



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Ανάπτυξη Cloud-based IoT συστήματος αισθητήρων
θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους με χρήση του
LoRaWAN για εφαρμογές έξυπνης γεωργίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Γ. Βέργης

Επιβλέπων καθηγητής: Ευάγγελος Χριστοφόρου

Αθήνα 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη Cloud-based IoT συστήματος αισθητήρων
θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους με χρήση του
LoRaWAN για εφαρμογές έξυπνης γεωργίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Γ. Βέργης

Επιβλέπων καθηγητής: Ευάγγελος Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Μαρτίου 2022

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Σούντρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2022

.....
Παναγιώτης Γ. Βέργης

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

Copyright © Παναγιώτης Βέργης

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

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί ραγδαία οι τεχνολογίες των αισθητήρων και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Υπολογίζεται ότι το 2020 ο αριθμός των «έξυπνων» αντικειμένων ξεπερνούσε τα 200 δισεκατομμύρια. Επίσης, ο ετήσιος οικονομικός αντίκτυπος του IoT εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται από 2,7 τρισεκατομμύρια δολάρια έως 6,2 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2025. Ωστόσο, οι εφαρμογές στον τομέα της γεωργίας αποτελούν μόλις το 4 % του μεριδίου αγοράς των εφαρμογών IoT. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι βέβαιο ότι θα επιφέρουν την ανάγκη για την ανάπτυξη της αγροτικής παραγωγής και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών με στόχο την βελτιστοποίηση και την αύξηση της αποδοτικότητας στην γεωργία. Στην παρούσα εργασία αναλύονται οι τεχνολογίες των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους και του IoT, καθώς και οι εφαρμογές που μπορούν να έχουν στην γεωργία. Επίσης, στα πλαίσια της εργασίας, αναπτύχθηκε ένα Cloud-based IoT σύστημα αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους με χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN, του διακομιστή δικτύου The Things Stack Community Edition και της Cloud πλατφόρμας TagoIO.

Λέξεις Κλειδιά: Αισθητήρες θερμοκρασίας, Αισθητήρες υγρασίας εδάφους, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Cloud Computing, LoRaWAN, IoT στην Γεωργία

Abstract

In recent decades sensor and Internet of Things (IoT) technologies have developed rapidly. It is estimated that in 2020 the number of "smart" objects exceeded 200 billion. The IoT's annual financial impact is also estimated to range from \$ 2.7 trillion to \$ 6.2 trillion by 2025. However, agricultural applications account for only 4 % of the IoT applications' market share. The increase in world population and the effects of climate change will certainly bring about the need to develop agricultural production and the application of new technologies in order to optimize and increase efficiency in agriculture. This thesis analyzes the technologies of temperature and soil moisture sensors and the IoT, as well as their applications in agriculture. Also, as part of this thesis, a Cloud-based IoT system of soil temperature and moisture sensors was developed using the LoRaWAN communication protocol, The Things Stack Community Edition network server and the TagoIO Cloud platform.

Key Words: Temperature sensors, Soil Moisture sensors, Internet of Things, Cloud Computing, LoRaWAN, IoT in Agriculture

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τα έτη 2020-2022 στον Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 2022. Το θέμα της εργασίας είναι η τεχνολογία αισθητήρων και Internet of Things και οι εφαρμογές τους στη γεωργία για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και υγρασίας στο έδαφος.

Υπεύθυνος καθηγητής ήταν ο κ. Ευάγγελος Χριστοφόρου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη του και την δυνατότητα που μου παρείχε να εκπονήσω την διπλωματική μου στον τομέα των αισθητήρων και συστημάτων. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα Αντώνη για την άψογη συνεργασία και τον χρόνο που αφιέρωσε ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η εργασία μου. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει, καθώς και στον φίλο μου Δημήτρη και την κοπέλα μου Δανάη για την στήριξη και τη συμπαράσταση τους όλο αυτό το διάστημα.

Παναγιώτης Βέργης, Φεβρουάριος 2022

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.2	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	2
1.3	ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	3
2.1	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	3
2.1.1	Θερμίστορ	4
2.1.2	Θερμοζεύγη	7
2.1.3	Αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου αντίστασης (RTD).....	11
2.1.4	Αισθητήρες ημιαγωγών	14
2.2	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ.....	18
2.2.1	Ωμικοί αισθητήρες	20
2.2.2	Αισθητήρες χωρητικότητας.....	22
2.2.3	Αισθητήρες χρόνου ανάκλασης.....	26
2.2.4	Αισθητήρες σκέδασης θερμότητας	30
2.2.5	Τενσιόμετρα	33
2.3	ΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ (ΙΟΤ)	35
2.3.1	Αρχιτεκτονική του ΙοΤ.....	37
2.3.2	Συσκευές ΙοΤ.....	42
2.3.3	Πρωτόκολλα Επικοινωνίας.....	50
2.3.4	Cloud Computing.....	58
2.4	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΙΟΤ ΣΤΗΝ ΓΕΩΡΓΙΑ	67
2.4.1	Πεδία εφαρμογής.....	67
2.4.2	Θερμοκρασία του εδάφους	72
2.4.3	Υγρασία του εδάφους.....	76
2.4.4	Συστήματα ΙοΤ για μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους.....	82
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	99
3.1	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	99
3.1.1	Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας.....	100
3.1.2	Μικροελεγκτής & Gateway.....	101

3.1.3	<i>LoRaWAN</i>	104
3.1.4	<i>The Things Network & The Things Stack</i>	115
3.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	121
3.2.1	<i>Ανάλυση λειτουργίας και βαθμονόμηση των αισθητήρων</i>	121
3.2.2	<i>Δημιουργία της εφαρμογής στο The Things Stack</i>	131
3.2.3	<i>Επικοινωνία με τη συσκευή και αποστολή δεδομένων</i>	137
3.2.4	<i>Αποκωδικοποίηση και Integration με το TagoIO</i>	142
3.2.5	<i>Μετρήσεις και Αποτελέσματα</i>	148
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	152
4.1	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	152
4.2	ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	154
4.3	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	154
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	156
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	163

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Ο παγκόσμιος πληθυσμός εκτιμάται ότι το 2050 θα είναι περίπου 9,7 δισεκατομμύρια, ως εκ τούτου θα υπάρχει μεγάλη ζήτηση για τρόφιμα. Αυτό σε συνδυασμό με τους μειωμένους φυσικούς πόρους, τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και τις απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες λόγω της κλιματικής αλλαγής καθιστούν την επισιτιστική ασφάλεια βασικό μέλημα για τις περισσότερες χώρες. Οι αισθητήρες, με τη μορφή ενσύρματων και ασύρματων αισθητήρων, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στη γεωργία τις τελευταίες δεκαετίες. Η αίσθηση του περιβάλλοντος στο οποίο λαμβάνει χώρα η παραγωγή και, πιο πρόσφατα, οι αντιδράσεις των φυτών στο κλίμα είναι ζωτικής σημασίας για τις σωστές και πιο ακριβείς αποφάσεις, βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας των ποικιλιών.

Ο κόσμος στρέφεται ολοένα και περισσότερο στη χρήση του IoT σε συνδυασμό με την ανάλυση δεδομένων για να καλύψει τις παγκόσμιες απαιτήσεις σε τρόφιμα τα επόμενα χρόνια. Ταυτόχρονα, το Cloud Computing, το οποίο είναι ήδη πολύ δημοφιλές, και το Fog Computing παρέχουν επαρκείς πόρους και λύσεις για τη διατήρηση, αποθήκευση και ανάλυση των τεράστιων όγκων δεδομένων που παράγονται από συσκευές IoT. Προβλέπεται ότι οι εγκαταστάσεις συσκευών IoT στον τομέα της γεωργίας θα αυξηθούν από 30 εκατομμύρια το 2015 σε 75 εκατομμύρια έως το 2020. Η τεχνολογία του IoT και της ανάλυσης δεδομένων Big Data μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση διαδικασιών, την πρόβλεψη καταστάσεων και τη βελτίωση πολλών δραστηριοτήτων, ακόμη και σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, θα επιτρέψει την ανάπτυξη της έξυπνης γεωργίας, η οποία αναμένεται να αποφέρει υψηλή απόδοση και λειτουργικότητα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούν οι τεχνολογίες αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους και η τεχνολογία του Internet of Things. Επίσης η εργασία πραγματεύεται την συνεργασία των τεχνολογιών IoT και Cloud Computing για την ανάπτυξη συστημάτων αισθητήρων και τις εφαρμογές που έχουν στον πρωτογενή τομέα παραγωγής. Τέλος, η εργασία αφορά στην ανάπτυξη ενός IoT συστήματος αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους για εφαρμογές στην γεωργία.

1.2 Σκοπός και στόχοι

Αρχικός στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η εξοικείωση του αναγνώστη με τις σύγχρονες τεχνολογίες αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας εδάφους, καθώς και με τις τεχνολογίες του IoT και Cloud Computing και τις εφαρμογές τους στον τομέα της γεωργίας. Επίσης, η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου Cloud-based IoT συστήματος αισθητήρων για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους με χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN. Τελικός στόχος της εργασίας είναι η αξιολόγηση του συστήματος, η εξαγωγή συμπερασμάτων για την λειτουργικότητά του καθώς και η παράθεση των πιθανών μελλοντικών βελτιώσεων και επεκτάσεών του.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, ακολουθούμενα από τη βιβλιογραφία και ένα παράρτημα. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, στην οποία αναφέρονται το αντικείμενο μελέτης, οι στόχοι και η δομή της. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται και αναλύεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του αντικειμένου της εργασίας. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του συστήματος της εργασίας και αναλύεται ολόκληρη η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την ανάπτυξή του. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά η αξιολόγηση του συστήματος και τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν, καθώς και προτάσεις για πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Η μέτρηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με την χρήση αισθητήρων και διατάξεων που φέρουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Στη δομή του, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας φέρει ακροδέκτες οι οποίοι θα πρέπει να έχουν την ελάχιστη δυνατή θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αντίσταση, ώστε να μην επηρεάζουν τη μέτρηση. Το υλικό του αισθητήριου στοιχείου πολλές φορές τοποθετείται μέσα σε κέλυφος το οποίο το προστατεύει από παράγοντες του περιβάλλοντος που μπορεί να το διαβρώσουν. Το κέλυφος θα πρέπει να έχει ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως να φέρει υψηλή θερμική αγωγιμότητα ώστε το στοιχείο του αισθητήρα να ανταποκρίνεται άμεσα στις θερμοκρασιακές αλλαγές του περιβάλλοντος και να προστατεύει το αισθητήριο στοιχείο από παράγοντες του περιβάλλοντος όπως την υγρασία, η οποία μπορεί να μεταβάλλει την ακρίβεια της μέτρησης του αισθητήριου στοιχείου [1].

Οι τεχνικές μέτρησης θερμοκρασίας που συναντώνται συχνότερα αξιοποιούν τις ιδιότητες των υλικών που μεταβάλλονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Αυτές περιλαμβάνουν:

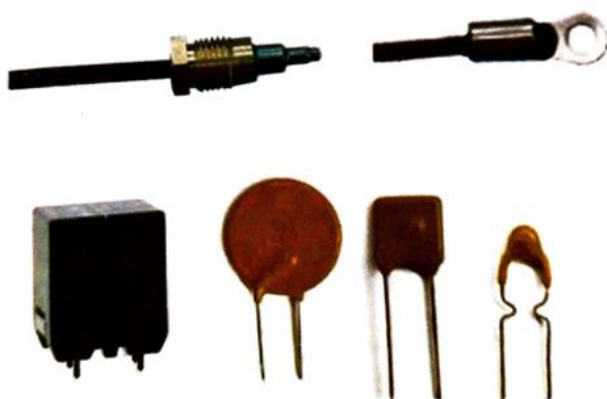
- μεταβολές των διαστάσεων,
- μεταβολές της ωμικής αντίστασης,
- μεταβολές χαρακτηριστικών των ημιαγωγών,
- μεταβολές ακτινοβολούμενης ενέργειας και
- παραγωγή διαφοράς δυναμικού λόγω διαφοράς θερμοκρασίας σε διαφορετικά μέταλλα [1]

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η αρχή λειτουργίας ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αισθητήρων, δηλαδή αισθητήρων που αξιοποιούν τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες των αισθητήριων στοιχείων του. Πιο συγκεκριμένα, οι τύποι αισθητήρων που αναλύονται παρακάτω είναι τα θερμίστορ, τα θερμοζεύγη, οι αισθητήρες τύπου αντίστασης ή RTDs και οι αισθητήρες ημιαγωγών.

2.1.1 Θερμίστορ

Το θερμίστορ (Εικόνα 1) είναι ένας τύπος αντίστασης, η τιμή της οποίας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Η λέξη θερμίστορ είναι συνδυασμός των αγγλικών λέξεων thermal και resistor. Τα θερμίστορ χρησιμοποιούνται ευρέως για τον περιορισμό της απότομης αύξησης των ρευμάτων, σαν αισθητήρες θερμοκρασίας, σαν αυτοεπαναφερόμενες ασφάλειες και σαν αυτορρυθμιζόμενα στοιχεία θέρμανσης. Υπάρχουν δύο τύποι θερμίστορ: τα θερμίστορ Αρνητικού Συντελεστή Θερμοκρασίας (Negative Temperature Coefficient - NTC), στα οποία η αντίσταση μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία και τα Θετικού Συντελεστή Θερμοκρασίας (Positive Temperature Coefficient - PTC), στα οποία η αντίσταση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

Τα θερμίστορ γενικά παράγονται χρησιμοποιώντας οξειδία μετάλλων σε σκόνη. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζονται από υλικά ημιαγωγών που έχουν υποστεί επεξεργασία με οξειδία χρωμίου, κοβαλτίου, σιδήρου, μαγγανίου και νικελίου. Η μορφή τους ποικίλει από δισκίδια και κάψουλες μέχρι και στυλίσκους, έχουν μικρό μέγεθος και εμφανίζουν μικρούς χρόνους απόκρισης [1]. Τα θερμίστορ μπορούν πλέον να επιτύχουν ακρίβεια σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών όπως $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ή $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ από $0 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $70 \text{ }^\circ\text{C}$ με εξαιρετικά μακροπρόθεσμα σταθερότητα. Το τυπικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας ενός θερμίστορ είναι από $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ έως $+150 \text{ }^\circ\text{C}$, αν και ορισμένα θερμίστορ από γυάλινο σώμα έχουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας $+300 \text{ }^\circ\text{C}$.



Εικόνα 1. Τυπικά δείγματα θερμίστορ [1]

Σε μία πρώτη προσέγγιση, η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση και τη θερμοκρασία είναι γραμμική και ισχύει:

$$\Delta R = k\Delta T \quad (2.1.1)$$

όπου:

ΔR είναι η αλλαγή στην τιμή της αντίστασης,

ΔT η αλλαγή στην θερμοκρασία και

k ο θερμικός συντελεστής της αντίστασης.

Εάν το k είναι θετικό, η αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, οπότε η συσκευή καλείται θερμίστορ θετικού συντελεστή θερμοκρασίας (PTC) ή resistor. Εάν το k είναι αρνητικό, η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και η συσκευή καλείται θερμίστορ αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (NTC).

Στην πράξη η γραμμική προσέγγιση που αναφέρθηκε παραπάνω ισχύει μόνο σε μικρές περιοχές θερμοκρασιών. Για ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασιών η καμπύλη θερμοκρασίας - αντίστασης πρέπει να περιγραφεί με περισσότερη λεπτομέρεια. Η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση και τη θερμοκρασία των θερμίστορ δίνεται από την πολυωνυμική εξίσωση Steinhart–Hart τριών όρων:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R)^3 \quad (2.1.2)$$

όπου:

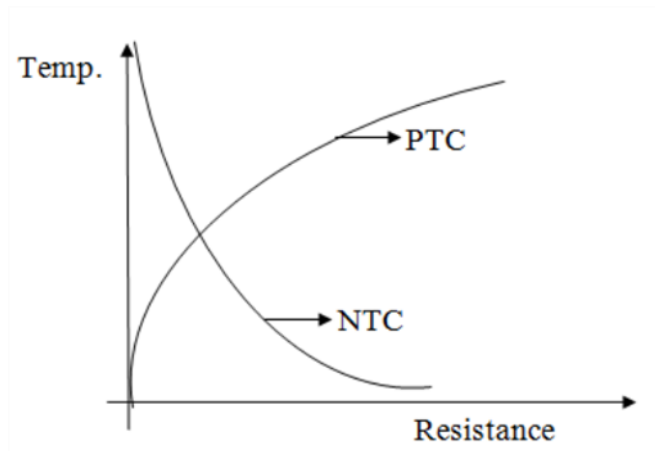
A , B και C οι συντελεστές του θερμίστορ (K^{-1}),

T η θερμοκρασία σε K σε θερμοκρασία αναφοράς $20\text{ }^\circ\text{C}$ και

R είναι η αντίσταση σε Ω σε θερμοκρασία αναφοράς $20\text{ }^\circ\text{C}$ [1].

Η εξίσωση δεν είναι ακριβής για ολόκληρο το πεδίο θερμοκρασιών, αλλά μόνο για ζώνες θερμοκρασιών. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εφαρμόζονται διαφορετικοί συντελεστές A , B και C σε κάθε ζώνη μέτρησης θερμοκρασίας [1]. Ωστόσο, το σφάλμα στην εξίσωση Steinhart–Hart είναι γενικά λιγότερο από $0.02\text{ }^\circ\text{C}$ για

μετρήσεις θερμοκρασίας σε εύρος πάνω από 200 °C. Η Εικόνα 2 δείχνει τις χαρακτηριστικές καμπύλες των NTC και PTC θερμίστορ.



Εικόνα 2. Χαρακτηριστική καμπύλη NTC και PTC θερμίστορ [2]

Τα θερμίστορ αρνητικού συντελεστή χαρακτηρίζονται επίσης και από την εξίσωση με την παράμετρο B , που αποτελεί μια άλλη μορφή της εξίσωσης Steinhart–Hart και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$R_{TH} = R_{REF} \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{REF}}\right)} \quad (2.1.3)$$

όπου:

R_{TH} η αντίσταση του θερμίστορ,

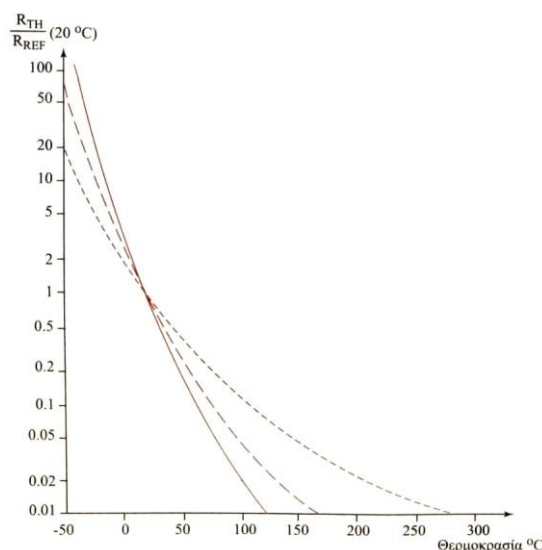
R_{REF} η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς,

T η θερμοκρασία,

T_{REF} η θερμοκρασία αναφοράς του θερμίστορ (25 °C, 298,15 K) και

B ο συντελεστής βαθμονόμησης του θερμίστορ, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του και λαμβάνει τιμές από 3000 έως 5000 K [1].

Στην Εικόνα 3 φαίνεται το διάγραμμα μεταβολής του λόγου R_{TH}/R_{REF} σε θερμίστορ NTC με τη θερμοκρασία για διάφορες τιμές της σταθεράς B .



Εικόνα 3. Διάγραμμα μεταβολής του R_{TH}/R_{REF} με τη θερμοκρασία [1]

2.1.2 Θερμοζεύγη

Το θερμοζεύγος είναι μια ηλεκτρική συσκευή που αποτελείται από δύο διαφορετικούς ηλεκτρικούς αγωγούς από διαφορετικά μέταλλα ή κράματα μετάλλων που σχηματίζουν μια ηλεκτρική σύνδεση. Ένα θερμοζεύγος παράγει μια εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία τάση ως αποτέλεσμα της θερμοηλεκτρικής επίδρασης, και αυτή η τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Τα θερμοζεύγη είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος αισθητήρα θερμοκρασίας· είναι φθηνά, εναλλάξιμα, παρέχονται με τυπικούς συνδετήρες και μπορούν να μετρήσουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Σε αντίθεση με τις περισσότερες άλλες μεθόδους μέτρησης θερμοκρασίας, τα θερμοζεύγη δεν απαιτούν εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Ο κύριος περιορισμός με τα θερμοστοιχεία είναι η ακρίβεια, καθώς είναι δύσκολο να επιτευχθούν σφάλματα συστήματος κάτω του ενός βαθμού Κελσίου.

Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται ευρέως στην επιστήμη και τη βιομηχανία. Πιθανές εφαρμογές περιλαμβάνουν μέτρηση θερμοκρασίας για κλιβάνους, καυσαέρια αεριοστρόβιλων, κινητήρες ντίζελ και άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Τα θερμοζεύγη χρησιμοποιούνται επίσης σε σπίτια, γραφεία και επιχειρήσεις ως αισθητήρες θερμοκρασίας σε θερμοστάτες και επίσης ως αισθητήρες φλόγας σε συσκευές ασφαλείας για συσκευές με αέριο.

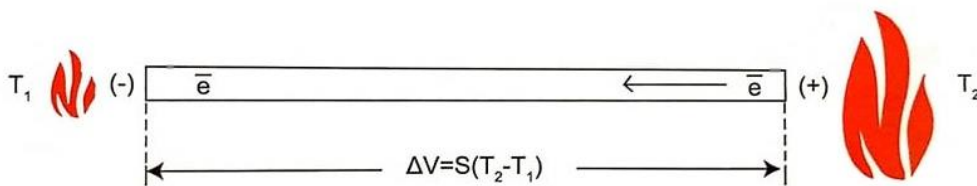
Η αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο ή αλλιώς στο φαινόμενο Seebeck (Εικόνα 4). Το 1821 ο T.J. Seebeck ανακάλυψε ότι

θερμαίνοντας ένα μέταλλο που οι δύο άκρες του βρίσκονται σε διαφορετικά θερμικά περιβάλλοντα $T_2 > T_1$ αναπτύσσεται μικρή διαφορά δυναμικού dV λόγω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου, ή αλλιώς του φαινομένου Seebeck. Κατά το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, τα ηλεκτρόνια του μεταλλικού αγωγού που βρίσκονται στο υψηλό θερμοκρασιακό περιβάλλον T_2 διαχέονται προς την περιοχή η οποία εκτίθεται στη θερμοκρασία T_1 λόγω της υψηλής τους ενεργειακής στάθμης. Η διαφορά δυναμικού δίνεται από τη σχέση:

$$dV = S(T) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.1.4)$$

όπου:

$S(T)$ ο θερμοηλεκτρικός συντελεστής ή συντελεστής Seebeck του υλικού (Volts/K) [1].



Εικόνα 4. Θερμοηλεκτρικό φαινόμενο [1]

Ο συντελεστής Seebeck αποτελεί έκφραση των ενεργειακών μεταβολών των ηλεκτρονίων και δίνεται από τη σχέση:

$$S \approx - \frac{2\pi^2 k \left(\frac{1}{2} kT\right)}{3eE_f} \quad (2.1.5)$$

όπου:

k η σταθερά Boltzmann,

T η θερμοκρασία Fermi και

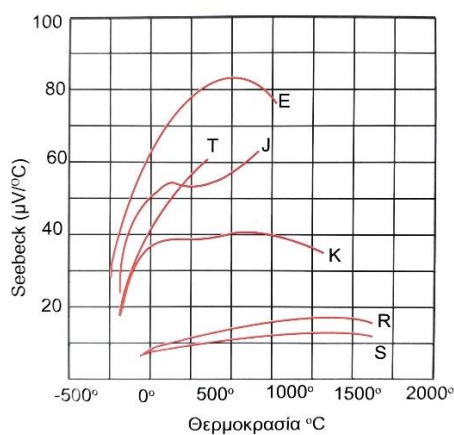
E_f η ενέργεια Fermi [1].

Ορισμένοι συνδυασμοί μετάλλων και κραμάτων είναι δημοφιλείς ως βιομηχανικά πρότυπα. Η επιλογή του συνδυασμού εξαρτάται από το κόστος, τη

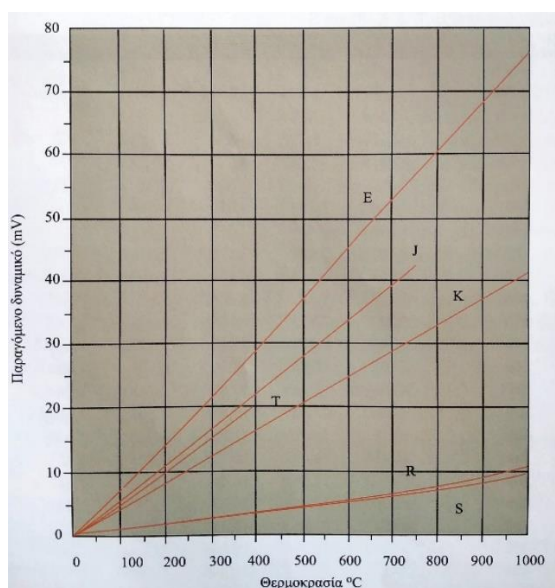
διαθεσιμότητα, την ευκολία, το σημείο τήξης, τις χημικές ιδιότητες, τη σταθερότητα και την παραγωγή. Διαφορετικοί τύποι ταιριάζουν καλύτερα για διαφορετικές εφαρμογές. Επιλέγονται συνήθως με βάση το εύρος θερμοκρασίας και την απαιτούμενη ευαισθησία. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ISA (Instrument Society of America) τα θερμοζεύγη χαρακτηρίζονται από τα υλικά κατασκευής τους και τον κατά σύμβαση τύπο τους. Οι συνηθέστεροι τύποι θερμοζεύγων είναι οι T, J, K, E, R και S. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα υλικά κατασκευής, το εύρος θερμοκρασιών και το παραγόμενο δυναμικό ανά °C ενώ η Εικόνα 5 παρουσιάζει τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή Seebeck και του δυναμικού ανά θερμοκρασία για τους τύπους θερμοζεύγων E, T, J, K, R και S.

Πίνακας 1. Υλικά κατασκευής, εύρος μέτρησης θερμοκρασιών και δυναμικό ανά °C για τους τύπους θερμοζεύγων E, T, J, K, R και S

Τύπος	Υλικά	Εύρος θερμοκρασιών	Δυναμικό ανά °C
T	Χαλκός – Κωνσταντάνη	-200 °C - +350 °C	40 mV/°C
J	Σίδηρος – Κωνσταντάνη	95 °C - 760 °C	50 μV/°C
K	Chromel – Alumel	95 °C - 1260 °C	40 μV/°C
E	Chromel – Κωνσταντάνη	95 °C - 900 °C	68 μV/°C
R	Ρόδιο 13% + Πλατίνα 87%	870 °C - 1450 °C	11.5 μV/°C
S	Ρόδιο 10% + Πλατίνα 90%	980 °C - 1450 °C	10 μV/°C



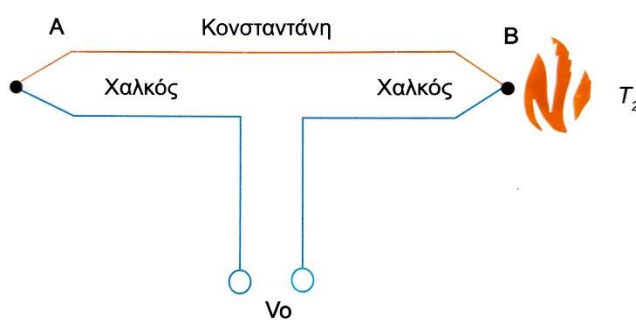
(α)



(β)

Εικόνα 5. Διάγραμμα μεταβολής α) συντελεστή Seebeck και θερμοκρασίας και β) δυναμικού συναρτήσει της θερμοκρασίας για τους τύπους θερμοζεύγων E, T, J, K, R και S [1]

Σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας απαιτείται πάντοτε ένα σημείο με θερμοκρασία αναφοράς η τιμή της οποίας θα πρέπει να δίνεται με υψηλή ακρίβεια. Στην Εικόνα 6 φαίνεται η διάταξη δύο μεταλλικών στοιχείων, που δημιουργούν δύο επαφές: την επαφή A (θερμοκρασία T_1) και την επαφή B (θερμοκρασία $T_2 > T_1$). Η επαφή A καλείται επαφή αναφοράς (reference junction) ή ψυχρή επαφή (cold junction) και η επαφή B, όπου γίνεται η μέτρηση, καλείται επαφή μέτρησης ή θερμή επαφή (hot junction).



Εικόνα 6. Θερμοζεύγος δύο θερμικών επαφών [1]

Η θερμοηλεκτρική τάση δίνεται από τη σχέση:

$$dV = (S_{Con}(T) - S_{Cu}(T)) \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.1.6)$$

όπου:

S_{Con} και S_{Cu} οι συντελεστές Seebeck των υλικών (κοινοκωνία και χαλκός στο συγκεκριμένο παράδειγμα)

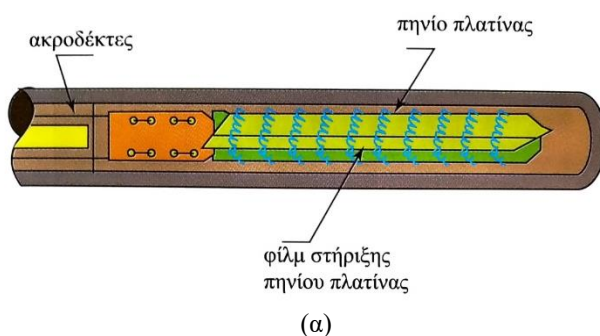
Από την παραπάνω σχέση διαπιστώνεται πως είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση της θερμοκρασίας T_2 όταν η θερμοκρασία T_1 έχει τιμή $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Ωστόσο σε διατάξεις που ένα από τα δύο στοιχεία του θερμοζεύγους δεν είναι από υλικό χαλκού, δεν είναι επιτρεπτή η απευθείας σύνδεση του αισθητήρα στο σύστημα μέτρησης. Επίσης, στην πράξη δεν είναι εύκολο η ψυχρή επαφή να διατηρείται σε σταθερή και γνωστή θερμοκρασία αναφοράς. Η συνηθέστερη τεχνική είναι η χρήση αισθητήρα θερμοκρασίας στο σημείο της ψυχρής επαφής, σε ισοθερμικό σύνδεσμο με αυτή, ο οποίος κάνει γνωστή τη θερμοκρασία αναφοράς και τις μεταβολές της συναρτήσει του χρόνου. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της ισοθερμικής επαφής μπορούν να

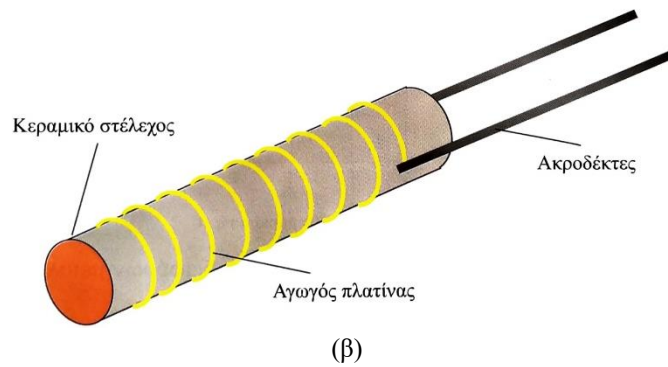
χρησιμοποιηθούν στοιχεία αισθητήρων RTD (Resistance Temperature Detectors), θερμίστορ ή διατάξεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [1].

2.1.3 Αισθητήρες θερμοκρασίας τύπου αντίστασης (RTD)

Οι αισθητήρες τύπου αντίστασης, που ονομάζονται επίσης ανιχνευτές θερμοκρασίας αντίστασης (Resistance Temperature Detectors - RTD), είναι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Η λειτουργία τους βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων μεταβάλλεται με γνωστό και προβλέψιμο τρόπο σε αντίστοιχες μεταβολές της θερμοκρασίας τους. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, η ηλεκτρική αντίσταση του μετάλλου αυξάνεται, ενώ καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, ελαττώνεται και αντίστοιχα η αντίστασή τους [1].

Συνήθως τα στοιχεία RTD αποτελούνται από ένα υψηλής ποιότητας λεπτό σύρμα από κάποιο μέταλλο σε μορφή πηνίου τυλιγμένο με τη σειρά του σε μορφή πηνίου γύρω από έναν πυρήνα από μη αγώγιμο υλικό, όπως στην Εικόνα 7α. Το σύρμα είναι καθαρό υλικό, συνήθως πλατίνα, νικέλιο ή χαλκός. Εναλλακτικός τρόπος κατασκευής είναι η στήριξη του πηνίου του μεταλλικού σύρματος σε κύλινδρο από μη αγώγιμο κεραμικό υλικό με υψηλή αντοχή στη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7β. Επίσης είναι δυνατή η κατασκευή μινιατούρων αισθητήρων RTD για ειδικές εφαρμογές [1]. Καθώς τα στοιχεία RTD είναι εύθραυστα, συχνά στεγάζονται σε προστατευτικούς καθετήρες. Οι αισθητήρες RTD, που έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και επαναληψιμότητα, αντικαθιστούν σιγά σιγά τους αισθητήρες θερμοζεύγων σε βιομηχανικές εφαρμογές κάτω των 600 °C.





Εικόνα 7. RTD σε α) μορφή σπειρών, β) σε πηνίο με φορέα κυλινδρικό κεραμικό υλικό [1]

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα RTD έχουν μια ακριβή σχέση αντίστασης - θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται για να παρέχει μια ένδειξη της θερμοκρασίας. Γενικά η ηλεκτρική (ωμική) αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από την ειδική αντίσταση, το μήκος και την επιφάνεια του υλικού σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1.7)$$

όπου:

- ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού,
- l το μήκος του αγωγού και
- A η εποφάνεια του αγωγού [1].

Η ειδική αντίσταση ενός αγωγού σχετίζεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_o [1 + \alpha(T - T_o)] \quad (2.1.8)$$

όπου:

- ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία T ,
- ρ_o η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία αναφοράς T_o (0 ή 20 °C) και
- α ο θερμικός συντελεστής του υλικού της ηλεκτρικής αντίστασης [1].

Ο θερμικός συντελεστής α είναι ένας συντελεστής θερμοκρασίας-αντίστασης, συνήθως δίνεται σε μονάδες $\Omega / (\Omega \cdot ^\circ\text{C})$ και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

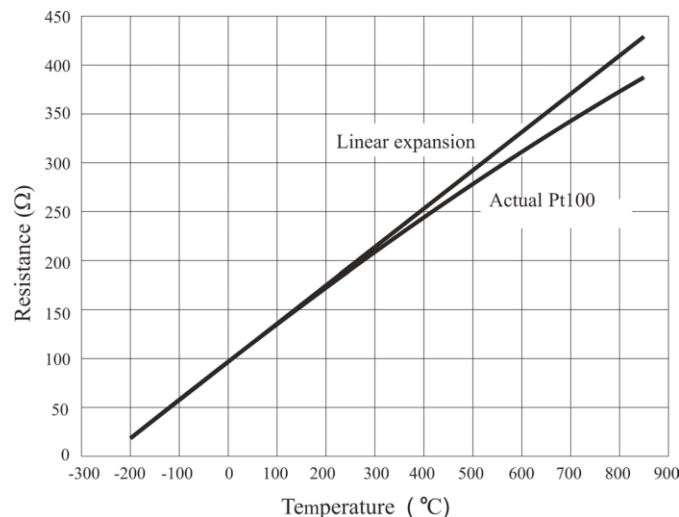
$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^{\circ}\text{C} \cdot R_0} \quad (2.1.9)$$

όπου:

R_0 η αντίσταση του αισθητήρα στους 0°C και

R_{100} η αντίσταση του αισθητήρα στους 100°C .

Η καθαρή πλατίνα, που προτάθηκε από τον Sir William Siemens ως στοιχείο για έναν ανιχνευτή θερμοκρασίας τύπου αντίστασης, έχει $\alpha = 0,003925 \Omega/(\Omega \cdot ^{\circ}\text{C})$ στην περιοχή 0 έως 100°C και χρησιμοποιείται στην κατασκευή εργαστηριακών RTD. Αντίθετα, δύο ευρέως αναγνωρισμένα πρότυπα για βιομηχανικούς αισθητήρες RTD, τα IEC 60751 και ASTM E-1137 καθορίζουν $\alpha = 0,00385 \Omega/(\Omega \cdot ^{\circ}\text{C})$. Πριν υιοθετηθούν ευρέως αυτά τα πρότυπα, χρησιμοποιούνταν διάφορες τιμές. Είναι ακόμη δυνατό να βρεθούν παλαιότεροι αισθητήρες με πλατίνα με συντελεστή $\alpha = 0,003916 \Omega/(\Omega \cdot ^{\circ}\text{C})$ και $0,003902 \Omega/(\Omega \cdot ^{\circ}\text{C})$. Αυτές οι διαφορετικές τιμές του θερμικού συντελεστή α για την πλατίνα επιτυγχάνονται με νόθευση (doping), εισάγοντας προσεκτικά προσμίξεις, οι οποίες ενσωματώνονται στη δομή του πλέγματος της πλατίνας και έχουν ως αποτέλεσμα μια διαφορετική καμπύλη R-T και συνεπώς διαφορετική τιμή α . Στην Εικόνα 8 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα PT100 κατασκευασμένου από πλατίνα.

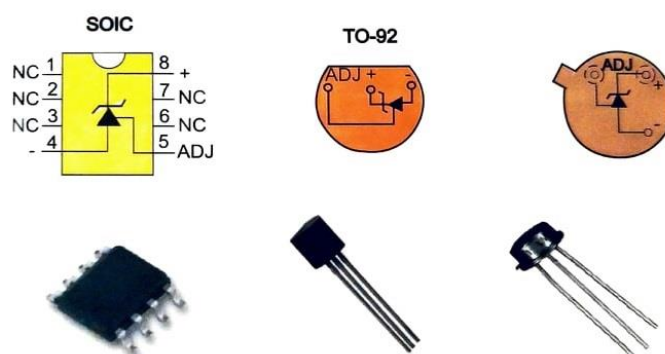


Εικόνα 8. Συνάρτηση μεταφοράς του PT100 [3]

Οι αισθητήρες RTD διαφέρουν από τα θερμίστορ στα εξής: στο υλικό που χρησιμοποιείται, καθώς στα θερμίστορ είναι γενικά ένα κεραμικό ή πολυμερές, ενώ στους RTD χρησιμοποιούνται καθαρά μέταλλα, και στη θερμοκρασιακή συμπεριφορά, αφού τα RTD είναι χρήσιμα σε μεγάλες περιοχές θερμοκρασιών, ενώ τα θερμίστορ πετυχαίνουν μεγάλες ακρίβειες μέσα σε περιορισμένη περιοχή θερμοκρασιών, τυπικά από $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας με αισθητήρες RTD χρησιμοποιούνται διατάξεις όπως πχ γέφυρα Wheatstone, στις οποίες συνδέεται το αισθητήριο στοιχείο για τη μέτρηση της αντίστασης.

