτιού.

### 3.1.5 Internet of Things Πλατφόρμα

Για την υλοποίηση της πλατφόρμας IoT, χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή Thingsboard, η οποία αποτελεί μια ανοικτού κώδικα (open source) και αυτο-φιλοξενούμενη (self hosted) λύση. Επιλέξαμε να φιλοξενήσουμε την πλατφόρμα χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Docker, εξασφαλίζοντας έτσι την ευελιξία και την αποδοτικότητα των πόρων μας.

Για το σκοπό αυτό χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο μικροελεγκτές LoRa32, όπου στον πρώτο ενσωματώθηκαν οι αισθητήρες, ενώ ο δεύτερος λειτούργησε ως μια συσκευή πύλη (gateway). Η πρώτη συσκευή στέλνει τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες και δεύτερη συσκευή λαμβάνει δεδομένα σε μορφή JSON με την εξής δομή: {"device\_id": "", "temperature": "", "humidity": ""}, τα οποία έπειτα ανεβαίνουν στο Thingsboard.

Αυτή η προσέγγιση μας επέτρεψε να δημιουργήσουμε όμορφους και πλούσιους σε χαρακτηριστικά πίνακες ελέγχου, χωρίς την ανάγκη να αναπτύξουμε την δική μας πλατφόρμα από το μηδέν, ενώ ταυτόχρονα διατηρούμε τα δεδομένα μας τοπικά.

Η συσκευή πύλη (gateway device) συλλέγει δεδομένα από πολλαπλές πηγές, χρησιμοποιώντας τόσο την τεχνολογία LoRa όσο και σειριακή σύνδεση μέσω των COM θυρών του υπολογιστή μας. Αυτή η διάταξη μας επιτρέπει να ενσωματώσουμε ποικίλα για αισθητήρια συστήματα και να συγκεντρώνουμε τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας έτσι μια ολοκληρωμένη εικόνα των παραμέτρων που παρακολουθούμε. Ο κώδικας για την πύλη είναι ο εξής:

```
1. import serial
2. import json
3. from tb_device_mqtt import TBDeviceMqttClient
4.
5. # Configure the serial connection to the LoRa receiver
6. ser = serial.Serial("COM6", 9600) # Update with your correct serial port
7.
8. client = TBDeviceMqttClient("192.168.2.6", username="_____")
9.
10.
11. def publish_data(device_id, temperature, humidity):
12.     # Format data as JSON
13.     data = {
14.         "deviceId": device_id,
15.         "temperature": temperature,
16.         "humidity": humidity,
```

```

17. }
18. client.send_telemetry(data)
19.
20.
21. # Connect to ThingsBoard
22. client.connect()
23.
24. while True:
25.     if ser.in_waiting > 0:
26.         line = ser.readline().decode("utf-8").strip()
27.         if line.startswith("Received:") or line.startswith("Got:"):
28.             json_data = line.replace("Received: ", "").replace("Got: ", "")
29.
30.             try:
31.                 data = json.loads(json_data)
32.                 temperature = data.get("temperature", "N/A")
33.                 humidity = data.get("humidity", "N/A")
34.                 device_id = data.get("device_id", "N/A")
35.                 print(f"Temperature: {temperature} °C, Humidity: {humidity} %")
36.                 publish_data(device_id, temperature, humidity)
37.             except json.JSONDecodeError:
38.                 print("Failed to decode JSON")
39.

```

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της προσέγγισής μας είναι ότι προσφέρει περισσότερες παροχές από άλλες IoT πλατφόρμες στα πακέτα που παρέχουν δωρεάν(Blynk και άλλα), και προσφέρει ανεξαρτησία στη διαχείριση των δεδομένων και τοπική αποθήκευσή τους. Η χρήση της κοινότητας Thingsboard μας παρέχει την δυνατότητα να προσαρμόσουμε και να επεκτείνουμε την πλατφόρμα σύμφωνα με τις ανάγκες μας, ενώ παράλληλα διατηρούμε τον έλεγχο των δεδομένων μας.

Η προσέγγισή μας συνδυάζει την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα των σύγχρονων τεχνολογιών με την ευελιξία της ανοικτής κοινότητας, επιτρέποντάς μας να δημιουργήσουμε

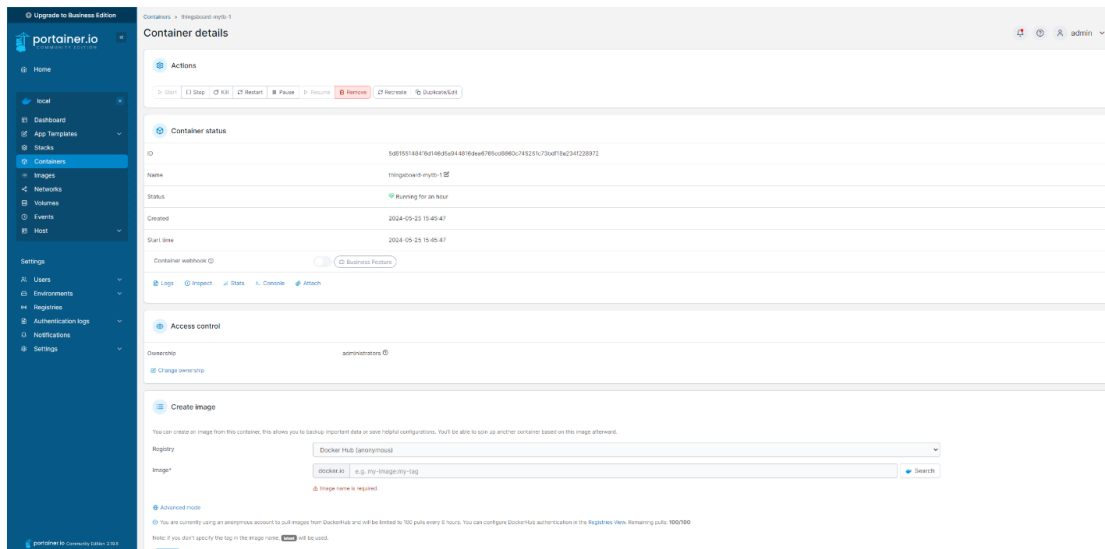
μα αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική λύση για τις ανάγκες της IoT παρακολούθησης. Επιπλέον, η χρήση του Docker για τη φιλοξενία της πλατφόρμας μας εξασφαλίζει την ευκολία στην διαχείριση και την δυνατότητα άμεσης κλιμάκωσης της υποδομής μας ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Συγκεκριμένα για να φιλοξενήσουμε την υπηρεσία Thingsboard χρησιμοποιούμε docker compose όπως φαίνεται στο Σχήμα 39.