2.1.4 Αισθητήρες ημιαγωγών

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας ημιαγωγών ή αισθητήρες στερεάς κατάστασης (Εικόνα 9) παράγονται στην μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated Circuit - IC). Η αρχή λειτουργίας τους προκύπτει από το γεγονός ότι η χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος των διόδων ημιαγωγών είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Η χρήση αισθητήρων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων περιορίζεται σε εφαρμογές όπου η θερμοκρασία κυμαίνεται από $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4], ενώ επίσης το ακατέργαστο αισθητήριο στοιχείο γενικά συσκευάζεται σε τυπική θήκη για ηλεκτρονικές συσκευές, η οποία δεν είναι ιδανική για ακριβή μέτρηση θερμοκρασίας [5]. Το εύρος μέτρησης αυτών των αισθητήρων μπορεί να είναι μικρό σε σύγκριση με αυτό των θερμοστοιχείων και των RTD, ωστόσο παρουσιάζουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα: είναι μικροί, ακριβείς και φθηνοί [4], ενώ επίσης έχουν καλή ευαισθησία και γραμμικότητα [5].



Εικόνα 9. Τύποι ολοκληρωμένων αισθητήρων θερμοκρασίας του εμπορίου [1]

Επίσης εάν οι αισθητήρες βαθμονομηθούν (calibration), είναι δυνατή η βελτίωση της ακρίβειας μέτρησης. Συνήθως, μια βαθμονόμηση δύο σημείων έχει ως αποτέλεσμα πέντε φορές μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ μια βαθμονόμηση τριών σημείων δίνει μια δεκαπλάσια βελτίωση σε ολόκληρο το εύρος θερμοκρασίας. Εάν το εύρος θερμοκρασίας είναι περιορισμένο, είναι δυνατή η επίτευξη ακόμη καλύτερης ακρίβειας. Ορισμένοι αισθητήρες, λόγω της ευαισθησίας τους, μπορεί να είναι πολύ καλοί στη μέτρηση μικρών αλλαγών θερμοκρασίας [5].

Σε μια επαφή διόδου, το ρεύμα ορθής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$I_D \approx I_S [e^{(V_D/\eta V_T)} - 1] \quad (2.1.10)$$

όπου:

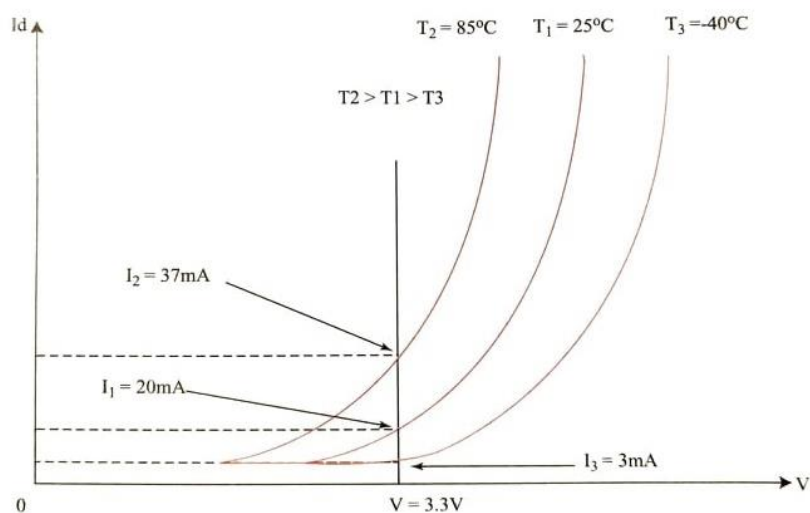
I_S το ρεύμα κορεσμού της διόδου,

η ο συντελεστής επαφής, για $S_i = 1$,

V_T η θερμοκή τάση που ισούται με $\frac{kT}{q}$ και

V_D η τάση πόλωσης της διόδου [1].

Στα διαγράμματα της εικόνας Εικόνα 10 φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος I_D της διόδου για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



Εικόνα 10. Σμήνος καμπυλών μεταβολής ρεύματος διόδου και θερμοκρασίας επαφής [1]

Οι περισσότεροι αισθητήρες στερεάς κατάστασης επαφής PN χρησιμοποιούν διπολικά τρανζίστορ για τα οποία η τάση βάσης-εκπομπού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της επαφής του [1]. Όταν δύο πανομοιότυπα τρανζίστορ λειτουργούν σε σταθερή αναλογία πυκνότητας ρεύματος συλλέκτη, η διαφορά στις τάσεις εκπομπών βάσης των τρανζίστορ είναι άμεσα ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, η τάση ορθής πόλωσης μιας διόδου πυριτίου, η οποία μπορεί να είναι η σύνδεση βάσης-εκπομπού ενός διπολικού τρανζίστορ επαφής (bipolar junction transistor - BJT), εξαρτάται από τη θερμοκρασία, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{BE} = V_{G0} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) + V_{BE0} \left(\frac{T}{T_0}\right) + \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{T_0}{T}\right) + \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_C}{I_{C0}}\right) \quad (2.1.11)$$

όπου

T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν,

T_0 η θερμοκρασία αναφοράς,

V_{G0} η τάση ενεργειακού χάσματος (bandgap) στο απόλυτο μηδέν,

V_{BE0} η τάση βάσης-εκπομπού σε θερμοκρασία T_0 και ρεύμα I_{C0} ,

k η σταθερά Boltzmann,

q το φορτίο ενός ηλεκτρονίου,

n μια σταθερά που εξαρτάται από τη συσκευή.

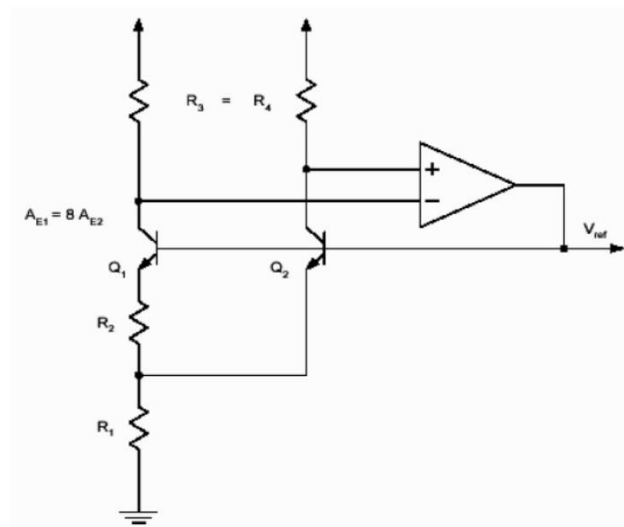
Συγκρίνοντας τις τάσεις δύο επαφών στην ίδια θερμοκρασία, αλλά σε δύο διαφορετικά ρεύματα, I_{C1} και I_{C2} , πολλές από τις μεταβλητές στην παραπάνω εξίσωση μπορούν να εξαλειφθούν και έτσι η σχέση γίνεται:

$$\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right) \quad (2.1.12)$$

Σημειώνεται ότι η τάση επαφής είναι συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος, δηλαδή ρεύματος-εμβαδού επαφής, και μια παρόμοια τάση εξόδου μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία των δύο συνδέσμων στο ίδιο ρεύμα, εάν η μία είναι επαφής είναι διαφορετικού εμβαδού από την άλλη. Ένα κύκλωμα που αναγκάζει τα I_{C1} και I_{C2} να έχουν σταθερή αναλογία N:1 δίνει τη σχέση:

$$\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln(N) \quad (2.1.13)$$

Ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, όπως το κύκλωμα αναφοράς ενεργειακού χάσματος (bandgap) Brokaw (Εικόνα 11) που μετρά το ΔV_{BE} , μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα παραμένει έγκυρο έως περίπου 200 - 250 °C, όταν τα ρεύματα διαρροής γίνονται αρκετά μεγάλα για να διαστρεβλώσουν τη μέτρηση. Πάνω από αυτές τις θερμοκρασίες, υλικά όπως το καρβίδιο του πυριτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί του πυριτίου.

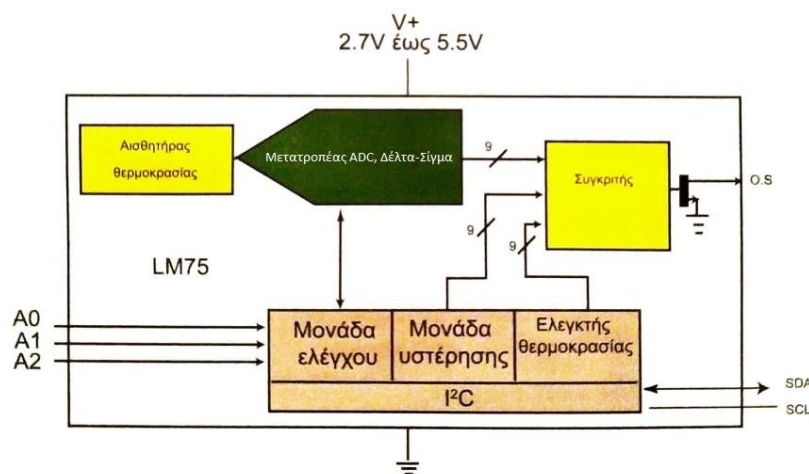


Εικόνα 11. Κύκλωμα ενεργειακού χάσματος Brokaw [6]

Η διαφορά τάσης μεταξύ δύο συνδέσεων p-n (π.χ. διόδους), που λειτουργούν σε διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος, είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία (Proportional To Absolute Temperature - PTAT). Τα κυκλώματα PTAT που χρησιμοποιούν τρανζίστορ BJT ή CMOS χρησιμοποιούνται ευρέως σε αισθητήρες θερμοκρασίας, όπου η έξοδος χρειάζεται να αλλάζει ανάλογα με τη θερμοκρασία, καθώς και σε άλλα κυκλώματα αντιστάθμισης θερμοκρασίας, όπου θέλουμε την ίδια έξοδο σε κάθε θερμοκρασία.

Οι αισθητήρες ημιαγωγών διατίθενται είτε σε αναλογική μορφή, που στην έξοδο παράγεται τάση ή ρεύμα ανάλογο της θερμοκρασίας, είτε ψηφιακή, όπου η μετάδοση της τιμής της θερμοκρασίας γίνεται μέσω μιας ψηφιακής γραμμής επικοινωνίας, όπως PWM (Pulse Width Modulation), I²C (Inter-Integrated Circuit) ή SPI (Serial Peripheral Interface) [4]. Σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα αισθητήρων

θερμοκρασίας ενσωματώνουν τεχνικές βελτίωσης όπως γραμμικοποίηση, πηγές τάσεων αναφοράς ακριβείας, ενισχυτές ακριβείας καθώς και ψηφιακή έξοδο καθορισμένων πρωτοκόλλων για άμεση διεπαφή με έναν μικροελεγκτή. Για την υλοποίηση ενός αυτόνομου συστήματος μέτρησης και ελέγχου της θερμοκρασίας απαιτείται μόνο η σύνδεση του ολοκληρωμένου με έναν μικροϋπολογιστή μέσω της ψηφιακής διεπαφής του. Ο μικροϋπολογιστής αποστέλλει σε δυαδικό κώδικα τα επίπεδα θερμοκρασίας και επιμέρους πληροφορίες ελέγχου του ολοκληρωμένου [1]. Ένα παράδειγμα τέτοιου ολοκληρωμένου κυκλώματος φαίνεται στην Εικόνα 12.



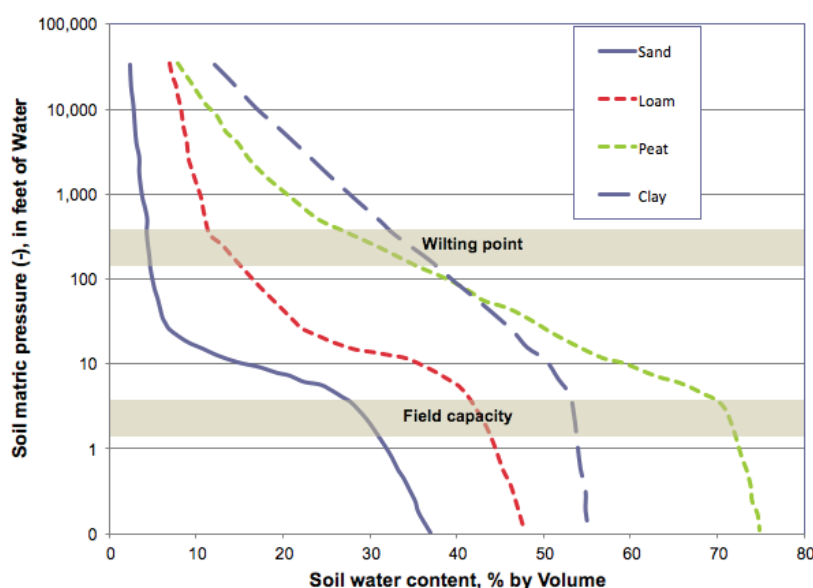
Εικόνα 12. Ολοκληρωμένο LM75 με ενσωματωμένα κυκλώματα γραμμικοποίησης και μονάδα A/D για ψηφιοποίηση δεδομένων [1]

2.2 Αισθητήρες υγρασίας

Η περιεκτικότητα ενός μέσου σε υγρασία μπορεί να εκφραστεί είτε ως απόλυτη τιμή, δηλαδή ο όγκος ή το βάρος του νερού ανά μονάδα βάρους ή όγκου του μέσου στο οποίο περιέχεται, είτε ως σχετική υγρασία, δηλαδή η ποσοστιαία (%) περιεκτικότητα του μέσου σε νερό σε σχέση με το σημείο κορεσμού του στην ίδια θερμοκρασία. Η απόλυτη υγρασία μπορεί να υπολογιστεί ή να μετρηθεί με σύστημα δύο θερμίστορ σε συνδεσμολογία γέφυρας. Η σχετική υγρασία μετράται με ειδικούς αισθητήρες από πολυμερή υλικά που μεταβάλλουν την αντίστασή τους ή τη χωρητικότητά τους συναρτήσει της υγρασίας [1]. Οι αισθητήρες υγρασίας του εδάφους μετρούν την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος. Συγκεκριμένα, μετρούν την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό έμμεσα χρησιμοποιώντας κάποια άλλη ιδιότητα του εδάφους, όπως την ηλεκτρική αντίσταση,

τη διηλεκτρική σταθερά ή την αλληλεπίδραση με νετρόνια, ως ενδεικτικό μέγεθος για την περιεκτικότητα σε υγρασία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η σχέση μεταξύ της μετρούμενης ιδιότητας και της υγρασίας του εδάφους πρέπει να βαθμονομείται και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους, η θερμοκρασία ή η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επίσης η σχέση μεταξύ δυναμικού του νερού και ογκομετρικής περιεκτικότητας σε νερό ποικίλει ανάλογα με το είδος του εδάφους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Για παράδειγμα, τα αμμώδη εδάφη έχουν χαμηλό δυναμικό και σχετικά υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, δηλαδή το νερό εισέρχεται σχετικά ελεύθερα και ταξιδεύει γρήγορα σε μια κλίση. Αντίθετα, τα εδάφη αργίλου έχουν υψηλό δυναμικό και χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Το νερό δεν εισέρχεται εύκολα σε αυτά τα εδάφη και ταξιδεύει αργά στο προφίλ του εδάφους. Τα λεπτότερα σωματίδια στα αργιλικά εδάφη τείνουν να συγκρατούν το νερό περισσότερο σφιχτά από ό,τι στα αμμώδη εδάφη [7].

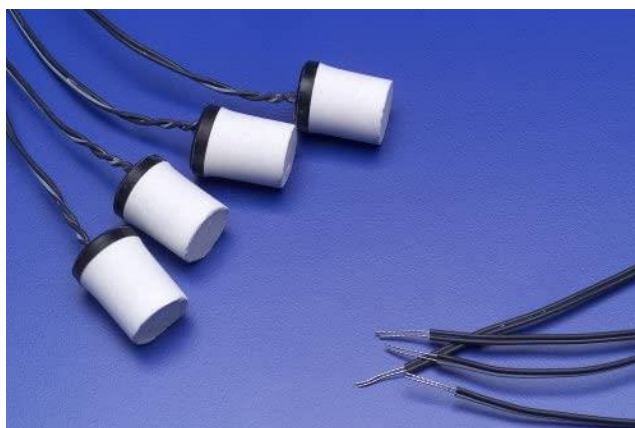


Εικόνα 13. Δυναμικό εδάφους σε σχέση με την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό σε τέσσερα διαφορετικά είδη εδάφους [7]

Εκτός από τους αισθητήρες υγρασίας που υπολογίζουν την ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό άλλοι τύποι αισθητήρων χρησιμοποιούν άλλες ιδιότητες του εδάφους, όπως η ανακλώμενη ακτινοβολία μικροκυμάτων, η οποία επηρεάζεται από την υγρασία του εδάφους και το δυναμικό νερού. Οι τελευταίοι αναφέρονται συνήθως ως αισθητήρες δυναμικού νερού του εδάφους και περιλαμβάνουν τενσιόμετρα και μπλοκ γύψου ή πορώδους υλικού.

2.2.1 Ωμικοί αισθητήρες

Οι αισθητήρες αυτοί συνήθως αποτελούνται από ένα κύβο από πορώδες υλικό, γύψο ή fiberglass, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί δύο ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Όταν ο αισθητήρας τοποθετηθεί στο υπό μέτρηση υλικό, τότε μια ποσότητα νερού κινείται από ή προς τον αισθητήρα μέχρι να εξισωθεί η πίεση του μέσα και έξω από αυτόν. Σε αυτό το σημείο ισορροπίας μετράται η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού με μια γέφυρα αντιστάσεων με μεταβλητή τιμή. Η βαθμονόμηση των τιμών αυτών μας δίνει τελικά την περιεκτικότητα του αισθητήρα, και άρα και του υλικού, σε νερό [1].



Εικόνα 14. Κύβοι γύψου που χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες μέτρησης της υγρασίας του εδάφους [1]

Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων αυτού του τύπου είναι το μικρό τους κόστος και η δυνατότητα συνεχούς μέτρησης της υγρασίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να μετακινούμε τον αισθητήρα από το υλικό, ενώ τα σημαντικότερα μειονεκτήματά τους είναι το μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι την εξισορρόπηση της υγρασίας μέσα και έξω από τον αισθητήρα (2 έως 3 ώρες) και άρα και τη λήψη σωστής μέτρησης, καθώς και το ότι κάθε υλικό απαιτεί διαφορετική βαθμονόμηση προκειμένου να έχουμε σωστή ένδειξη [1]. Επίσης οι αισθητήρες αυτοί με την πάροδο του χρόνου χάνουν τη σταθερή επαφή με το χώμα και μπορεί ανταποκρίνεται λανθασμένα στις αλλαγές του εδάφους [8].

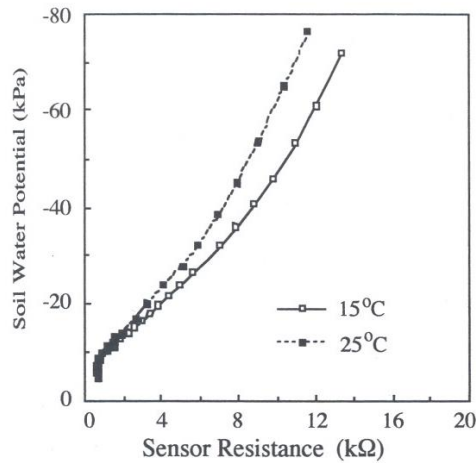
Παρόμοια αρχή λειτουργίας με αυτούς τους αισθητήρες έχουν και οι αισθητήρες κοκκώδους μήτρας (granular matrix sensor - GMS), των οποίων η τεχνολογία μειώνει τα προβλήματα που υπάρχουν στους κύβους γύψου με τη χρήση ενός αδιάλυτου κοκκώδους υλικού πλήρωσης που συγκρατείται σε ένα υφασμάτινο σωλήνα

στηριζόμενο σε μέταλλο ή πλαστικό πλέγμα [8], όπως στην Εικόνα 15. Οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν με την ίδια αρχή όπως οι κύβοι γύψου και περιέχουν ένα στρώμα γύψου ενσωματωμένο στην κοκκώδη μήτρα κάτω από ένα ζεύγος κουλουριασμένων ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια μέσα στο GMS ενσωματώνονται στο κοκκώδες υλικό πλήρωσης πάνω από το στρώμα γύψου. Το στρώμα γύψου διαλύεται αργά για να ρυθμίσει την επίδραση της αλατότητας του διαλύματος εδάφους στην ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το μέγεθος σωματιδίων του κοκκώδους υλικού πλήρωσης και η συμπίεσή του καθορίζει την κατανομή του μεγέθους των πόρων στο GMS και τα χαρακτηριστικά απόκρισης του [8].



Εικόνα 15. Παραδείγματα αισθητήρων GMS [9]

Πλεονεκτήματα αυτών των αισθητήρων είναι η ικανότητα μέτρησης μεγάλης περιοχής, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, είναι φθηνοί ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μέτρια αλατούχα εδάφη. Ωστόσο, παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση σε αμμώδη εδάφη λόγω αργού χρόνου αντίδρασης, είναι ευαίσθητοι στην ξήρανση και είναι σχετικά ανακριβείς [7]. Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ενός αισθητήρα Watermark 200SS στους 15 και 25 °C.



Εικόνα 16. Το δυναμικό νερού εδάφους μετρούμενο με τενσιόμετρο ως συνάρτηση της αντίστασης του αισθητήρα Watermark 200SS στους 15 και 25 °C [8]

2.2.2 Αισθητήρες χωρητικότητας

Οι αισθητήρες χωρητικότητας (Εικόνα 17) ή αλλιώς αισθητήρες πεδίου συχνότητας (Frequency Domain Sensors) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους. Η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός υλικού μπορεί να εκτιμηθεί μετρώντας την ηλεκτρική χωρητικότητα ενός συγκεκριμένου όγκου υλικού με συγκεκριμένη διηλεκτρική σταθερά, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων [1]. Το όργανο μέτρησης αποτελείται από ένα κύκλωμα ταλάντωσης και το αισθητήριο στοιχείο του αισθητήρα που είναι ενσωματωμένο στο έδαφος, ενώ η συχνότητα λειτουργίας εξαρτάται από την τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Η μετρούμενη τιμή δεν είναι γραμμικά ανάλογη της υγρασίας του υλικού και εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και τη θερμοκρασία του [1].



Εικόνα 17. Αισθητήρας μέτρησης της υγρασίας του εδάφους μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς του [1]

Η χωρητικότητα καθορίζεται ως το φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει ένα υλικό υπό δεδομένο ηλεκτρικό δυναμικό. Συνήθως, οι πυκνωτές απεικονίζονται ως παράλληλες πλάκες και η χωρητικότητα μπορεί να γραφτεί ως το πηλίκο μεταξύ φόρτισης και δυναμικού:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2.1)$$

όπου

C η χωρητικότητα,

Q το ηλεκτρικό φορτίο και

V το ηλεκτρικό δυναμικό [10].

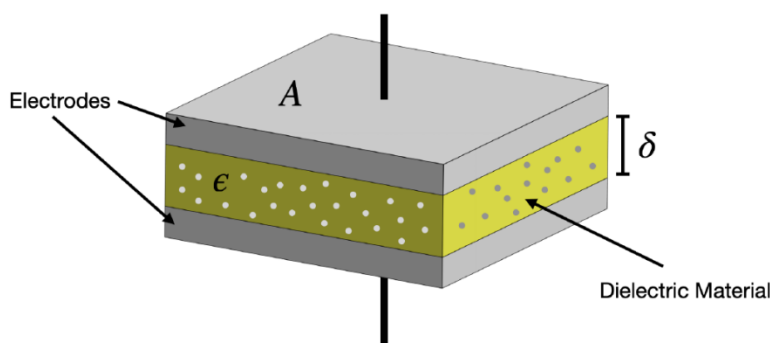
Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Gauss, η χωρητικότητα μπορεί να προσδιοριστεί ευρύτερα με την παρακάτω ολοκληρωτική μορφή:

$$C = \frac{\oint_S \epsilon E \cdot ds}{\int E \cdot dl} \quad (2.2.2)$$

όπου:

ϵ η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του υλικού μεταξύ των ηλεκτροδίων και

E το ηλεκτρικό πεδίο [10].



Εικόνα 18. Πυκνωτής παράλληλων πλακών [10]

Για έναν ιδανικό πυκνωτή παράλληλων πλακών (Εικόνα 18) η εξίσωση 2.4.1 μπορεί να απλοποιηθεί αν υποτεθεί ομοιόμορφη κατανομή φορτίου στις περιοχές των

πλακών του πυκνωτή και ομοιόμορφη διαδρομή του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των πλακών:

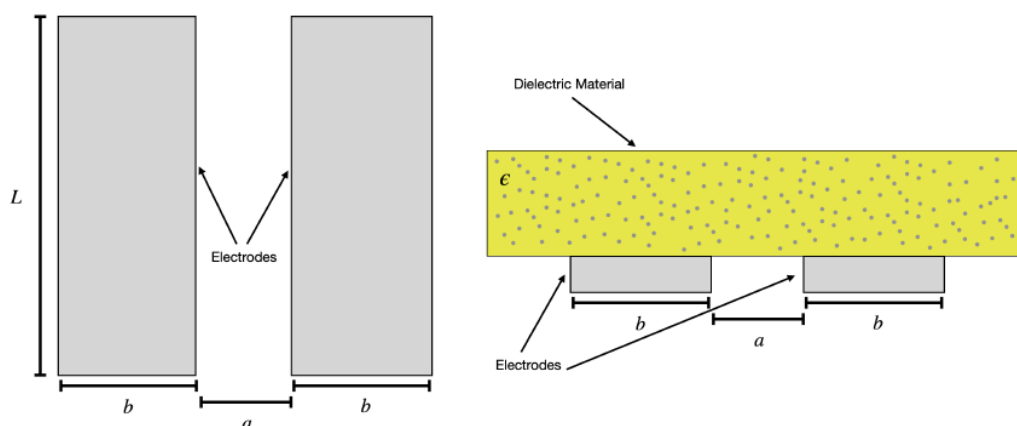
$$C = \frac{\epsilon EA}{E\delta} = \frac{\epsilon A}{\delta} \quad (2.2.3)$$

όπου:

A το εμβαδόν των πλακών και

δ η απόσταση μεταξύ των πλακών [10].

Οι αισθητήρες χωρητικότητας συνήθως χρησιμοποιούν διατάξεις πυκνωτών όπως αυτή της Εικόνα 19, όπου η πλάκες δεν είναι σε παράλληλη διάταξη αλλά σε συνεπίπεδη. Σε αυτή την περίπτωση το ολοκλήρωμα είναι πολύ πιο περίπλοκο, όπου υποθέτεται μια άπειρη γραμμή για το μήκος κάθε ηλεκτροδίου καθώς και παραδοχές συμμετρίας.



Εικόνα 19. Σχέδιο συνεπίπεδου πυκνωτή με εκτεθειμένο υλικό ως διηλεκτρικό [10]

Η εκτεθειμένη περιοχή πάνω από τις πλάκες δρα ως το διηλεκτρικό υλικό, επιτρέποντας έτσι τη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς, η οποία είναι πολύ υψηλότερη για το νερό από ότι στα περισσότερα εδάφη. Αυτό επιτρέπει στον αισθητήρα να υπολογίζει προσεγγιστικά την περιεκτικότητα σε νερό σε ένα έδαφος με βάση την αλλαγή στην χωρητικότητα. Η θεωρητική προσέγγιση της χωρητικότητας για την διάταξη αυτή δίδεται από την εξίσωση:

$$C = \frac{7}{40} \cdot \varepsilon \cdot L \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{a}{L}\right)} \cdot 1 + \left(\frac{L}{b}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^{-\frac{2}{3}} \quad (2.2.4)$$

όπου:

L το μήκος των πλακών,

b το πλάτος των πλακών και

a η μεταξύ τους απόσταση [10].

Η χωρητικότητα μπορεί επίσης να υπολογιστεί μέσω της πιο απλής σχέσης [10]:

$$C = \frac{\varepsilon L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{b}{a}\right) \quad (2.2.5)$$

Εύκολα συμπεραίνεται ότι και οι δύο σχέσεις καθορίζουν τη χωρητικότητα γραμμικά σε σχέση με τη διηλεκτρική σταθερά, το οποίο είναι σημαντικό καθώς η ακριβής μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς είναι απαραίτητη για την προσέγγιση της περιεκτικότητας σε νερό. Η χωρητικότητα είναι μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να μετρηθεί, ωστόσο, η χωρητικότητα σπάνια μετριέται άμεσα. Αντ' αυτού, είναι συνηθέστερη η χρήση του πυκνωτή σε κάποιο κύκλωμα και η μέτρηση της συχνότητας συντονισμού του κυκλώματος. Η συχνότητα συντονισμού για ένα LC κύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_t}} \quad (2.2.6)$$

όπου:

L ο συντελεστής αυτεπαγωγής του συστήματος και

C_t η συνολική χωρητικότητα του συστήματος [10].

Κάθε τύπος εδάφους αποτελείται από διάφορα υλικά που η σχετική ηλεκτρική επιτρεπτότητα κυμαίνεται από 2 έως 6 όταν είναι στεγνό. Ως αναφορά, η διηλεκτρική σταθερά για τον αέρα είναι περίπου 1. Ωστόσο, η διηλεκτρική σταθερά για το νερό είναι περίπου 80 για μια τυπική θερμοκρασία και πίεση. Αυτή η υψηλή ηλεκτρική επιτρεπτότητα επιτρέπει την πιο ελεύθερη ροή ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που

αυξάνει την χωρητικότητα και οδηγεί σε χαμηλότερη τιμή συχνότητας συντονισμού. Γι' αυτό το λόγο η χωρητικότητα είναι ένα καλό μέγεθος μέτρησης της υγρασίας του εδάφους, λόγω της επίδρασης του νερού σχετικά με την ηλεκτρική επιτρεπτότητα των υλικών που υπάρχουν στο έδαφος [10]. Η ηλεκτρική επιτρεπτότητα συνδέεται με την ογκομετρική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό με τη σχέση:

$$\varepsilon = (1 - \theta_u)\varepsilon_s + \theta_u\varepsilon_w \quad (2.2.7)$$

όπου:

θ_u η ογκομετρική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό που ισούται με $\frac{V_w}{V_s}$,

ε_s η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του εδάφους και

ε_w η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του νερού [10].

Επομένως, η ογκομετρική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό μπορεί να υπολογισθεί με έναν αισθητήρα χωρητικότητας ως συνάρτηση της συχνότητας συντονισμού ενός LC κυκλώματος. Ωστόσο, ο υπολογισμός της υγρασίας του εδάφους δεν είναι μια απλή διαδικασία, καθώς απαιτεί γνώση των ιδιοτήτων του εδάφους όπως η πυκνότητα και διηλεκτρική σταθερά. Γι' αυτό για κάθε τύπο εδάφους απαιτείται βαθμονόμηση των αισθητήρων [10].

2.2.3 Αισθητήρες χρόνου ανάκλασης

Η εκτίμηση της υγρασίας με τους αισθητήρες χρόνου ανάκλασης (Εικόνα 20) βασίζεται στη μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού παλμού ή ενός σήματος διαμέσου του υλικού. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από τον τύπο του υλικού, την περιεκτικότητά του σε υγρασία και την αγωγιμότητά του [1]. Η λειτουργία τους βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας των ανακλασίμετρων. Ένα ανακλασίμετρο πεδίου χρόνου (Time Domain Reflectometers - TDR) είναι ένα ηλεκτρονικό όργανο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών γραμμών παρατηρώντας τις ανακλώμενες κυματομορφές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό και τον εντοπισμό βλαβών σε μεταλλικά καλώδια. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό ασυνεχειών σε συνδέσεις, πλακέτες

τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board - PCB) ή οποιαδήποτε άλλη ηλεκτρική διαδρομή.



Εικόνα 20. Διάφοροι τύποι αισθητήρων TDR [1]

Ένα TDR μετρά τις ανακλάσεις κατά μήκος ενός αγωγού. Προκειμένου να μετρηθούν αυτές οι ανακλάσεις, το TDR μεταδίδει ένα σήμα στον αγωγό και «ακούει» την ανάκλασή του. Εάν ο αγωγός έχει ομοιόμορφη σύνθετη αντίσταση και έχει τερματιστεί σωστά, τότε δεν θα υπάρχουν ανακλάσεις και το υπόλοιπο σήμα θα απορροφηθεί στο τέλος του τερματισμού. Αντιθέτως, εάν υπάρχουν αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση, τότε μέρος του σήματος θα ανακλάται πίσω στην πηγή. Η σύνθετη αντίσταση της ασυνέχειας μπορεί να προσδιοριστεί από το πλάτος του ανακλώμενου σήματος. Η απόσταση από την ανακλαστική σύνθετη αντίσταση μπορεί επίσης να προσδιοριστεί από το χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός για να επιστρέψει.

Η ανάλυση ξεκινά με τη διάδοση ενός βήματος ή ώθησης ενέργειας σε ένα σύστημα και την επακόλουθη παρατήρηση της ενέργειας που αντανακλάται από το σύστημα. Αναλύοντας το μέγεθος, τη διάρκεια και το σχήμα της ανακλώμενης κυματομορφής, μπορεί να προσδιοριστεί η φύση της αλλαγής της σύνθετης αντίστασης στο σύστημα μετάδοσης. Εάν ένα τερματικό φορτίο τοποθετηθεί στην έξοδο του ανακλαστήρα και εφαρμοστεί ένα σήμα, παρατηρείται ένα σήμα στην οθόνη που το πλάτος του είναι συνάρτηση της αντίστασης. Το μέγεθος του σήματος που παράγεται από το φορτίο αντίστασης μπορεί να εκφραστεί ως κλάσμα του σήματος εισόδου με συντελεστή που δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.2.8)$$

όπου:

Z_L η σύνθετη αντίσταση στον τερματισμό και

Z_0 η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Τα TDR μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε υγρασία στο έδαφος και σε πορώδη μέσα. Το πλεονέκτημα των TDR είναι η ικανότητά τους να προσδιορίζουν με ακρίβεια τη διαπερατότητα (διηλεκτρική σταθερά) ενός υλικού μέσω διάδοσης κυμάτων, λόγω της ισχυρής σχέσης μεταξύ της διαπερατότητας ενός υλικού και της περιεκτικότητάς του σε νερό. Η μέτρηση συνήθως περιλαμβάνει την εισαγωγή ενός αισθητήρα στο έδαφος και στη συνέχεια την εφαρμογή είτε Τυπικής Ανάλυσης Κυματομορφής (Standard Waveform Analysis) για τον προσδιορισμό της μέσης περιεκτικότητας υγρασίας κατά μήκος του αισθητήρα είτε της Ανάλυσης Προφίλ (Profile Analysis) για την παροχή περιεκτικότητας υγρασίας σε διακριτά σημεία κατά μήκος του αισθητήρα. Η μέθοδος μέτρησης της υγρασίας με TDR βασίζεται στον υπολογισμό της φαινομενικής διαπερατότητας από τον χρόνο ταξιδιού ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς, η οποία συνήθως αποτελείται από δύο ή περισσότερες παράλληλες μεταλλικές ράβδους ενσωματωμένες στο έδαφος. Οι καθετήρες έχουν συνήθως μήκος μεταξύ 10 και 30 cm και συνδέονται στο TDR μέσω ομοαξονικού καλωδίου.

Τυπική Ανάλυση Κυματομορφής

Στην ανάλυση κυματομορφής τοποθετείται ένας αισθητήρας στο υλικό προς μέτρηση. Ο αισθητήρας περιέχει έναν κυματοδηγό που αποτελείται από δύο ή τρία παράλληλα καλώδια τα οποία συνδέονται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου σε μια γεννήτρια παλμών τάσης που στέλνει με ακρίβεια καθορισμένους παλμούς τάσης στον αισθητήρα. Καθώς ο παλμός κινείται κατά μήκος του κυματοδηγού, η πρόοδός του ποικίλλει ανάλογα με το περιεχόμενο υγρασίας του υλικού που εξετάζεται. Όταν ο παλμός φτάσει στο τέλος του κυματοδηγού ανακλάται. Αυτή η ανάκλαση απεικονίζεται σε κυματομορφή TDR χρησιμοποιώντας παλμογράφο συνδεδεμένο στον αισθητήρα. Η ένταση του παλμού στον ανιχνευτή μετριέται και σχετίζεται με

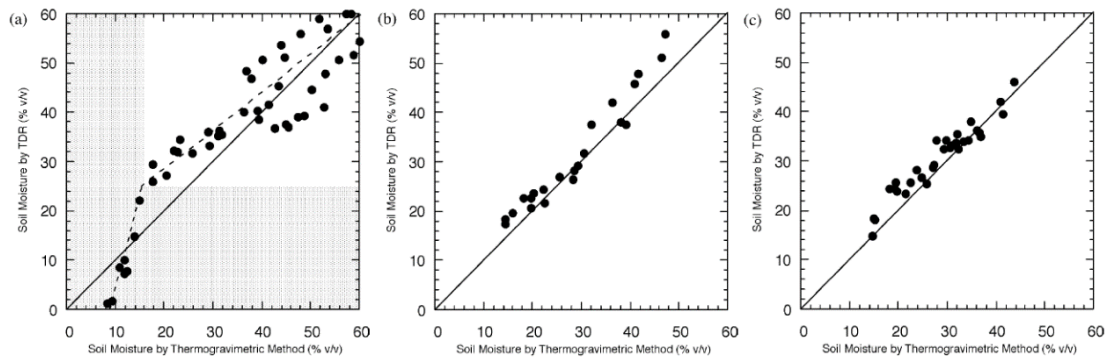
την περιεκτικότητα σε υγρασία. Η υψηλότερη τάση δείχνει αύξηση της υγρασίας. Συγκρίνοντας τη μετρούμενη ανάκλαση με τον αρχικό παλμό, η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία και η σχετική επιτρεπτότητα του δείγματος μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας ένα ισοδύναμο κύκλωμα ως αναφορά.

Ανάλυση Προφίλ

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μια ποικιλία τεχνικών για την προσθήκη χωρικών πληροφοριών στα αποτελέσματα της μέτρησης.

- Αλγόριθμος ανακατασκευής: Μία προσέγγιση είναι η μοντελοποίηση της διάδοσης παλμών στον κυματοδηγό και η βαθμονόμηση του μοντέλου έναντι εργαστηριακής μέτρησης. Συγκρίνοντας πραγματικές μετρήσεις με τις μετρήσεις του εργαστηριακού μοντέλου, μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή υγρασίας.
- Τροποποίηση διατομής: Η αλλαγή της διατομής του κυματοδηγού μεταβάλλει τις ανακλάσεις των παλμών και δημιουργεί τεχνητές ανακλάσεις σε κάθε αλλαγή της διατομής. Αυτό επιτρέπει την κατάτμηση του κυματοδηγού εφαρμόζοντας μια διαφορετική διατομή σε κάθε τμήμα.
- Υποδιαίρεση: Ο κυματοδηγός υποδιαιρείται σε τμήματα με χρήση διόδων PIN. Κάθε τμήμα παρέχει τη δική του ανάκλαση παλμών, δείχνοντας έτσι την περιεκτικότητα υγρασίας σε αυτό το τμήμα μόνο. Αυτό επιτρέπει τη χαρτογράφηση της περιεκτικότητας σε υγρασία στα μεμονωμένα τμήματα και επομένως δείχνει την κατανομή της χωρικής υγρασίας.
- Παραλλαγή μήκους: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί πολλούς οδηγούς κυμάτων με διαφορετικά μήκη τοποθετημένα παράλληλα μεταξύ τους.

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ποσοστιαίας υγρασίας ενός αισθητήρα TDR και η απόδοσή του σε σύγκριση με τις τιμές υγρασίας που υπολογίστηκαν μέσω θερμοβαρυτικής μεθόδου για διάφορα μήκη κυματοδηγών. Όπως παρατηρείται, οι κυματοδηγοί με μεγαλύτερο μήκος επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με μικρότερα μήκη κυματοδηγών.



Εικόνα 21. Σύγκριση θερμοβαρουμετρικής μέτρησης και μέτρησης με αισθητήρα TDR της υγρασίας εδάφους για διάφορα μήκη κυματοδηγού: (a) 5 cm (b) 10 cm και (c) 15 cm [11]

Πλεονεκτήματα των αισθητήρων TDR είναι η πολύ καλή ακρίβεια ($\pm 1\%$), μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς βαθμονόμηση για συγκεκριμένο έδαφος [7], είναι ανεξάρτητοι από την υφή του εδάφους, τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε αλάτι και παρέχουν τη δυνατότητα για μακροπρόθεσμες μετρήσεις [12]. Ωστόσο οι αισθητήρες αυτοί είναι συνήθως ακριβοί [12], χρειάζονται καλή επαφή μεταξύ αισθητήρα και εδάφους, ενώ επίσης παρέχουν μικρή περιοχή ανίχνευσης [7].

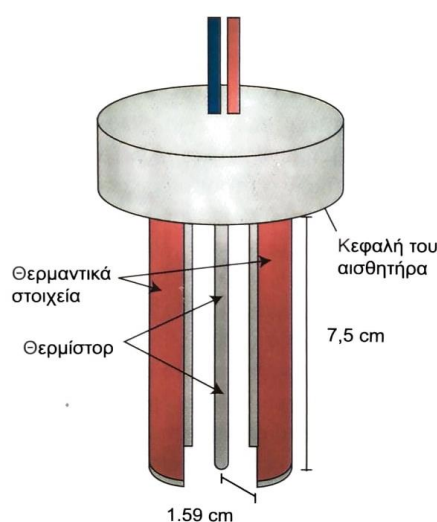
2.2.4 Αισθητήρες σκέδασης θερμότητας

Οι αισθητήρες σκέδασης θερμότητας (Heat Dissipating Sensors - HDR) χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους μέσω θερμικής αντί ηλεκτρικής αγωγιμότητας, γεγονός που τους διακρίνει στην πραγματική τιμή μέτρησης της υγρασίας ανεξάρτητα του μεγέθους της αγωγιμότητας η οποία αλλάζει με την προσθήκη λιπασμάτων στο έδαφος. Η δομή ενός αισθητήρα σκέδασης θερμότητας φαίνεται στην Εικόνα 22. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης η θερμοκρασία ενός υλικού μετريέται πριν την εμφάνιση ενός θερμικού παλμού που εφαρμόζεται στον αισθητήρα. Η διαφορά της αρχικής τιμής της θερμοκρασίας στο πορώδες υλικό με την τελική τιμή μετά την εφαρμογή του θερμικού παλμού είναι ανάλογη της υγρασίας που συγκρατείται από το πορώδες υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της υγρασίας θα ισοδυναμεί με μικρότερη θερμοκρασιακή ανιχνεύσιμη διαφορά. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας υπολογίζεται με ένα αισθητήρα θερμοκρασίας ακριβείας ο οποίος βρίσκεται στην άκρη του αισθητήρα. Όσον αφορά τα μειονεκτήματα τους, αυτά εστιάζονται στις απαιτήσεις ισχύος σε σύγκριση με

άλλους τύπους αισθητήρων λόγω της αναγκαιότητας δημιουργίας θερμικού παλμού [1].

Υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων, όπου και οι δύο απαιτούν ένα θερμαντικό στοιχείο και μια συσκευή μέτρησης θερμοκρασίας. Ο ένας τύπος δεν χρησιμοποιεί πορώδες κεραμικό υλικό και το στοιχείο θέρμανσης και ανίχνευσης εισάγονται σε μεταλλικούς σωλήνες και θάβονται απευθείας στο έδαφος, σε συγκεκριμένη απόσταση. Το στοιχείο θέρμανσης ενεργοποιείται σε καθορισμένο χρόνο, θερμαίνοντας το έδαφος γύρω του. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας ανιχνεύει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται μέσω του εδάφους από το ένα στοιχείο στο άλλο. Δεδομένου ότι ο λόγος μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους, η οποία εξαρτάται από την ποσότητα νερού στο έδαφος, η μέγιστη θερμοκρασία που ανιχνεύεται στον αισθητήρα είναι συνάρτηση της υγρασίας του εδάφους [13].

Ο άλλος τύπος αισθητήρα σκέδασης θερμότητας χρησιμοποιεί ένα πορώδες κεραμικό υλικό με ένα στοιχείο θέρμανσης και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας ενσωματωμένο μέσα σε αυτό. Ομοίως, το στοιχείο θέρμανσης ενεργοποιείται σε καθορισμένο χρόνο, θερμαίνοντας το πορώδες υλικό. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας, ο οποίος συνήθως είναι ένα θερμίστορ ή θερμοζεύγος, ανιχνεύει τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εσωτερικό μέρος του σώματος του αισθητήρα για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα μετά της παροχή ισχύος. Δεδομένου ότι το νερό που απορροφάται από το έδαφος από το πορώδες υλικό αλλάζει τη θερμική αγωγιμότητά του, η θερμοκρασία του αισθητήρα είναι συνάρτηση της υγρασίας του εδάφους [13].



Εικόνα 22. Δομή αισθητήρα σκέδασης θερμότητας [1]

Ο ρυθμός διάχυσης της θερμότητας σε ένα πορώδες σώμα εξαρτάται από τη συγκεκριμένη θερμότητα, τη θερμική αγωγιμότητα και την πυκνότητα ρ του υλικού. Για ένα ομοιογενές ισοτροπικό υλικό του οποίου η θερμική αγωγιμότητα δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, η διάχυση δίνεται από τη σχέση:

$$\kappa = \frac{K}{\rho C} \quad (2.2.9)$$

όπου:

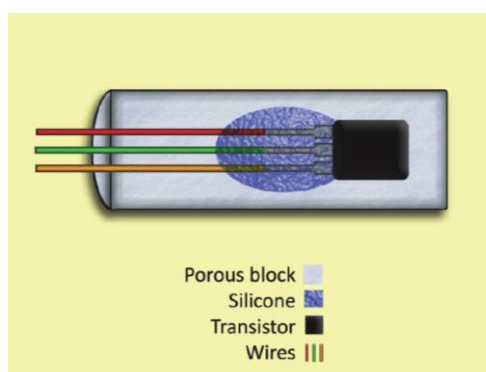
C η θερμότητα

K η θερμική αγωγιμότητα

ρ η πυκνότητα του υλικού [14].

Σε πορώδες υλικό, η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από την αγωγιμότητα της μήτρας, το ποσοστό του υλικού που αποτελούν οι πόροι και το ποσοστό του χώρου πόρων που είναι γεμάτο με νερό. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται εκθετικά με την περιεκτικότητα σε νερό. Η συγκεκριμένη θερμότητα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την περιεκτικότητα σε νερό καθώς ο αέρας στους πόρους εκτοπίζεται από το νερό [14].

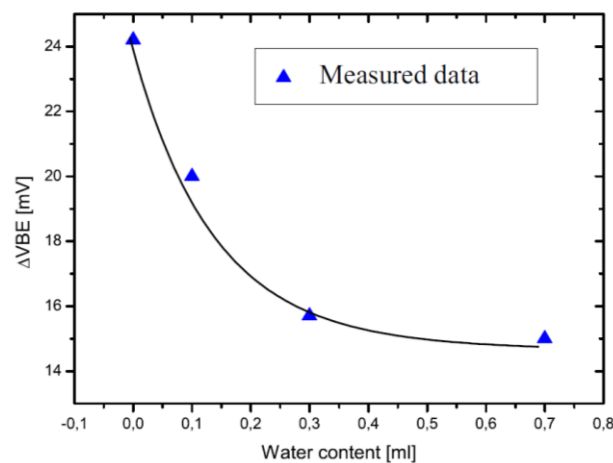
Μια καινοτόμος πρόταση είναι η χρήση ενός διπολικού τρανζίστορ μέσα στο πορώδες υλικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23, αντί για ένα στοιχείο θέρμανσης και ενός αισθητήρα θερμοκρασίας, δεδομένου ότι το διπολικό τρανζίστορ είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως πηγή θέρμανσης όσο και ως αισθητήρας θερμοκρασίας [13].



Εικόνα 23. Δομή αισθητήρα σκέδασης θερμότητας με χρήση διπολικού τρανζίστορ [13]

Εάν εφαρμοστεί μια γνωστή τάση V_{CE} και ένα γνωστό ρεύμα I_C στο τρανζίστορ, παράγεται ισχύς ίση με $P = V_{CE} \cdot I_C$. Αυτή η ισχύς σκεδάζεται στο πορώδες υλικό, που έχει απορροφήσει κάποια ποσότητα νερού και θερμαίνει το σώμα του αισθητήρα, όπως τα ωμικά στοιχεία θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στους συμβατικούς αισθητήρες σκέδασης θερμότητας. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική V_{BE} - T του διπολικού τρανζίστορ [13].

Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση αυξάνονται ταυτόχρονα η τάση και το ρεύμα πηγής και μετράται η τιμή της τάσης V_{BEi} . Αυτή η κατάσταση διαρκεί για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε να σκεδαστεί η θερμότητα από την ισχύ του τρανζίστορ. Στην δεύτερη φάση, μετράται ξανά η τιμή της V_{BEf} και η τάση και το ρεύμα πηγής επιστρέφουν στις αρχικές τους τιμές. Η διαφορά $\Delta V_{BE} = V_{BEf} - V_{BEi}$ οφείλεται μόνο στη διαφορά θερμοκρασίας στο τρανζίστορ που προκαλείται από την ισχύ που διαχέεται από το τρανζίστορ στο πορώδες υλικό αναλόγως την περιεκτικότητά του σε νερό [13]. Στην Εικόνα 24 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη.

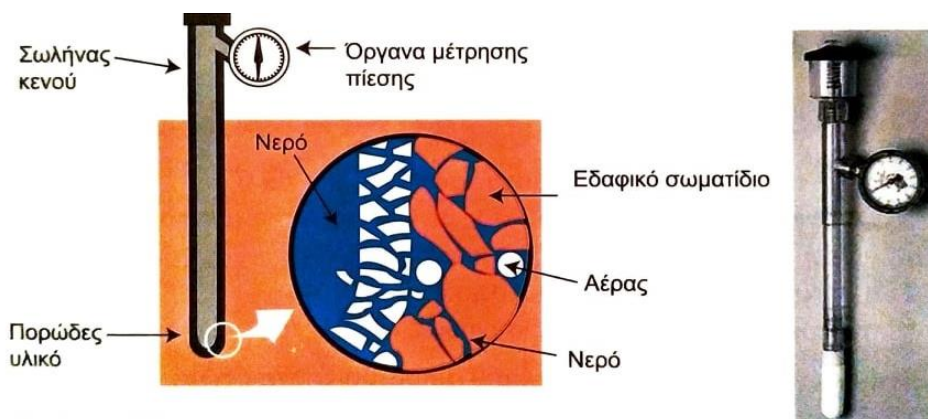


Εικόνα 24. Η ΔV_{BE} ως συνάρτηση του περιεχομένου του αισθητήρα σε νερό [13]

2.2.5 Τενσιόμετρα

Το τενσιόμετρο (Εικόνα 25) λειτουργεί ως μια τεχνητή ρίζα για τη μέτρηση της δύναμης που πρέπει να υπερνικήσουν οι ρίζες των φυτών προκειμένου να έχουν πρόσβαση στο νερό που συγκρατείται από το χώμα σε μία καλλιέργεια. Ένα τενσιόμετρο αποτελείται από έναν γυάλινο ή πλαστικό σωλήνα ο οποίος περιέχει νερό και ένα κεραμικό διάφραγμα στη βάση του, που έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

Στην κορυφή του οργάνου βρίσκεται ένας αισθητήρας πίεσης κενού. Η εξίσωση της πίεσης γίνεται μέσω ενός κεραμικού πορώδους υλικού, το οποίο βρίσκεται στην άκρη του σωλήνα που τοποθετείται μέσα στο υπό μέτρηση υλικό [1].



Εικόνα 25. Αρχή λειτουργίας (αριστερά) και τυπικό δείγμα тенσιόμετρον (δεξιά) [1]

Όταν το έδαφος στο οποίο βυθίζεται το тенσιόμετρο είναι αρκετά ξηρό, τότε το νερό το οποίο περιέχει ο σωλήνας διαφεύγει μέσω του κεραμικού διαφράγματος προς το έδαφος. Επομένως η διαφορά της πίεσης του κενού μέσα στο σωλήνα καταγράφεται από το όργανο του тенσιόμετρον, δίνοντας μια υψηλή τιμή μέτρησης που σημαίνει μεγάλη καταπόνηση στις ρίζες των φυτών για τη συγκράτηση νερού από το χώμα. Συνεπώς, σε υγρό χώμα, η τιμή της ένδειξης του οργάνου θα είναι χαμηλή λόγω του μικρότερου ποσοστού διαφυγής του νερού του σωλήνα του οργάνου προς το έδαφος. Μονάδα μέτρησης των тенσιόμετρον είναι το κιλοπασκάλ (KPa). Όσο μεγαλύτερο στρες δημιουργείται στις ρίζες των φυτών για τη συγκράτηση νερού από το χώμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένδειξη του οργάνου, όπως παρουσιάζει και ο Πίνακας 2. Ένα επίπεδο έντασης ανάμεσα στα 2-10 KPa είναι γενικά επιθυμητό για την περίπτωση ανθοκομικής παραγωγής [1].

Πίνακας 2. Ενδείξεις тенσιόμετρον και καταστάσεις εδάφους [1]

Ένδειξη	Κατάσταση
0-8	Υψηλό επίπεδο υγρασίας
8	Μεσαίο επίπεδο υγρασίας
8-35	Κατάλληλη υγρασία
35-50	Μεσαίο επίπεδο υγρασίας
50+	Πολύ χαμηλό επίπεδο. Ξηρό έδαφος

Τα тенσιόμετρα έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι δεν επηρεάζονται από τη θερμοκρασία του διαλύματος του εδάφους ή από το ωσμωτικό δυναμικό (η ποσότητα των αλάτων που διαλύονται στο νερό του εδάφους), καθώς τα άλατα μπορούν να μετακινηθούν μέσα και έξω από το κεραμικό υλικό ελεύθερα. Επομένως, οι μετρήσεις του тенσιόμετρου δεν επηρεάζονται από την ηλεκτροαγωγιμότητα ή τη θερμοκρασία του εδάφους [15]. Μειονεκτήματα των οργάνων είναι το περιορισμένο εύρος της κλίμακας των μετρήσεων, και το ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χοντρόκοκκα υλικά, στα οποία δεν υπάρχει καλή επαφή του οργάνου με το υλικό. Το νερό στο εσωτερικό του тенσιόμετρου χρειάζεται συχνή αναπλήρωση όταν τα тенσιόμετρα χρησιμοποιούνται σε ξηρά περιβάλλοντα, όπου γίνονται πηγή νερού που διαρρέει λόγω ξηρότερου περιβάλλοντος. Σε ένα επίπεδο τιμών 0-15 KPa το νερό στο σωλήνα του тенσιόμετρου θα πρέπει να αναπληρώνεται κάθε τρεις με τέσσερις εβδομάδες [1].

2.3 Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) αποτελεί το δίκτυο επικοινωνίας φυσικών αντικειμένων ("πραγμάτων") που είναι ενσωματωμένα με αισθητήρες, λογισμικό και άλλες τεχνολογίες με σκοπό τη σύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων με άλλες συσκευές και συστήματα μέσω του Διαδικτύου. Η φιλοσοφία του IoT είναι η σύνδεση όλων των ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους (τοπικό δίκτυο) ή με δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο (παγκόσμιο ιστό). Η έννοια «πράγματα» (Things) αναφέρεται σε μία ευρεία ποικιλία συσκευών εντελώς διαφορετικά μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα με ενσωματωμένους αισθητήρες, κάμερες, κλιματιστικά, φώτα, συστήματα ασφαλείας, smartwatches ακόμα και αυτοκίνητα των οποίων οι περίπλοκοι αισθητήρες εντοπίζουν αντικείμενα στην πορεία τους. Το Διαδύκτιο των Πραγμάτων είναι μία από τις τρεις κορυφαίες τεχνολογικές εξελίξεις της επόμενης δεκαετίας, μαζί με το Mobile Internet και την αυτοματοποίηση του Knowledgework, και αποτελεί το επόμενο μεγάλο βήμα στον χώρο της τεχνολογίας. Ο όρος Internet of Things επινοήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 από τον επιχειρηματία Kevin Ashton.

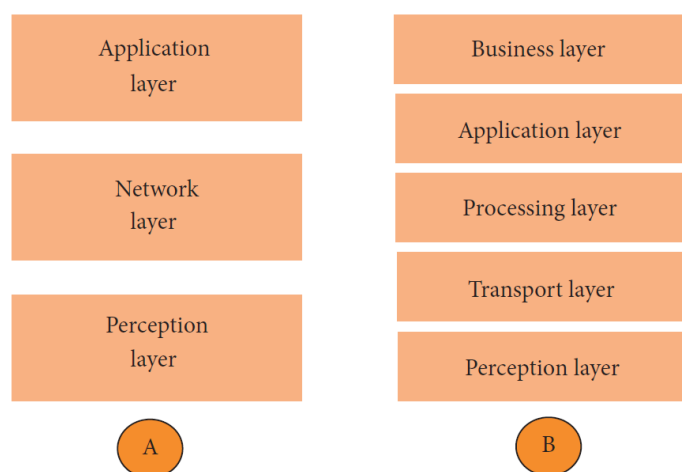
Η τεχνολογία του IoT έχει εξελιχθεί χάρη στη σύγκλιση πολλαπλών τεχνολογιών. Πεδία όπως η ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time

analytics), η μηχανική μάθηση (machine learning), η τεχνολογία αισθητήρων και ενσωματωμένων συστημάτων, των ασύρματων δικτύων, των συστημάτων ελέγχου, του αυτοματισμού και άλλα συμβάλλουν στην ενεργοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Οι συσκευές και τα αντικείμενα με ενσωματωμένους αισθητήρες συνδέονται σε μια πλατφόρμα Internet of Things, η οποία ενσωματώνει δεδομένα από τις διάφορες συσκευές και εφαρμόζει αναλυτικά στοιχεία για την κοινή χρήση των πιο πολύτιμων πληροφοριών με εφαρμογές που έχουν δημιουργηθεί για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων αναγκών. Αυτές οι ισχυρές πλατφόρμες IoT μπορούν να εντοπίσουν ακριβώς ποιες πληροφορίες είναι χρήσιμες και ποιες μπορούν να αγνοηθούν με ασφάλεια. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό και την αναγνώριση προτύπων, την υποβολή προτάσεων και τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων πριν εμφανιστούν. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από συνδεδεμένες συσκευές επιτρέπουν την λήψη έξυπνων αποφάσεων σχετικά με το ποια στοιχεία θα αποθηκεύονται, βάσει πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Με τις πληροφορίες που παρέχει η προηγμένη ανάλυση δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν οι διαδικασίες πιο αποτελεσματικές. Έξυπνα αντικείμενα και συστήματα σημαίνουν την αυτοματοποίηση συγκεκριμένων εργασιών, ειδικά όταν αυτές είναι επαναλαμβανόμενες, συνηθισμένες, χρονοβόρες ή ακόμα και επικίνδυνες [16].

Το Internet of Things έχει εφαρμογές σε πολλά πεδία, ορισμένα από τα οποία περιλαμβάνουν την υγειονομική περίθαλψη, τη βιομηχανική αυτοματοποίηση, τα έξυπνα σπίτια και κτήρια, την αυτοκινητοβιομηχανία και τη φορητή τεχνολογία. Όλο και περισσότερο, οι εφαρμογές IoT χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence – AI) και μηχανική εκμάθηση για να προσθέσουν νοημοσύνη σε συσκευές. Επίσης, οι εφαρμογές του IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολλούς τρόπους για να βοηθήσουν τις επιχειρήσεις να απλοποιήσουν, να βελτιώσουν, να αυτοματοποιήσουν και να ελέγξουν τις διαδικασίες, παρέχοντας παράλληλα σχετικές πληροφορίες, επιδόσεις δραστηριότητας, ακόμη και περιβαλλοντικές συνθήκες που πρέπει να παρακολουθούνται και να ελέγχονται από απόσταση. Ως αποτέλεσμα, οι εφαρμογές IoT μπορούν να βοηθήσουν στην προώθηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων και ροών εσόδων και να παρέχουν σε πραγματικό χρόνο δεδομένα που χρειάζονται οι επιχειρήσεις για να αναπτύξουν προϊόντα και υπηρεσίες [17].

2.3.1 Αρχιτεκτονική του IoT

Υπάρχουν πολλά μοντέλα για την αρχιτεκτονική για το IoT, καθώς έχουν προταθεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές από διαφορετικούς ερευνητές. Η πιο βασική αρχιτεκτονική είναι μια αρχιτεκτονική τριών επιπέδων όπως φαίνεται στην Εικόνα 26. Εισήχθη στα πρώτα στάδια της έρευνας σε αυτό το πεδίο. Έχει τρία επίπεδα, της αντίληψης, του δικτύου, και της εφαρμογής [18].



Εικόνα 26. Αρχιτεκτονική IoT A) τριών επιπέδων και B) πέντε επιπέδων [18]

- (i) Το επίπεδο αντίληψης είναι το φυσικό στρώμα, το οποίο έχει αισθητήρες για την ανίχνευση και τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον. Ανιχνεύει ορισμένες φυσικές παραμέτρους ή προσδιορίζει άλλα έξυπνα αντικείμενα στο περιβάλλον.
- (ii) Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση στο άλλα έξυπνα αντικείμενα, συσκευές δικτύου και διακομιστές. Τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται επίσης για μετάδοση και επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων.
- (iii) Το επίπεδο εφαρμογής είναι υπεύθυνο για την παράδοση εφαρμογών συγκεκριμένων υπηρεσιών στον χρήστη. Ορίζει διάφορες εφαρμογές στις οποίες το Διαδίκτυο των Πραγμάτων μπορεί να αναπτυχθεί, για παράδειγμα, έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις και έξυπνη υγεία [18].

Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων ορίζει την κύρια ιδέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αλλά δεν αρκεί για την έρευνα, επειδή η έρευνα επικεντρώνεται συχνά

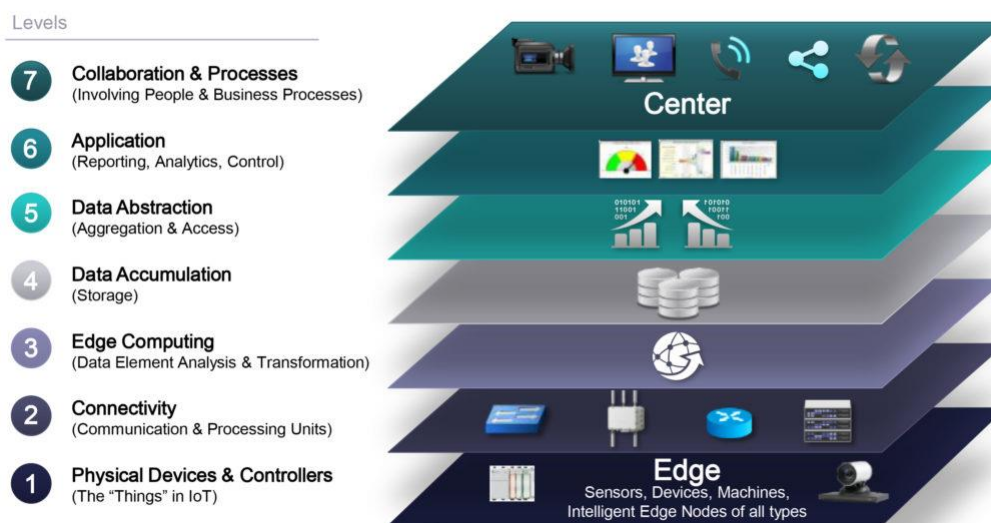
σε λεπτές πτυχές του IoT. Γι' αυτό, υπάρχουν και άλλες αρχιτεκτονικές με περισσότερα επίπεδα. Μια από αυτές είναι η αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων, η οποία περιλαμβάνει επιπλέον τα επίπεδα επεξεργασίας και το επιχειρηματικό επίπεδο. Τα πέντε επίπεδα είναι τα επίπεδα αντίληψης, μεταφοράς, επεξεργασίας, εφαρμογής και το επιχειρηματικό επίπεδο. Ο ρόλος των επιπέδων αντίληψης και εφαρμογής είναι ο ίδιος με την αρχιτεκτονική τριών επιπέδων [18].

- (i) Το επίπεδο μεταφοράς μεταφέρει τα δεδομένα του αισθητήρα από το επίπεδο αντίληψης στο στρώμα επεξεργασίας και αντίστροφα μέσω δικτύων όπως 3G, LAN, Bluetooth, RFID και NFC.
- (ii) Το επίπεδο επεξεργασίας είναι επίσης γνωστό ως μεσαίο λογισμικό επίπεδο. Αποθηκεύει, αναλύει και επεξεργάζεται τεράστιες ποσότητες δεδομένων που προέρχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Μπορεί να διαχειριστεί και να παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών στα κατώτερα επίπεδα. Χρησιμοποιεί πολλές τεχνολογίες όπως βάσεις δεδομένων, υπολογιστικό νέφος και μονάδες επεξεργασίας μεγάλων δεδομένων.
- (iii) Το επιχειρηματικό επίπεδο διαχειρίζεται ολόκληρο το σύστημα IoT, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών, των επιχειρηματικών και κερδοσκοπικών μοντέλων, και το απόρρητο των χρηστών [18].

Ενδιαφέρον έχει η αρχιτεκτονική που προτείνουν οι Ning και Wang, η οποία είναι εμπνευσμένη από τα επίπεδα επεξεργασίας στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Είναι εμπνευσμένη από την ευφυΐα και την ικανότητα των ανθρώπων να σκέφτονται, να αισθάνονται, να θυμούνται, να λαμβάνουν αποφάσεις και να αντιδρούν στο φυσικό περιβάλλον. Αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο είναι ο ανθρώπινος εγκέφαλος, ο οποίος είναι ανάλογος με την μονάδα επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων ή το κέντρο δεδομένων. Το δεύτερο είναι η σπονδυλική στήλη, η οποία είναι ανάλογη με το καταναμημένο δίκτυο κόμβων επεξεργασίας δεδομένων και έξυπνων πυλών (gateways). Το τρίτο είναι το δίκτυο νεύρων, το οποίο αντιστοιχεί στα στοιχεία δικτύωσης και αισθητήρων [18].

Μία άλλη αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων είναι αυτή του IoT World Forum Reference Model, η οποία παρέχει μια βαθύτερη εικόνα των επιπέδων του

συστήματος καθώς απεικονίζει τα διαφορετικά επίπεδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27. IoT World Forum Reference Model [19]

- (i) *Φυσικές συσκευές και ελεγκτές:* Αυτό το επίπεδο αποτελείται από τα «πράγματα» του διαδικτύου των πραγμάτων. Από τη σκοπιά του σχεδιασμού του συστήματος, τα «πράγματα» είναι οι αισθητήρες και οι συσκευές που διαχειρίζεται άμεσα η αρχιτεκτονική του IoT. Μια σημαντική ιδέα του IoT που μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτό το επίπεδο είναι το Edge Intelligence, το οποίο επιτρέπει την αντίδραση με μικρή καθυστέρηση σε επιτόπια γεγονότα και επιτρέπει υψηλότερα επίπεδα αυτονομίας και κατακευματισμένης επεξεργασίας.
- (ii) *Συνδεσιμότητα:* Αυτό το επίπεδο παρεμβάλλεται μεταξύ μιας συσκευής (Edge Node) και της μεταφοράς στο Cloud. Για τις επικοινωνίες υπάρχουν πολλές εναλλακτικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει τη χαρτογράφηση δεδομένων πεδίου με τις λογικές και φυσικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, καθώς και τη μεταστροφή προς την εγκατάσταση ή το cloud και το επόμενο επίπεδο, Edge Computing.
- (iii) *Edge Computing:* Το επόμενο επίπεδο στην αρχιτεκτονική του World Forum Model είναι το Edge Computing ή πιο σωστά το "Cloud Edge" ή το "Cloud Gateway". Απαιτείται, σε κάποιο βαθμό, σε οποιοδήποτε σύστημα IoT Αυτό το επίπεδο διασυνδέει τα πεδία δεδομένων και ελέγχου με τα υψηλότερα επίπεδα cloud ή εταιρικών επιπέδων λογισμικού. Μετατροπή πρωτοκόλλων,

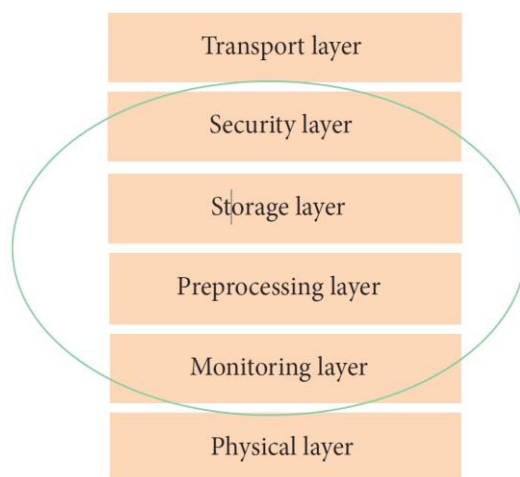
δρομολόγηση σε λειτουργίες λογισμικού υψηλότερου επιπέδου και ακόμη και λογική «γρήγορης διαδρομής» για λήψη αποφάσεων χαμηλού λανθάνοντος χρόνου εφαρμόζονται σε αυτό το επίπεδο.

- (iv) *Συσσώρευση δεδομένων:* Δεδομένης της ταχύτητας, του όγκου και της ποικιλίας που παρέχουν τα συστήματα IoT, είναι απαραίτητο να παρέχεται εισερχόμενη αποθήκευση δεδομένων για μεταγενέστερη επεξεργασία, ομαλοποίηση, ενσωμάτωση και προετοιμασία για upstream applications.
- (v) *Αφαίρεση δεδομένων:* Στο επίπεδο αφαίρεσης δεδομένων γίνεται "μετάφραση" των δεδομένων, συλλέγοντας πληροφορίες από πολλούς αισθητήρες ή μετρήσεις IoT, επιταχύνεται η κυκλοφορία ή τα σήματα υψηλής προτεραιότητας και οργανώνονται τα εισερχόμενα δεδομένα σε κατάλληλο σχήμα και ροές για upstream επεξεργασία.
- (vi) *Επίπεδο εφαρμογής:* Σε αυτό το επίπεδο εκτελείται η λογική εφαρμογής του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων. Η παρακολούθηση, η βελτιστοποίηση της διαδικασίας, η διαχείριση συναγερμών, η στατιστική ανάλυση, η λογική ελέγχου, η εφοδιαστική, τα πρότυπα καταναλωτών, είναι μερικά παραδείγματα εφαρμογών IoT.
- (vii) *Συνεργασία και Διαδικασίες:* Σε αυτό το επίπεδο, η επεξεργασία εφαρμογών παρουσιάζεται στους χρήστες και τα δεδομένα που υποβάλλονται σε επεξεργασία σε χαμηλότερα επίπεδα ενσωματώνονται στις επιχειρηματικές εφαρμογές. Αυτό το επίπεδο αφορά την ανθρώπινη αλληλεπίδραση με όλα τα επίπεδα του συστήματος IoT και είναι το επίπεδο όπου παρέχεται οικονομική αξία. Η πρόκληση σε αυτό το επίπεδο είναι η αποτελεσματική αξιοποίηση της αξίας του IoT και των επιπέδων υποδομής και υπηρεσιών και η αξιοποίηση σε οικονομική ανάπτυξη, επιχειρηματική βελτιστοποίηση και κοινωνικά αγαθά [19].

Δύο είδη αρχιτεκτονικών με παρόμοια στοιχεία μεταξύ τους είναι η αρχιτεκτονική υπολογιστικού νέφους (Cloud) και ομίχλης (Fog). Σε ορισμένες αρχιτεκτονικές συστήματος η επεξεργασία δεδομένων γίνεται με μεγάλο συγκεντρωτικό τρόπο από υπολογιστές cloud. Μια τέτοια κεντρική αρχιτεκτονική στο cloud διατηρεί το cloud στο κέντρο, τις εφαρμογές πάνω από αυτό και το δίκτυο έξυπνων πραγμάτων κάτω από αυτό. Το cloud computing έχει προτεραιότητα επειδή

παρέχει μεγάλη ευελιξία και επεκτασιμότητα. Προσφέρει υπηρεσίες όπως βασική υποδομή, πλατφόρμα, λογισμικό και αποθήκευση. Οι προγραμματιστές μπορούν να παρέχουν τα εργαλεία αποθήκευσής τους, τα εργαλεία λογισμικού, εξόρυξη δεδομένων και εργαλεία μηχανικής μάθησης και οπτικοποίησης μέσω του cloud. Πρόσφατα, υπάρχει μια κίνηση προς μια άλλη αρχιτεκτονική συστήματος την υπολογιστική ομίχλης, όπου οι αισθητήρες και οι πύλες δικτύου συμμετέχουν στην επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων [18].

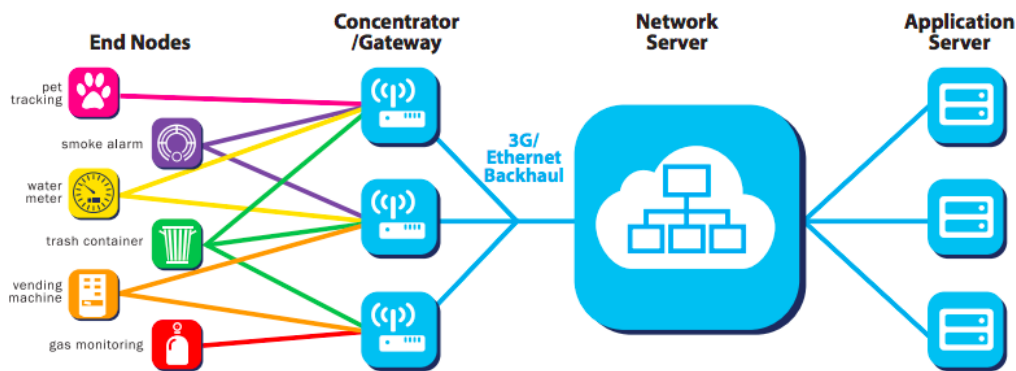
Η αρχιτεκτονική ομίχλης παρουσιάζει μια πολυεπίπεδη προσέγγιση όπως φαίνεται στην Εικόνα 28, η οποία εισάγει επίπεδα παρακολούθησης, προεπεξεργασίας, αποθήκευσης και ασφάλειας μεταξύ του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου μεταφοράς [18].



Εικόνα 28. Αρχιτεκτονική ομίχλης (Fog architecture) [18]

Το επίπεδο παρακολούθησης παρακολουθεί την ισχύ, τους πόρους, τις απαντήσεις και τις υπηρεσίες. Το επίπεδο προεπεξεργασίας εκτελεί φιλτράρισμα, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων αισθητήρων. Το προσωρινό επίπεδο αποθήκευσης παρέχει λειτουργίες αποθήκευσης όπως αναπαραγωγή δεδομένων, διανομή και αποθήκευση. Τέλος, το επίπεδο ασφαλείας εκτελεί κρυπτογράφηση / αποκρυπτογράφηση και διασφαλίζει ακεραιότητα και απόρρητο δεδομένων. Η παρακολούθηση και η προεπεξεργασία γίνονται στα «άκρα» του δικτύου (Edge Computing) πριν από την αποστολή δεδομένων στο σύννεφο [18].

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η τοπολογία ενός συστήματος Διαδικτύου των Πραγμάτων.



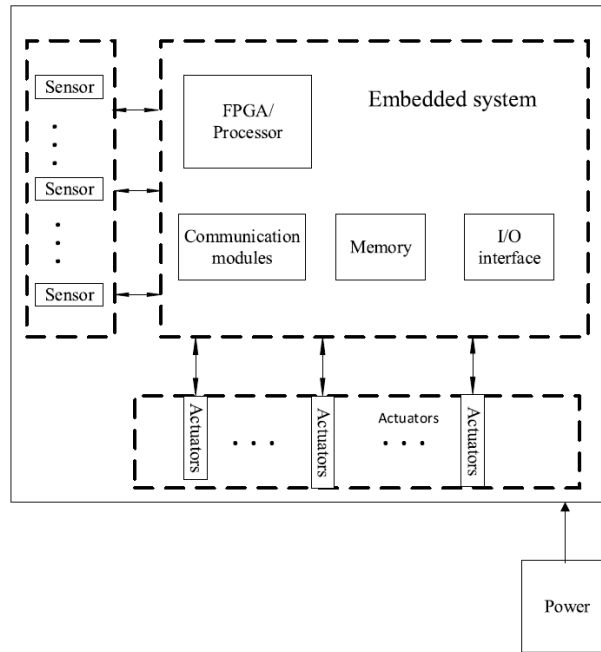
Εικόνα 29. Τοπολογία συστήματος IoT [19]

Το σύστημα αποτελείται από τους τερματικούς κόμβους (end nodes), δηλαδή τις «έξυπνες» συσκευές και τους αισθητήρες, τους συγκεντρωτές ή πύλες (concentrator/gateway), δηλαδή συσκευές που επικοινωνούν ασύρματα με τους τερματικούς κόμβους, τον εξυπηρετητή του δικτύου (network server) και τον εξυπηρετητή εφαρμογών (application server).

2.3.2 Συσκευές IoT

Η ιδεολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πολύ δυναμικό και ριζικά καταναμημένο δικτυωμένο σύστημα που αποτελείται από πολλά αναγνωρίσιμα έξυπνα αντικείμενα. Οι συνδεδεμένες συσκευές είναι η καρδιά του IoT, καθώς λειτουργούν ως διεπαφή μεταξύ του πραγματικού και του ψηφιακού κόσμου [20]. Ένας από τους κύριους στόχους μιας συσκευής IoT είναι η συλλογή, η επεξεργασία, η αποστολή και η λήψη δεδομένων. Έτσι, για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος είναι απαραίτητη η αξιολόγηση του είδους των δεδομένων που συλλέγονται και του υλικού που απαιτείται για να γίνει αυτό. Μπαίνοντας λοιπόν στην εποχή του Διαδικτύου των Πραγμάτων, η χρήση μικρού, φθηνού και ευέλικτου υπολογιστικού υλικού (hardware) γίνεται παρούσα [20].