Στην υπηρεσία Thingsboard, πρόσβαση της οποίας γίνεται μέσω ενός φυλλομετρητή, πρώτα προστίθονται οι συσκευές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 40. Αφού γίνει αυτή η διαδικασία, και εισέρχονται δεδομένα στο σύστημα, τότε μπορούν να δημιουργηθούν και τα κατάλληλα ταμπλό που παρουσιάζουν τις πληροφορίες που θέλει ο χρήστης. Ένα απλό ταμπλό είναι και το Σχήμα 42. Όπου παρουσιάζει την θερμοκρασία και την υγρασία του σένσορα της παρούσας διπλωματικής.

```
root@docker:~# ls
thingsboard
@docker:~# cd thingsboard/
@docker:~/thingsboard# cat docker-compose.yaml
services:
  mytb:
    restart: always
    image: "thingsboard/tb-postgres"
    ports:
      - "8080:9090"
      - "1883:1883"
      - "7070:7070"
      - "5683-5688:5683-5688/udp"
    environment:
      TB_QUEUE_TYPE: in-memory
    volumes:
      - mytb-data:/data
      - mytb-logs:/var/log/thingsboard

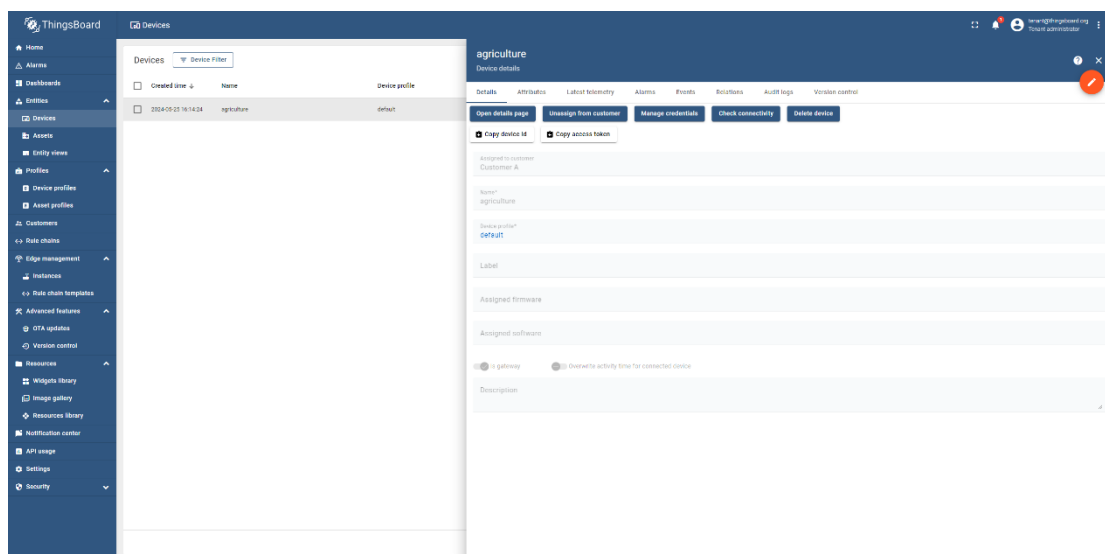
volumes:
  mytb-data:
  mytb-logs:
@docker:~/thingsboard#
```

Σχήμα 39: Docker compose κώδικας για την φιλοξενία του Thingsboard



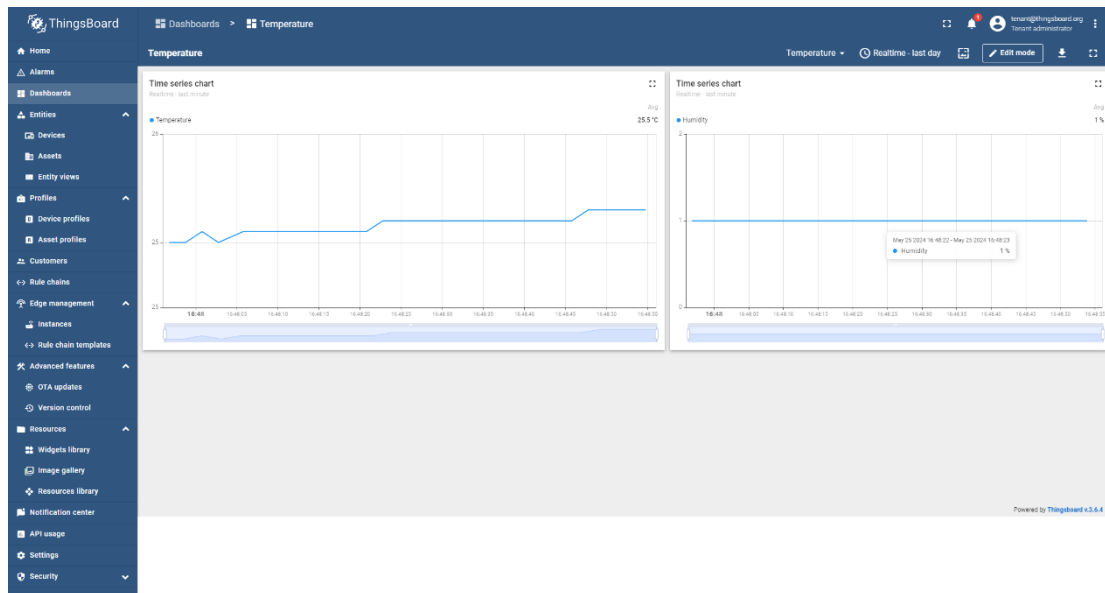
Σχήμα 40: Λεπτομέρειες της υπηρεσίας Thingboard στο Docker.

Συνοψίζοντας, η επιλογή και η υλοποίηση της πλατφόρμας IoT βασισμένης στην κοινότητα Thingsboard, σε συνδυασμό με την αυτο-φιλοξενούμενη προσέγγιση, μας παρείχε μια ισχυρή και ευέλικτη βάση για την επίτευξη των ερευνητικών μας στόχων.



Σχήμα 41: Προβολή συσκευής στην πλατφόρμα Thingsboard.





Σχήμα 42: Παράδειγμα ταμπλό του Thingsboard.

## 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 3.2.1 Ανάπτυξη Λειτουργικού Πρωτοτύπου

Το σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας και υγρασίας που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, τόσο σε επίπεδο hardware όσο και σε software, πέρασε από διάφορα στάδια προκειμένου να φτάσει στην τελική του μορφή.

Αρχικά, ελέγχθηκε και προγραμματίστηκε η λειτουργία των αισθητήρων. Αυτή η διαδικασία έγινε με τη χρήση ενός άλλου μικροελεγκτή, του ESP32 της FireBeetle, ο οποίος είναι ένας μικροελεγκτής χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, διαθέτει dual-core ESP-WROOM-32, υποστηρίζοντας επικοινωνία μέσω Wi-Fi και Bluetooth, καθιστώντας ιδανικό για εφαρμογές IoT. Πρώτα συνδέθηκε και προγραμματίστηκε ο αισθητήρας θερμοκρασίας και ύστερα ο αισθητήρας υγρασίας. Η δοκιμή και ο έλεγχος λειτουργίας του έγινε τοποθετώντας όλο το απαραίτητο υλικό σε μια πλακέτα δοκιμών (breadboard). Παρακάτω παρατίθενται ο κώδικας αυτός.

```

1. #include <OneWire.h>
2. #include <DallasTemperature.h>
3.
4. #define ONE_WIRE_BUS 25 // Define the digital pin for DS18B20
5. OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

```

```
6. DallasTemperature sensors(&oneWire);
7.
8. const int soilMoisturePin = 36; // Define the analog pin for SEN0308
9. const int dryValue = 2850; // Adjust this value based on dry soil readings
10. const int wetValue = 0; // Adjust this value based on saturated soil readings
11.
12. void setup() {
13.   Serial.begin(9600);
14.   sensors.begin();
15. }
16.
17. void loop() {
18.   float temperature = getTemperature();
19.   int soilMoisture = getSoilMoisture();
20.
21.   Serial.print("Temperature: ");
22.   Serial.print(temperature);
23.   Serial.print(" °C");
24.
25.   Serial.print(" | Soil Moisture: ");
26.   Serial.print(soilMoisture);
27.   Serial.println("%");
28.
29.   delay(2000); // Adjust the delay based on your requirements
30. }
31.
32. float getTemperature() {
33.   sensors.requestTemperatures();
34.   return sensors.getTempCByIndex(0);
35. }
36.
37. int getSoilMoisture() {
```

```

38. int sensorValue = analogRead(soilMoisturePin);
39. // Map the sensor value to a percentage (adjust the mapping based on your sensor
characteristics)
40. int moisturePercentage = map(sensorValue, dryValue, wetValue, 0, 100);
41. return moisturePercentage;
42. }
43.

```

Στη συνέχεια, έπρεπε να επιτευχθεί η επικοινωνία μέσω LoRa. Γι' αυτό το σκοπό, αγοράστηκαν δύο LoRa32u4 II, ώστε ο ένας να έχει το ρόλο του πομπού και ο άλλος το ρόλο του δέκτη. Η λειτουργία τους ελέγχθηκε αρχικά με την αποστολή ενός απλού μηνύματος.