Οι τελικές συσκευές IoT αποτελούνται από ενσωματωμένα συστήματα που αλληλεπιδρούν με αισθητήρες και ενεργοποιητές και απαιτούν ασύρματη συνδεσιμότητα. Αυτές οι συσκευές IoT μερικές φορές αναφέρονται ως αισθητήρες IoT. Η αρχιτεκτονική μιας τυπικής συσκευής IoT φαίνεται στην Εικόνα 30. Το ενσωματωμένο σύστημα αποτελείται από συστοιχία επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (Field Programmable Gate Array – FPGA) ή μικροεπεξεργαστή, μονάδες επικοινωνίας, μνήμη και διεπαφές εισόδου/εξόδου [21].

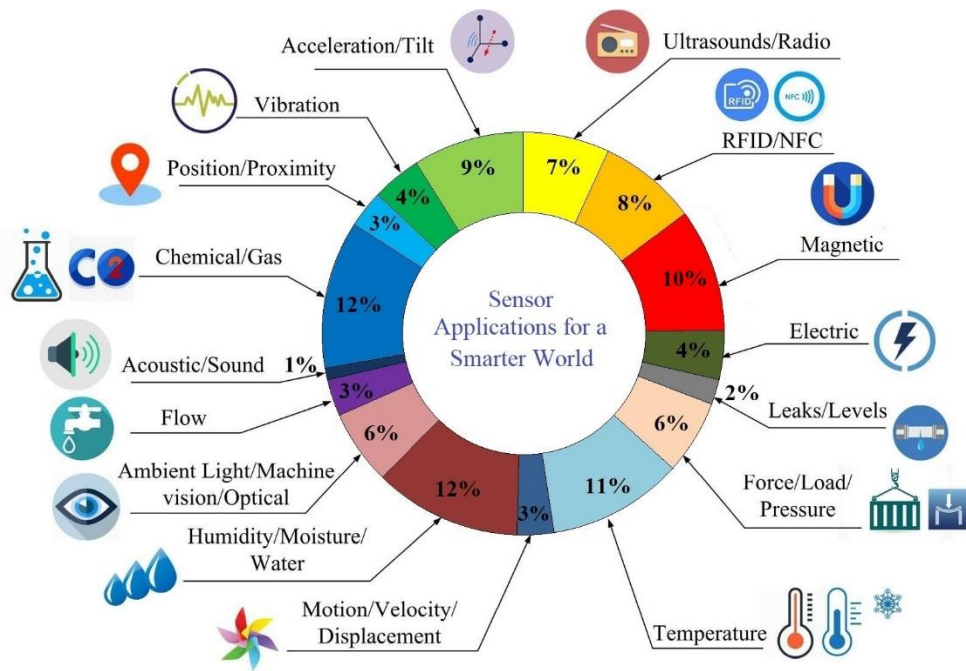


Εικόνα 30. Η αρχιτεκτονική μιας συσκευής IoT [21]

Τα κύρια μέρη ενός IoT συστήματος, όσο αφορά το υλικό, είναι οι τελικές συσκευές IoT, που αποτελούνται από τους αισθητήρες και τα ενσωματωμένα συστήματα, καθώς και οι συσκευές πύλες ή gateways.

Αισθητήρες

Όλες οι εφαρμογές IoT πρέπει να διαθέτουν έναν ή περισσότερους αισθητήρες για να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον. Οι αισθητήρες είναι απαραίτητα στοιχεία των έξυπνων αντικειμένων. Μια από τις πιο σημαντικές πτυχές του Διαδικτύου των Πραγμάτων είναι η συνειδητοποίηση του περιβάλλοντος, η οποία δεν είναι δυνατή χωρίς την τεχνολογία των αισθητήρων [18]. Οι αισθητήρες είναι τα στοιχεία εισόδου που μετρούν τις φυσικές μεταβλητές και τις μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα. Τα είδη των αισθητήρων ποικίλουν καθώς περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, καπνού, αερίου, φωτός, ήχου, δόνησης, ροής αέρα, ροής νερού, ταχύτητας, επιτάχυνσης, εγγύτητας, θέσης GPS, υψόμετρου, δύναμης και ούτω καθεξής. Στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται το ποσοστό χρήσης διάφορων κατηγοριών αισθητήρων σε καθημερινές και βιομηχανικές εφαρμογές του IoT.



Εικόνα 31. Κοινές κατηγορίες αισθητήρων σε εφαρμογές IoT [22]

Οι αισθητήρες επίσης παρακολουθούν την εσωτερική κατάσταση της συσκευής, ενώ αισθητήρες όπως κουμπιά, ρυθμιστικά ή οθόνη αφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση αλληλεπίδραση με τη συσκευή, παρέχοντας μια διεπαφή ανθρώπου-μηχανής [20]. Οι αισθητήρες IoT είναι συνήθως μικροί σε μέγεθος, έχουν χαμηλό κόστος και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Περιορίζονται από παράγοντες όπως η χωρητικότητα της μπαταρίας και η ευκολία ανάπτυξης [18]. Το αντίστροφο των αισθητήρων είναι οι συσκευές εξόδου, οι οποίες μετατρέπουν ένα ηλεκτρικό σήμα σε ένα φυσικό αποτέλεσμα. Οι συσκευές εξόδου περιλαμβάνουν LED, ηχεία και οθόνες και ενεργοποιητές όπως κινητήρες ή ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες που κινούν ή ελέγχουν τα πράγματα στον φυσικό κόσμο. Οι ενεργοποιητές συνήθως χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές IoT [20].

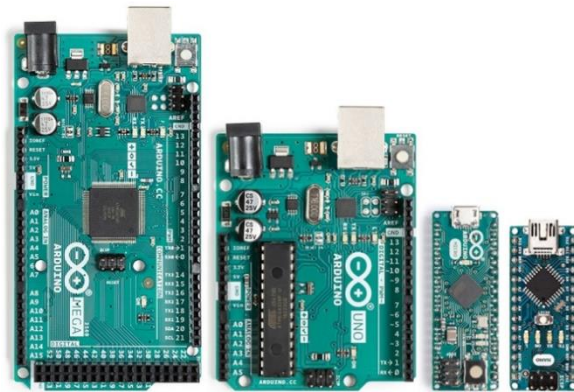
Μικροελεγκτές

Οι συσκευές IoT συνήθως απαιτούν δυνατότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων για να εκτελούν βασικό χειρισμό, μετασχηματισμό και ανάλυση των δεδομένων που συλλέγουν οι αισθητήρες. Οι συσκευές IoT μπορούν να επεξεργάζονται δεδομένα απευθείας ή να μεταδίδουν αυτά τα δεδομένα σε άλλες συσκευές, συσκευές πύλης (gateways) ή υπηρεσίες cloud ή εφαρμογές για συγκέντρωση και ανάλυση. Η επεξεργαστική ισχύς και ο αποθηκευτικός χώρος που

χρησιμοποιούνται από μια εφαρμογή IoT θα εξαρτηθούν από το πόση επεξεργασία πραγματοποιείται στην ίδια τη συσκευή σε αντίθεση με το πόσο εκτελείται η επεξεργασία από τις υπηρεσίες ή τις εφαρμογές που καταναλώνουν τα δεδομένα [20]. Ο ρόλος ενός μικροελεγκτή επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση περιφερειακών που απαιτούνται για την υποστήριξη γρήγορου ελέγχου εντός ενός ενσωματωμένου περιβάλλοντος. Με απλά λόγια, ένας μικροελεγκτής είναι ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει τα απαραίτητα στοιχεία ενός πλήρους συστήματος υπολογιστή: CPU, μνήμη, ταλαντωτή ρολογιού, εισόδους και εξόδους. Οι πιο γνωστές ολοκληρωμένες πλακέτες μικροελεγκτών είναι οι μικροελεγκτές Arduino, Raspberry Pi και NodeMCU καθώς είναι άμεσα διαθέσιμες και απαιτούν λιγότερη επένδυση από το σχεδιασμό και την κατασκευή προσαρμοσμένων πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Board - PCB). Ωστόσο πλέον στην αγορά υπάρχει πληθώρα μικροελεγκτών και ενσωματωμένων συστημάτων με ποικίλα χαρακτηριστικά και δυνατότητες.

Arduino

Τα Arduino είναι μικροελεγκτές μονής πλακέτας, δηλαδή μια απλή μητρική πλακέτα ανοικτού κώδικα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή (Εικόνα 32). Τα σχέδια των πλακετών Arduino χρησιμοποιούν μια ποικιλία μικροεπεξεργαστών και ελεγκτών. Οι περισσότερες πλακέτες Arduino αποτελούνται από έναν μικροελεγκτή



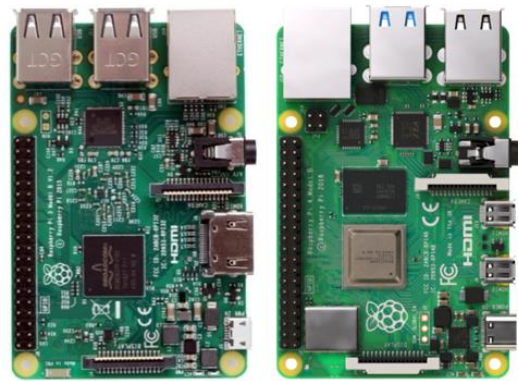
Εικόνα 32. Μικροελεγκτές Arduino (Mega, Uno, Micro, Nano)

Atmel 8-bit AVR (ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280 ή ATmega2560) με ποικίλες ποσότητες μνήμης flash, pins και δυνατοτήτων και περιλαμβάνουν γραμμικό ρυθμιστή τάσης 5 V και κρυσταλλικό ή κεραμικό ταλαντωτή 16 MHz. Οι πλακέτες είναι εξοπλισμένες με σετ ψηφιακών και αναλογικών ακίδων εισόδου / εξόδου (I / O) που μπορούν να διασυνδεθούν με διάφορες πλακέτες επέκτασης (shields) ή breadboards και άλλα κυκλώματα. Οι πλακέτες διαθέτουν διασυνδέσεις σειριακών επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένου του Universal Serial Bus (USB) σε ορισμένα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται

επίσης για τη φόρτωση προγραμμάτων από προσωπικούς υπολογιστές. Οι μικροελεγκτές μπορούν να προγραμματιστούν χρησιμοποιώντας τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++, χρησιμοποιώντας ένα τυπικό API που είναι επίσης γνωστό ως "γλώσσα Arduino". Εκτός από τη χρήση παραδοσιακών εργαλείων μεταγλωττιστή, το Arduino παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated Development Environment - IDE) και ένα εργαλείο γραμμής εντολών (Arduino-CLI) που αναπτύχθηκε στο Go.

Raspberry Pi

Το Raspberry Pi είναι μια σειρά μικρών υπολογιστών μονής πλακέτας που αναπτύχθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο από το Ίδρυμα Raspberry Pi σε συνεργασία με την Broadcom (Εικόνα 33). Έχουν κυκλοφορήσει αρκετές γενιές Raspberry Pi. Όλα τα μοντέλα διαθέτουν σύστημα σε ένα chip (SoC) της Broadcom με

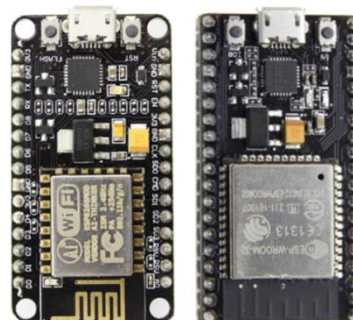


Εικόνα 33. Raspberry Pi 3 και 4

ενσωματωμένη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) συμβατή με ARM και μονάδα επεξεργασίας γραφικών on-chip (GPU). Το υλικό Raspberry Pi έχει εξελιχθεί μέσω αρκετών εκδόσεων που διαθέτουν παραλλαγές στον τύπο της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας, το μέγεθος της χωρητικότητας μνήμης, την υποστήριξη δικτύωσης και την υποστήριξη περιφερειακών συσκευών. Η ταχύτητα του επεξεργαστή κυμαίνεται από 700 MHz έως 1,4 GHz για το Pi 3 Model B+ ή 1,5 GHz για το Pi 4. Η ενσωματωμένη μνήμη κυμαίνεται από 256 MiB έως 1 GiB μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM), με έως και 8 GiB διαθέσιμες στις κάρτες Pi 4. Secure Digital (SD) σε MicroSDHC form factor (SDHC σε πρώιμα μοντέλα) χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της μνήμης του λειτουργικού συστήματος και του προγράμματος. Οι πλακέτες έχουν μία έως πέντε θύρες USB. Για έξοδο βίντεο, υποστηρίζονται HDMI και CVBS, με μια τυπική υποδοχή 3,5 χιλ. για έξοδο ήχου. Η έξοδος χαμηλότερου επιπέδου παρέχεται από έναν αριθμό ακίδων GPIO (General-Purpose Input/Output), οι οποίες υποστηρίζουν κοινά πρωτόκολλα όπως το I²C. Τα μοντέλα B διαθέτουν θύρα Ethernet 8P8C και τα Pi 3, Pi 4 και Pi Zero W διαθέτουν ενσωματωμένο Wi-Fi 802.11n και Bluetooth.

NodeMCU

Το NodeMCU (Εικόνα 34) είναι μια πλακέτα IoT ανοιχτού κώδικα χαμηλού κόστους. Αρχικά περιελάμβανε firmware που τρέχει στο ESP8266 Wi-Fi SoC από την Espressif Systems και υλικό που βασίστηκε στη μονάδα ESP-12. Αργότερα, προστέθηκε υποστήριξη και για το ESP32 32-bit MCU. Το NodeMCU είναι ένα υλικολογισμικό (firmware) ανοιχτού κώδικα για το οποίο διατίθενται σχέδια



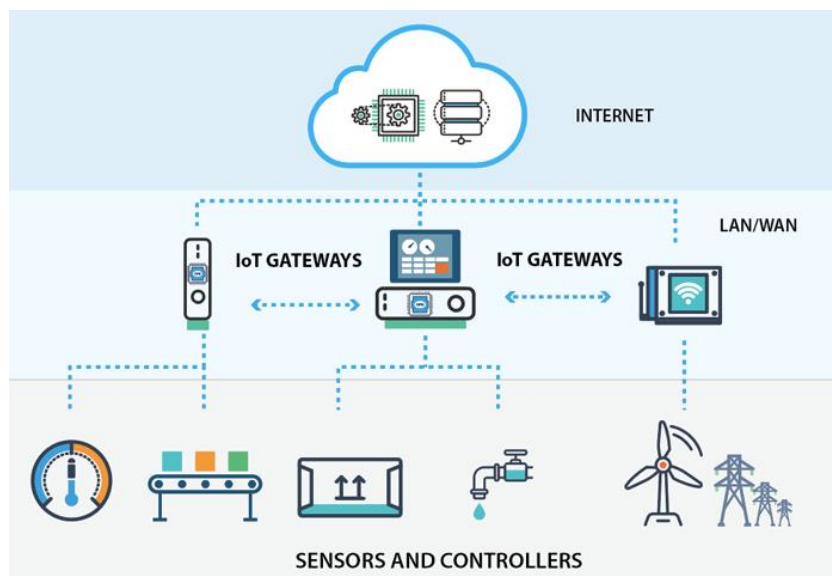
Εικόνα 34. NodeMCU ESP8266 και ESP32

πλακέτας πρωτότυπου ανοιχτού κώδικα. Το όνομα "NodeMCU" είναι συνδυασμός των λέξεων "node" (κόμβος) και "MCU" (μονάδα μικροελεγκτή). Ο όρος "NodeMCU" αναφέρεται αυστηρά στο υλικολογισμικό και όχι στα αντίστοιχα kit ανάπτυξης. Τόσο το υλικολογισμικό όσο και τα πρωτότυπα σχέδια είναι ανοιχτού κώδικα. Το πρωτότυπο υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι μια πλακέτα κυκλώματος που λειτουργεί ως ένα πακέτο διπλής γραμμής (DIP) που ενσωματώνει έναν ελεγκτή USB με μια μικρότερη επιφανειακή πλακέτα που περιέχει το MCU και την κεραία. Η επιλογή της μορφής DIP επιτρέπει την εύκολη δημιουργία πρωτοτύπων σε breadboard. Ο σχεδιασμός βασίστηκε αρχικά στη μονάδα ESP-12 του ESP8266, το οποίο είναι ένα Wi-Fi SoC ενσωματωμένο με έναν πυρήνα Tensilica Xtensa LX106, που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές IoT.

Gateways

Οι πύλες IoT (gateways) είναι συσκευές που δρουν ως ένας σύνδεσμος μεταξύ του δικτύου αισθητήρων και του δικτύου επικοινωνίας, και μπορεί να αποθηκεύσει και να μετατρέψει τα δεδομένα αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των δικτύων (Εικόνα 35). Βρίσκονται μεταξύ του επιπέδου αντίληψης, του επιπέδου δικτύου και του επιπέδου πρόσβασης δικτύου στην αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων του IoT, και δίνει στο σύστημα IoT τη δυνατότητα να ενσωματώνει μια ποικιλία μεθόδων πρόσβασης, να καλύπτει τις απαιτήσεις σύγκλισης και πρόσβασης των τοπικών επικοινωνιών μικρών αποστάσεων, να συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς και να ολοκληρώνει τις λειτουργίες προώθησης, ελέγχου, σηματοδότησης, κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης [23]. Ουσιαστικά το gateway είναι μια λύση για την επίτευξη

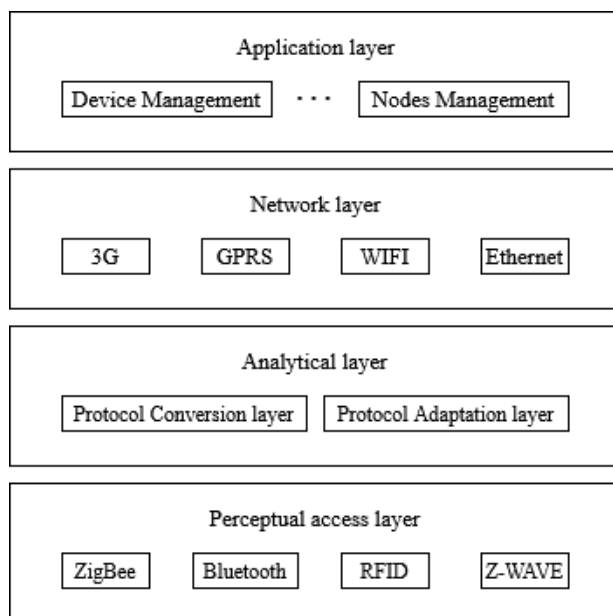
επικοινωνίας σε ένα σύστημα IoT, συνήθως μεταξύ των συσκευών ή συσκευών με το cloud [24]. Ταυτόχρονα, το gateway είναι υπεύθυνο για την προστασία της ασφάλειας και αποτροπής εξωτερικής εισβολής, για την μετατροπή πρωτοκόλλου μεταξύ δύο διαφορετικών δικτύων και, στη συνέχεια, μπορεί να μετατρέπει μια μορφή πακέτου σε άλλη μορφή πακέτου [23].



Εικόνα 35. Ο ρόλος των gateway στο IoT [24]

Τα gateways αναδύονται ως βασικό συστατικό για την οικοδόμηση ενός ισχυρού συστήματος IoT και για την παροχή υπολογιστικής ισχύος σε σενάρια Edge Computing. Το Edge Computing κατανέμει το φορτίο σε ένα σύστημα, εκτελώντας την επεξεργασία δεδομένων στην πηγή δεδομένων (edge), αντί να βασίζεται σε έναν κεντρικό διακομιστή για το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας [24]. Τα gateways επιτρέπουν τη μετατροπή δεδομένων μεταξύ των πρωτοκόλλων επικοινωνίας μικρής απόστασης και των παραδοσιακών δικτύων επικοινωνίας. Υποστηρίζουν διαφορετικούς τύπους κόμβων αισθητήρων, πολλαπλά πρωτόκολλα επικοινωνίας, ασύρματα ή ενσύρματα, και παρέχει ένα σύνολο ενοποιημένων πληροφοριών για την εφαρμογή ή το χρήστη [25]. Μια έξυπνη πύλη (smart gateway) εκτελεί εργασίες όπως η συλλογή δεδομένων αισθητήρων, προεπεξεργασία και φιλτράρισμα δεδομένων, παροχή υπηρεσιών υπολογισμού, αποθήκευσης και δικτύωσης σε συσκευές IoT, επικοινωνία με το Cloud και αποστολή απαραίτητων δεδομένων, παρακολούθηση της κατανάλωσης ισχύος, των δραστηριοτήτων και των υπηρεσιών των συσκευών IoT και διασφάλιση της ασφάλειας και του απορρήτου των δεδομένων [18]. Η βασική δομή

ενός gateway, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36, αποτελείται από το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο ανάλυσης (επίπεδο μετατροπής και προσαρμογής πρωτοκόλλου) και το επίπεδο αντίληψης [23].



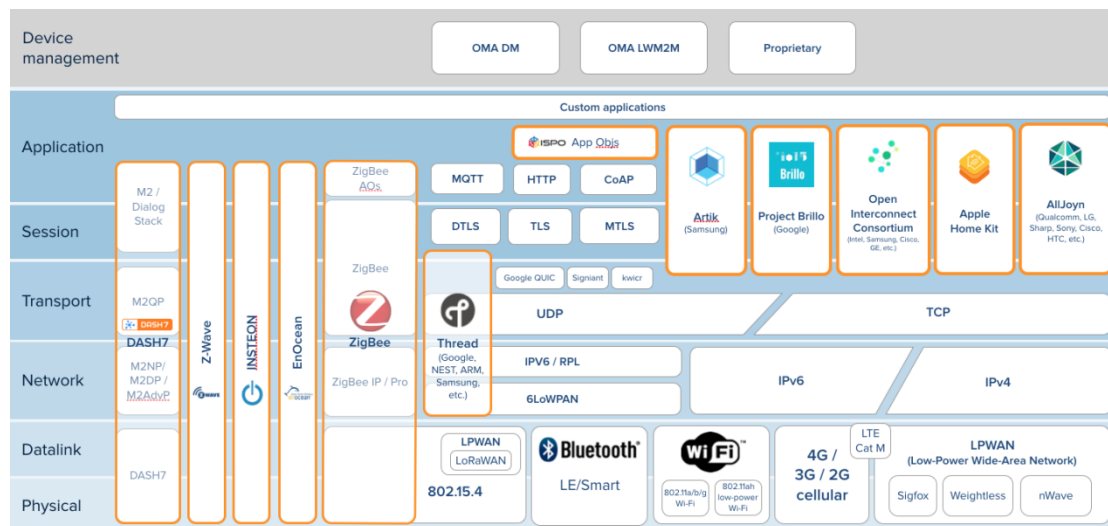
Εικόνα 36. Ιεραρχία IoT Gateway [23]

- (i) *Επίπεδο εφαρμογής:* Το επίπεδο εφαρμογής πραγματοποιεί αυτόματα τη διαχείριση της συσκευής ανίχνευσης και τη διαχείριση κάθε υποδικτύου.
- (ii) *Επίπεδο δικτύου:* Το επίπεδο δικτύου παρέχει μια ποικιλία διασύνδεσης καναλιών πρόσβασης επικοινωνίας δικτύου. Για το κινητό περιβάλλον ή το μη σταθερό περιβάλλον του δικτύου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία μεθόδων πρόσβασης. Το επίπεδο δικτύου περιλαμβάνει μια ποικιλία δικτύων επικοινωνίας και δημιουργίας δικτύων με το Διαδίκτυο, το οποίο πλέον είναι η πιο συνηθισμένη μορφή δικτύου επικοινωνίας, όπως τα δίκτυα 2g, 3g, 4g ή διαδίκτυο υπολογιστή κ.λπ.
- (iii) *Επίπεδο ανάλυσης:* Το επίπεδο ανάλυσης εφαρμόζει την τυποποίηση της μετατροπής πρωτοκόλλου και ανάλυση της μορφής των δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων προσαρμογέα πρωτοκόλλου και μετατροπής πρωτοκόλλου. Η μονάδα προσαρμογέα πρωτοκόλλου ορίζει μια διεπαφή για πρόσβαση, εξασφαλίζοντας ότι διαφορετικά πρωτόκολλα επιπέδου πρόσβασης μετατρέπονται σε μία ενοποιημένη μορφή δεδομένων και σηματοδότησης.

- (iv) *Επίπεδο αντιληπτικής πρόσβασης:* Το επίπεδο αντιληπτικής πρόσβασης ολοκληρώνει τον έλεγχο του δικτύου και την πρόσβαση για τους κόμβους και αντιστοιχίζει μια ποικιλία τεχνολογιών δικτύων αισθητήρων για την πραγματοποίηση πρόσβασης διαφορετικών πρωτοκόλλων αντίληψης [23].

2.3.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Καθώς το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αναπτύσσεται ταχύτατα, υπάρχει μεγάλος αριθμός ετερογενών έξυπνων συσκευών που συνδέονται στο διαδίκτυο. Οι συσκευές IoT διαθέτουν μπαταρία, με ελάχιστη υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικό χώρο. Λόγω αυτών των περιορισμών, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις επικοινωνίας, που έχουν να κάνουν με θέματα όπως η διευθυνσιοδότηση και η ταυτοποίηση των έξυπνων συσκευών, η επικοινωνία με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η χρήση πρωτοκόλλων δρομολόγησης με χαμηλή απαίτηση μνήμης και αποδοτικών προτύπων επικοινωνίας η επικοινωνία υψηλής ταχύτητας χωρίς μεγάλες απώλειες και η κινητικότητα των έξυπνων συσκευών. Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται η χαρτογράφηση των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και προτύπων στο IoT σε σχέση με τα επίπεδα της αρχιτεκτονικής του IoT.



Εικόνα 37. Χαρτογράφηση των πρωτοκόλλων και προτύπων που χρησιμοποιούνται μεταξύ των επιπέδων του IoT [26]

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση των πιο συνηθισμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο εφαρμογών.

Πρωτόκολλα επικοινωνίας φυσικού επιπέδου

Οι συσκευές IoT μπορούν να συνδεθούν τοπικά μέσω δικτύων non-IP, που καταναλώνουν λιγότερη ισχύ και συνδέονται στο Διαδίκτυο μέσω έξυπνων πυλών. Τα non-IP κανάλια επικοινωνίας όπως Bluetooth, RFID και NFC είναι αρκετά δημοφιλείς αλλά είναι περιορισμένου εύρους λύσεις (έως και λίγα μέτρα). Επομένως, οι εφαρμογές τους περιορίζονται σε μικρά δίκτυα προσωπικής περιοχής (Personal Area Network - PAN). Τα PAN χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές IoT όπως φορετές συσκευές (wearables) συνδεδεμένες με smartphone. Για να αυξηθεί το εύρος αυτών των τοπικών δικτύων, είναι αναγκαία η τροποποίηση και η χρήση της στοίβας IP έτσι ώστε διευκολυνθεί η επικοινωνία χαμηλής ισχύος. Οι κορυφαίες τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT είναι οι IEEE 802.15.4, WiFi HaLow, 6LoWPAN, RFID, NFC, Sigfox, LoraWAN και άλλα ιδιόκτητα πρωτόκολλα για ασύρματα δίκτυα [18].

NFC

Η επικοινωνία κοντινού πεδίου (Near Field Communication - NFC) είναι μια ασύρματη τεχνολογία επικοινωνία μικρής εμβέλειας, μέσω της οποίας οι κινητές συσκευές μπορούν να αλληλεπιδρούν σε απόσταση λίγων εκατοστών. Όλοι οι τύποι δεδομένων μπορούν να μεταφερθούν μεταξύ δύο συσκευών με δυνατότητα NFC σε δευτερόλεπτα φέρνοντας κοντά την μία στην άλλη. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στο RFID. Χρησιμοποιεί παραλλαγές στο μαγνητικό πεδίο για την επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών με δυνατότητα NFC. Το NFC λειτουργεί σε ζώνη συχνοτήτων 13,56 MHz, δηλαδή το ίδιο με RFID υψηλής συχνότητας. Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας, ενεργή και παθητική. Στην ενεργή λειτουργία, και οι δύο συσκευές παράγουν μαγνητικά πεδία, ενώ σε παθητική λειτουργία, μόνο μια συσκευή δημιουργεί το πεδίο και η άλλη χρησιμοποιεί διαμόρφωση για τη μεταφορά των δεδομένων. Η παθητική λειτουργία είναι χρήσιμη στο συσκευές με μπαταρία για βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας. Ένα όφελος της απαίτησης εγγύτητας μεταξύ των συσκευών είναι η χρησιμότητα για ασφαλείς συναλλαγές, όπως πληρωμές. Επίσης, το NFC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αμφίδρομη επικοινωνία σε αντίθεση με το RFID. Κατά συνέπεια, σχεδόν όλα τα smartphones στην αγορά σήμερα διαθέτουν τεχνολογία NFC [18].

RFID

Το RFID (Radio Frequency Identification) έχει μια ποικιλία προτύπων όπως ISO, IEC, ASTM International, DASH7 Alliance και EPC-global. Τα RFID συστήματα που αποτελούνται από μια συσκευή ανάγνωσης που ονομάζεται αναγνώστης, και ένα μικρό πομποδέκτη ραδιοσυχνότητων που ονομάζεται ετικέτα (tag) . Αυτή η ετικέτα προγραμματίζεται ηλεκτρονικά με μοναδικές πληροφορίες που λειτουργεί ως χαρακτηριστικό ανάγνωσης εξ αποστάσεως. Υπάρχουν δύο τεχνολογίες συστημάτων ετικετών RFID: το πρώτο ονομάζεται ενεργό σύστημα ετικετών αναγνώστη και το άλλο ονομάζεται παθητική ετικέτα αναγνώστη. Οι ενεργές ετικέτες λειτουργούν με μπαταρία, είναι πιο ακριβές και χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες, ενώ οι παθητικές ετικέτες χρησιμοποιούν χαμηλότερες συχνότητες και δεν έχουν εσωτερική πηγή ενέργειας. Επειδή οι πληροφορίες RFID είναι στατικές και πρέπει να προγραμματιστούν στην ετικέτα, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη μέτρηση ή διαγνωστικά δεδομένα. Ορισμένες από τις εφαρμογές IoT που χρησιμοποιούν RFID περιλαμβάνουν έξυπνες αγορές, υγειονομική περίθαλψη, εθνική ασφάλεια και γεωργία. Το RFID μπορεί να υποστηρίξει τοπολογία δικτύου P2P [27].

BLE

Το BLE (Bluetooth Low Energy) είναι επίσης γνωστό ως Bluetooth smart το οποίο είναι ένα σημαντικό πρωτόκολλο για εφαρμογές IoT. Είναι σχεδιασμένο για μικρό εύρος, χαμηλό εύρος ζώνης και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για Εφαρμογές IoT. Τα πλεονεκτήματα του BLE έναντι του κλασικού Bluetooth περιλαμβάνουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, χαμηλότερο χρόνο εγκατάστασης και υποστήριξη τοπολογίας δικτύου αστέρα με απεριόριστο αριθμό κόμβων [27]. Η στοίβα πρωτοκόλλου BLE είναι παρόμοια με τη στοίβα που χρησιμοποιείται στην κλασική τεχνολογία Bluetooth. Η κύρια διαφορά είναι ότι το BLE δεν υποστηρίζει ροή δεδομένων. Αντ' αυτού, υποστηρίζει γρήγορη μεταφορά μικρών πακέτων δεδομένων (το μέγεθος πακέτου είναι μικρό) με ρυθμό δεδομένων 1Mbps. Υπάρχουν δύο τύποι συσκευών στο BLE: αφέντης και σκλάβος. Ο αφέντης λειτουργεί ως κεντρική συσκευή που μπορεί να συνδεθεί με διάφορες συσκευές σκλάβους. Το BLE υποστηρίζει απαιτήσεις χαμηλού κύκλου λειτουργίας καθώς το μέγεθος του πακέτου του είναι μικρό και ο χρόνος που χρειάζεται για τη μετάδοση του μικρότερου πακέτου μπορεί να είναι ακόμα και 80 μ s [18].

WiFi HaLow

Η WiFi alliance ανέπτυξε πρόσφατα το WiFi HaLow, ή αλλιώς wifi χαμηλής ισχύος, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11ah. Καταναλώνει χαμηλότερη ισχύ από μία παραδοσιακή συσκευή WiFi και έχει επίσης μεγαλύτερο εύρος. Γι' αυτό το πρωτόκολλο είναι κατάλληλο για εφαρμογές Internet of Things. Το εύρος του WiFi HaLow είναι σχεδόν διπλάσιο από το εύρος του WiFi. Όπως και άλλες συσκευές WiFi, συσκευές που υποστηρίζουν Wi-Fi HaLow υποστηρίζουν επίσης τη συνδεσιμότητα IP, η οποία είναι σημαντική για τις εφαρμογές IoT. Το πρότυπο IEEE 802.11ah αναπτύχθηκε για περιπτώσεις ασύρματου δικτύου αισθητήρων, όπου οι συσκευές είναι ενεργειακά περιορισμένες και απαιτούν σχετικά μεγάλη εμβέλεια. Το IEEE 802.11ah λειτουργεί κάτω από τη ζώνη των Gigahertz (900MHz). Λόγω της σχετικά χαμηλότερης συχνότητας, το εύρος είναι μεγαλύτερο από τα κύματα υψηλότερης συχνότητας, καθώς αυτά παρουσιάζουν υψηλότερη εξασθένιση. Το IEEE 802.11ah έχει επίσης σχεδιαστεί για να υποστηρίζει μεγάλα δίκτυα τοπολογίας αστέρων, όπου πολλοί σταθμοί συνδέονται σε ένα σημείο πρόσβασης [18].

Zigbee

Το πρωτόκολλο ZigBee δημιουργήθηκε από την ZigBee Alliance με βάση το πρότυπο IEEE802.15.4 για ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος. Το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ συμπαγών και φθηνών ενσωματωμένων συσκευών χαμηλής ισχύος που χρειάζονται μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Υποστηρίζει επικοινωνία χαμηλής ισχύος μαζί με επικοινωνία χαμηλού κόστους και μικρής εμβέλειας. Το Zigbee λειτουργεί για αξιόπιστες, χαμηλής ενέργειας και φθηνές λύσεις επικοινωνίας. Το εύρος της επικοινωνίας συσκευών Zigbee είναι πολύ μικρό (10–100 μέτρα) [18]. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό ρυθμό δεδομένων, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας και ασφαλείς συσκευές δικτύωσης. Επιπλέον, το ZigBee μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικούς τύπους τοπολογιών όπως τοπολογία δικτύου πλέγματος, αστέρα και δέντρου [27].

6LoWPAN

Το 6LoWPAN (Low Power Wireless Personal Area Network) είναι το συνηθέστερο πρότυπο από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT, καθώς είναι ένα τυπικό πρωτόκολλο

διαδικτύου βασισμένο σε IP. Μπορεί να συνδεθεί απευθείας με άλλο δίκτυο IP χωρίς ενδιάμεσες οντότητες όπως πύλες ή διακομιστές μεσολάβησης [27]. Το 6LoWPAN επιτρέπει την επικοινωνία χρησιμοποιώντας το IPv6 μέσω του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4 δρώντας ως ένα επίπεδο προσαρμογής μεταξύ του επιπέδου MAC (Medium Access Control) και του επιπέδου δικτύου (IPv6) [27][18]. Υποστηρίζει 2^{128} διευθύνσεις IP, οπότε ο αριθμός των διευθύνσεων είναι παραπάνω από επαρκής. Είναι επίσης χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ισχύος εύρους ζώνης. Το 6LoWPAN υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους τοπολογιών όπως τοπολογία πλέγματος και αστέρα [27].

SigFox

Το SigFox είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής ισχύος για ένα εύρους αντικειμένων χαμηλής ενέργειας, όπως αισθητήρες και εφαρμογές M2M (Machine to Machine) [27] που χρησιμοποιεί επικοινωνία στενής ζώνης ($\approx 10\text{MHz}$). Χρησιμοποιεί δωρεάν τμήματα του ραδιοφάσματος (ζώνη ISM) για τη μετάδοση των δεδομένων [18]. Επιτρέπει τη μεταφορά μικρών ποσοτήτων δεδομένων σε αποστάσεις έως και 50 χιλιομέτρων. Το SigFox χρησιμοποιεί την τεχνολογία Ultra Narrow Band (UNB). Αυτή η τεχνολογία έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται χαμηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων από 10 έως 1000 bits ανά δευτερόλεπτο και μπορεί να λειτουργήσει με μια μικρή μπαταρία. Η τεχνολογία SigFox χρησιμοποιείται σε έξυπνους μετρητές, οθόνες παρακολούθησης ασθενών, γεωργικές εφαρμογές, συσκευές ασφαλείας, φωτισμούς δρόμου και αισθητήρες του περιβάλλοντος. Επίσης το SigFox υποστήριξη και την τοπολογία δικτύου αστέρα [27].

Κινητή τηλεφωνία

Η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας είναι ιδανική για εφαρμογές που χρειάζονται δεδομένα υψηλής απόδοσης (throughput) και απαιτούν λειτουργία σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Μπορεί να εκμεταλλευτεί τις δυνατότητες κινητής επικοινωνίας GSM/3G /4G και να παρέχει αξιόπιστη συνδεσιμότητα υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο. Ωστόσο, χρειάζεται υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, δεν είναι κατάλληλο για επικοινωνία M2M ή για ένα τοπικό δίκτυο. Το πρωτόκολλο κινητής επικοινωνίας χρησιμοποιείται επίσης για πολλές εφαρμογές, ειδικά για εφαρμογές που περιλαμβάνουν κινητές συσκευές [27].

LoRaWAN

Το πρωτόκολλο LoRaWAN είναι παρόμοιο με το πρωτόκολλο Sigfox. Απευθύνεται σε εφαρμογές δικτύου ευρείας περιοχής (Wide Area Network – WAN) και έχει σχεδιαστεί για να είναι ένα πρωτόκολλο χαμηλής ισχύος. Ο ρυθμός δεδομένων του μπορεί να κυμαίνονται από 0,3 kbps έως 50 kbps και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αστικό ή προαστιακό περιβάλλον (εύρος 2–5 km σε μια πολυσύχναστη αστική περιοχή). Σχεδιάστηκε για να χρησιμεύσει ως πρότυπο για πρωτόκολλα IoT μεγάλης εμβέλειας. Γι' αυτό έχει χαρακτηριστικά για την υποστήριξη πολλαπλών λειτουργιών, την ενεργοποίηση πολλαπλών εφαρμογών και περιλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς τομείς δικτύου [18].

Z-Wave

Το Z-Wave είναι ένα πρωτόκολλο MAC χαμηλής ισχύος που αναπτύχθηκε από τη Zensys και χρησιμοποιεί ασύρματο οικιακό αυτοματισμό για τη σύνδεση 30-50 κόμβων και έχει χρησιμοποιηθεί για επικοινωνία IoT, ειδικά για έξυπνους οικιακούς και μικρούς εμπορικούς τομείς. Αυτή η τεχνολογία έχει σχεδιαστεί για μικρά πακέτα δεδομένων σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες έως 100 kbps και επικοινωνία από σημείο σε σημείο σε απόσταση 30 μέτρων. Επομένως, είναι κατάλληλο για μικρά μηνύματα σε εφαρμογές IoT, όπως έλεγχος φωτός, έλεγχος ενέργειας, έλεγχος υγειονομικής περίθαλψης κτλ. Μια σύνδεση Z-Wave αποτελείται από δύο τύπους συσκευών (ελεγκτής και σκάβος). Οι κόμβοι σκλάβοι είναι συσκευές χαμηλού κόστους που δεν μπορούν να ξεκινήσουν μηνύματα. Μπορούν να απαντήσουν και να εκτελέσουν μόνο εντολές που αποστέλλονται ελέγχοντας συσκευές που ξεκινούν μηνύματα εντός του δικτύου. Το Z-Wave υποστηρίζει τοπολογία δικτύου πλέγματος [27].

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN) μπορεί να παρέχουν διάφορα χρήσιμα δεδομένα και χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι κυβερνητικές και περιβαλλοντικές υπηρεσίες, ο αμυντικός και στρατιωτικός τομέας, στην εξερεύνηση επικίνδυνου περιβάλλοντος, στην σεισμική ανίχνευση κλπ. [28]. Το μειονέκτημα των non-IP τεχνολογιών, όπως RFID, NFC, και το Bluetooth είναι ότι το εύρος τους είναι πολύ μικρό. Έτσι, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπου χρειάζεται παρακολούθηση

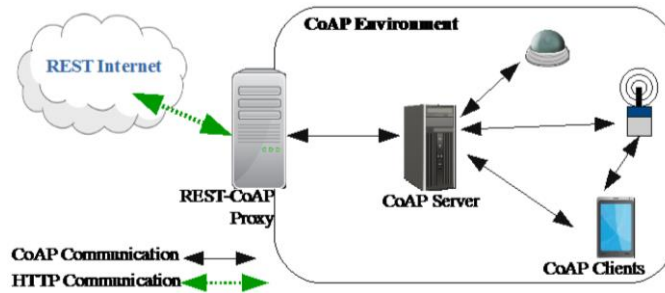
μιας μεγάλης περιοχής μέσω πολλών κόμβων αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) συνίσταται από δεκάδες έως χιλιάδες κόμβους αισθητήρων που συνδέονται με ασύρματες τεχνολογίες. Συλλέγουν δεδομένα για το περιβάλλον και τα κοινοποιούν σε συσκευές πύλης που μεταδίδουν τις πληροφορίες στο cloud μέσω του Διαδικτύου. Η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων σε ένα WSN μπορεί να είναι ευθεία ή έμμεση (multi-hop) [18]. Ωστόσο, τα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να αντιμετωπίσουν πολλά προβλήματα σχετικά με τις επικοινωνίες (μικρό εύρος επικοινωνίας, ασφάλεια και απόρρητο, αξιοπιστία, κινητικότητα κλπ.) και τους πόρους (απαιτήσεις ενέργειας, χωρητικότητα αποθήκευσης, δυνατότητα επεξεργασίας, διαθεσιμότητα εύρους ζώνης κ.λπ.) [28]. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι περιορισμένης φύσης, αλλά οι κόμβοι πύλης έχουν επαρκή ισχύ και πόρους επεξεργασίας. Οι δημοφιλέστερες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται σε ένα WSN είναι οι τοπολογίες αστέρα (star), πλέγματος (mesh) και υβριδικού δικτύου. Το μεγαλύτερο μέρος της επικοινωνίας στο WSN βασίζεται στο Πρότυπο IEEE 802.15.4 [18].

Πρωτόκολλα επικοινωνίας επιπέδου εφαρμογής

Το επίπεδο εφαρμογής είναι υπεύθυνο για τη μορφοποίηση και την παρουσίαση των δεδομένων. Η επικοινωνία στο επίπεδο εφαρμογής με το Διαδίκτυο βασίζεται συνήθως στο πρωτόκολλο HTTP. Ωστόσο, το HTTP δεν είναι κατάλληλο για εφαρμογές IoT καθώς έχει αρκετούς περιορισμούς. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικά πρωτόκολλα για περιβάλλοντα IoT, όπως το CoAP (Constrained Application Protocol) και το MQTT (Message Queue Telemetry Transport) [18].

CoAP

Το CoAP (Εικόνα 38) μπορεί να θεωρηθεί ως εναλλακτική λύση για το HTTP. Χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές IoT. Σε αντίθεση με το HTTP, ενσωματώνει βελτιστοποιήσεις για περιορισμένα περιβάλλοντα εφαρμογών. Χρησιμοποιεί τη μορφή δεδομένων EXI (Efficient XML Interchanges), η οποία είναι μια μορφή δυαδικών δεδομένων και είναι πολύ πιο αποτελεσματική από άποψη χώρου σε σύγκριση με το απλό κείμενο HTML/XML.

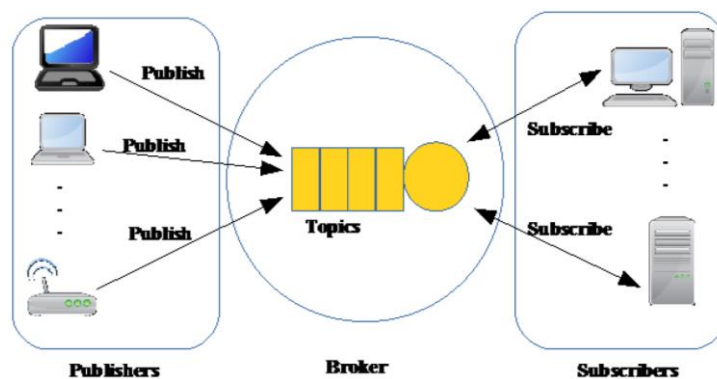


Εικόνα 38. Η λειτουργία του CoAP [29]

Άλλες υποστηριζόμενες λειτουργίες είναι η ενσωματωμένη συμπίεση κεφαλίδας, η ανακάλυψη πόρων, η αυτόματη διαμόρφωση, η ασύγχρονη ανταλλαγή μηνυμάτων, ο έλεγχος συμφόρησης και η υποστήριξη για μηνύματα πολλαπλής διανομής. Υπάρχουν τέσσερις τύποι μηνυμάτων στο CoAP: μη επιβεβαιώσιμα, επιβεβαιώσιμα, επαναφορά (ack) και αναγνώριση. Για αξιόπιστη μετάδοση μέσω UDP (User Datagram Protocol), χρησιμοποιούνται επιβεβαιώσιμα μηνύματα. Επιπλέον, χρησιμοποιεί DTLS (Datagram Transport Layer Security) για λόγους ασφαλείας [18].

MQTT

Το MQTT (Εικόνα 39) είναι ένα πρωτόκολλο δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe) που τρέχει μέσω TCP (Transmission Control Protocol). Αναπτύχθηκε από την IBM κυρίως ως πρωτόκολλο πελάτη/διακομιστή. Οι πελάτες είναι εκδότες/συνδρομητές και ο διακομιστής ενεργεί ως broker στον οποίο οι πελάτες συνδέονται μέσω TCP. Οι πελάτες μπορούν να δημοσιεύσουν ή να εγγραφούν σε ένα θέμα. Αυτή η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω του broker, του οποίου η δουλειά είναι να συντονίζει τις συνδρομές και επίσης να πιστοποιεί τον πελάτη για ασφάλεια.

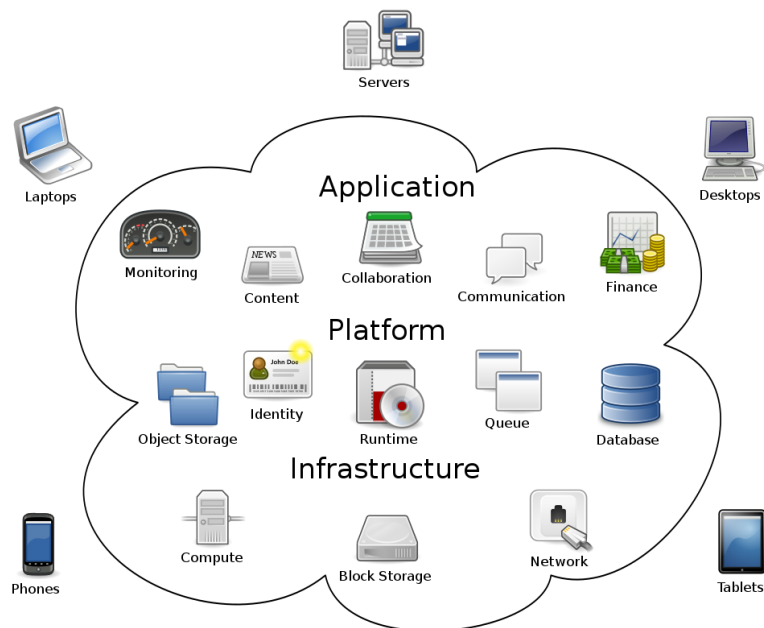


Εικόνα 39. Η αρχιτεκτονική του MQTT [29]

Το MQTT είναι ένα ελαφρύ πρωτόκολλο, το οποίο το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές IoT. Αλλά λόγω του γεγονότος ότι τρέχει μέσω TCP, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με όλους τους τύπους εφαρμογών IoT. Μια επέκταση του MQTT είναι το MQTT-S/MQTT-SN, το οποίο έχει σχεδιαστεί για συσκευές χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους. Βασίζεται στο MQTT αλλά έχει κάποιες βελτιστοποιήσεις για WSN. Τα ονόματα του θέματος αντικαθίστανται από αναγνωριστικά θέματος, τα οποία μειώνουν τα γενικά έξοδα μετάδοσης. Τα θέματα δεν χρειάζονται εγγραφή καθώς έχουν καταχωρηθεί εκ των προτέρων. Τα μηνύματα χωρίζονται επίσης έτσι ώστε να αποστέλλονται μόνο οι απαραίτητες πληροφορίες. Επιπλέον, για εξοικονόμηση ενέργειας, υπάρχει μια διαδικασία εκτός σύνδεσης για πελάτες που βρίσκονται σε κατάσταση ύπνου. Τα μηνύματα μπορούν να αποθηκευτούν στην προσωρινή μνήμη και αργότερα να διαβαστούν από τους πελάτες όταν ξυπνήσουν. Οι πελάτες συνδέονται με τον broker μέσω μιας συσκευής πύλης, η οποία βρίσκεται εντός του δικτύου αισθητήρων και συνδέεται με τον broker [18].

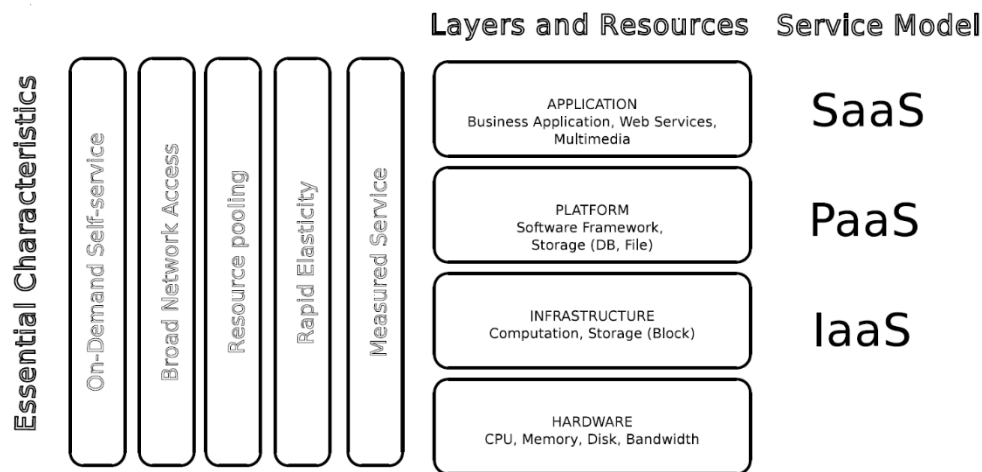
2.3.4 Cloud Computing

Οι βασικές πτυχές του υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing) έχουν αναφερθεί στον ορισμό που παρέχεται από το Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογιών (National Institute of Standards and Technology - NIST): «Το Cloud Computing είναι ένα μοντέλο που επιτρέπει την πανταχού παρούσα, βολική, κατ' απαίτηση πρόσβαση στο δίκτυο σε μια κοινή ομάδα διαμορφώσιμων υπολογιστικών πόρων (π.χ., δίκτυα, διακομιστές, αποθήκευση, εφαρμογές και υπηρεσίες) που μπορούν να παρέχονται και να απελευθερώνονται γρήγορα με ελάχιστη προσπάθεια διαχείρισης ή αλληλεπίδραση παρόχου υπηρεσιών» [28]. Το Cloud Computing επιτρέπει την παροχή ευέλικτων πόρων (Εικόνα 40) και έχει γίνει εξαιρετικά δημοφιλές για πολλές επιχειρήσεις ώστε να επωφελούνται από τη γρήγορη ανταπόκριση σε νέες απαιτήσεις από πελάτες. Παραδείγματα μεγάλων παρόχων υπηρεσιών cloud είναι η Amazon, η Microsoft, η Google και η Salesforce [30].



Εικόνα 40. Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του υπολογιστικού νέφους [31]

Η αρχιτεκτονική του Cloud μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα επίπεδα: κέντρο δεδομένων (υλικό), υποδομή, πλατφόρμα και εφαρμογή (Εικόνα 41). Κάθε ένα από αυτά μπορεί να θεωρηθεί ως υπηρεσία για το επόμενο επίπεδο και ως καταναλωτής για το προηγούμενο επίπεδο. Στην πράξη, οι υπηρεσίες Cloud μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: Λογισμικό ως υπηρεσία (Software as a Service - SaaS), πλατφόρμα ως υπηρεσία (Platform as a Service - PaaS) και υποδομή ως υπηρεσία (Infrastructure as a Service - IaaS). Το SaaS αναφέρεται στην παροχή εφαρμογών που εκτελούνται σε περιβάλλοντα Cloud. Οι εφαρμογές είναι συνήθως προσβάσιμες μέσω ενός λεπτού πελάτη ή ενός προγράμματος περιήγησης ιστού. Το PaaS αναφέρεται σε πόρους επιπέδου πλατφόρμας (π.χ. υποστήριξη λειτουργικού συστήματος, πλαίσια ανάπτυξης λογισμικού κ.λπ.). Το IaaS αναφέρεται στην παροχή πόρων επεξεργασίας, αποθήκευσης και δικτύου, επιτρέποντας στον καταναλωτή να ελέγχει το λειτουργικό σύστημα, την αποθήκευση και τις εφαρμογές [28].



Εικόνα 41. Αρχιτεκτονική του Cloud Computing [28]

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι Clouds, οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα ακόλουθα:

- (i) Private Cloud - προορίζεται για αποκλειστική χρήση από έναν μόνο οργανισμό, που συνήθως ανήκει, διαχειρίζεται και λειτουργεί από τον ίδιο τον οργανισμό.
- (ii) Community Cloud - παρέχεται για αποκλειστική χρήση από μια συγκεκριμένη κοινότητα καταναλωτών που έχουν κοινές ανησυχίες.
- (iii) Δημόσιο Cloud - που προορίζεται για ανοιχτή χρήση από το ευρύ κοινό.
- (iv) Hybrid Cloud - σύνθεση δύο ή περισσότερων ξεχωριστών υποδομών Cloud (ιδιωτική, κοινότητα ή δημόσια) .
- (v) Virtual Private Cloud - εναλλακτική λύση που στοχεύει στην αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με δημόσια και ιδιωτικά Cloud, αξιοποιώντας τις τεχνολογίες εικονικού ιδιωτικού δικτύου (VPN) για να επιτρέπεται στους ιδιοκτήτες επιχειρήσεων να ρυθμίζουν τις απαιτούμενες ρυθμίσεις δικτύου (π.χ. ασφάλεια, τοπολογία κ.λπ.) [28].

Cloud-based IoT

Το Internet of Things και το Cloud Computing είναι και οι δύο ταχέως αναπτυσσόμενες υπηρεσίες, κάθε μία με τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά. Από τη μία πλευρά, το IoT βασίζεται σε έξυπνες συσκευές που επικοινωνούν σε ένα παγκόσμιο δίκτυο και μια δυναμική υποδομή. Το IoT χαρακτηρίζεται συνήθως από ευρέως κατανοημένες συσκευές με περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας και αποθήκευση. Αυτές οι συσκευές αντιμετωπίζουν ζητήματα σχετικά με την απόδοση,

την αξιοπιστία, το απόρρητο και την ασφάλεια. Από την άλλη πλευρά, το Cloud Computing περιλαμβάνει ένα τεράστιο δίκτυο με απεριόριστες δυνατότητες αποθήκευσης και υπολογιστικής ισχύος. Επιπλέον, παρέχει ένα ευέλικτο, στιβαρό περιβάλλον που επιτρέπει δυναμική ενοποίηση δεδομένων από διάφορες πηγές. Παρόλο που το IoT και το Cloud Computing διαφέρουν μεταξύ τους, τα χαρακτηριστικά τους είναι σχεδόν συμπληρωματικά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3. Αυτή η συμπληρωματικότητα είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο πολλοί ερευνητές πρότειναν την ενσωμάτωσή τους, καθώς η τεχνολογία του Cloud Computing έχει επιλύσει εν μέρει τα περισσότερα από τα προβλήματα του IoT. Πράγματι, το IoT και το Cloud είναι δύο συγκριτικά απαιτητικές τεχνολογίες και συνδυάζονται προκειμένου να αλλάξουν το τρέχον και το μελλοντικό περιβάλλον των υπηρεσιών διαδικτυακής εργασίας [32]. Το Cloud Computing δίνει τη δυνατότητα σε ερευνητές και επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν και να διατηρούν πολλούς πόρους εξ αποστάσεως, αξιόπιστα και με χαμηλό κόστος. Το IoT χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό ενσωματωμένων συσκευών, όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές που δημιουργούν μεγάλα δεδομένα, τα οποία με τη σειρά τους απαιτούν πολύπλοκους υπολογισμούς για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών [29]. Η ενσωμάτωση αυτών των δύο τεχνολογιών, δηλαδή το Cloud-based Internet of Things, είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει την έξυπνη χρήση εφαρμογών, πληροφοριών και υποδομών με οικονομικά αποδοτικό τρόπο [32].

Πίνακας 3. Οι συμπληρωματικοί τομείς των τεχνολογιών IoT και Cloud [32]

	IoT	Cloud Computing
Χαρακτηριστικά	Είναι διαδεδωμένο. Αποτελείται από πραγματικά αντικείμενα.	Είναι πανταχού παρόν (οι πόροι είναι διαθέσιμοι από παντού). Είναι εικονικοί πόροι
Δυνατότητες Επεξεργασίας	Περιορισμένη υπολογιστική δυνατότητα	Σχεδόν απεριόριστες υπολογιστικές δυνατότητες
Δυνατότητες Αποθήκευσης	Περιορισμένη έως καθόλου δυνατότητες αποθήκευσης	Απεριόριστες αποθηκευτικές δυνατότητες
Συνδεσιμότητα	Χρησιμοποιεί το Διαδίκτυο ως σημείο σύγκλισης	Χρησιμοποιεί το Διαδίκτυο για παροχή υπηρεσιών
Μεγάλα Δεδομένα (Big Data)	Είναι η πηγή μεγάλων δεδομένων.	Είναι ένα μέσο διαχείρισης μεγάλων δεδομένων.

Λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων του IoT όσον αφορά την ισχύ επεξεργασίας, την αποθήκευση, την απόδοση, την ασφάλεια, το απόρρητο και την αξιοπιστία, η ενσωμάτωση του IoT στο Cloud είναι σίγουρα ο καλύτερος τρόπος για να ξεπεραστούν τα περισσότερα από αυτά τα ζητήματα. Το Cloud μπορεί ακόμη και να επωφεληθεί από το IoT επεκτείνοντας τα όριά του με τα αντικείμενα στον πραγματικό κόσμο με πιο δυναμικό και κατανεμημένο τρόπο και παρέχοντας νέες υπηρεσίες για δισεκατομμύρια συσκευές σε διαφορετικά σενάρια πραγματικής ζωής. Επιπλέον, το Cloud παρέχει απλότητα στη χρήση και μειώνει το κόστος χρήσης εφαρμογών και υπηρεσιών για τον τελικό χρήστη. Το Cloud απλοποιεί επίσης τη ροή της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων του IoT και παρέχει γρήγορη, χαμηλού κόστους εγκατάσταση και ενσωμάτωση για σύνθετη επεξεργασία και ανάπτυξη δεδομένων. Τα οφέλη της ενσωμάτωσης του IoT στο Cloud περιγράφονται παρακάτω.

Επικοινωνία

Το Cloud είναι μια αποτελεσματική και οικονομική λύση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση, τη διαχείριση και την παρακολούθηση των συσκευών του IoT χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες εφαρμογές και προσαρμοσμένες πύλες. Η διαθεσιμότητα γρήγορων συστημάτων διευκολύνει τη δυναμική παρακολούθηση και τον έλεγχο απομακρυσμένων αντικειμένων, καθώς και την πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ενώ ο αυτοματισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευκολύνει τη διανομή και τη συλλογή δεδομένων χαμηλού κόστους. Ωστόσο, παρόλο που το Cloud μπορεί να διευκολύνει σημαντικά τη διασύνδεση του IoT, εξακολουθεί να έχει περιορισμούς, κυρίως στη μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων από το Διαδίκτυο στο Cloud. [32]

Αποθήκευση

Καθώς το IoT μπορεί να χρησιμοποιείται σε δισεκατομμύρια συσκευές, περιλαμβάνει έναν τεράστιο αριθμό πηγών πληροφοριών, οι οποίες δημιουργούν τεράστιο αριθμό ημι-δομημένων ή μη δομημένων δεδομένων. Αυτό είναι γνωστό ως Μεγάλα Δεδομένα (Big Data) και έχει τρία χαρακτηριστικά: ποικιλία (π.χ. τύπους δεδομένων), ταχύτητα (π.χ. συχνότητα δημιουργίας δεδομένων) και όγκο (π.χ. μέγεθος δεδομένων). Το Cloud θεωρείται μια από τις πιο οικονομικά αποδοτικές και

κατάλληλες λύσεις όσον αφορά την αντιμετώπιση του τεράστιου όγκου δεδομένων που δημιουργούνται από το IoT. Επιπλέον, δημιουργεί νέες δυνατότητες για ενοποίηση δεδομένων, συγκέντρωση και κοινή χρήση με τρίτους. [32]

Δυνατότητα επεξεργασίας

Οι συσκευές IoT χαρακτηρίζονται από περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας που εμποδίζουν την επιτόπια και πολύπλοκη επεξεργασία δεδομένων. Αντ' αυτού, τα συγκεντρωμένα δεδομένα μεταφέρονται σε κόμβους που έχουν υψηλές δυνατότητες. Ωστόσο, η επίτευξη επεκτασιμότητας παραμένει μια πρόκληση λόγω της απουσίας των κατάλληλων υποδομών. Το Cloud προσφέρει μια λύση σε αυτό, παρέχοντας απεριόριστες δυνατότητες εικονικής επεξεργασίας και ένα μοντέλο χρήσης κατ' απαίτηση (on-demand). Οι προγνωστικοί αλγόριθμοι και η λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων μπορούν να ενσωματωθούν στο IoT προκειμένου να αυξηθούν τα έσοδα και να μειωθούν οι κίνδυνοι με χαμηλότερο κόστος. [32]

Οικονομικά πλεονεκτήματα

Το Cloud Computing είναι ελκυστικό, καθώς απαλλάσσει τις επιχειρήσεις από την ανάγκη να επενδύσουν στην υποδομή, ενοικιάζοντας αντ' αυτού πόρους ανάλογα με τις ανάγκες και πληρώνοντας μόνο για τη χρήση τους. Επιπλέον, επιτρέπει τη μείωση του λειτουργικού κόστους, καθώς οι πάροχοι υπηρεσιών δεν χρειάζεται να παρέχουν χωρητικότητα ανάλογα με το μέγιστο φορτίο (στην πραγματικότητα, οι πόροι απελευθερώνονται όταν η ζήτηση υπηρεσιών είναι χαμηλή). Τέλος, η εξωτερική ανάθεση της υποδομής υπηρεσιών στο Cloud μετατοπίζει τον επιχειρηματικό κίνδυνο προς τον πάροχο υποδομής, ο οποίος είναι καλύτερα εξοπλισμένος για τη διαχείριση του [28].

Τεχνικά πλεονεκτήματα

Εκτός από τέτοια οικονομικά πλεονεκτήματα, το Cloud Computing παρέχει και ορισμένα τεχνικά οφέλη, όπως η ενεργειακή απόδοση, η βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων υλικού και λογισμικού, η ελαστικότητα και ευελιξία [28].

Νέες δυνατότητες

Το IoT χαρακτηρίζεται από την ετερογένεια των συσκευών, των πρωτοκόλλων και των τεχνολογιών του. Ως εκ τούτου, η αξιοπιστία, η επεκτασιμότητα, η διαλειτουργικότητα, η ασφάλεια, η διαθεσιμότητα και η αποδοτικότητα μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν. Η ενσωμάτωση του IoT στο Cloud επιλύει τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα. Παρέχει άλλες δυνατότητες όπως ευκολία χρήσης και ευκολία πρόσβασης, με χαμηλό κόστος ανάπτυξης. [32]

Στον κομμάτι της δέσμευσης πόρων του Cloud για χρήση στο IoT, έχουν γίνει προσπάθειες προς την περιγραφή και την υλοποίηση γλωσσών και πλαισίων για την αποτελεσματική αναπαράσταση, τον σχολιασμό και την επεξεργασία δεδομένων που προκύπτουν από συσκευές IoT. Οι σχεδιαστές συστημάτων και οι διαχειριστές λειτουργιών αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις για την υλοποίηση συστημάτων Cloud IoT στην πράξη, λόγω της πολυπλοκότητας και της διαφορετικότητας των απαιτήσεών τους όσον αφορά την κατανάλωση πόρων IoT, την προσαρμογή και τη διακυβέρνηση χρόνου εκτέλεσης. Οι Πίνακας 4 και Πίνακας 5 παρουσιάζουν τη σύγκριση μεταξύ παρόχων υπηρεσιών PaaS που διαθέτουν χαρακτηριστικά και υπηρεσίες για το IoT [30].

Πίνακας 4. Γενικά χαρακτηριστικά παρόχων PaaS [30]

Provider	Open source	Hosting	Server languages	Client languages	Mobile SDK languages
Bluemix	no	closed	many	Java, JS	Android, iOS
Parse	yes	open	JS	Java, JS, C	Android, iOS
Google	no	closed	many	Java, Python	Android, iOS
Amazon	no	closed	many	C, JS	Android, iOS
Azure	no	closed	many	C, Java, JS	Android, iOS, WP
Heroku	no	closed	many		-
CloudFoundry	yes	closed	many	N/A	N/A
Kinvey	no	open	JS	JS	Android, iOS
DreamFactory	yes	open	JS	JS	Android, iOS

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά IoT παρόχων PaaS [30]

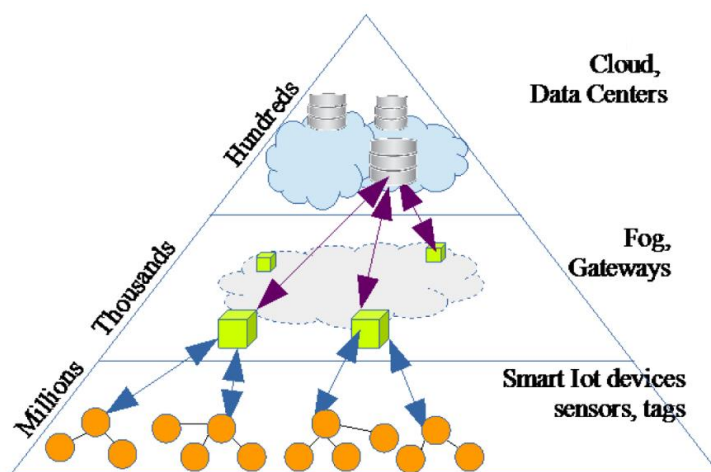
Provider	Protocols	Data store	BLOB	GEO coordinates	Push notifications	Trigger	Visualization
Bluemix	MQTT	yes	no	yes	yes	yes	yes
Parse	REST	yes	yes	yes	yes	yes	no
Google	REST	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Amazon	MQTT, REST	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Azure	MQTT, AMQP, REST	yes	yes	yes	yes	yes	N/A
Heroku	MQTT	yes	yes	N/A	no	no	N/A
CloudFoundry	REST	yes	yes	N/A	no	no	no
Kinvey	REST	yes	yes	N/A	yes	yes	N/A
DreamFactory	REST	yes	yes	N/A	yes	yes	N/A

Fog Computing

Το Fog Computing (υπολογιστική ομίχλης), γνωστό και ως Cloudlets ή Edge Computing, μπορεί να λειτουργήσει ως γέφυρα μεταξύ έξυπνων συσκευών και υπηρεσιών Cloud και αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Μέσω του Fog, είναι δυνατή η επέκταση των υπηρεσιών του Cloud Computing προς τις τερματικές συσκευές του δικτύου. Λόγω της εγγύτητάς του με τους τελικούς χρήστες σε σύγκριση με τα κέντρα δεδομένων του Cloud, το Fog Computing έχει τη δυνατότητα να προσφέρει υπηρεσίες με καλύτερη απόδοση στο κομμάτι της καθυστέρησης. Οι φορείς δικτύων κινητής τηλεφωνίας αποτελούν πιθανούς παρόχους Fog Computing, δεδομένου ότι μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες ως ένα από τα μοντέλα IaaS, PaaS ή SaaS στις επιχειρήσεις, παρέχοντας υπηρεσίες μέσω του δικτύου τους ή ακόμα και των πύργων τηλεφωνίας [29].

Το Fog υποστηρίζει την ιδέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), στην οποία οι περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο σε καθημερινή βάση συνδέονται μεταξύ τους. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τηλέφωνα, φορητές συσκευές παρακολούθησης της υγείας και συνδεδεμένα οχήματα. Οι συσκευές IoT είναι συχνά περιορισμένες σε πόρους και έχουν περιορισμένες υπολογιστικές ικανότητες. Ένας κόμβος ομίχλης μπορεί να παρέχει ασφάλεια και ισχύ για συσκευές

IoT εκτελώντας αυτούς τους υπολογισμούς. Στην Εικόνα 42 φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός Cloud και Fog based IoT συστήματος.



Εικόνα 42. Ο ρόλος των πόρων του Cloud και Fog στην παροχή IoT υπηρεσιών [29]

Το Fog μπορεί ουσιαστικά να θεωρηθεί ως επέκταση του Cloud που λειτουργεί ως ενδιάμεσο μεταξύ της άκρης του δικτύου και του Cloud. Πράγματι, λειτουργεί με εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση που απαιτούν άλλους κόμβους για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις καθυστέρησης. Παρόλο που ο αποθηκευτικός χώρος, η υπολογιστική ισχύς και η δικτύωση είναι οι κύριοι πόροι τόσο του Fog όσο και του Cloud, το Fog έχει ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως η επίγνωση της τοποθεσίας και η τοποθεσία στα άκρα του δικτύου, που παρέχουν γεωγραφική κατανομή και χαμηλή καθυστέρηση. Επιπλέον, υπάρχουν μεγάλοι κόμβοι, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με το Cloud, το οποίο υποστηρίζει την αλληλεπίδραση και την κινητικότητα σε πραγματικό χρόνο [32].

Ένα από τα πλεονεκτήματα του Fog είναι πως αντί να προωθούνται όλα τα δεδομένα που παράγονται από αισθητήρες και συσκευές σε διακομιστές που βασίζονται στο Cloud για επεξεργασία, η επεξεργασία μπορεί να γίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μονάδες που βρίσκονται μαζί με τις συσκευές παραγωγής δεδομένων, έτσι ώστε να προωθούνται τα επεξεργασμένα και όχι τα ακατέργαστα δεδομένα, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις εύρους ζώνης. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι ότι τα επεξεργασμένα δεδομένα είναι πολύ πιθανό να τα χρειαστούν οι ίδιες συσκευές που παρήγαγαν τα δεδομένα, οπότε έτσι, με τοπική και όχι απομακρυσμένη επεξεργασία, ελαχιστοποιείται η καθυστέρηση μεταξύ εισόδου

και απόκρισης. Το Fog μπορεί επίσης μπορεί να χρησιμοποιεί τεχνολογία εικονικοποίησης (virtualization) για να διευκολύνει την ανάπτυξη και εκτέλεση ενός φάσματος εφαρμογών σε edge διακομιστές. Ωστόσο η τεχνολογία του Fog Computing παρουσιάζει και προκλήσεις, κυρίως σε ότι αφορά την ασφάλεια, την ιδιωτικότητα, την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία.

2.4 Εφαρμογές αισθητήρων και IoT στην γεωργία

Ο αγροτικός τομέας επηρεάστηκε πολύ από τις τεχνολογίες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN) και αναμένεται να επωφεληθεί εξίσου από το IoT [33]. Με την πάροδο των χρόνων, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί για έξυπνη γεωργία και παραγωγή τροφίμων με έμφαση στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, την γεωργία ακρίβειας, αυτοματοποίηση μηχανών και ελέγχου διαδικασιών. Η ικανότητα των WSN στην αυτοοργάνωση, την αυτοδιαμόρφωση, την αυτοδιάγνωση και την αυτοθεραπεία τα καθιστούν καλή επιλογή για την έξυπνη γεωργία και την βιομηχανία τροφίμων. Τα WSN είναι συστήματα που περιλαμβάνουν πομποδέκτες ραδιοσυχνότητας (RF), αισθητήρες, μικροελεγκτές και πηγές ενέργειας. Ωστόσο, με την εμφάνιση του IoT υπάρχει μια μετάβαση από τη χρήση των WSN για έξυπνη γεωργία στο IoT. Το IoT ενσωματώνει πολλές τεχνολογίες που υπάρχουν ήδη, όπως αυτή των WSN, την αναγνώριση RF, το Cloud Computing, τα συστήματα middleware και τις end-user εφαρμογές [21].

2.4.1 Πεδία εφαρμογής

Παρακολούθηση και έλεγχος

Στη γεωργία μπορούν να παρακολουθηθούν αρκετοί παράγοντες, οι οποίοι εξαρτώνται από τον υπό εξέταση τομέα της γεωργίας.

Καλλιέργειες

Οι παράγοντες που μπορούν να παρακολουθούνται περιλαμβάνουν την ποσότητα της βροχόπτωσης, την υγρασία των φύλλων, τη θερμοκρασία, την υγρασία, την υγρασία του εδάφους, την αλατότητα, το κλίμα, τον ξηρό κύκλο, την ηλιακή ακτινοβολία, την

κίνηση των παρασίτων, τις ανθρώπινες δραστηριότητες κ.λπ. Η απόκτηση τέτοιων λεπτομερών δεδομένων επιτρέπει τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων για τη βελτίωση της ποιότητας των αγροτικών προϊόντων, την ελαχιστοποίηση του κινδύνου και τη μεγιστοποίηση των κερδών. Για παράδειγμα, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας δίνουν πληροφορίες σχετικά με την έκθεση των φυτών στο ηλιακό φως από όπου ο αγρότης μπορεί να αναγνωρίσει εάν τα φυτά είναι σωστά εκτεθειμένα ή υπερβολικά. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους παρέχει πληροφορίες σχετικά με την υγρασία του εδάφους που μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο των συνθηκών του εδάφους και στη μείωση του κινδύνου ασθενειών των φυτών. Επιπλέον, τα έγκαιρα και ακριβή δεδομένα πρόγνωσης καιρού, όπως οι βροχοπτώσεις, μπορούν να βελτιώσουν το επίπεδο παραγωγικότητας. Επιπλέον, τέτοια δεδομένα μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες στο στάδιο του σχεδιασμού και να μειώσουν το κόστος εργασίας. Οι αγρότες μπορούν επίσης να λάβουν διορθωτικά και προληπτικά μέτρα εκ των προτέρων με βάση τα δεδομένα που παρέχονται. Τα δεδομένα κίνησης παρασίτων μπορούν να συλλεχθούν και να τροφοδοτηθούν εξ αποστάσεως ζωντανά στους αγρότες για έλεγχο παρασίτων ή να χρησιμοποιηθούν για την παροχή συμβουλών στους αγρότες με βάση την καταγραφή των επιθέσεων παρασίτων [21].

Δασοκομία

Τα δάση διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον κύκλο του άνθρακα και φιλοξενούν επίσης πάνω από τα δύο τρίτα των παγκοσμίως γνωστών ειδών. Οι παράγοντες που πρέπει να παρακολουθούνται σε ένα δάσος περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους και του αέρα και τα διαφορετικά επίπεδα αερίων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, τολουόλιο, οξυγόνο, υδρογόνο, μεθάνιο, ισοβουτάνιο, αμμωνία, αιθανόλη, υδρόθειο και διοξείδιο του αζώτου. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να παρέχουν συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και προειδοποίησης για πυρκαγιά στο δάσος και επίσης να βοηθήσουν στην παρακολούθηση για την αντιμετώπιση ασθενειών [21].

Κτηνοτροφία

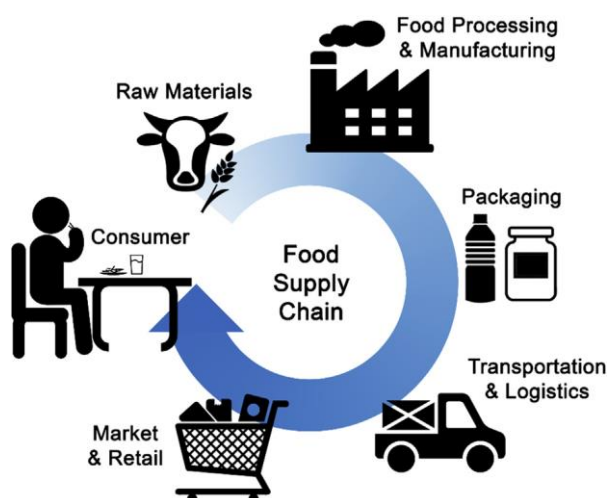
Οι παράγοντες που πρέπει να παρακολουθούνται στην κτηνοτροφία εξαρτώνται από της τύπους των ζώων που εξετάζονται. Για παράδειγμα, η αγωγιμότητα του γάλακτος από βουβάλια και αγελάδες μπορεί να δώσει πληροφορίες για την κατάσταση της

υγείας των ζώων. Άλλοι παράγοντες είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η απόδοση, η επίθεση παρασίτων και η ποιότητα του νερού [21]. Ορισμένες εφαρμογές του IoT περιλαμβάνουν την παρακολούθηση για βελτιστοποίηση πρακτικών σίτισης και ανάλυση του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα σε κυψέλες μελισσών [33]. Η υλοποίηση λύσεων IoT επιτρέπει στους αγρότες να παρακολουθούν και να αναζητούν τη θέση του ζωικού τους κεφαλαίου επισημαίνοντας μεμονωμένα ζώα με συσκευή RFID, αποτρέποντας έτσι την κλοπή ζώων [21], ενώ επιτρέπει και την ανάλυση της συμπεριφοράς των ζώων [33]. Άλλοι τομείς όπως η παρακολούθηση αποθήκευσης που περιλαμβάνει το νερό, τα καύσιμα και της ζωοτροφές μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες στον προγραμματισμό τους και στην μείωση του κόστους [21].