Κώδικας Πομπού:

```

1. #include <RH_RF95.h> // Include the RadioHead library
2.
3. #define RFM95_CS 8 // Define the chip select pin
4. #define RFM95_RST 4 // Define the reset pin
5. #define RFM95_INT 7 // Define the interrupt pin
6.
7. RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT); // Define the LoRa module with CS and INT
pins
8.
9. void setup() {
10. Serial.begin(9600);
11. while (!Serial); // Wait for serial port to be available
12.
13. if (!rf95.init()) {
14. Serial.println("LoRa radio init failed");
15. while (1);
16. }
17.

```

```

18. Serial.println("LoRa radio init OK!");
19. rf95.setFrequency(915.0); // Set the LoRa frequency
20. }
21.
22. void loop() {
23.   const char *message = "Hello, LoRa!"; // Message to send
24.
25.   // Send message
26.   rf95.send((uint8_t *)message, strlen(message));
27.   rf95.waitPacketSent();
28.   Serial.print("Message Sent: ");
29.   Serial.println(message);
30.
31.   delay(5000); // Wait for 5 seconds before sending the next message
32. }
33.

```

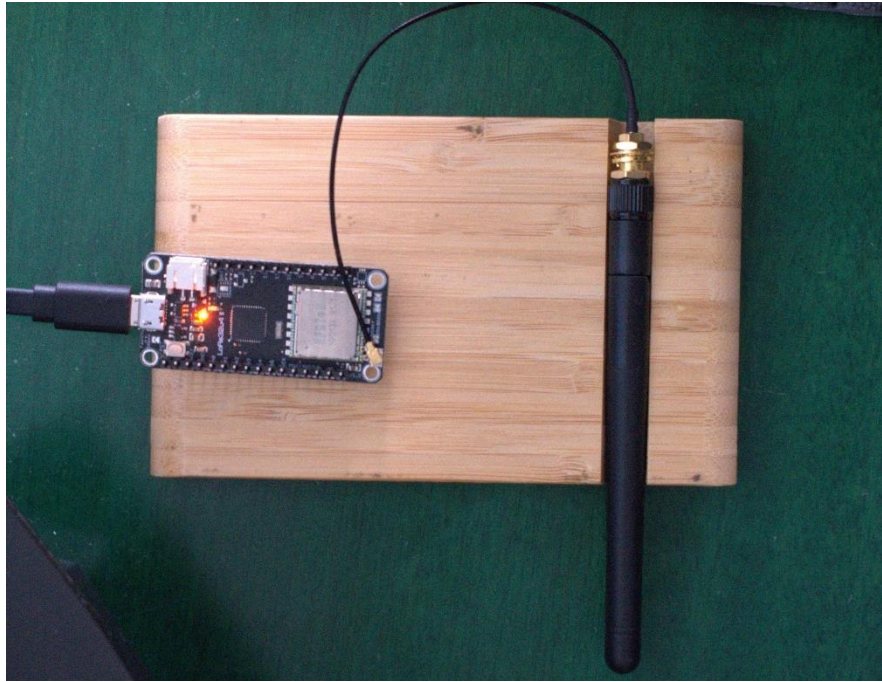
Κώδικας Δέκτη:

```

1. #include <RH_RF95.h> // Include the RadioHead library
2.
3. #define RFM95_CS 8 // Define the chip select pin
4. #define RFM95_RST 4 // Define the reset pin
5. #define RFM95_INT 7 // Define the interrupt pin
6.
7. RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT); // Define the LoRa module with CS and INT
pins
8.
9. void setup() {
10.   Serial.begin(9600);
11.   while (!Serial); // Wait for serial port to be available
12.

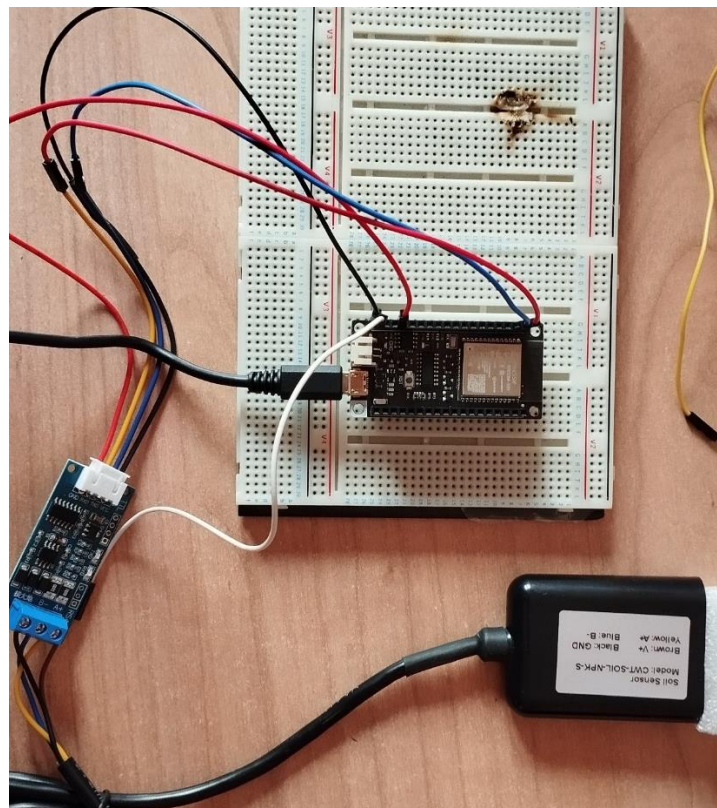
```

```
13. if (!rf95.init()) {
14.   Serial.println("LoRa radio init failed");
15.   while (1);
16. }
17.
18. Serial.println("LoRa radio init OK!");
19. rf95.setFrequency(915.0); // Set the LoRa frequency
20. }
21.
22. void loop() {
23.   if (rf95.available()) { // If a packet is available
24.     uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
25.     uint8_t len = sizeof(buf);
26.     if (rf95.recv(buf, &len)) { // Receive the packet
27.       Serial.print("Received: ");
28.       Serial.println((char*)buf); // Print the received message
29.     }
30.   }
31. }
32.
```



Σχήμα 43: Δέκτης μετρήσεων.

Ταυτόχρονα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 44 έγινε η προσπάθεια να προστεθεί και επιπλέον αισθητήρας Αζώτου, Φωσφόρου και Κάλιου στο ESP32.



Σχήμα 44: Αισθητήρας NPK.

Εφόσον όλες οι συνιστώσες του πειράματος, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας και ενδοεπικοινωνία μέσω LoRa πρωτοκόλλου, ελέγχθηκαν ότι λειτουργούν η κάθε μια ξεχωριστά έπρεπε να συνδεθούν και να λειτουργήσουν ως μια ενιαία μονάδα. Έτσι συνδέθηκε η μια πλακέτα-πομπός με τους αισθητήρες μέσω breadboards και jumper wires και σε αυτήν χρησιμοποιήθηκε ο εξής κώδικας:

```
1. #include <SPI.h>
2. #include <RH_RF95.h>
3. #include <OneWire.h>
4. #include <ArduinoJson.h>
5.
6. #define DS18S20_Pin 2
7. #define soilMoisture 0
8.
9. #define RFM95_CS 8
10. #define RFM95_RST 4
11. #define RFM95_INT 7
12.
13. // Change this to your network's frequency
14. #define RF95_FREQ 868.0
15.
16. const char* device_id = "lora1" ;
17.
18. RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);
19.
20. OneWire ds(DS18S20_Pin); // on digital pin 2
21.
22. void setup()
23. {
24.   pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
25.   digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
26.
```

```
27. Serial.begin(9600);
28. while (! Serial);
29.
30. // manual reset
31. digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
32. delay(10);
33. digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
34. delay(10);
35.
36. if (!rf95.init()) {
37.   Serial.println("LoRa radio init failed");
38.   while (1);
39. }
40. Serial.println("LoRa radio init OK!");
41.
42. if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
43.   Serial.println("setFrequency failed");
44.   while (1);
45. }
46. Serial.print("Set Freq to: "); Serial.println(RF95_FREQ);
47.
48. // Set transmit power to 13 dBm
49. rf95.setTxPower(13, false);
50. }
51.
52. void loop()
53. {
54.   Serial.println("Sending to rf95_server");
55.
56.   float temperature = getTemperature();
57.   float humidity = getHumidity();
58.
```



```

59. if (temperature != -1000) {
60.     Serial.print("Temperature: ");
61.     Serial.print(temperature);
62.     Serial.println(" °C");
63. }
64.
65. Serial.print("Humidity: ");
66. Serial.print(humidity);
67. Serial.println(" %");
68.
69. // Create a JSON object
70. StaticJsonDocument<200> jsonDoc;
71. jsonDoc["temperature"] = temperature;
72. jsonDoc["humidity"] = humidity;
73. jsonDoc["device_id"] = device_id;
74.
75.
76. // Serialize JSON to a string
77. char jsonString[200];
78. serializeJson(jsonDoc, jsonString);
79.
80. // Send the JSON string
81. rf95.send((uint8_t *)jsonString, strlen(jsonString) + 1);
82.
83. rf95.waitPacketSent();
84. Serial.println("Message sent!");
85. Serial.println(jsonString);
86.
87. delay(2000); // Wait for 2 seconds before sending the next message
88. }
89.
90. float getHumidity() {

```

```

91. int analogHumidity = analogRead(soilMoisture); //connect sensor to Analog 0
92. int moisturePercent = map(analogHumidity, 0, 768, 100, 0);
93. return moisturePercent;
94. }
95.
96. float getTemperature() {
97. //returns the temperature from one DS18S20 in DEG Celsius
98.
99. byte data[12];
100. byte addr[8];
101.
102. if (!ds.search(addr)) {
103. //no more sensors on chain, reset search
104. Serial.println("no more sensors on chain, reset search!");
105. ds.reset_search();
106. return -1000;
107. }
108.
109. if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) {
110. Serial.println("CRC is not valid!");
111. return -1000;
112. }
113.
114. if (addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
115. Serial.print("Device is not recognized");
116. return -1000;
117. }
118.
119. ds.reset();
120. ds.select(addr);
121. ds.write(0x44, 1); // start conversion, with parasite power on at the end
122.

```

```

123. byte present = ds.reset();
124. ds.select(addr);
125. ds.write(0xBE); // Read Scratchpad
126.
127. for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
128.   data[i] = ds.read();
129. }
130.
131. ds.reset_search();
132.
133. byte MSB = data[1];
134. byte LSB = data[0];
135.
136. float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); //using two's compliment
137. float TemperatureSum = tempRead / 16;
138.
139. return TemperatureSum;
140. }
141.

```

Ενώ η πλακέτα-δέκτης συνδέθηκε στο υπολογιστή για να κάνουμε την λήψη των δεδομένων μέσω Serial Protocol. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στην πλακέτα-δέκτη είναι ο εξής:

```

#include <SPI.h>
#include <RH_RF95.h>

#define RFM95_CS 8
#define RFM95_RST 4
#define RFM95_INT 7

// Change this to your network's frequency
#define RF95_FREQ 868.0

```

```

RH_RF95 rf95(RFM95_CS, RFM95_INT);

void setup()
{
  pinMode(RFM95_RST, OUTPUT);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);

  Serial.begin(9600);
  delay(100);

  // manual reset
  digitalWrite(RFM95_RST, LOW);
  delay(10);
  digitalWrite(RFM95_RST, HIGH);
  delay(10);

  if (!rf95.init()) {
    Serial.println("LoRa radio init failed");
    while (1);
  }
  Serial.println("LoRa radio init OK!");

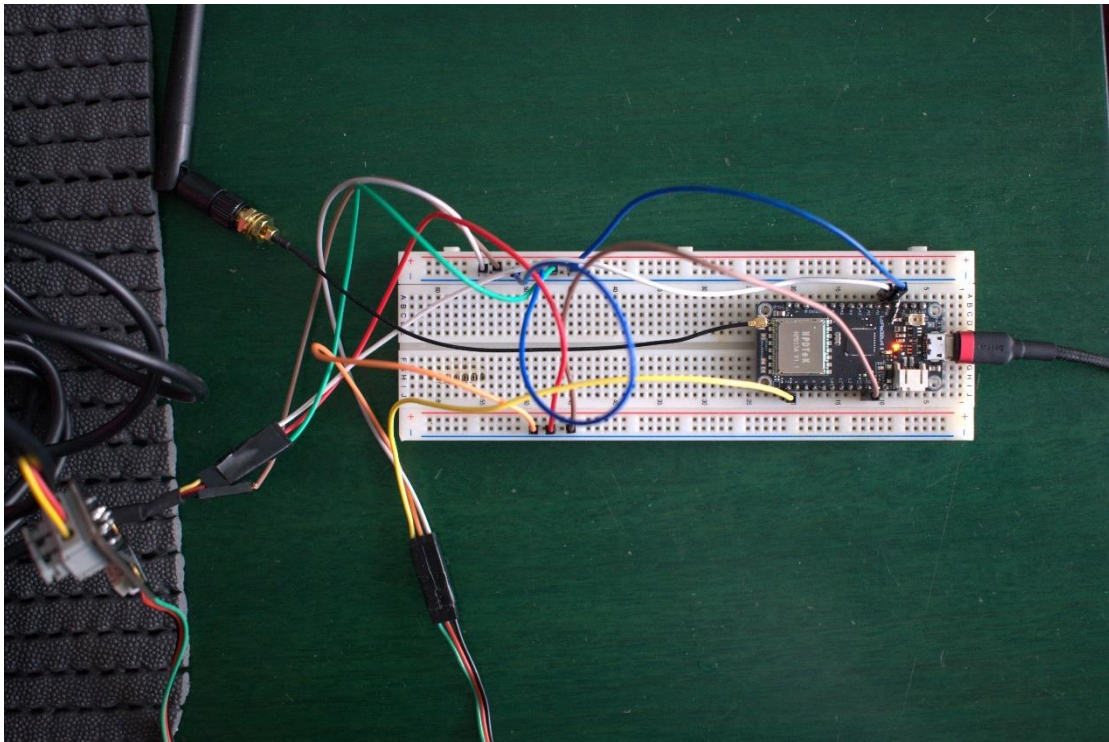
  if (!rf95.setFrequency(RF95_FREQ)) {
    Serial.println("setFrequency failed");
    while (1);
  }
  Serial.print("Set Freq to: "); Serial.println(RF95_FREQ);

  // Set the transmitter power (optional)
  rf95.setTxPower(13, false);
}

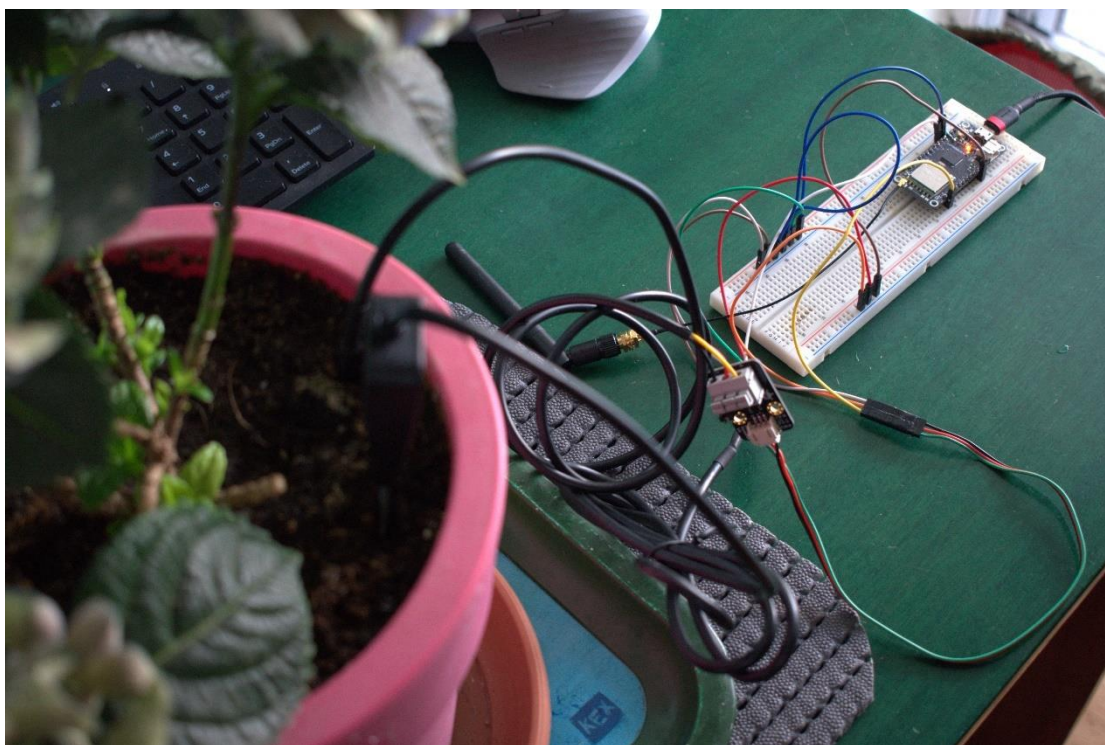
```

```
void loop()
{
  if (rf95.available()) {
    // Should be a message for us now
    uint8_t buf[RH_RF95_MAX_MESSAGE_LEN];
    uint8_t len = sizeof(buf);

    if (rf95.recv(buf, &len)) {
      Serial.print("Received: ");
      Serial.println((char*)buf);
    } else {
      Serial.println("Receive failed");
    }
  }
}
}
```