Εντοπισμός και ιχνηλάτηση

Το IoT μπορεί να εφαρμοστεί στην παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων για τη βελτίωση της αλυσίδας εφοδιασμού (Εικόνα 43) και των logistics των εταιρειών. Το IoT μπορεί να παρέχει δεδομένα για να επιτρέψει στις γεωργικές εταιρείες να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις, να προγραμματίζουν, να συνδέονται έξυπνα με επιχειρηματικούς εταίρους και να εξοικονομούν χρόνο και χρήμα. Πληροφορίες, όπως η τοποθεσία και η αναγνώριση περιουσιακών στοιχείων μπορούν να παρακολουθούνται χρησιμοποιώντας RFID και GPS [21]. Επίσης ο εντοπισμός και η ιχνηλάτηση της αλυσίδας γεωργικών προϊόντων επιτρέπει στον καταναλωτή και σε άλλους ενδιαφερόμενους φορείς να γνωρίζουν το πλήρες ιστορικό του προϊόντος, βελτιώνοντας έτσι την εμπιστοσύνη του καταναλωτή σε θέματα ασφάλειας και υγείας του προϊόντος. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να παρακολουθούνται, όπως το περιβάλλον ανάπτυξης, οι συνθήκες παραγωγής, παράγοντες παρασίτων, παράγοντες διαχείρισης, συνθήκες αποθήκευσης, μεταφορά και χρόνος στην αγορά. Οι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το αναπτυσσόμενο περιβάλλον είναι το έδαφος, ο αέρας και το νερό. Οι συνθήκες παραγωγής επηρεάζονται από την εφαρμογή ζιζανιοκτόνων, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων. Επιπλέον, ο τύπος των ζωοτροφών και των εμβολίων που χορηγούνται στα ζώα μπορεί να ιχνηλατηθεί, καθώς θα μπορούσαν να προκαλέσουν άμεσα ζητήματα ασφάλειας της υγείας. Τα γεωργικά προϊόντα μπορούν γενικά να επηρεαστούν από παράσιτα σε όλη τη διαδικασία, γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει την ποσότητα και την ποιότητα

του προϊόντος, επομένως η ιχνηλάτηση των προϊόντων μπορεί να βοηθήσει της αγρότες να βελτιώσουν την αλυσίδα παραγωγής και εφοδιασμού [21].



Εικόνα 43. Η ροή της ανεφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων [33]

Τα συστήματα εντοπισμού και ιχνηλάτησης θα πρέπει βασικά να περιλαμβάνουν: εισαγωγή, αποθήκευση, μεταφορά, διεργασία και έξοδο πληροφοριών. Οι πληροφορίες εισόδου περιλαμβάνουν τα δεδομένα ολόκληρου του κύκλου ζωής του προϊόντος, την γεωγραφική προέλευση, την τρέχουσα θέση, τον προορισμό και τα ενδιαφερόμενα μέρη που εμπλέκονται σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Τα συστήματα θα πρέπει να περιλαμβάνουν μνήμη για την αποθήκευση των πληροφοριών για μια χρονική περίοδο για σκοπούς έρευνας και ανάπτυξης. Η μεταφορά πληροφοριών αναφέρεται στη διαδικασία ενοποίησης και τυποποίησης ολόκληρης της πληροφορίας. Το σύστημα εντοπισμού και ιχνηλάτησης θα πρέπει να μπορεί να επεξεργάζεται τα δεδομένα που συλλέγονται και τελικά να τα εξάγει σε όλους της εμπλεκόμενους κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η χρήση του RFID στην παρακολούθηση από το στάδιο της παραγωγής, της επεξεργασίας, της μεταφοράς, της αποθήκευσης, της διανομής, των πωλήσεων και των υπηρεσιών μετά την πώληση παρέχει τη δυνατότητα συλλογής, αποθήκευσης και ανάλυσης δεδομένων σε μεγάλη απόσταση με γρήγορη ταχύτητα [21].

Γεωργικά Μηχανήματα

Τα γεωργικά μηχανήματα που βασίζονται στο IoT μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και στη μείωση των απωλειών σιτηρών. Με σωστή χαρτογράφηση, τη χρήση GPS και δορυφορικών συστημάτων

πλοήγησης (GNSS) τα μηχανήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε λειτουργία αυτόματου πιλότου. Τα μηχανήματα που περιλαμβάνουν οχήματα, μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) και ρομπότ μπορούν να ελέγχονται εξ αποστάσεως με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες που συλλέγονται μέσω του συστήματος IoT για ακριβή και αποτελεσματική εφαρμογή των πόρων στις απαιτούμενες εκτάσεις αγροκτημάτων. Τα μηχανήματα μπορούν επίσης να συλλέξουν δεδομένα ώστε μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες να χαρτογραφήσουν το χωράφι τους για προγραμματισμό ενεργειών, όπως λίπανση, άρδευση, διατροφή. Για παράδειγμα, η CLAAS, ένας κατασκευαστής γεωργικών μηχανημάτων έχει εφαρμόσει το IoT στον εξοπλισμό τους, επιτρέποντας στα μηχανήματα να λειτουργούν σε λειτουργία αυτόματου πιλότου. Μια άλλη λύση είναι οι αισθητήρες UAV του Precisionhawk, οι οποίοι μπορούν να παρέχουν στους αγρότες πληροφορίες, όπως ταχύτητα ανέμου, ασφάλεια αέρα, μεταξύ άλλων παραμέτρων. Η λύση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εικόνες και χαρτογράφηση αγροτεμαχίων [21].

Γεωργία Ακριβείας και Θερμοκήπια

Η γεωργία ακριβείας μπορεί να οριστεί ως η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από μεταβλητές ενός αγροκτήματος ή μιας καλλιέργειας και η χρήση προγνωστικών αναλυτικών στοιχείων για έξυπνες αποφάσεις προκειμένου να μεγιστοποιηθούν οι αποδόσεις, να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να μειωθεί το κόστος. Η γεωργία ακριβείας βασίζεται σε διάφορες τεχνολογίες, οι οποίες περιλαμβάνουν κόμβους αισθητήρων, GPS και Big Data Analytics για την επίτευξη βελτιωμένης απόδοσης των καλλιεργειών. Οι έξυπνες αποφάσεις που επιτυγχάνονται από το Data Analytics οδηγούν επίσης σε λιγότερη σπατάλη πόρων, όπως νερό σε συστήματα άρδευσης, λιπάσματα, φυτοφάρμακα κ.λπ. Η γεωργία ακριβείας παρουσιάζει νέες προκλήσεις για τους ερευνητές στον τομέα της ρομποτικής, της επεξεργασίας εικόνας, της ανίχνευσης μετεωρολογικών δεδομένων κ.λπ. Με το GPS και το GNSS, οι αγρότες είναι σε θέση να εντοπίζουν ακριβείς τοποθεσίες και να χαρτογραφούν τοποθεσίες με πολλές μεταβλητές δεδομένων, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από την τεχνολογία μεταβλητού ρυθμού για τη βέλτιστη κατανομή των αγροτικών πόρων, όπως σπορά, ψεκασμός και άλλες υπηρεσίες. Παρόλο που η τεχνολογία γεωργίας ακριβείας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση, είναι σημαντικό να παρέχονται λύσεις που να είναι εύχρηστες από τους

αγρότες και να παρέχεται επίσης εκπαίδευση για να επιτρέψει στους αγρότες μικρής και μεσαίας κλίμακας να επωφεληθούν από τα συστήματα [21]. Λύσεις IoT μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε θερμοκήπια όπου τα φυτά καλλιεργούνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Το θερμοκήπιο προσφέρει το πλεονέκτημα της καλλιέργειας οποιουδήποτε φυτού σε οποιοδήποτε μέρος και ανά πάσα στιγμή παρέχοντας κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες σχετικά με την εφαρμογή WSN σε θερμοκήπια για την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Πρόσφατες εργασίες έδειξαν πώς το IoT μπορεί να εφαρμοστεί στο θερμοκήπιο για τη μείωση του ανθρώπινου δυναμικού, την εξοικονόμηση ενέργειας, την αύξηση της αποτελεσματικότητας στην παρακολούθηση του χώρου του θερμοκηπίου και την άμεση σύνδεση των γεωργών θερμοκηπίου με τους πελάτες [21].

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η εφαρμογή του IoT στο πεδίο παρακολούθησης και ελέγχου σε καλλιέργειες και συγκεκριμένα η συλλογή δεδομένων της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους σε καλλιέργειες. Στην επόμενη ενότητα ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση της επίδρασης που έχουν η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους στη γεωργία.

2.4.2 Θερμοκρασία του εδάφους

Το έδαφος αποτελεί σημαντικό μέσο αποθήκευσης θερμότητας, ενεργώντας ως δεξαμενή ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και πηγή θερμότητας προς την επιφάνεια τη νύχτα. Επηρεάζεται καθημερινά κυρίως από διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας [34]. Η θερμοκρασία του εδάφους είναι η συνάρτηση της ροής θερμότητας στο έδαφος και της ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ του εδάφους και της ατμόσφαιρας. Ορίζεται επίσης ως η συνάρτηση της εσωτερικής ενέργειας του εδάφους. Η μεταφορά της θερμότητας στο έδαφος και η λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας στην επιφάνεια είναι οι πρωταρχικές αιτίες διακυμάνσεων στη θερμοκρασία του εδάφους. Κύρια πηγή της θερμοκρασίας του εδάφους είναι η ηλιακή ακτινοβολία [34].

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του εδάφους που εμπλέκονται στην ανάπτυξη των φυτών.

Ρυθμίζει τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες του εδάφους. Επηρεάζει επίσης τις ενδοσφαιρικές διαδικασίες ανταλλαγής αερίου μεταξύ της ατμόσφαιρας και του εδάφους. Η ποσότητα της ακτινοβολίας που λαμβάνεται από το έδαφος επηρεάζει τη θερμοκρασία του εδάφους, βιολογικές διεργασίες όπως σπόροι, βλάστηση, εμφάνιση φυτωρίων, ανάπτυξη ριζών φυτών και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών. Η θερμοκρασία του εδάφους αλλάζει το ρυθμό αποσύνθεσης της οργανικής ύλης και της ορυκτοποίησης διαφορετικών οργανικών υλικών στο έδαφος. Επηρεάζει επίσης την κατακράτηση νερού του εδάφους, τη μετάδοσή του και τη διαθεσιμότητά του στα φυτά [34].

Επιδράσεις της θερμοκρασίας σε βιολογικές ιδιότητες του εδάφους

Βιοδραστηριότητα

Η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τη δραστηριότητα των βιοτόπων του εδάφους καθορίζοντας τον ρυθμό της φυσιολογικής δραστηριότητας, όπως η ενζυματική δραστηριότητα, και έμμεσα επηρεάζοντας τις φυσικοχημικές ιδιότητες, όπως η διάχυση και η διαλυτότητα των θρεπτικών συστατικών, ο ρυθμός εξάτμισης μεταλλικών στοιχείων και ούτω καθεξής [35]. Το εύρος θερμοκρασίας του εδάφους μεταξύ 10 °C και 28 °C επηρεάζει την αναπνοή του εδάφους αυξάνοντας τη δραστηριότητα των εξωκυτταρικών ενζύμων που αποικοδομούν την πολυμερή οργανική ύλη στο έδαφος, αυξάνουν την πρόσληψη μικροβίων των διαλυτών υποστρωμάτων καθώς και μικροβιακών ρυθμών αναπνοής. Αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους αυξάνει τα ποσοστά ορυκτοποίησης του αζώτου στο έδαφος μέσω της αύξησης της μικροβιακής δραστηριότητας και αύξησης της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης. Η θερμοκρασία του εδάφους υπό του σημείου ψύξης μειώνει την ορυκτοποίηση αναστέλλοντας μικροβιακή δραστηριότητα και μειώνοντας την διάχυση των διαλυτών υποστρωμάτων στο έδαφος [34].

Μικροοργανισμοί και Μακροοργανισμοί

Οι περισσότεροι μικροοργανισμοί του εδάφους απαιτούν θερμοκρασίες μεταξύ 10 °C και 35.6 °C για τις δραστηριότητές τους. Οι μικροβιακές δραστηριότητες του εδάφους μειώνονται στις χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ στο σημείο πήξης (0 °C οι περισσότερες δραστηριότητες σταματούν [34]. Σε εύρος θερμοκρασίας από 10 °C έως 24 °C, οι

μακροοργανισμοί του εδάφους έχουν αυξημένο ρυθμό μεταβολισμού, με αποτέλεσμα να πρέπει να τροφοδοτούνται περισσότερο ή να καίνε τα αποθέματα λίπους. Στην ακραία υψηλή θερμοκρασία των 58 °C, οι μακροοργανισμοί αυτοί πεθαίνουν εξαιτίας των δυσμενών θερμοκρασιών. Οι μακροοργανισμοί εδάφους δεν επιβιώνουν σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο πήξης [34].

Αποσύνθεση οργανικής ύλης

Σε θερμοκρασία υπό των 0 °C, η συσσώρευση ύλης στο έδαφος αυξάνεται λόγω του αργού ρυθμού αποσύνθεσης. Η οργανική ύλη αποσυντίθεται αργά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ως αποτέλεσμα της μείωσης των μικροβιακών δραστηριοτήτων και των βιοχημικών διεργασιών. Θερμοκρασία εδάφους μεταξύ 21 °C και 38 °C αυξάνει την αποσύνθεση της οργανικής ύλης αυξάνοντας την κίνηση των διαλυτών υποστρωμάτων στο έδαφος και διεγείροντας τις μικροβιακές δραστηριότητες [34].

Επιδράσεις της θερμοκρασίας σε χημικές ιδιότητες του εδάφους

Ανταλλαγή κατιόντων

Η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους μειώνει την οργανική ύλη μέσω της καύσης. Αυτή η μείωση σε οργανική ύλη και η μείωση του κλάσματος αργίλου, ως αποτέλεσμα της υψηλής θερμοκρασίας, οδηγεί σε μείωση της χωρητικότητας ανταλλαγής κατιόντων στο έδαφος [34].

Διαθεσιμότητα Φωσφόρου

Σε έρευνα του 2012 παρατηρήθηκε ότι ο υδατοδιαλυτός φωσφόρος αυξήθηκε με τη θερμοκρασία του εδάφους μεταξύ 5 °C και 25 °C λόγω της αύξησης της κίνησης του φωσφόρου στο έδαφος που ελέγχεται με την διάχυση. Εδάφη με χαμηλή θερμοκρασία έχουν χαμηλή διαθεσιμότητα φωσφόρου επειδή η απελευθέρωση φωσφόρου από οργανικά υλικά εμποδίζεται από την χαμηλή θερμοκρασία [34].

pH εδάφους

Σε θερμοκρασίες εδάφους που κυμαίνονται από 25 °C έως 39 °C, το pH του εδάφους αυξάνεται ως αποτέλεσμα της μετουσίωσης οργανικού οξέος, που αυξάνεται σε υψηλή θερμοκρασία [34].

Επιδράσεις της θερμοκρασίας σε φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Δομή του εδάφους

Η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους προκαλεί αφυδάτωση αργιλικών ορυκτών 2:1 στο έδαφος που οδηγεί σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων αργίλου που με τη σειρά τους αποδίδουν λιγότερα σωματίδια αργίλου και περισσότερη λάσπη στο έδαφος. Υψηλή θερμοκρασία εδάφους επίσης οδηγεί σε ρωγμές που προκαλούνται από τη θερμότητα στα σωματίδια μεγέθους άμμου που τελικά οδηγούν σε βλάβη και κατά συνέπεια σε μειωμένη ποσότητα σωματιδίων μεγέθους άμμου στο έδαφος [34].

Σταθερότητα αδρανούς εδάφους

Σε θερμοκρασία εδάφους πάνω από 30 °C, η σταθερότητα αδρανούς εδάφους αυξάνεται. Αυτό είναι αποτέλεσμα του θερμικού μετασχηματισμού οξειδίων σιδήρου και αργιλίου, προκαλώντας τους να ενεργούν ως τσιμεντοειδείς παράγοντες για σωματίδια αργιλίου, που στη συνέχεια σχηματίζουν ισχυρά σωματίδια μεγέθους ιλύος στο έδαφος [34].

Περιεκτικότητα υγρασίας

Μειώσεις στην υγρασία του εδάφους συμβαίνουν όταν οι υψηλές θερμοκρασίες στο έδαφος μειώνουν το ιξώδες του νερού, επιτρέποντας έτσι περισσότερο νερό να διεισδύσει στο προφίλ του εδάφους. Επιπλέον, η μειωμένη σκιά σε συνδυασμό με τις αυξημένες θερμοκρασίες οδηγούν επίσης σε υψηλότερους ρυθμούς εξάτμισης που με τη σειρά τους περιορίζουν την κίνηση του νερού στο προφίλ του εδάφους [34].

Επιδράσεις της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη των φυτών

Πρόσληψη νερού

Η πρόσληψη νερού μειώνεται με την χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό είναι λόγω του αυξημένου ιξώδους και του μειωμένου ρυθμού απορρόφησης νερού σε χαμηλή θερμοκρασία. Η μειωμένη πρόσληψη νερού μειώνει το ρυθμό της φωτοσύνθεσης [34].

Πρόσληψη θρεπτικών ουσιών

Οι μεταβολικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών στο έδαφος και διασφαλίζουν ότι τα θρεπτικά συστατικά είναι σε μορφή διαθέσιμη στα φυτά. Ως εκ τούτου, αυξημένες μεταβολικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών ως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους τονώνουν τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών για τα φυτά [34]. Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει επίσης την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών αλλάζοντας το ιξώδες του εδάφους και τη μεταφορά θρεπτικών συστατικών. Έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλή θερμοκρασία εδάφους, η πρόσληψη θρεπτικών ουσιών από τα φυτά μειώνεται ως αποτέλεσμα του υψηλού ιξώδους του εδάφους και της χαμηλής μεταφοράς θρεπτικών συστατικών των ριζών [34].

Ανάπτυξη των ριζών

Η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους βελτιώνει την ανάπτυξη των ριζών λόγω της αύξησης της μεταβολικής δραστηριότητας των κυττάρων των ριζών και την ανάπτυξη πλευρικών ριζών. Η χαμηλή θερμοκρασία του εδάφους οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης των θρεπτικών ουσιών των ιστών και ως εκ τούτου μειώνει την ανάπτυξη των ριζών [34].

Αναπνοή των ριζών

Σε μια μελέτη του 2005 βρέθηκε πως σε θερμοκρασίες μεταξύ 20 °C και 30 °C, η αναπνοή μειώθηκε λογαριθμικά με την εξάντληση της υγρασίας του εδάφους χωρίς ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών. Στους 10 °C, ωστόσο, η αναπνοή ήταν πιο κοντά σε ένα βασικό επίπεδο, εμφανίζοντας μόνο μικρή μείωση με την μείωση της υγρασίας του εδάφους [36]. Μια ποσοτική περιγραφή της αναπνοής ριζών σε αλλαγές στη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους είναι σημαντική για την μοντελοποίηση της ανάπτυξης των φυτών και την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής που σχετίζεται με την αύξηση του ατμοσφαιρικού CO₂ [36].

2.4.3 Υγρασία του εδάφους

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία είναι η ποσότητα του νερού που περιέχει. Η περιεκτικότητα σε νερό εκφράζεται ως αναλογία, η οποία μπορεί να

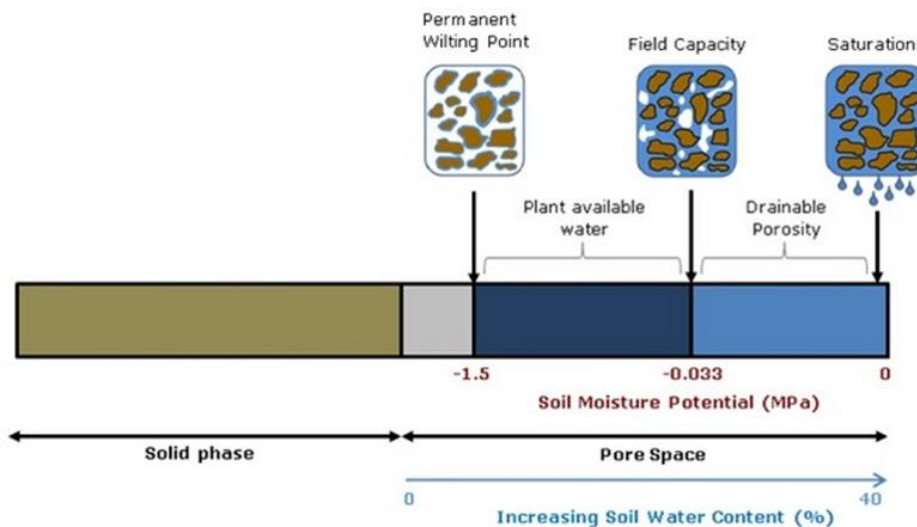
κυμαίνεται από 0 (εντελώς στεγνό) έως την τιμή του πορώδους των υλικών κατά τον κορεσμό [37]. Η τιμή αυτή ονομάζεται σχετική υγρασία και συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Η υγρασία μπορεί να υπάρχει ως προσροφημένη υγρασία σε εσωτερικές επιφάνειες και ως τριχοειδές συμπυκνωμένο νερό σε μικρούς πόρους. Σε χαμηλή σχετική υγρασία, η υγρασία αποτελείται κυρίως από προσροφημένο νερό. Σε υψηλότερη σχετική υγρασία, το υγρό νερό γίνεται όλο και πιο σημαντικό, ανάλογα με το μέγεθος των πόρων [37]. Το νερό που διεισδύει μέσω του εδάφους φιλτράρεται, αποθηκεύεται για χρήση των φυτών και αναδιανέμεται κατά μήκος των διαδρομών ροής σε υπόγεια και επιφανειακά ύδατα [38].

Το αποθηκευμένο νερό στο έδαφος είναι μια δυναμική ιδιότητα που αλλάζει χωρικά επηρεαζόμενο από το κλίμα, την τοπογραφία και τις ιδιότητες του εδάφους και χρονικά ως αποτέλεσμα των διαφορών μεταξύ της χρήσης και της ανακατανομής μέσω της ροής κάτω από την επιφάνεια [38]. Οι αλλαγές στα αποθέματα υγρασίας του εδάφους μπορούν να εκφραστούν ως το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της ποσότητας του νερού που προστίθεται και εκείνης που χάνεται. Η περιεκτικότητα σε νερό αυξάνεται όταν οι εισροές, συμπεριλαμβανομένης της βροχόπτωσης ή της άρδευσης, υπερβαίνουν τις εκροές. Η περιεκτικότητα σε νερό μειώνεται όταν εκροές όπως βαθιά διήθηση, επιφανειακή απορροή, πλευρική ροή και εξατμισοδιαπνοή υπερβαίνουν τις εισροές [38].

Η ικανότητα αποθήκευσης και κατανομής των αποθεμάτων νερού ποικίλει ανάλογα με τις ιδιότητες του εδάφους, όπως είναι η σύσταση, η υφή και η δομή. Σε γενικές γραμμές, τα εδάφη πλούσια σε άργιλο έχουν τον μεγαλύτερο χώρο πόρων, και επομένως τη μεγαλύτερη συνολική ικανότητα συγκράτησης νερού. Ωστόσο, η συνολική ικανότητα συγκράτησης νερού δεν περιγράφει πόση ποσότητα νερού διατίθεται στα φυτά ή πόσο ελεύθερα αποστραγγίζεται το νερό στο έδαφος [38].

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό περιγράφεται με τρεις καταστάσεις υγρασίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 44, οι οποίες σχετίζονται με την ενέργεια που απαιτείται για τη μετακίνηση ή εξαγωγή νερού: κορεσμός, υδατοϊκανότητα και σημείο μόνιμου μαρασμού.



Εικόνα 44. Περιεκτικότητα σε νερό και δυναμικό νερού κατά τον κορεσμό, υδατοϊκανότητας και σημείο μόνιμου μαρασμού [38]

Όταν το έδαφος βρίσκεται σε κορεσμό ή κοντά σε κορεσμό, εμφανίζει συνήθως δυναμικό νερού κοντά στα 0 MPa (Mega Pascal). Η υδατοϊκανότητα είναι η κατάσταση που περιγράφει την περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους που συγκρατείται έναντι της δύναμης της βαρύτητας από τις δυνάμεις συνοχής (σε μικροπόρους και μεσοπόρους) σε τάση $-0,033$ MPa. Καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε νερό, το δυναμικό του εδάφους του εδάφους μειώνεται, και ως αποτέλεσμα, το νερό συγκρατείται πιο έντονα στις ορυκτές επιφάνειες λόγω συνεκτικών δυνάμεων μεταξύ μορίων νερού και συγκολλητικών δυνάμεων που σχετίζονται με νερό και μεταλλικά σωματίδια. Το σημείο στο οποίο οι δυνάμεις συνοχής συγκρατούν το νερό πολύ σφιχτά για εξαγωγή από τα φυτά ($-1,5$ MPa) ονομάζεται σημείο μόνιμου μαρασμού. Η ποσότητα νερού που διατηρείται μεταξύ υδατοϊκανότητας και σημείου μόνιμου μαρασμού θεωρείται διαθέσιμη, καθώς το νερό που συγκρατείται μεταξύ αυτών των δύο καταστάσεων έναντι της δύναμης της βαρύτητας, αλλά όχι τόσο σφιχτά που δεν μπορεί να εξαχθεί από φυτά. Το νερό που διατηρείται σε δυναμικό κάτω από το σημείο μόνιμου μαρασμού ($<-1,5$ MPa) δεν είναι διαθέσιμο για χρήση από τα περισσότερα φυτά, επειδή προσκολλάται έντονα στα μεταλλικά σωματίδια [38].

Επιδράσεις της υγρασίας σε φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους

Διάχυση θερμότητας

Η υγρασία επηρεάζει τη διάχυση της θερμότητας στο έδαφος. Η ροή θερμότητας είναι υψηλότερη σε υγρό έδαφος από ότι σε ξηρό έδαφος όπου οι πόροι γεμίζουν με αέρα. Ο ρυθμός διάχυσης της θερμότητας αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε υγρασία [34]. Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει επίσης τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους, επηρεάζοντας έμμεσα την φυσιολογία των ριζών. Τα ξηρά εδάφη συνήθως εμφανίζουν πολύ πιο ευρείς διακυμάνσεις σε καθημερινή θερμοκρασία από ό,τι τα υγρά εδάφη [34].

Απορρόφηση και μεταφορά μεταλλικών στοιχείων

Τα μέταλλα πρέπει να διαλυθούν σε νερό για να απορροφηθούν από τα φυτά. Ωστόσο, η ποσότητα του νερού που απορροφάται από τα φυτά είναι δυσανάλογη με την ποσότητα του απορροφώμενου μεταλλικού άλατος. Οι δύο τύποι απορρόφησης είναι πολύ διαφορετικοί λόγω των περιβαλλοντικών αλλαγών. Από τη μία πλευρά, το αλάτι πρέπει να διαλυθεί σε νερό για να απορροφηθεί από τις ρίζες του φυτού και να εισέλθει στις ρίζες του φυτού με τη ροή του νερού. Από την άλλη πλευρά, οι μηχανισμοί απορρόφησης των δύο είναι διαφορετικοί. Η απορρόφηση νερού είναι κυρίως παθητική απορρόφηση που προκαλείται από διαπνοή φυτών, ενώ η απορρόφηση μεταλλικών στοιχείων είναι κυρίως ενεργή απορρόφηση που καταναλώνει μεταβολική ενέργεια [39].

Επιδράσεις της υγρασίας σε βιολογικές ιδιότητες του εδάφους

Βιότοπος του εδάφους

Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει τους βιότοπους του εδάφους με δύο τρόπους. Βιολογικά το νερό είναι απαραίτητο για τη ζωή και για τη δραστηριότητα των ενζύμων και του μεταβολισμού και είναι ένας διαλύτης για βιολογικά θρεπτικά συστατικά και άλλες χημικές ουσίες. Φυσικά, η υγρασία του εδάφους επηρεάζει τη θερμοκρασία του εδάφους, καθώς το νερό είναι καλός αγωγός θερμότητας, και τον αερισμό του εδάφους. Ο βαθμός με τον οποίο γεμίζουν οι πόροι του εδάφους επηρεάζει την κίνηση μικροοργανισμών στο έδαφος. Σε πολύ ξηρό έδαφος, τα φυτά

μπορεί να μην μπορούν να εξαγάγουν αρκετό νερό μέσω των ριζών λόγω της ενέργειας που χρειάζεται για την απομάκρυνση του νερού από τους μικρούς πόρους. Αυτό είναι γνωστό ως το μόνιμο σημείο μαρασμού, πέρα από το οποίο το φυτό δεν μπορεί να ανακάμψει. Αντιστρόφως, σε υγρές συνθήκες, το οξυγόνο δεν διαχέεται εύκολα μέσω του εδάφους, με αποτέλεσμα τα επίπεδα που είναι διαθέσιμα στον οργανισμό να εξαντληθούν οδηγώντας σε αναερόβιες συνθήκες. Οι μύκητες τείνουν να είναι πιο ανθεκτικοί στο στρες του νερού από τα βακτήρια, αν και υπό ακραίες συνθήκες, ορισμένα βακτήρια μπορούν να σχηματίσουν ανθεκτικά ενδοσπόρια που επιτρέπουν στον οργανισμό να επιβιώσει έως ότου προκύψουν πιο κατάλληλες συνθήκες [35].

Μεταφορά οργανικών υλικών

Το νερό είναι το μέσο μετατροπής και μεταφοράς υλικών και συμμετέχει επίσης άμεσα σε ορισμένες βιοχημικές αντιδράσεις. Συνήθως, οι καλλιέργειες έχουν ανεπαρκείς ποσότητες νερού κατά τη διάρκεια του σταδίου διόγκωσης των φρούτων, και η φωτοσύνθεση και η μεταφορά εμποδίζονται, με αποτέλεσμα τα φρούτα και οι σπόροι να μην μπορούν να συσσωρεύσουν επαρκή οργανική ύλη και να γίνονται συρρικνωμένα και λεπτά. Επομένως, σε συνθήκες ξηρασίας, η άρδευση μπορεί να επιταχύνει τη μεταφορά οργανικής ύλης. Ωστόσο, η υπερβολική ποσότητα νερού δεν ευνοεί τη μεταφορά οργανικής ύλης. Η υπερβολική ποσότητα νερού θα προκαλέσει ανεπαρκή αερισμό του εδάφους και θα επηρεάσει την αναπνοή και άλλες μεταβολικές διεργασίες [39].

Επιδράσεις της υγρασίας στην ανάπτυξη των φυτών

Μορφολογία των φυτών

Τα φυτά εκτελούν φωτοσύνθεση και συσσωρεύουν ξηρή ύλη μέσω της παροχής νερού. Και το ποσό της συσσώρευσης αντανακλάται άμεσα στις δυναμικές αλλαγές του ύψους των φυτών, του πάχους του στελέχους, της επιφάνειας των φύλλων και της απόδοσης. Σε καταστάσεις έλλειψης νερού, τα φυτά υποφέρουν από χαμηλή ανάπτυξη, μείωση των φωτοσυνθετικών περιοχών των φύλλων και μείωση της απόδοσης [39].

Αλλαγή των φύλλων

Το φύλλο είναι ο κύριος τόπος φωτοσύνθεσης και διαπνοής. Η επέκταση των κυττάρων της μεσοφύλλης και η ανάπτυξη των φύλλων είναι πολύ ευαίσθητες στις συνθήκες του νερού. Το φαινόμενο μαρασμού του φυτού που εμφανίζεται όταν το φυτό στερείται νερού είναι μια εκδήλωση της μειωμένης σπαργής [39].

Ανάπτυξη της ρίζας και του βλαστού

Οι ρίζες των φυτών είναι τα κύρια όργανα που απορροφούν νερό. Η ανάπτυξή τους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, αλλά ο κυριότερος είναι η υγρασία και ο αερισμός του εδάφους. Η κατανομή της υγρασίας του εδάφους επηρεάζει την κατακόρυφη κατανομή του ριζικού συστήματος. Όταν η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους είναι υψηλή, η αντίσταση του εδάφους στη διάχυση της ρίζας γίνεται μικρότερη, γεγονός που ευνοεί την εμφάνιση νέων ριζών. Το έδαφος περιέχει συνήθως μια ορισμένη ποσότητα νερού, οπότε το ίδιο το ριζικό σύστημα δεν είναι επιρρεπές σε έλλειψη νερού. Όταν το έδαφος είναι στεγνό ή η παροχή νερού είναι ανεπαρκής, το ριζικό σύστημα απορροφά περιορισμένο νερό και πρώτα ικανοποιεί τις δικές του ανάγκες. Έτσι, λίγο νερό διοχετεύεται στο άνω μέρος του φυτού. Επομένως, όταν η υγρασία του εδάφους είναι ανεπαρκής, η επίδραση στο άνω μέρος του φυτού είναι μεγαλύτερη από αυτήν του υπόγειου μέρους. Αντίθετα, εάν η υγρασία του εδάφους είναι πολύ μεγάλη και οι συνθήκες αερισμού του εδάφους είναι κακές, η επίδραση στο υπόγειο τμήμα είναι μεγαλύτερη από το τμήμα του εδάφους. Ένα μέτριο και αργό έλλειμμα νερού μπορεί να αυξήσει το απόλυτο βάρος ρίζας, να εμποδίσει την ανάπτυξη των τμημάτων πάνω από το έδαφος, να μειώσει τη συσσώρευση ξηράς ύλης των τμημάτων πάνω από το έδαφος και να μειώσει την απόδοση [39].

Φωτοσύνθεση

Η φωτοσύνθεση είναι η κύρια πηγή ενέργειας για τα φυτά. Ο φωτοσυνθετικός ρυθμός σχετίζεται στενά με την κατάσταση του νερού των φυτών. Τα πειράματα έχουν δείξει ότι όταν η περιεκτικότητα σε νερό των φυτικών ιστών πλησιάζει στον κορεσμό, η φωτοσύνθεση είναι η υψηλότερη. Όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι πολύ υψηλή, τα στόματα θα κλείσουν παθητικά και η φωτοσύνθεση θα ανασταλεί. Όταν τα φυτά στερούνται νερού, η φωτοσύνθεση μειώνεται. Όταν τα φύλλα μαραθούν λόγω

σοβαρής έλλειψης νερού, η φωτοσύνθεση μειώνεται απότομα ή ακόμη και σταματά. Οι συνθήκες του εδάφους επηρεάζουν επίσης τη φωτοσύνθεση των φυτών. Η μείωση της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό προκαλεί μείωση του δυναμικού νερού των φύλλων και αύξηση της αντίστασης στα στόματα, η οποία τελικά οδηγεί σε αυξημένη αντίσταση στη διάχυση των φύλλων, παρεμπόδιση στη διάχυση CO₂ και μειωμένο φωτοσυνθετικό ρυθμό [39].

Βλάστηση των σπόρων

Η απορρόφηση νερού είναι η κύρια προϋπόθεση για τη βλάστηση των σπόρων. Μόνο αφότου οι σπόροι έχουν απορροφήσει αρκετό νερό, θα αρχίσουν σταδιακά διάφορες φυσιολογικές και βιοχημικές επιδράσεις που σχετίζονται με τη βλάστηση. Αυτό συμβαίνει επειδή το νερό μπορεί να διογκωθεί και να μαλακώσει την επένδυση του σπόρου, τότε το οξυγόνο μπορεί εύκολα να διεισδύσει στην επικάλυψη του σπόρου προς σπορά για να ενισχύσει την αναπνοή του εμβρύου, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνει το έμβρυο να σπάσει τον μανδύα του σπόρου [39].

Αναπνοή των ριζών

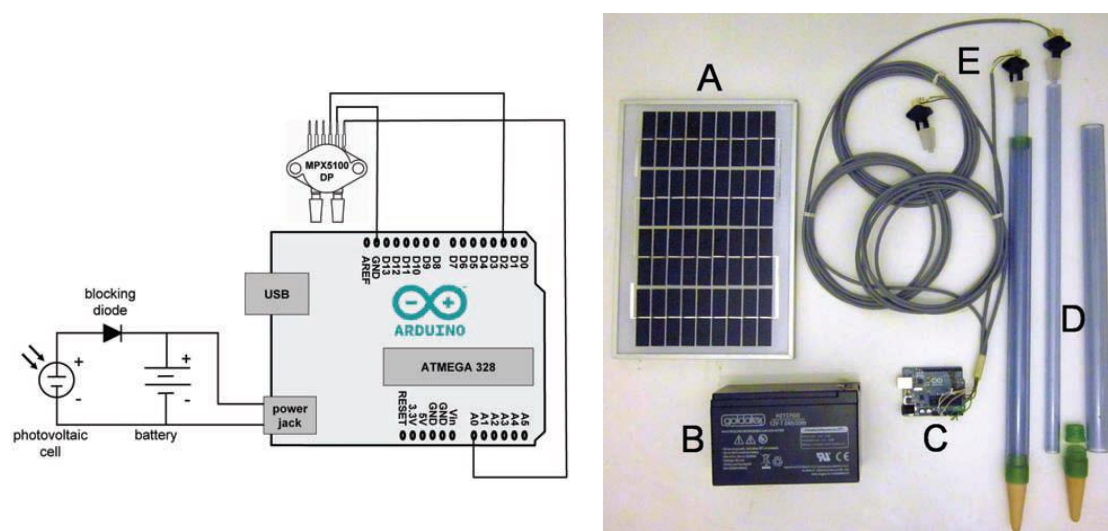
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε μελέτη του 2005 βρέθηκε πως σε θερμοκρασίες μεταξύ 20 °C και 30 °C, η αναπνοή μειώθηκε λογαριθμικά με την εξάντληση της υγρασίας του εδάφους χωρίς ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών. Στους 10 °C, ωστόσο, η αναπνοή ήταν πιο κοντά σε ένα βασικό επίπεδο, εμφανίζοντας μόνο μικρή μείωση με την μείωση της υγρασίας του εδάφους [36]. Επομένως, σε μέτριες θερμοκρασίες, η υγρασία του εδάφους ασκεί σημαντική επιρροή στην αναπνοή των ριζών. Η αναπνοή των ριζών μειώνεται καθώς η υγρασία του εδάφους εξαντλείται [36].

2.4.4 Συστήματα IoT για μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους

Σύστημα χαμηλού κόστους για μέτρηση του υδατικού δυναμικού του εδάφους

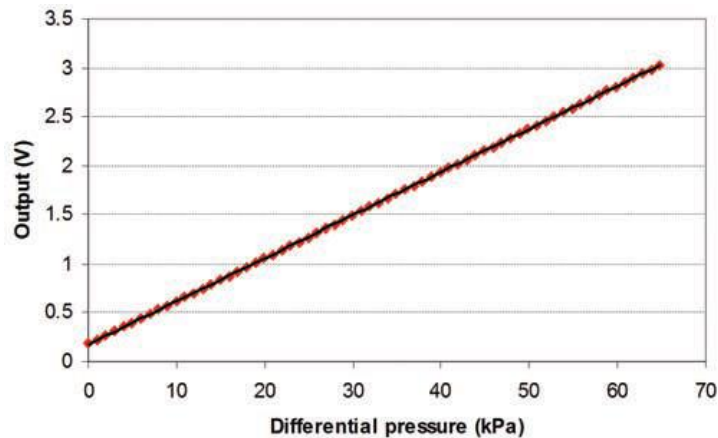
Ένα σύστημα χαμηλού κόστους για τη μέτρηση του υδατικού δυναμικού του εδάφους και την καταγραφή δεδομένων βασισμένο στον μικροελεγκτή Arduino, με χρήση тенσιόμετρων και ηλεκτρονικών μορφοτροπέων πίεσης που αναπτύχθηκε στο Ερευνητικό Κέντρο για τη Γεωργία και τη Δασοκομία Laimburg στο Bolzano της

Ιταλίας. Το σχεδιάγραμμα και τα στοιχεία της διάταξης παρουσιάζονται στην Εικόνα 45.



Εικόνα 45. Αριστερά: ηλεκτρικό σχεδιάγραμμα του συστήματος καταγραφής του тенσιόμετρον. Δεξιά: στοιχεία της διάταξης: (A) φωτοβολταϊκό πάνελ, (B) επαναφορτιζόμενη μπαταρία, (C) πλακέτα Arduino, (D) συναρμολογημένο (αριστερά) και μη συναρμολογημένο (δεξιά) тенσιόμετρο, (E) μορφοτροπείς πίεσης συνδεδεμένοι στην πλακέτα του ελεγκτή [40].

Το κάθε тенσιόμετρο αποτελείται από έναν σωλήνα PVC διαμέτρου 16 mm, όπου στο άκρο του έχει στερεωθεί με θερμοκολλητική κόλλα ένα πορώδες κεραμικό κωνικό κύπελλο, και από έναν δεύτερο εξωτερικό σωλήνα διαμέτρου 25 mm. Τα κύπελλα παρουσιάζουν μια υδραυλική αγωγιμότητα που είναι αρκετά υψηλή ώστε να επιτρέπει ταχεία απόκριση από την αύξηση του μητρικού δυναμικού του εδάφους λόγω αύξησης της υγρασία του εδάφους. Όταν συμβαίνει αυτό, η διαφορά πίεσης μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα από τους μορφοτροπείς πίεσης MPX5100DP με βήμα 45 mV/kPa [40]. Στην Εικόνα 46 φαίνεται η αναλογική έξοδος του MPX5100DP σε συνάρτηση με την διαφορά πίεσης.



Εικόνα 46. Η καμπύλη βαθμονόμησης του MPX5100DP [40]

Η διάταξη χρησιμοποιεί την EEPROM του Atmega328, μεγέθους 1 Kbyte για αποθήκευση των δεδομένων, τα οποία μπορούν να ληφθούν από την πλακέτα του μικροελεγκτή στον υπολογιστή μέσω σειριακής σύνδεσης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε και ένα μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ (5W/12V) και μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία κατάλληλου μεγέθους (6Ah) για να παρέχει επαρκή ισχύ για συνεχή και μακροχρόνια λειτουργία της μονάδας.



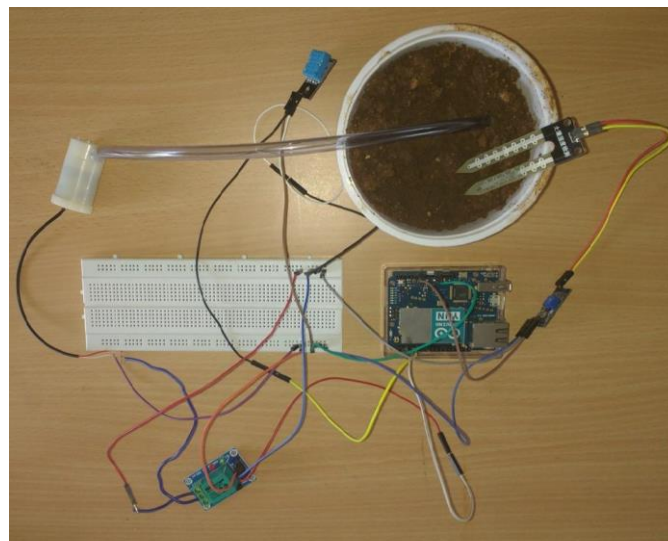
Εικόνα 47. Η μονάδα εγκατεστημένη ένα οπωρώνα μηλιάς. (A) Φωτοβολταϊκό πάνελ. (B) Πλακέτα μικροελεγκτή και (C) μπαταρία [40].

Από τεχνικής άποψης, σύμφωνα με την ερευνητική εργασία, το σύστημα έχει αποδειχθεί ακριβές και αξιόπιστο, τρέχοντας για δοκιμαστική περίοδο αρκετών

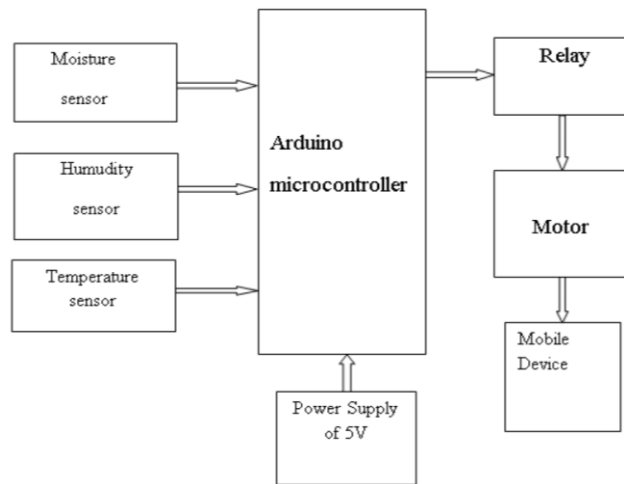
μηγών σε δύο συνεχόμενα χρόνια χωρίς καμία δυσλειτουργία. Όσο για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, ωστόσο, δεν μπορεί να αποκλειστεί ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες, όπως ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται π.χ. από κεραυνούς, η σταθερότητα του συστήματος μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο. Το συνολικό κόστος της διάταξης υπολογίστηκε στα 73 ευρώ.

Αυτοματοποίηση αρδευτικού συστήματος με χρήση IoT

Σε αυτό το προτεινόμενο σύστημα γίνεται χρήση διάφορων αισθητήρων όπως θερμοκρασίας, υγρασίας και αισθητήρας υγρασίας εδάφους που ανιχνεύουν τις διάφορες παραμέτρους του εδάφους και με βάση την τιμή υγρασίας του ποτίζεται αυτόματα με τη χρήση μιας αντλίας. Οι παράμετροι που μετρώνται και η κατάσταση του κινητήρα της αντλίας εμφανίζονται σε εφαρμογή Android. Στην Εικόνα 48 φαίνεται η προτεινόμενη διάταξη με τον μικροελεγκτή, τους αισθητήρες την αντλία και την μονάδα ελέγχου της αντλίας. Η Εικόνα 49 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα του αυτόματου συστήματος άρδευσης, το οποίο αποτελείται από τρεις αισθητήρες που συνδέονται με τον ελεγκτή και οι τιμές ανίχνευσης από αυτούς τους αισθητήρες αποστέλλονται στην εφαρμογή.

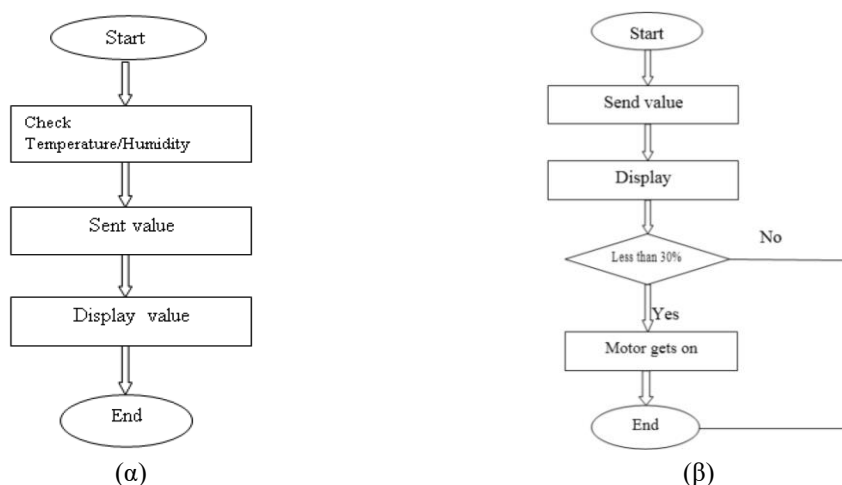


Εικόνα 48. Η διάταξη του συστήματος [41]

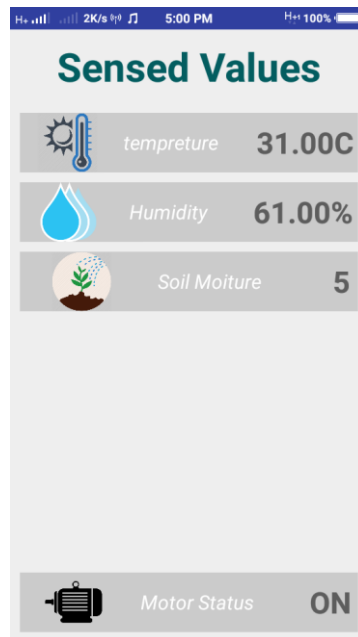


Εικόνα 49. Το block diagram του συστήματος [41]

Ο αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας του αέρα είναι ο DHT11, ο οποίος είναι ένας βασικός, ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν χωρητικό αισθητήρα υγρασίας και ένα θερμίστορ για τη μέτρηση του περιβάλλοντος αέρα και παράγει ένα ψηφιακό σήμα στην έξοδο δεδομένων. Στη συνέχεια, οι τρέχουσες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας αποστέλλονται στον μικροελεγκτή και αυτές οι τιμές εμφανίζονται σε μια εφαρμογή Android. Ο αισθητήρας υγρασίας του εδάφους της προτεινόμενης διάταξης μετρά την περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος με βάση το επίπεδο αντίστασης. Η μονάδα αισθητήρα παράγει υψηλό επίπεδο αντίστασης όταν η υγρασία του εδάφους είναι χαμηλή. Διαθέτει τόσο ψηφιακή όσο και αναλογική έξοδο. Στην Εικόνα 50 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής των αισθητήρων, ενώ στην Εικόνα 51 φαίνονται οι τιμές των αισθητήρων στην εφαρμογή Android.



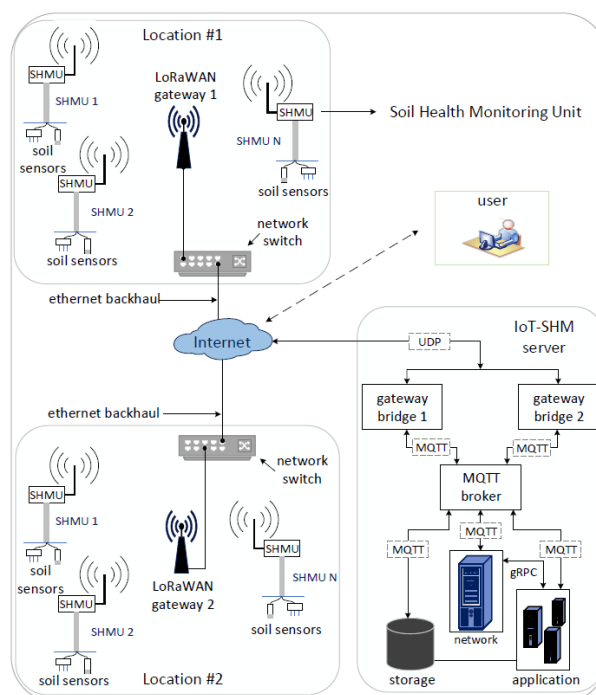
Εικόνα 50. Διαγράμματα ροής αισθητήρων α) θερμοκρασίας-υγρασίας και β) υγρασίας εδάφους [41]



Εικόνα 51. Τα δεδομένα σε εφαρμογή Android [41]

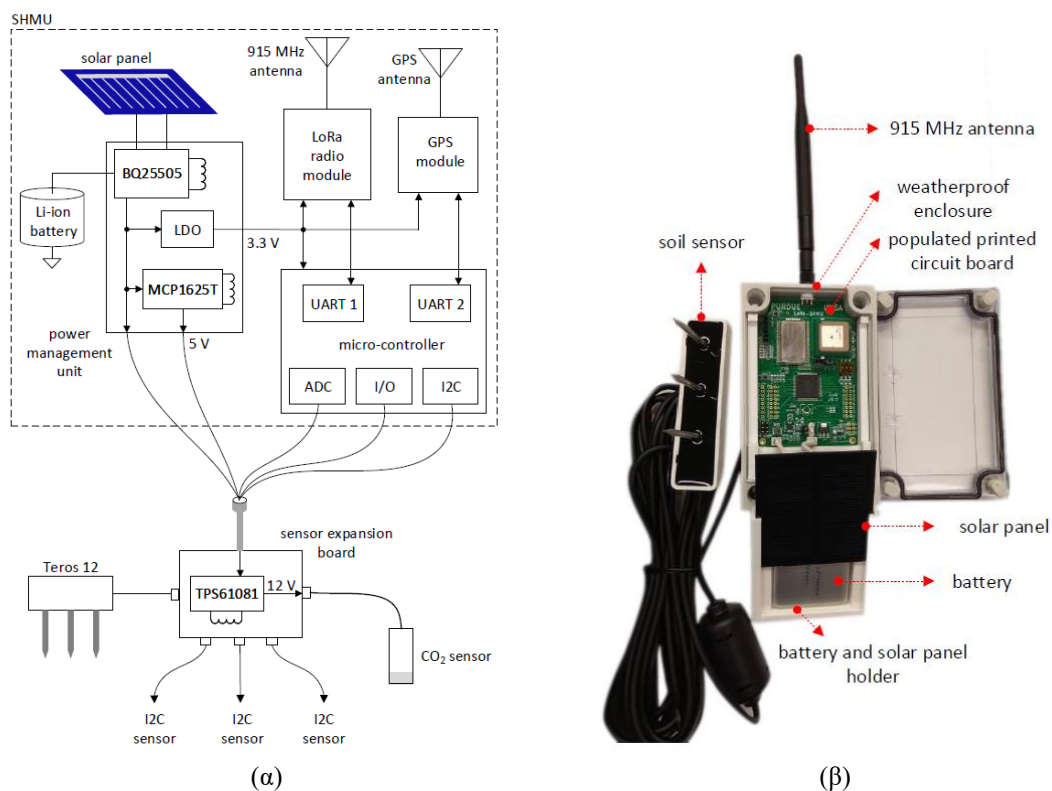
IoT σύστημα παρακολούθησης real-time της υγείας του εδάφους με χρήση του LoRaWAN

Το σύστημα παρακολούθησης υγείας του εδάφους (Soil Health Monitoring-SHM) χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική δικτύου του LoRaWAN. Στην αρχιτεκτονική αυτή, ένα δίκτυο αναπτύσσεται σε τοπολογία star-of-stars όπως στην Εικόνα 52.



Εικόνα 52. Η αρχιτεκτονική του δικτύου του συστήματος [42]

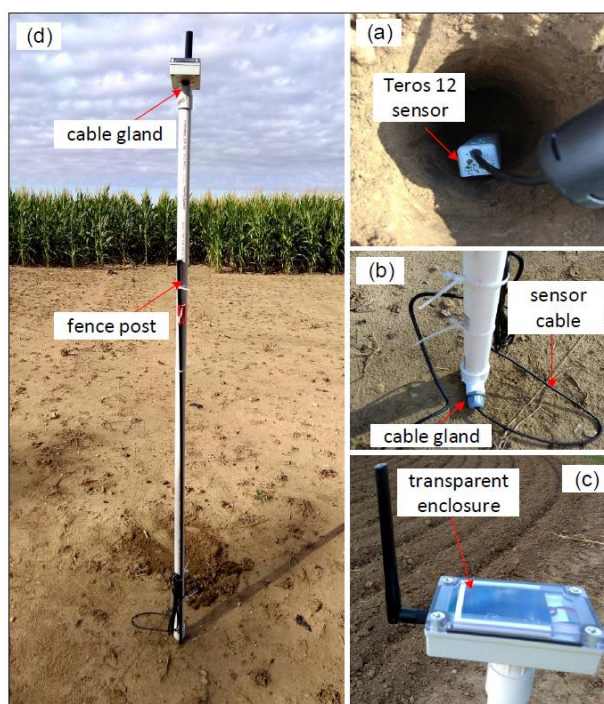
Οι τερματικοί κόμβοι του προτεινόμενου συστήματος καλούνται SHMU και αναπτύσσονται σε κάθε τοποθεσία για τη συλλογή μεταβλητών σχετικές με το έδαφος (θερμοκρασία, αγωγιμότητα, υγρασία και CO₂) και δεδομένα τοποθεσίας, και μετά την επεξεργασία τους, τα διαβιβάζουν σε ένα LoRaWAN gateway που χρησιμοποιεί τη ζώνη ραδιοκυμάτων ISM 900 MHz. Οι LoRaWAN πύλες συνδέονται στο Διαδίκτυο μέσω switch και από εκεί σε έναν κεντρικό διακομιστή IoT SHM. Οι πύλες LoRaWAN χρησιμεύουν ως συγκεντρωτές για τα SHMU και αναμεταδίδουν δεδομένα μεταξύ των SHMU και του κεντρικού διακομιστή IoT SHM. Ένα SHMU αποτελείται από αισθητήρες εδάφους, έναν μικροελεγκτή ATmega 2560, μια μονάδα LoRa RN2903, μια μονάδα GPS, ένα ηλιακό κύτταρο 7 cm 6,5 cm (MIKROE-651), μια μπαταρία Li-ion 2500 mAh και μια μονάδα διαχείρισης ενέργειας για φόρτιση της μπαταρίας [42]. Το διάγραμμα του SHMU απεικονίζεται στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53. α) Block diagram του SHMU και β) το πρωτότυπο υλοποιημένο SHMU [42]

Το σύστημα χρησιμοποιεί δύο κύριους αισθητήρες: τον Teros 12, ένας εμπορικά διαθέσιμος αισθητήρα εδάφους από την Meter Group, και τον GMP 251, ένας αισθητήρας CO₂ από τη Vaisala. Ο Teros 12 είναι ένας υψηλής ποιότητας αισθητήρας εδάφους ικανός να μετρήσει τη θερμοκρασία του εδάφους, την ηλεκτρική

αγωγιμότητα και την υγρασία. Ο αισθητήρας Teros 12 είναι βαθμονομημένος για ορυκτό έδαφος και τα χαρακτηριστικά του τον καθιστούν πολύ καλή επιλογή για μακροπρόθεσμη παρακολούθηση της υγείας του εδάφους. Ο αισθητήρας Vaisala GMP 251 είναι ένας υπέρυθρος μη διασπαρμένος αισθητήρας και έχει κατασκευαστεί για να αντέχει σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών. Ο αισθητήρας CO₂ GMP 251 διαθέτει αναλογική έξοδο, η ανάγνωση της οποίας γίνεται χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (ADC) που είναι ενσωματωμένος στον κεντρικό μικροελεγκτή. Ο διακομιστής του συστήματος εκτελείται σε έναν προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Ubuntu 18.04 LTS. Το πακέτο λογισμικού του διακομιστή αποτελείται από προγράμματα ανοιχτού κώδικα όπως το ChirpStack, το Mosquitto και το PostgreSQL. Το ChirpStack αποτελείται από διαφορετικά στοιχεία λογισμικού, όπως ο διακομιστής δικτύου ChirpStack, το gateway γέφυρα ChirpStack και ο διακομιστής εφαρμογής ChirpStack. Ο broker μηνυμάτων Mosquitto εφαρμόζει το πρωτόκολλο Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο pub/sub μεταξύ του gateway γέφυρας ChirpStack και του διακομιστή δικτύου ChirpStack. Ο διακομιστής δικτύου ChirpStack υλοποιεί το δίκτυο LoRaWAN. Αυτός ο διακομιστής εξαλείφει τα διπλά πακέτα, διαχειρίζεται την ασφάλεια και τον προγραμματισμό των πλαισίων downlink και των ρυθμών δεδομένων. Ο διακομιστής εφαρμογής ChirpStack είναι υπεύθυνος για το χειρισμό της διαδικασίας σύνδεσης των SHMU και την αποκωδικοποίηση του ωφέλιμου φορτίου της εφαρμογής. Μόλις αποκωδικοποιηθούν τα δεδομένα, το ωφέλιμο φορτίο προωθείται στην PostgreSQL για μακροχρόνια αποθήκευση και οπτικοποίηση δεδομένων [42].



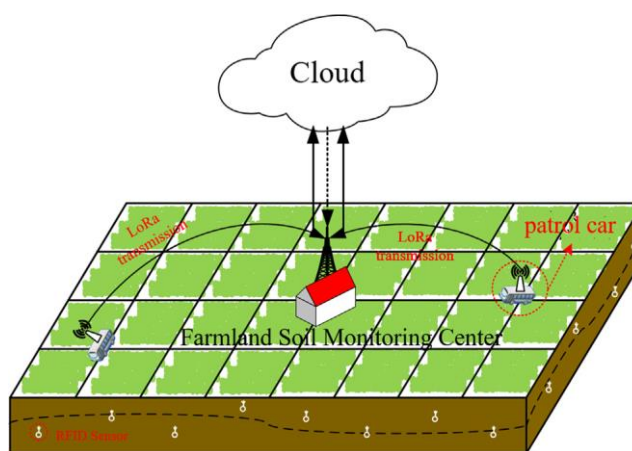
Εικόνα 54. Εγκατάσταση του SHMU με αισθητήρα Teros 12. (α) Εγκατάσταση αισθητήρα Teros 12 με τα ηλεκτρόδια ευθυγραμμισμένα οριζόντια (το σώμα προσανατολίζεται κατακόρυφα), (β) εγκατάσταση καλωδίου αισθητήρα και στυπιοθλίπτη καλωδίου για προστασία από την υγρασία, (γ) κάτοψη που δείχνει την εγκατάσταση διαφανούς περιβλήματος ανθεκτικού στις καιρικές συνθήκες, (δ) πλήρης όψη του SHMU [42].

Η Εικόνα 54 δείχνει την εγκατάσταση ενός SHMU στο έδαφος για την λήψη μετρήσεων. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, το προτεινόμενο σύστημα είναι κατάλληλο για περιβαλλοντική παρακολούθηση και γεωργία ακριβείας. Επίσης το επιλεγμένο ηλιακό πάνελ μπορεί να παρέχει αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει τη μονάδα SHMU και να φορτίσει την μπαταρία του. Ωστόσο το κόστος κατασκευής μιας μονάδας SHMU ξεπερνά τα 179 ευρώ, χωρίς να υπολογίζεται το κόστος των αισθητήρων σε αυτό το ποσό.

Σύστημα παρακολούθησης περιβάλλοντος του εδάφους βασισμένο σε αισθητήρες RFID και LoRa

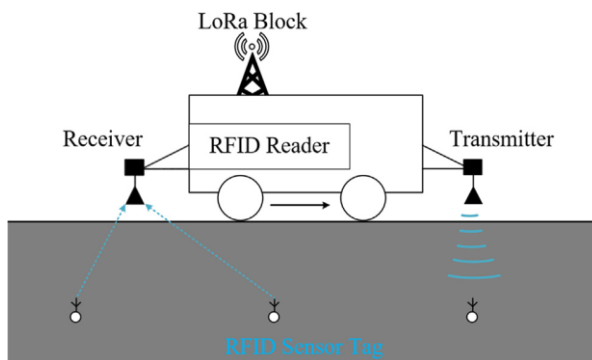
Αυτή η εργασία προτείνει ένα σύστημα παρακολούθησης του περιβάλλοντος του εδάφους που βασίζεται σε αισθητήρα RFID και LoRa για την υλοποίηση μακροπρόθεσμης και παρακολούθηση χαμηλού κόστους. Το σύστημα παρακολούθησης αποτελείται από ένα όχημα περιπολίας, αισθητήρα RFID, κέντρο παρακολούθησης γεωργικών εκτάσεων και μία πλατφόρμα Cloud. Η Εικόνα 55 δείχνει το προτεινόμενο σύστημα παρακολούθησης του εδαφικού περιβάλλοντος. Οι

σχεδιασμένοι αισθητήρες RFID είναι ενσωματωμένοι στο έδαφος για παρακολούθηση υψηλής ακρίβειας. Το περιπολικό, που ενσωματώνει συσκευή ανάγνωσης RFID και λειτουργία επικοινωνίας LoRa, είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των πληροφοριών των ενσωματωμένων αισθητήρων RFID και την επικοινωνία με το κέντρο παρακολούθησης. Το κέντρο παρακολούθησης αποθηκεύει τα ληφθέντα δεδομένα και θα τα ανεβάζει στην πλατφόρμα Cloud μέσω ενσύρματου ή κυψελοειδούς δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η πλατφόρμα Cloud μπορεί να αναλύσει τα δεδομένα και να λάβει τις αντίστοιχες αποφάσεις.



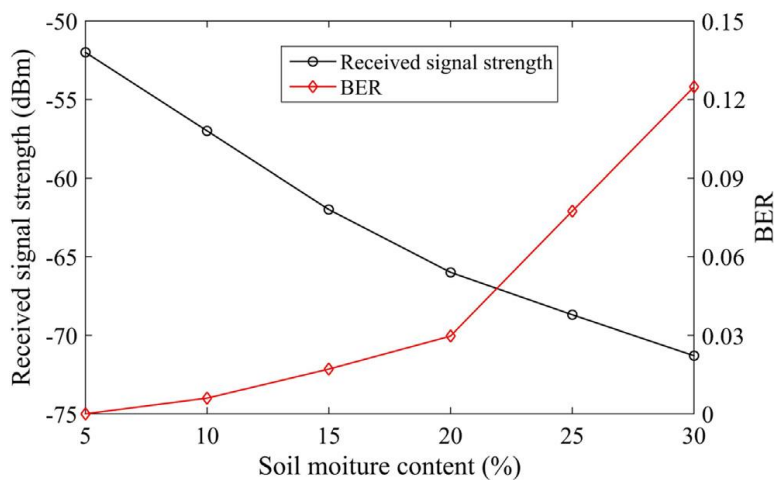
Εικόνα 55. Το προτεινόμενο σύστημα [43]

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 56 ο «αναγνώστης» RFID του περιπολικού αποτελείται από έναν ξεχωριστό πομπό RFID στο μπροστινό μέρος του αυτοκινήτου και έναν ξεχωριστό δέκτη RFID στο τέλος του αυτοκινήτου. Ο πομπός παράγει ένα σήμα συνεχούς κύματος για να τροφοδοτήσει τον αισθητήρα RFID του εδάφους και ο δέκτης ενισχύει και αποδιαμορφώνει το σήμα οπισθοσκέδασης από τους ενσωματωμένους αισθητήρες RFID [43].

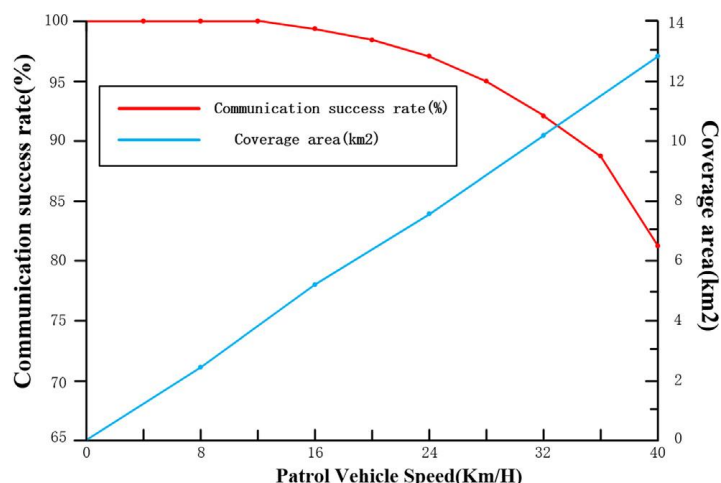


Εικόνα 56. Το όχημα περιπολίας [43]

Η ισχύς του ληφθέντος σήματος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την περιεκτικότητα σε υγρασία όσο και από την ταχύτητα του οχήματος περιπολίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 57 και στην Εικόνα 58 αντίστοιχα.



Εικόνα 57. Επίδραση της υγρασίας του εδάφους στο λαμβανόμενο σήμα [43]

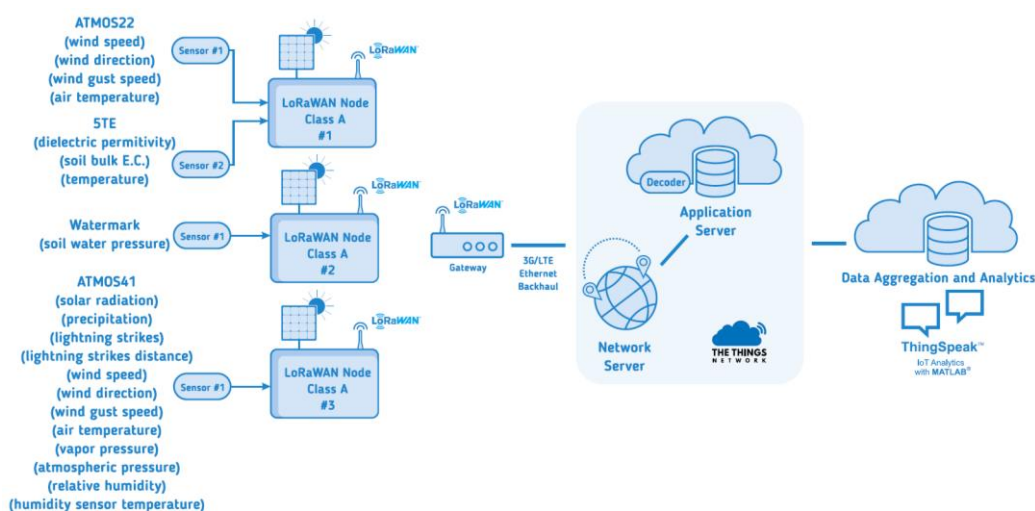


Εικόνα 58. Επίδραση της ταχύτητας του οχήματος περιπολίας στο λαμβανόμενο σήμα [43]

Τα σχετικά σφάλματα κατά τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας σε υγρασία στο έδαφος είναι 1,5% και 1,0% αντίστοιχα όταν το βάθος ενσωμάτωσης είναι 60 cm και η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους είναι μικρότερη από 30%. Η βέλτιστη ταχύτητα του περιπολικού είναι 33 km/h όταν το ποσοστό επιτυχίας επικοινωνίας είναι πάνω από 90% και η περιοχή κάλυψης είναι πάνω από 10 km².

Κόμβοι LoRaWAN χαμηλού κόστους για έξυπνη γεωργία και IoT

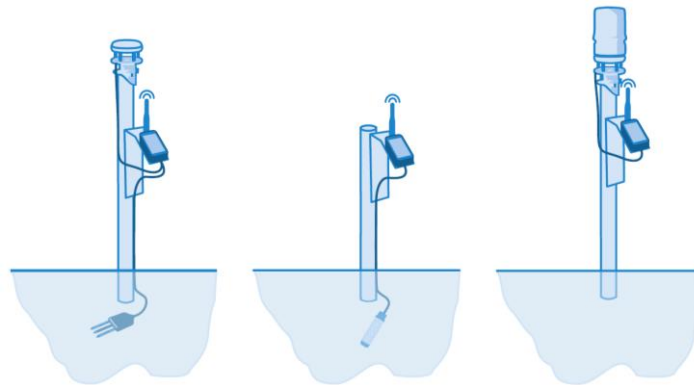
Στην συγκεκριμένη εργασία αναπτύχθηκαν τρεις κόμβοι με αισθητήρες χαμηλού κόστους που χρησιμοποιούνται στη γεωργία για τη μέτρηση πολλών περιβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία εδάφους και αέρα, ταχύτητα ανέμου, ριπή και κατεύθυνση, περιεκτικότητα σε νερό, τάση νερού και ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλιακή ακτινοβολία, βροχόπτωση, ατμοσφαιρική και τάση ατμών, σχετική υγρασία και μέτρηση χτυπημάτων κεραυνών), εύκολοι στην εγκατάσταση και τη συντήρηση, χαμηλής κατανάλωσης και επικοινωνούν ασύρματα μέσω δικτύου Long Rang Wide Area Network (LoRaWAN). Οι τρεις κόμβοι στέλνουν δεδομένα σε έναν διακομιστή μέσω μιας υπάρχουσας πύλης στο αγρόκτημα. Τα δεδομένα αποκωδικοποιούνται και αποστέλλονται σε μια πλατφόρμα ανάλυσης Internet of Things όπου συγκεντρώνονται, προβάλλονται και αναλύονται. Επίσης η ανάπτυξη μιας cluser-based βιβλιοθήκης μετατρέπει τους κόμβους σε plug-and-play. Η αρχιτεκτονική του συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 59.



Εικόνα 59. Η αρχιτεκτονική του συστήματος [44]

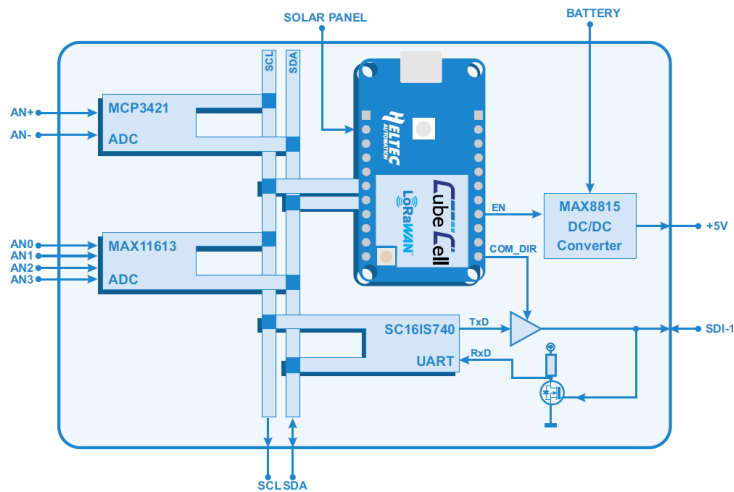
Όπως φαίνεται και παραπάνω, οι κόμβοι που υλοποιήθηκαν (κόμβος #1, κόμβος #2 και κόμβος #3) έχουν διάφορους αισθητήρες συνδεδεμένους σε αυτούς. Ο κόμβος #1 συνδέεται με αισθητήρες ATMOS22 (ψηφιακό ανεμόμετρο υπερήχων SDI-12) και 5TE (ψηφιακός αισθητήρας εδάφους SDI-12) από την Meter Group. Ο κόμβος #2 συνδέεται μόνο με έναν αισθητήρα Watermark, από το Irrrometer (αλλαγή αντίστασης που σχετίζεται με την τάση του εδάφους) και ο κόμβος #3 συνδέεται με το ATMOS41, από το Meter Group (ένας πλήρης ψηφιακός μετεωρολογικός σταθμός

all-in-one με έξοδο SDI-12). Όλοι οι κόμβοι έχουν ασύρματη σύνδεση και στέλνουν τα δεδομένα μέσω του LoRaWAN σε μια πύλη (Lorix One, από την Wifx) που είναι συνδεδεμένη μέσω Ethernet (μπορεί επίσης να συνδεθεί μέσω Wi-Fi ή LTE) σε έναν διακομιστή (The Things Network - TTN). Στον διακομιστή TTN δημιουργήθηκε ένας αποκωδικοποιητής που σχετίζεται με την αναπτυγμένη βιβλιοθήκη cluster. Μετά την αποκωδικοποίηση τα δεδομένα αποστέλλονται σε μια πλατφόρμα για οπτικοποίηση και ανάλυση. Η Εικόνα 60 δείχνει την εγκατάσταση των κόμβων στο έδαφος για την λήψη μετρήσεων.



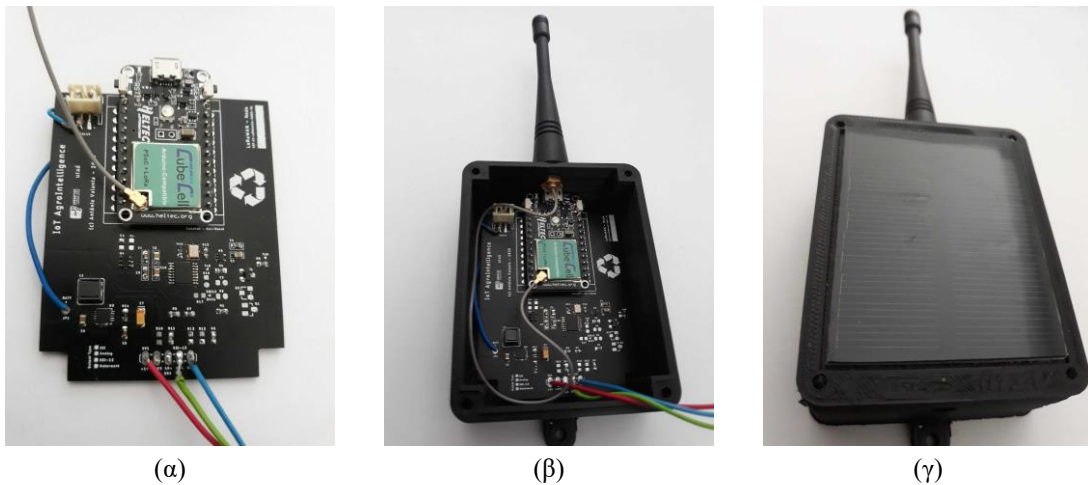
Εικόνα 60. Σχέδιο των κόμβων του συστήματος. Αριστερά: κόμβος με αισθητήρες ATMOS22 και 5TE, μέση: κόμβος με αισθητήρα Watermark και δεξιά: κόμβος με αισθητήρα ATMOS41 [44]

Για την κύρια μονάδα επεξεργασίας των κόμβων χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα ανάπτυξης CubeCell από την Heltec, καθώς διαθέτει ενσωματωμένο LoRa module, ηλιακό φορτιστή και έχει χαμηλό κόστος. Ωστόσο ένα μειονεκτήματα της επιλεγμένης μονάδας είναι ότι διαθέτει μόνο μία αναλογική θύρα (12-bit ADC). Έτσι, ήταν απαραίτητο να παρασχεθούν στο σύστημα περισσότερα κανάλια ADC. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την χρήση εξωτερικών μονάδων ADC με επικοινωνία I2C. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το μονοκάναλο ADC 18 bit MCP3421 της Microchip και το ADC 12 bit, 4 καναλιών MAX11613 από τη Maxim. Στην Εικόνα 61 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα των κόμβων.