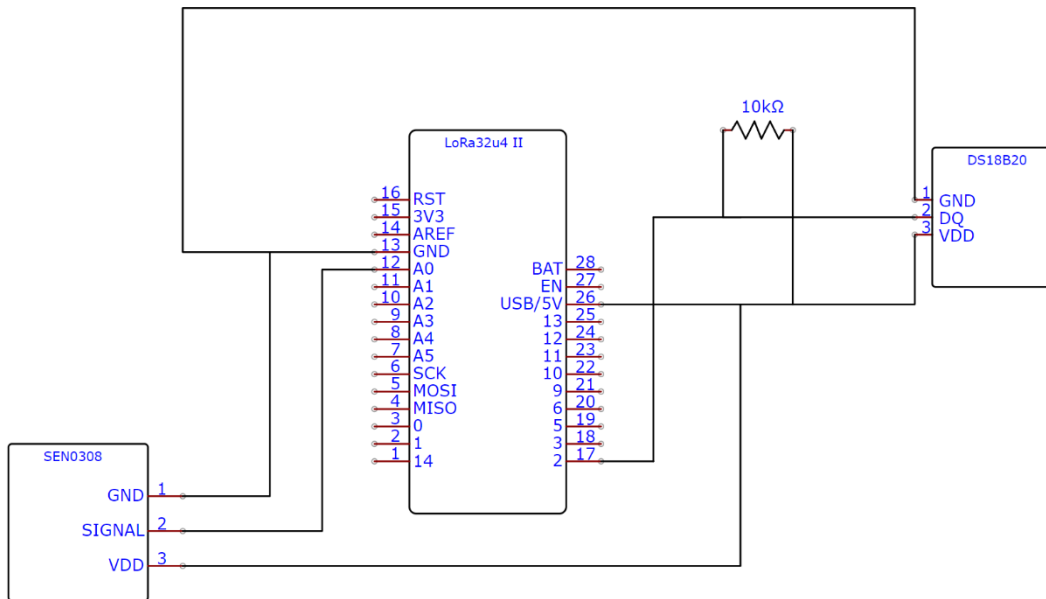


Σχήμα 45: Σύνδεση του πομπού με τους αισθητήρες στο breadboard.

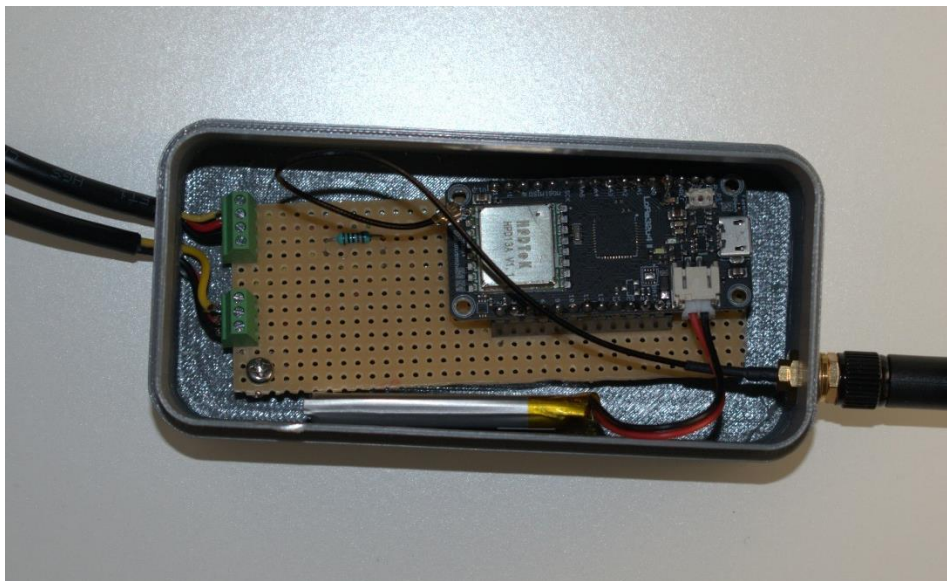


*Σχήμα 46: Πείραμα λειτουργίας της διάταξης πάνω στο breadboard.*

Αφού όλα λειτούργησαν όπως έπρεπε, είχε έρθει η στιγμή να δοθεί η τελική μορφή στη κατασκευή. Έτσι, πάρθηκε μία διάτρητη πλακέτα πάνω στην οποία αρχικά κολλήθηκε ο πομπός. Ύστερα, χρειάστηκε να υλοποιηθεί ένα pull up κύκλωμα για τη σύνδεση του αισθητήρα θερμοκρασίας, ώστε να αποφευχθεί ο θόρυβος. Γι' αυτό το σκοπό, κολλήθηκε μία αντίσταση  $10k\Omega$  μεταξύ της τροφοδοσίας του αισθητήρα και του καλωδίου σήματος. Έπειτα, έγιναν οι συνδέσεις και οι κολλήσεις με το κολλητήρι και των δύο αισθητήρων με τον μικροελεγκτή. Παρακάτω, φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος και η τελική μορφή της πλακέτας.



Σχήμα 47: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης.



Σχήμα 48: Τελική μορφή κυκλώματος διάτρητης πλακέτας.

Στα τελικά βήματα της υλοποίησης, έχουμε την δημιουργία του κουτιού στο Autodesk Fusion, την τοποθέτηση της πλακέτας μέσα σε αυτό και τέλος τη σύνδεση με το Thingsboard για την εκτέλεση των τελικών πειραμάτων και την εξαγωγή των δεδομένων.

### 3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε ένα φυτό εσωτερικού χώρου, η Σανσεβιέρια (*Sansevieria trifasciata*). Το σύστημα που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από

αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα και τα αποστέλλουν μέσω LoRa σε μία πύλη (gateway). Η πύλη στη συνέχεια στέλνει τα δεδομένα στην πλατφόρμα ThingBoard για περαιτέρω ανάλυση και αποθήκευση.



*Σχήμα 49: Περιβάλλον μετρήσεων.*





*Σχήμα 50: Περιβάλλον μετρήσεων.*

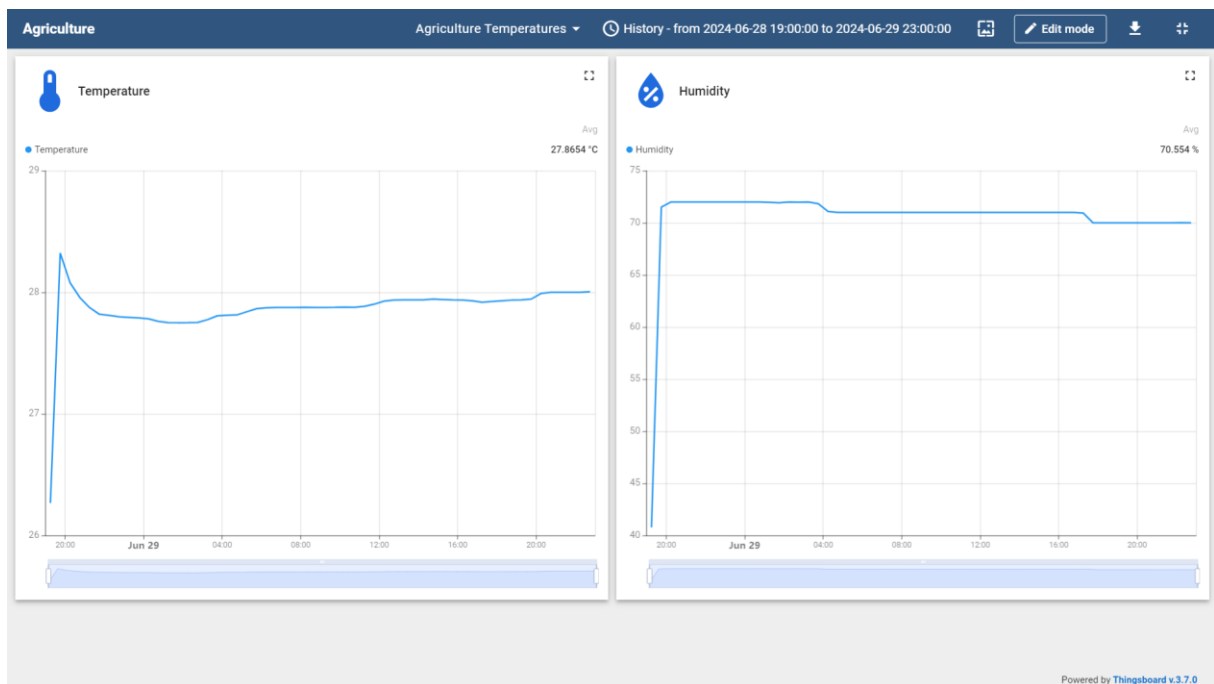
Παράλληλα με την παρακολούθηση των δεδομένων στο φυτό εσωτερικού χώρου, έγινε και η παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του δωματίου στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις, μέσω του αισθητήρα Sonoff SNZB-02, ο οποίος στέλνει τα δεδομένα του στον server πρωτοκόλλου zigbee. Η θερμοκρασία του δωματίου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κυμαίνονταν από 28°C έως 30°C, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 52, ενώ η υγρασία κυμαινόταν από 33% έως 55%, όπως φαίνεται στο Σχήμα 53. Οι μετρήσεις που έγιναν στο φυτό διήρκεσαν μία ημέρα και αφορούσαν την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους του. Αρχικά, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο χώμα της γλάστρας και μετά από ένα διάστημα έγινε πότισμα του φυτού.

Πριν το πότισμα, η θερμοκρασία του εδάφους ήταν 26°C. Κατά τη διάρκεια του ποτίσματος, σημειώθηκε απότομη άνοδος της θερμοκρασίας στους 28°C. Μετά το πότισμα, η θερμοκρασία σταθεροποιήθηκε μεταξύ 27°C και 28°C. Όσον αφορά την υγρασία του εδάφους, πριν το πότισμα ήταν 40%. Κατά το πότισμα, σημειώθηκε απότομη άνοδος της υγρασίας στο 72%. Μετά το πότισμα, η υγρασία μειώθηκε με αργό ρυθμό, σταθεροποιώντας περίπου στο 70%.

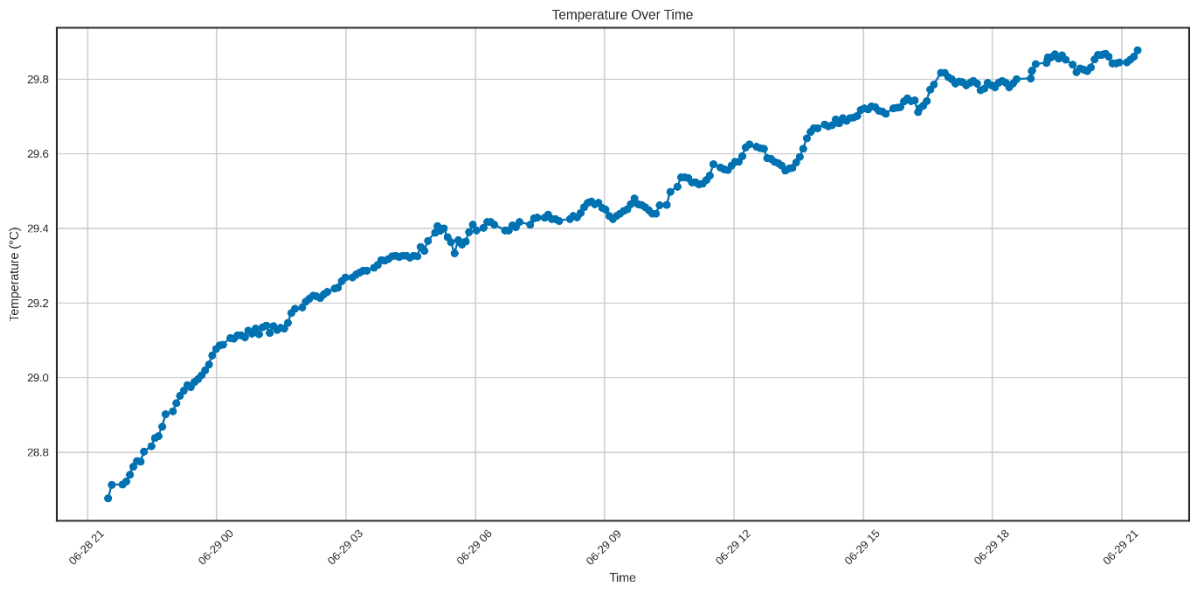
Τα δεδομένα αυτά επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη συμπεριφορά του φυτού κατά το πότισμα. Η απότομη άνοδος της θερμοκρασίας του εδάφους μπορεί να οφείλεται στη θερμοκρασία του νερού που χρησιμοποιήθηκε για το πότισμα, ενώ η αύξηση της υγρασίας είναι το αποτέλεσμα της απορρόφησης του νερού από το έδαφος.

Για την καλύτερη κατανόηση των μεταβολών αυτών, παρατίθενται τα ακόλουθα γραφήματα: Γράφημα θερμοκρασίας περιβάλλοντος χώρου και εδάφους, το οποίο δείχνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας, και γράφημα υγρασίας περιβάλλοντος χώρου και εδάφους, το οποίο δείχνει τη μεταβολή της υγρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζουν τις μεταβολές σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν την ανάλυση της συμπεριφοράς του φυτού υπό διαφορετικές συνθήκες.

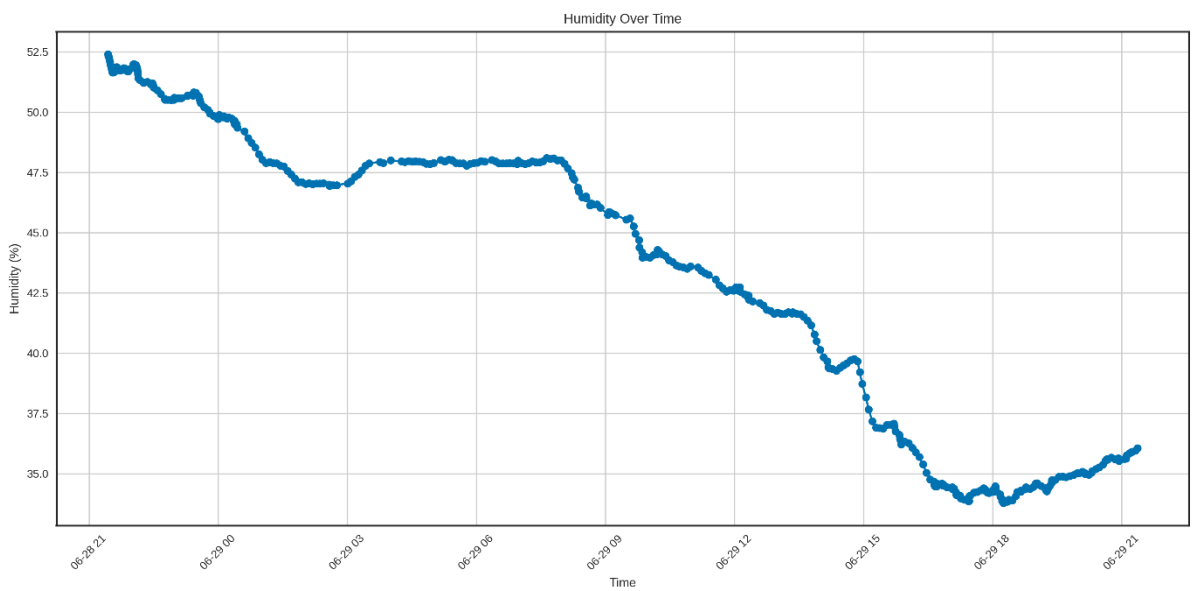
Οι μετρήσεις και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα του αισθητήρα και του συστήματος LoRa στην παρακολούθηση των συνθηκών του εδάφους. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την υγεία και τις ανάγκες του φυτού. Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής μέσω της παρακολούθησης και του ελέγχου των συνθηκών καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 51: Η πλατφόρμα Thingsboard κατά την διάρκεια των μετρήσεων



Σχήμα 52: Διάγραμμα θερμοκρασίας δωματίου



Σχήμα 53: Διάγραμμα υγρασίας δωματίου

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

### 4.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Όπως έχει καταστεί σαφές, η παρούσα εργασία περιλάμβανε την κατασκευή ενός ενσωματωμένου συστήματος πολλαπλών αισθητήρων για την ασύρματη και απομακρυσμένη επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο των συνθηκών καλλιέργειας, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LoRa. Έπειτα από το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συνολικού αυτού συστήματος και αφότου τέθηκε σε λειτουργία για το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για την καταγραφή των δεδομένων, αποδείχθηκε πως το σύστημα λειτούργησε με τον αναμενόμενο τρόπο σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Οι λαμβανόμενες μετρήσεις ήταν πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές, καθώς χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικά όργανα για την επιβεβαίωση της ορθότητάς τους.

Συγκεντρωτικά, θα αναφερθούν κάποια από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος επιτήρησης και ελέγχου μιας καλλιέργειας. Το τελικό σύστημα, όπως διαμορφώνεται από την παραπάνω μελέτη, είναι ιδιαιτέρως εύχρηστο, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί και να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε καλλιέργεια με ελάχιστη προσπάθεια. Ο χρήστης απλώς τοποθετεί τον πομπό στο σημείο που τον ενδιαφέρει και συνδέει τον δέκτη σε έναν υπολογιστή, και όλες οι υπόλοιπες λειτουργίες εκκινούν με αυτόματο τρόπο χάρη στον σωστό προγραμματισμό του ενσωματωμένου συστήματος.

Σημαντικό χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις έως 10 χλμ. Με τη χρήση της τεχνολογίας LoRa, οι μετρήσεις στέλνονται απομακρυσμένα στην πλατφόρμα ThingBoard, όπου ο χρήστης έχει πρόσβαση κατά τη διάρκεια όλου του 24ώρου και μπορεί να δέχεται ειδοποιήσεις όταν κάποια μέτρηση είναι εκτός ορίων. Αυτό επιτρέπει την άμεση αντίδραση σε οποιαδήποτε προβλήματα μπορεί να προκύψουν, αποφεύγοντας σφάλματα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά την καλλιέργεια.

Το σύστημα είναι επίσης οικονομικά αποδοτικό. Το συνολικό κόστος κατασκευής του ενσωματωμένου συστήματος ανήλθε περίπου στα 62,93 €, με τον αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 να κοστίζει 7 €, τον αισθητήρα υγρασίας SEN0308 17,63 €, και κάθε μικροελεγκτή LoRa32u4 II 18,65 €. Συγκρίνοντας αυτή την τιμή με υπάρχουσες λύσεις στην αγορά, γίνεται

αντιληπτό ότι το σύστημα αυτό αποτελεί μία προσιτή και αποδοτική επιλογή για την παρακολούθηση καλλιεργειών.

Όσον αφορά τη συνολική λειτουργία του συστήματος, οι μετρήσεις που έγιναν σε εσωτερικό χώρο επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα των αισθητήρων και της τεχνολογίας LoRa στην παρακολούθηση των συνθηκών καλλιέργειας. Η σταθερότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας παρείχαν πολύτιμες πληροφορίες για την υγεία και τις ανάγκες του φυτού.

Ωστόσο, σημειώθηκε ότι ο αισθητήρας υγρασίας χρειάζεται βαθμονόμηση για τη διατήρηση της ακρίβειάς του. Αυτή η απαίτηση μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ειδικών διαλυμάτων βαθμονόμησης και τη σωστή συντήρηση των αισθητήρων.

Συμπερασματικά, το σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης με αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας και τεχνολογία LoRa απέδειξε την αξία του ως ένα αποτελεσματικό, αξιόπιστο και οικονομικά αποδοτικό εργαλείο για την παρακολούθηση και βελτίωση των συνθηκών καλλιέργειας. Μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις του συστήματος μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την απόδοσή του και την ευκολία χρήσης του, προσφέροντας ακόμα περισσότερες δυνατότητες στους καλλιεργητές.

## 4.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στο πλαίσιο της μελλοντικής επέκτασης του συστήματός, σχεδιάζουμε να ενσωματώσουμε έναν αισθητήρα NPK (Άζωτο, Φωσφόρος, Κάλιο) για την ανάλυση του εδάφους, ο οποίος θα μας επιτρέψει να παρέχουμε πιο ολοκληρωμένες και ακριβείς πληροφορίες για τις ανάγκες των καλλιεργειών.

Επιπλέον, στόχος μας είναι να διατηρήσουμε τη σχεδίαση του συστήματος μας όσο το δυνατόν πιο εύκολη στην προσθήκη και άλλων αισθητήρων ή εξαρτημάτων στο μέλλον.

Πέραν της ενσωμάτωσης του αισθητήρα NPK, προγραμματίζουμε επίσης τη χρήση ηλιακής ενέργειας για την τροφοδοσία του συστήματος, προκειμένου να βελτιώσουμε την ενεργειακή αυτονομία και τη βιωσιμότητά του. Η χρήση ηλιακών πάνελ θα εξασφαλίσει τη συνεχή λειτουργία του συστήματος ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου η πρόσβαση σε παραδοσιακές πηγές ενέργειας είναι περιορισμένη και χωρίς την ανάγκη αντικατάσταση μπαταριών σε καθένα από τα αισθητήρια.

Επιπρόσθετα, εργαζόμαστε στη μείωση του μεγέθους του κουτιού και της πλακέτας του συστήματος, καθιστώντας το πιο συμπαγές και ελαφρύ, διευκολύνοντας την εγκατάσταση και μεταφορά του. Το μικρότερο και πιο εργονομικό σχεδιαστικό θα συμβάλλει στην ενσωμάτωση του συστήματος σε διάφορα περιβάλλοντα καλλιέργειας χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργικότητά του.

Τέλος, διερευνούμε τη δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγμένων δυνατοτήτων ανάλυσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης, ώστε να μπορούμε να προσφέρουμε πιο ακριβείς προβλέψεις και συστάσεις στους αγρότες, βελτιστοποιώντας έτσι τη διαχείριση των καλλιεργειών και αυξάνοντας την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα.

Με αυτές τις επεκτάσεις, το σύστημα μας φιλοδοξεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη και ευέλικτη λύση για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των καλλιεργειών, αξιοποιώντας την τελευταία λέξη της τεχνολογίας για τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής.

## 5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] 'An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore'. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8372905>
- [2] V. IO, 'The Basics of Smart Farming: How Is IoT Used in Agriculture?', VITALITY IO, Inc. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://vitality.io/how-is-iot-used-in-agriculture/>
- [3] A. Κωστοπούλου, 'Ενσωματωμένα συστήματα', *Embedded systems*, Δεκεμβρίου 2016, Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/handle/123456789/3125>
- [4] A. Bose, 'Embedded System - Characteristics, Types, Advantages & Disadvantages', *electricalfundablog.com*. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://electricalfundablog.com/embedded-system-characteristics-types-advantages-disadvantages/>
- [5] 'What are embedded systems? | Embedded System Examples | DesignSpark'. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.rs-online.com/designspark/what-is-an-embedded-system>
- [6] 'Microcontroller', *Wikipedia*. 12 Φεβρουάριος 2024. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Microcontroller&oldid=1206532843>
- [7] 'What Is a Microcontroller? The Defining Characteristics and Architecture of a Common Component - Technical Articles'. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/what-is-a-microcontroller-introduction-component-characteristics-component/>
- [8] 'What is a Microcontroller? A Look Inside a Microcontroller', *Arrow.com*. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/engineering-basics-what-is-a-microcontroller>

- [9] Administrator, 'Basics of Microcontrollers - History, Structure and Applications', ElectronicsHub. Ημερομηνία πρόσβασης: 17 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.electronicshub.org/microcontrollers-basics-structure-applications/>
- [10] 'WiFi LoRa 32(V3)', Heltec Automation. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>
- [11] S. Vashi, J. Ram, J. Modi, S. Verma, και C. Prakash, 'Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and security issues', στο *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, Οκτωβρίου 2017, σσ. 492–496. doi: 10.1109/I-SMAC.2017.8058399.
- [12] R. Porkodi και V. Bhuvanewari, 'The Internet of Things (IoT) Applications and Communication Enabling Technology Standards: An Overview', στο *2014 International Conference on Intelligent Computing Applications*, Μαρτίου 2014, σσ. 324–329. doi: 10.1109/ICICA.2014.73.
- [13] P. Sethi και S. R. Sarangi, 'Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications', *J. Electr. Comput. Eng.*, τ. 2017, σ. e9324035, Ιανουαρίου 2017, doi: 10.1155/2017/9324035.
- [14] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, και M. Alzubaidi, 'Internet of Things (IoT) communication protocols: Review', στο *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, Amman, Jordan: IEEE, Μαΐου 2017, σσ. 685–690. doi: 10.1109/ICITECH.2017.8079928.
- [15] 'Which are the most common Internet of Things Wireless protocols?', Emanuele Pagliari. Ημερομηνία πρόσβασης: 7 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://emanuelepagliari.it/2020/10/13/internet-of-things-wireless-communication-protocols/>
- [16] 'Πρωτόκολλο επικοινωνίας', *Βικιπαίδεια*. 19 Μάρτιος 2022. Ημερομηνία πρόσβασης: 12 Μάρτιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%A0%CF%81%CF%89%CF%84%CF%8C%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BB%CE%BF\\_%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%BD%CE%AF%CE%B1%CF%82&oldid=9381199](https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%A0%CF%81%CF%89%CF%84%CF%8C%CE%BA%CE%BF%CE%BB%CE%BB%CE%BF_%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%BD%CE%AF%CE%B1%CF%82&oldid=9381199)



- [17] 'Wi-Fi', *Wikipedia*. 5 Απρίλιος 2024. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wi-Fi&oldid=1217378744>
- [18] 'Bluetooth', *Wikipedia*. 1 Απρίλιος 2024. Ημερομηνία πρόσβασης: 8 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bluetooth&oldid=1216779566>
- [19] 'LoRa', *Wikipedia*. 6 Μάιος 2024. Ημερομηνία πρόσβασης: 11 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=LoRa&oldid=1222490704>
- [20] Macnman, 'What's the advantages of LoRa?', *Medium*. Ημερομηνία πρόσβασης: 5 Ιούλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://medium.com/@digital.macnman/whats-the-advantages-of-lora-7314b8d3dacf>
- [21] 'LoRaWAN Based Panic Button, LoRaWAN Experts Germany', *Mutelcor*. Ημερομηνία πρόσβασης: 11 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://mutelcor.com/lora/>
- [22] Κ. Καλοβρέκτης και Ν. Κατέβας, *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ*, 3ο έκδ. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- [23] J. Liu, L. Ma, και J. Yang, 'Methods and techniques of temperature measurement', στο *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, Yichang, China: IEEE, Σεπτεμβρίου 2011, σσ. 5332–5334. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057907.
- [24] 'Resistance Temperature Detector (RTD): Construction, Working Principle, Types and Advantages | Sensors and Transducers | Teachics'. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://teachics.org/sensors-and-transducers/resistance-temperature-detector-rtd-working/>
- [25] 'A Guide to Semiconductor Temperature Sensors', *AZoSensors.com*. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=2852>
- [26] 'What is a semiconductor temperature sensor? Types and characteristics of temperature sensors - Semiconductor business -Macnica,Inc.', *Macnica, Inc*. Ημερομηνία πρόσβασης: 19 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο:

[https://www.macnica.co.jp/en/business/semiconductor/articles/texas\\_instruments/130365/](https://www.macnica.co.jp/en/business/semiconductor/articles/texas_instruments/130365/)

- [27] 'Infrared Temperature Sensor: what is it and how does it work?' Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.sensortips.com/temperature/infrared-temperature-sensor/>
- [28] 'Infrared Temperature Sensor: Unveiling its Applications and Advantages -'. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://lambdageeks.com/infrared-temperature-sensor/>
- [29] L. Gill, 'What Is An Infrared Thermometer? How Do They Work?', Process Parameters Ltd. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.processparameters.co.uk/what-is-an-infrared-thermometer/>
- [30] G. Korotcenkov, *Handbook of Humidity Measurement Volume 3*. Taylor & Francis Group, 2021. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://books.google.gr/books?id=k\\_CzzgEACAAJ](https://books.google.gr/books?id=k_CzzgEACAAJ)
- [31] 'How does a humidity sensor work? | Electronics360'. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://electronics360.globalspec.com/article/17573/how-does-a-humidity-sensor-work>
- [32] 'Αισθητήρας υγρασίας μικροκυμάτων TS 610 SDI - TROTEC'. Ημερομηνία πρόσβασης: 28 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://gr.trotec.com/proionta-kai-ypiresies/syskeyes-metrisis/pollaples-leitoyrgies/t3000/aisthitires-sdi/aisthitires-ygrasias-ylikoy/ts-610-sdi/>
- [33] J. Hrisko, 'Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing'.
- [34] 'TDR moisture sensor', *Wikipedia*. 7 Φεβρουάριος 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 28 Δεκέμβριος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=TDR\\_moisture\\_sensor&oldid=1138001192](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=TDR_moisture_sensor&oldid=1138001192)
- [35] 'Waterproof\_Capacitive\_Soil\_Moisture\_Sensor\_SKU\_SEN0308-DFRobot'. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://wiki.dfrobot.com/Waterproof\\_Capacitive\\_Soil\\_Moisture\\_Sensor\\_SKU\\_SEN0308](https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0308)
- [36] 'Gravity: Waterproof DS18B20 Temperature Sensor Kit'. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.dfrobot.com/product-1354.html>

[37] '18.03€ 5% OFF|Arduino Lora Module 868mhz | Arduino 915mhz Module | Iot Development Board | Lora32u4 - Landing Gear - Aliexpress', aliexpress.com. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: [https://www.aliexpress.com/item/32947015211.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://www.aliexpress.com/item/32947015211.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=)