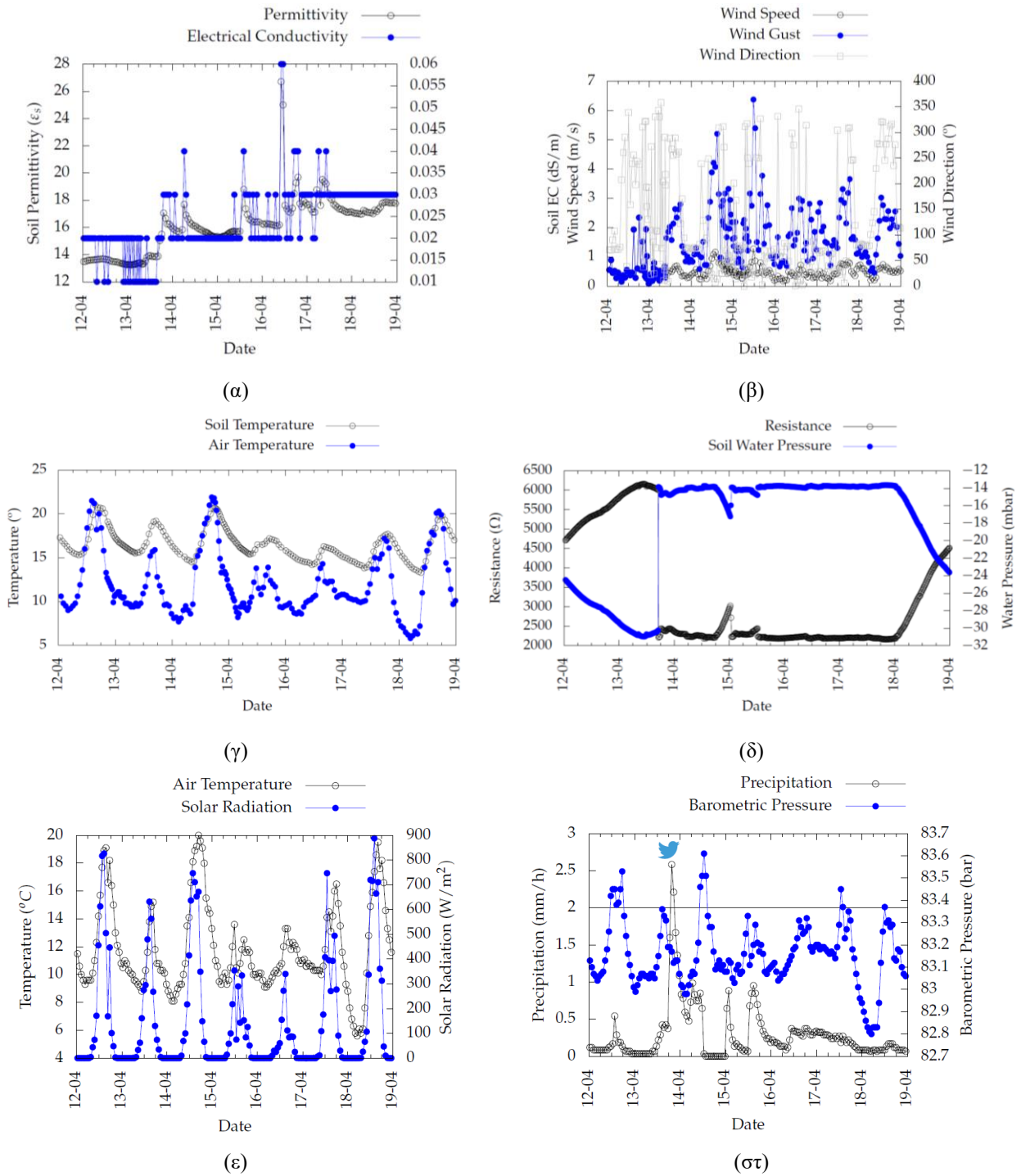
Εικόνα 61. Σχηματικό διάγραμμα ενός κόμβου LoRaWAN [44]

Η Εικόνα 62 δείχνει τα τρία στάδια ανάπτυξης ενός από τους κόμβους: α) μόνο το PCB με όλα τα εξαρτήματα, όπου φαίνεται η μονάδα CubeCell της Heltec, β) το PCB που βρίσκεται στο τρισδιάστατο εκτυπωμένο στεγανό κουτί πάνω από την μπαταρία LiPo 2000 mAh και γ) ο κόμβος του κουτιού με το κάλυμμα όπου βρίσκεται το ηλιακό πάνελ.



Εικόνα 62. α) Το PCB με τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, β) Το PCB μέσα στην 3D εκτυπωμένη θήκη, γ) Το ηλιακό πάνελ στο κάλυμμα της θήκης [44].

Στην Εικόνα 63 παρουσιάζονται οι ληφθείσες μετρήσεις από τους αισθητήρες των κόμβων για διάστημα 7 ημερών.



Εικόνα 63. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες: α) 5TE, β) ATMOS22, γ) 5TE (έδαφος), ATMOS22 (αέρας), δ) Watermark, ε) και στ) ATMOS41 [44].

Το κόστος του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της μπαταρίας, του ηλιακού πάνελ, της κεραίας, όλων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, του PCB και του κουτιού με το κάλυμμα αλλά χωρίς τους αισθητήρες, υπολογίζεται περίπου στα 37,5 ευρώ. Η κατανάλωση ενέργειας των κόμβων εξαρτάται από τον αριθμό και τον τύπο των αισθητήρων που συνδέονται στον κάθε κόμβο. Στις περιπτώσεις που υλοποιήθηκαν, η

μέγιστη κατανάλωση ήταν 400 μ A. Το ανεπτυγμένο σύστημα είναι ιδανικό για εφαρμογές IoT έξυπνης γεωργίας καθώς υλοποιεί ένα ασύρματο δίκτυο που βασίζεται στο πρωτόκολλο LoRaWAN.

Αισθητήρας θερμοκρασίας, υγρασίας και αγωγιμότητας εδάφους EM500-SMTC

Το σύστημα EM500-SMTC από την Milesight (Εικόνα 64) παρέχει έναν εξωτερικό αισθητήρα για τη λήψη ακριβών και στιγμιαίων πληροφοριών σχετικά με την περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Διαθέτει ενσωματωμένη μονάδα για επικοινωνία μέσω LoRaWAN και NFC και λειτουργεί με το Milesight IoT Cloud (Web & App), το οποίο επιτρέπει την παρακολούθηση των δεδομένων. Το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας είναι μεταξύ -40 και 80 $^{\circ}$ C με ακρίβεια μέτρησης ± 1 $^{\circ}$ C, ενώ το εύρος μέτρησης της σχετικής υγρασίας είναι 0 – 100 % με ακρίβεια μέτρησης 2% για εύρος 0 – 50 % και 3% για εύρος 50 – 100 %. Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται μεταξύ -30 με 70 $^{\circ}$ C για τον πομποδέκτη και -40 με 85 $^{\circ}$ C για τους αισθητήρες. Επίσης διαθέτει μπαταρία Li-SOCl₂ 19000 mAh, με διάρκεια ζωής έως και 10 χρόνια. Το κόστος του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 500 και 600 ευρώ.



Εικόνα 64. Το σύστημα EM500-SMTC [45]

Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας με βάση το LoRaWAN LW002-TH

Το σύστημα LW002-TH της Moko Smart (Εικόνα 65) μπορεί να συνδεθεί με τον αισθητήρα υγρασίας SHT30 και τον αισθητήρα θερμοκρασίας PT100 για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο. Υποστηρίζει όλες τις ζώνες περιοχών του πρωτοκόλλου LoRaWAN και λειτουργεί στις

θερμοκρασίες μεταξύ -10 και 50 °C. Η ακρίβεια μέτρησης είναι $\pm 3\%$ για την υγρασία και ± 1 °C για τη θερμοκρασία. Η μπαταρία του μπορεί να διαρκέσει έως και 10 χρόνια και το κόστος του κυμαίνεται μεταξύ 40 και 50 ευρώ.



Εικόνα 65. Το σύστημα LW002-TH [46]

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Στοιχεία της διάταξης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα Cloud-based IoT σύστημα αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους, η αρχιτεκτονική του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 66. Ο τελικός κόμβος του συστήματος αποτελείται από έναν μικροελεγκτή LoRa32u4 II v1.3, ένα θερμίστορ ως αισθητήρα θερμοκρασίας και έναν χωρητικό αισθητήρα υγρασίας. Ο κόμβος επικοινωνεί με ένα gateway μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN και στην συνέχεια το gateway επικοινωνεί με τον διακομιστή του The Things Stack Community Edition μέσω διαδικτύου, όπου και καταλήγουν τα αρχικά δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες. Στο The Things Stack γίνεται η αποκωδικοποίηση και επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και ένα integration μέσω webhook με την πλατφόρμα TagoIO, στην οποία γίνεται η οπτικοποίηση και αποθήκευση των δεδομένων. Τέλος, μέσω της υπηρεσίας TagoRUN δημιουργήθηκε μια εφαρμογή όπου ένας χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στα δεδομένα και στα εργαλεία οπτικοποίησης.



Εικόνα 66. Η αρχιτεκτονική του συστήματος

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα στοιχεία της διάταξης και στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία υλοποίησης κάθε σταδίου του συστήματος.

3.1.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας

Αισθητήρας θερμοκρασίας NTC θερμίστορ

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας που είχε αρχικά επιλεγεί για την εργασία ήταν ένας αδιάβροχος DS18B20 της Dallas Semiconductors. Ο DS18B20 είναι ένας αισθητήρας ολοκληρωμένου κυκλώματος (ή ημιαγωγών) με ενσωματωμένο μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC). Ωστόσο, λόγω της μικρής χωρητικότητας σε μνήμη του μικροελεγκτή και της μεγάλης απαίτησης μνήμης από τις βιβλιοθήκες του αισθητήρα, σε συνδυασμό με τον υπόλοιπο κώδικα της εργασίας, δεν ήταν δυνατή η χρήση του. Επομένως επιλέχθηκε ο αδιάβροχος αισθητήρας θερμίστορ αρνητικού συντελεστή (Εικόνα 67).



Εικόνα 67. Αδιάβροχος αισθητήρας θερμίστορ NTC

Χαρακτηριστικά αισθητήρα:

- Αντίσταση στους 25 °C: 10K ±1%
- $B_{25/50} = 3950 \pm 1\%$
- Εύρος θερμοκρασίας: -20 °C έως +105 °C
- Ακρίβεια μέτρησης: ± 1 %
- Κόστος: 1.80 €

Αισθητήρας υγρασίας Capacitive Soil Moisture Sensor SEN 0193 v1.2

Ο αισθητήρας υγρασίας που επιλέχθηκε είναι ο χωρητικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους SEN 0193 v1.2 από την DFRobot (Εικόνα 68). Είναι κατασκευασμένος από υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση που του δίνει εξαιρετική διάρκεια ζωής. Το κύκλωμά του περιλαμβάνει έναν ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης που του δίνει εύρος τάσης

λειτουργίας 3,3 - 5,5 V. Είναι ιδανικός για MCU χαμηλής τάσης, καθώς η τάση τροφοδοσίας του μπορεί να είναι είτε 3.3 V είτε 5 V. Η έξοδος του είναι αναλογική και εξαρτάται από την χωρητικότητα του συνεπίπεδου πυκνωτή που εισέρχεται στο έδαφος και δρα ως το αισθητήριο στοιχείο. Η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι μεταβλητή και εξαρτάται άμεσα από τα επίπεδα υγρασίας του υλικού στο οποίο βρίσκεται.



Εικόνα 68. Χωρητικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους SEN 0193 v1.2

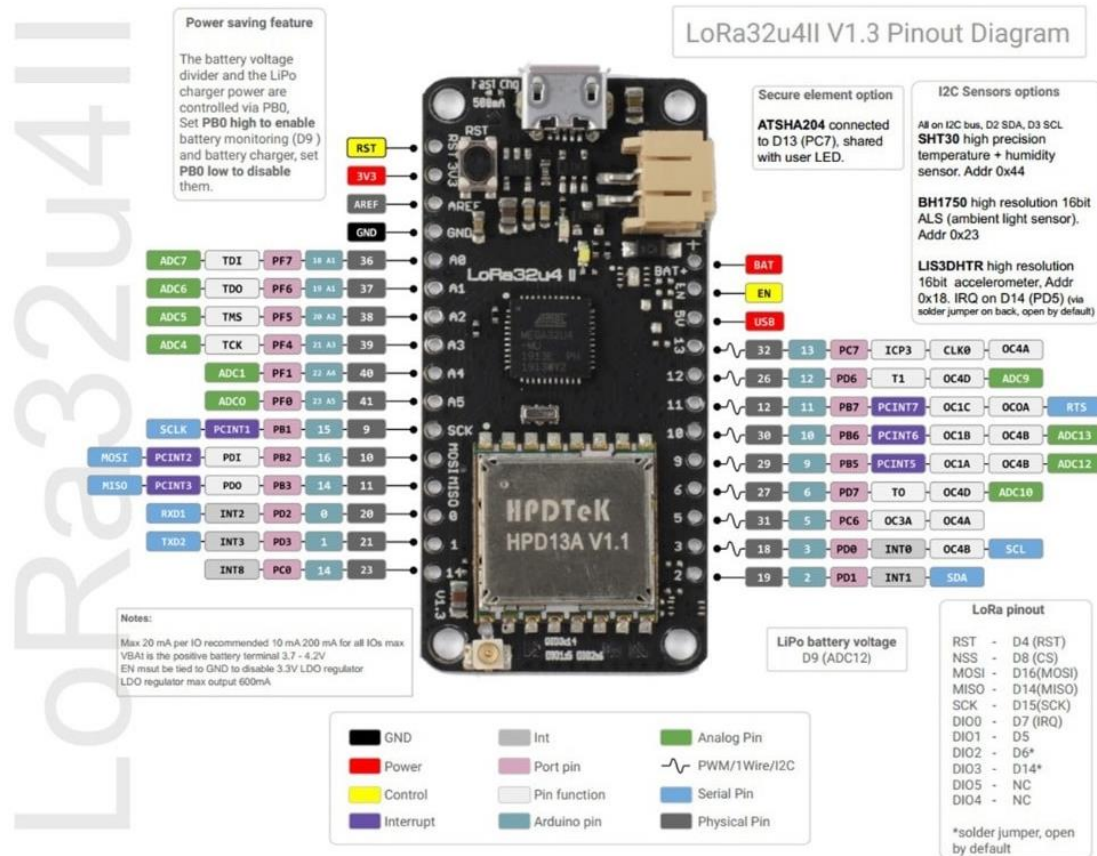
Χαρακτηριστικά αισθητήρα:

- Τάση τροφοδοσίας: 3,3 - 5,5 V
- Ρεύμα λειτουργίας: 5 mA
- Τάση εξόδου: 0 - 3.0 V
- Διαστάσεις: 9.8 x 2.3 cm
- Βάρος: 15 g [47]
- Κόστος: 4.80 €

3.1.2 Μικροελεγκτής & Gateway

LoRa32u4 II v1.3

Η πλακέτα ανάπτυξης που επιλέχθηκε για την εργασία είναι η πλακέτα LoRa32u4 II v1.3 της BSFrance, η οποία είναι ιδανική για εφαρμογές IoT, καθώς απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ισχύος για την λειτουργία της. Είναι βασισμένη στον μικροελεγκτή Atmega 32u4. Διαθέτει pins εισόδου για ψηφιακά και αναλογικά σήματα και pins εξόδου στα 3,3 και 5 V. Επίσης διαθέτει ενσωματωμένο το chip Semtech SX1276 για επικοινωνία μέσω των διαμορφώσεων FSK, MSK, GFSK, GMSK, LoRa και OOK και είναι συμβατή με το περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE. Στην Εικόνα 69 φαίνεται η πλακέτα LoRa32u4 II v1.3 και το διάγραμμα αντιστοίχισης των pins.



Εικόνα 69. Διάγραμμα αντιστοίχισης των pin του LoRa32u4 II v1.3 [48]

Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή:

- MCU: Atmega 32u4 3.3V @ 8MHz
- ROM: 32K
- RAM: 2K
- Logic level: 3.3V
- Operating voltage: 3.3V – 5.0V
- LoRa Chipset: Semtech SX1276 [49]
- Κόστος: 15.60 €

Χαρακτηριστικά Chipset Semtech SX1276:

- Διαμορφώσεις: FSK, MSK, GFSK, GMSK, LoRa, OOK
- Διεπαφή SPI για επικοινωνία με την MCU
- Ισχύς μετάδοσης: +20dBm
- Ευαισθησία δέκτη:
 - -139 dBm LoRa 62.5 Khz SF12 146 bps

- -136 dBm LoRa 125 Khz SF12 293 bps
- -118 dBm LoRa 125 Khz SF6 9380 bps
- -123 dBm FSK 5 Khz 1.2 Kbps
- -117 dBm FSK 5 Khz 4.8 Kbps
- -110 dBm FSK 20 Khz 38.4 Kbps
- FIFO: 64 Bytes
- Data rate:
 - FSK: 1.2 K~300 Kbps
 - LoRa: 0.018 K~37.5 Kbps
- Συχνότητα λειτουργίας: 868 MHz – 915 MHz
- Λειτουργία RSSI (Received Signal Strength Indication) [49]

Gateway TTN-GW-868

Για την επίτευξη της επικοινωνίας των συσκευών κόμβων στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων απαιτείται η χρήση μιας συσκευής πύλης (gateway). Για τους σκοπούς της εργασίας, και καθώς δεν υπήρχε διαθέσιμη συσκευή gateway στο χώρο της σχολής, αγοράστηκε μέσω του εργαστηρίου η συσκευή TTN-GW-868 (Εικόνα 70). Το συγκεκριμένο μοντέλο, όπως φαίνεται και από την ονομασία του, λειτουργεί στη συχνότητα 868 MHz του LoRaWAN.



Εικόνα 70. Η συσκευή TTN-GW-868

Η συσκευή διαθέτει ενσωματωμένα μικροτσίπ LoRa, Wifi, Bluetooth 4.2 και Ethernet PHY, επομένως μπορεί να επικοινωνεί με συσκευές μέσω των πρωτοκόλλων LoRa

και Bluetooth, ενώ μπορεί να συνδεθεί στο διαδίκτυο είτε μέσω Wifi είτε μέσω της θύρας Ethernet. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα εύρη συχνότητας και μετάδοσης της συσκευής.

Πίνακας 6. *Εύρη συχνότητας και μετάδοσης για το LoRaWAN, Wifi και Bluetooth [50]*

	Frequency Range	Maximum TX Range
LoRaWAN 868 MHz	863 to 870 MHz	14 dBm
802.11.b/g/n Wireless LAN	2.412 to 2.472 GHz	20.7 dBm
Bluetooth 4.2	2.402 to 2.480 GHz	3 dBm

Χαρακτηριστικά gateway:

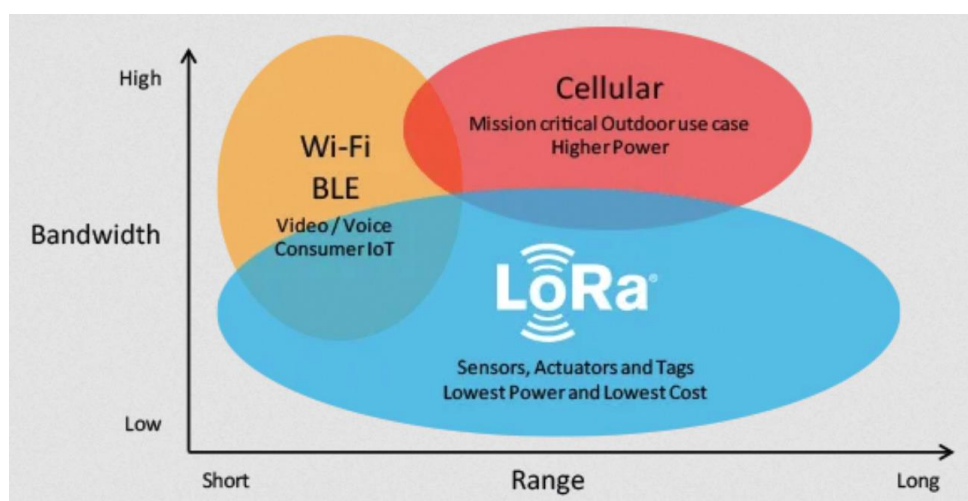
- MCU Microchip: PIC32
- Τάση / Ρεύμα εξωτερικής τάσης: 12 V / 2 A
- LoRa Microchip: LoRa 868/915 Gateway Module
- Συχνότητα LoRaWAN: 868 MHz
- Bluetooth Microchip: Bluetooth 4.2 LE Module
- Διαστάσεις: 210 x 210 x 32 mm
- Κόστος: 308.12 €

3.1.3 LoRaWAN

Το LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο Media Access Control - MAC χτισμένο πάνω στη διαμόρφωση LoRa. Είναι ένα επίπεδο λογισμικού που ορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι συσκευές χρησιμοποιούν το υλικό LoRa, για παράδειγμα όταν μεταδίδουν, και τη μορφή των μηνυμάτων. Το LoRa είναι μια τεχνική ασύρματης διαμόρφωσης που προέρχεται από την τεχνολογία Chirp Spread Spectrum (CSS). Κωδικοποιεί πληροφορίες σε ραδιοκύματα χρησιμοποιώντας παλμούς κελαηδίσματος (chirps) - παρόμοιο με τον τρόπο που επικοινωνούν τα δελφίνια και οι νυχτερίδες. Το LoRa είναι ιδανικό για εφαρμογές που μεταδίδουν μικρά κομμάτια δεδομένων με χαμηλό ρυθμό bit. Τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν σε μεγαλύτερη εμβέλεια σε

σύγκριση με τεχνολογίες όπως WiFi, Bluetooth ή ZigBee και είναι ανθεκτικό έναντι διαταραχών. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το LoRa κατάλληλο για αισθητήρες και ενεργοποιητές που λειτουργούν σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Το LoRa μπορεί να λειτουργήσει σε sub-gigahertz ζώνες χωρίς άδεια, για παράδειγμα, 915 MHz, 868 MHz και 433 MHz. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει στα 2,4 GHz για να επιτύχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με τις sub-gigahertz ζώνες, με κόστος στην εμβέλεια. Αυτές οι συχνότητες εμπίπτουν σε ζώνες ISM που δεσμεύονται διεθνώς για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς [51].

Το πρωτόκολλο LoRaWAN αναπτύσσεται και διατηρείται από τη LoRa Alliance. Η πρώτη προδιαγραφή LoRaWAN κυκλοφόρησε τον Ιανουάριο του 2015. Είναι κατάλληλο για τη μετάδοση ωφέλιμων φορτίων μικρού μεγέθους (όπως δεδομένα αισθητήρων) σε μεγάλες αποστάσεις. Η διαμόρφωση LoRa παρέχει ένα σημαντικά μεγαλύτερο εύρος επικοινωνίας με χαμηλό εύρος ζώνης από άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ορισμένες τεχνολογίες πρόσβασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασύρματη μετάδοση δεδομένων και το αναμενόμενο εύρος μετάδοσης σε σχέση με το εύρος ζώνης. Στην Εικόνα 71 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του εύρους και του bandwidth του LoRa σε σύγκριση με άλλα ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας του IoT.



Εικόνα 71. Το εύρος και το bandwidth του LoRa σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας [51]

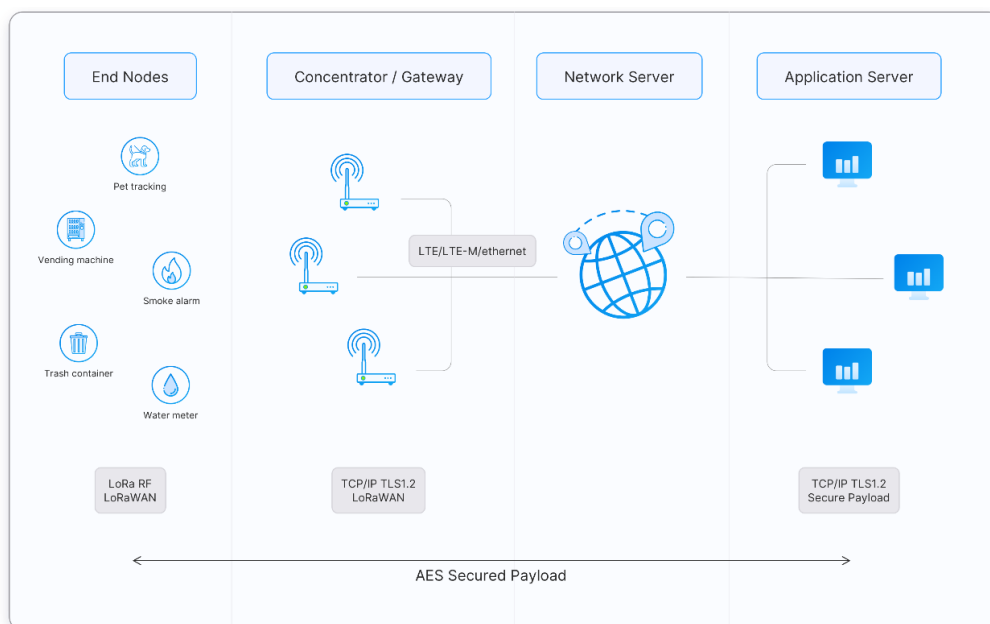
Πλεονεκτήματα του LoRaWAN:

- **Εξαιρετικά χαμηλή ισχύς:** Οι συσκευές LoRaWAN είναι βελτιστοποιημένες για να λειτουργούν σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης και μπορούν να διαρκέσουν έως και 10 χρόνια με μία μπαταρία σε σχήμα νομίσματος.
- **Μεγάλη εμβέλεια:** Οι πύλες LoRaWAN μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα σε απόσταση άνω των 10 χιλιομέτρων σε αγροτικές περιοχές και έως 3 χιλιομέτρων σε πυκνές αστικές περιοχές.
- **Βαθιά διείσδυση σε εσωτερικούς χώρους:** Τα δίκτυα LoRaWAN μπορούν να παρέχουν βαθιά κάλυψη εσωτερικών χώρων και να καλύπτουν εύκολα πολυώροφα κτίρια.
- **Φάσμα χωρίς άδεια χρήσης:** Δεν χρειάζεται η πληρωμή ακριβών τελών άδειας χρήσης φάσματος συχνοτήτων για την ανάπτυξη ενός δικτύου LoRaWAN.
- **Γεωγραφική τοποθεσία:** Ένα δίκτυο LoRaWAN μπορεί να προσδιορίσει τη θέση των τελικών συσκευών χρησιμοποιώντας τριγωνισμό χωρίς την ανάγκη GPS. Μια συσκευή LoRa μπορεί να εντοπιστεί εάν τουλάχιστον τρεις πύλες λάβουν το σήμα της.
- **Υψηλή χωρητικότητα:** Οι διακομιστές δικτύου LoRaWAN χειρίζονται εκατομμύρια μηνύματα από χιλιάδες πύλες.
- **Δημόσια και ιδιωτική ανάπτυξη:** Είναι εύκολο να αναπτυχθούν δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα LoRaWAN χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό (πύλες, τελικές συσκευές, κεραιές) και λογισμικό.
- **Ασφάλεια end-to-end:** Το LoRaWAN διασφαλίζει ασφαλή επικοινωνία μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή εφαρμογών χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση AES-128.
- **Ενημερώσεις υλικολογισμικού over the air:** Ενημέρωση εξ αποστάσεως του υλικολογισμικού για μία μόνο τελική συσκευή ή ομάδα τελικών συσκευών.
- **Περιοδωγή:** Οι τελικές συσκευές LoRaWAN μπορούν να πραγματοποιούν απρόσκοπτη μεταβίβαση από το ένα δίκτυο στο άλλο.
- **Χαμηλό κόστος:** Ελάχιστη υποδομή, χαμηλού κόστους τερματικοί κόμβοι και λογισμικό ανοιχτού κώδικα.

- Πρόγραμμα πιστοποίησης: Το πρόγραμμα πιστοποίησης LoRa Alliance πιστοποιεί τις τελικές συσκευές και παρέχει στους τελικούς χρήστες τη σιγουριά ότι οι συσκευές είναι αξιόπιστες και συμβατές με τις προδιαγραφές LoRaWAN.
- Οικοσύστημα: Το LoRaWAN διαθέτει ένα πολύ μεγάλο οικοσύστημα κατασκευαστών συσκευών, κατασκευαστών πυλών, κατασκευαστών κεραιών, παρόχων υπηρεσιών δικτύου και προγραμματιστών εφαρμογών [51].

Αρχιτεκτονική του LoRaWAN

Τα δίκτυα LoRaWAN αναπτύσσονται σε μια τοπολογία star-of-stars. Ένα τυπικό δίκτυο LoRaWAN (Εικόνα 72) αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:



Εικόνα 72. Η αρχιτεκτονική του LoRaWAN [52]

- End Devices: αισθητήρες ή ενεργοποιητές στέλνουν ασύρματα μηνύματα με διαμόρφωση LoRa στις πύλες ή λαμβάνουν μηνύματα ασύρματα πίσω.
- Gateways: λαμβάνουν τα μηνύματα από τις τελικές συσκευές και τα προωθούν στον server του δικτύου.
- Network Server: ένα κομμάτι λογισμικού που εκτελείται σε διακομιστή που διαχειρίζεται ολόκληρο το δίκτυο.
- Application Server: ένα κομμάτι λογισμικού που εκτελείται σε έναν διακομιστή που είναι υπεύθυνος για την ασφαλή επεξεργασία δεδομένων εφαρμογής.

- Join Server: ένα κομμάτι λογισμικού που εκτελείται σε διακομιστή που επεξεργάζεται μηνύματα αιτήματος σύνδεσης που αποστέλλονται από τελικές συσκευές (Ο join server δεν εμφανίζεται στην παραπάνω εικόνα) [52].

Παράμετροι περιοχών

Το LoRaWAN λειτουργεί στο ραδιοφάσμα χωρίς άδεια. Αυτό σημαίνει ότι ο καθένας μπορεί να χρησιμοποιήσει τις ραδιοσυχνότητες χωρίς να χρειάζεται να πληρώσει τέλη για δικαιώματα μετάδοσης. Είναι παρόμοιο με το WiFi, το οποίο χρησιμοποιεί τις ζώνες ISM 2,4 GHz και 5 GHz παγκοσμίως. Το LoRaWAN χρησιμοποιεί χαμηλότερες ραδιοσυχνότητες με μεγαλύτερη εμβέλεια. Το γεγονός ότι οι συχνότητες έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια συνοδεύεται επίσης από περισσότερους περιορισμούς που συχνά αφορούν την εκάστοτε χώρα. Ως αποτέλεσμα, το LoRaWAN καθορίζεται για έναν αριθμό ζωνών για αυτές τις περιοχές. Αυτές οι ζώνες είναι αρκετά παρόμοιες ώστε να υποστηρίζουν ένα αγνωστικό πρωτόκολλο περιοχής, αλλά έχουν μια σειρά από συνέπειες για την υλοποίηση των συστημάτων υποστήριξης. Υπάρχουν οι ευρωπαϊκές ζώνες (EU863-870, EU433), η αμερικάνικη ζώνη (US902-928), οι κινέζικες ζώνες (CN779-787, CN470-510) κ.α. Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή της EU863-870 ζώνης, που αφορά τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [53].

Η ζώνη EU863-870 μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή όπου η χρήση ραδιοφάσματος ορίζεται από το πρότυπο ETSI [EN300.220]. Η ζώνη EU863-870 χρησιμοποιείται σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες και σε ορισμένες χώρες εκτός Ευρώπης, για παράδειγμα, το Μπαχρέιν (BH), που βρίσκεται στη Μέση Ανατολή. Η ζώνη EU863-870 υποδηλώνει ότι η ζώνη συχνοτήτων κυμαίνεται μεταξύ 863 και 870 MHz, αλλά ορισμένες χώρες χρησιμοποιούν ελαφρώς διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων. Για παράδειγμα, η Αλβανία (AL) χρησιμοποιεί 863-873 MHz. Τα ακόλουθα τρία προεπιλεγμένα κανάλια 868.10, 868.30, 868.50 με Bandwidth στα 125 kHz πρέπει να είναι ενσωματωμένα σε κάθε τελική συσκευή που υποστηρίζει τη ζώνη EU863-870. Αυτά τα κανάλια χρησιμοποιούνται από την τελική συσκευή για τη μετάδοση του μηνύματος Join-request. Η τελική συσκευή επιλέγει τυχαία ένα από τα προεπιλεγμένα κανάλια για να στείλει το μήνυμα Join-request. Για συσκευές συμβατές με την έκδοση LoRaWAN 1.0.x, αυτά τα τρία προεπιλεγμένα κανάλια δεν πρέπει να τροποποιηθούν, αλλά για συσκευές που είναι συμβατές με την έκδοση

LoRaWAN 1.1 και μεταγενέστερη, αυτά τα κανάλια μπορούν να τροποποιηθούν μέσω της εντολής NewChannelReq. Η ζώνη EU863-870 υποστηρίζει έως και 16 κανάλια. Κατά την ενεργοποίηση της τελικής συσκευής ενδέχεται να καθοριστούν πρόσθετα κανάλια. Για παράδειγμα, το The Things Network χρησιμοποιεί τις ακόλουθες 5 επιπλέον συχνότητες για uplink 867.1, 867.3, 867.5, 867.7, 867.9 MHz. Για downlink, το The Things Network χρησιμοποιεί μία επιπλέον σταθερή συχνότητα για την υποδοχή λήψης RX2, την 869.525 MHz στο DR0 (SF12 / 125 kHz) [53].

Duty Cycle

Ο κύκλος λειτουργίας υποδεικνύει το κλάσμα του χρόνου που ένας πόρος είναι απασχολημένος. Όταν μια μεμονωμένη συσκευή εκπέμπει σε ένα κανάλι για 2 μονάδες χρόνου κάθε 10 μονάδες χρόνου, αυτή η συσκευή έχει κύκλο λειτουργίας 20%, όπως φαίνεται στην Εικόνα 73.



Εικόνα 73. Παράδειγμα 20 % duty cycle [54]

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) ορίζει τον μέγιστο κύκλο λειτουργίας (duty cycle) για τη συχνότητα EU863-870 στο 1%, που είναι ο μέγιστος χρόνος επικοινωνίας μιας συσκευής. Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού του χρόνου on-air που επιτρέπεται ανά ημέρα (24 ώρες), ανά συσκευή για ορισμένους κοινούς κύκλους λειτουργίας.

Πίνακας 7. Επιτρεπόμενος χρόνος time-on-air ανά ημέρα ανά συσκευή για κάποιες τιμές duty cycle [53]

Duty cycle (maximum)	Equation: Time-On-Air = number of seconds per day X duty cycle	Maximum allowed Time-On-Air per day, per device
0.1%	$86400 \times 0.1\%$	86 seconds per day
1%	$86400 \times 1\%$	864 seconds per day
10%	$86400 \times 10\%$	8640 seconds per day

Στο δημόσιο δίκτυο της κοινότητας του Things Network ισχύει η Πολιτική Δίκαιης Χρήσης (Fair Use Policy) που περιορίζει τον χρόνο επικοινωνίας σε 30 δευτερόλεπτα

την ημέρα (24 ώρες) ανά κόμβο για uplink μηνύματα και σε 10 μηνύματα την ημέρα (24 ώρες) ανά κόμβο για μηνύματα downlink. Στο ιδιωτικό δίκτυο, αυτά τα όρια δεν ισχύουν, αλλά πρέπει να υπάρχει συμμόρφωση με τα κυβερνητικά όρια και τα όρια του LoRaWAN [54].

Data Rate & Spreading Factor

Ο ρυθμός δεδομένων (data rate) είναι ο αριθμός των bit που μεταδίδονται ανά μονάδα χρόνου. Με τη διαμόρφωση LoRa, ο ρυθμός δεδομένων εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες όπως ο συντελεστής διασποράς (spreading factor), το εύρος ζώνης (bandwidth) και ο ρυθμός κωδικοποίησης. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τον ρυθμό μετάδοσης bit για κάθε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (DR0 - DR6) που έχει διαμορφωθεί με τον συντελεστή διασποράς και το εύρος ζώνης.

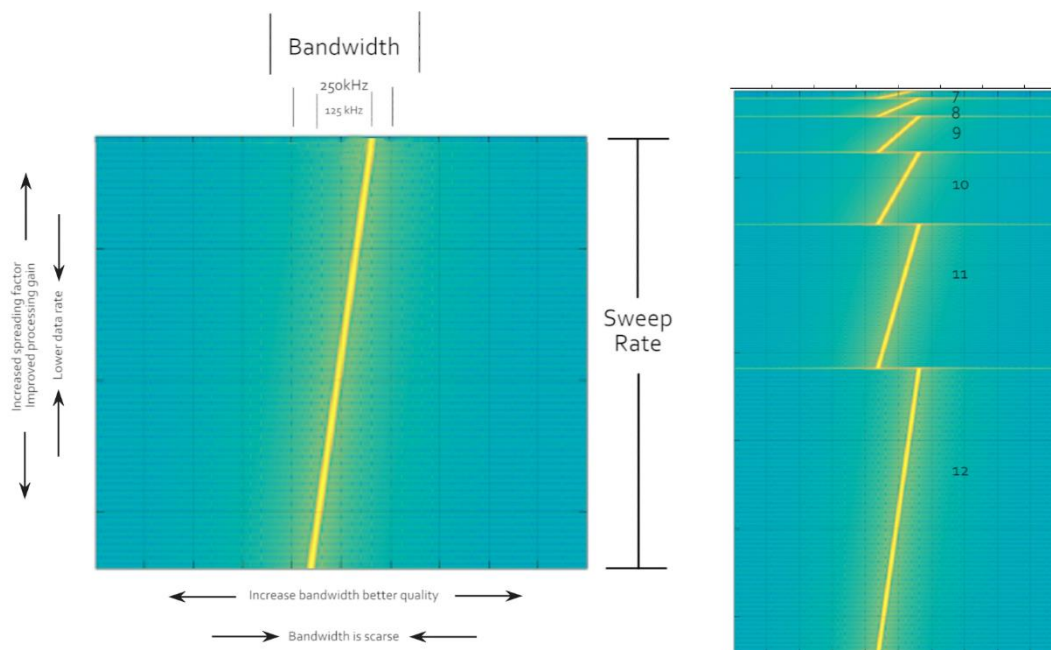
Πίνακας 8. Τιμές bit rate για διάφορες τιμές spreading factor και bandwidth [53]

Data Rate	Configuration (SF + BW)	Bit rate (bit/s)
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	11000

Οι υψηλότεροι συντελεστές διασποράς προκαλούν χαμηλότερους ρυθμούς bit και οι χαμηλότεροι συντελεστές διασποράς προκαλούν υψηλότερους ρυθμούς bit. Ωστόσο, για τον ίδιο συντελεστή διασποράς, εάν το εύρος ζώνης διπλασιαστεί, ο ρυθμός δεδομένων διπλασιάζεται επίσης.

Το LoRa βασίζεται στην τεχνολογία Chirp Spread Spectrum (CSS), όπου τα chirps (γνωστά και ως σύμβολα) είναι ο φορέας δεδομένων. Ο συντελεστής διασποράς ελέγχει τον ρυθμό των chirp και επομένως ελέγχει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Χαμηλότεροι συντελεστές διασποράς σημαίνουν ταχύτερα chirps και συνεπώς υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Για κάθε αύξηση του συντελεστή

διασποράς, ο ρυθμός σάρωσης (sweep rate) chirp μειώνεται στο μισό και έτσι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μειώνεται στο μισό [51], όπως φαίνεται και στην Εικόνα 74.



Εικόνα 74. Αριστερά: Παράδειγμα ενός chirp με bandwidth 250 kHz. Δεξιά: Η διάρκεια των chirp για διαφορετικές τιμές spreading factor [55]

Οι χαμηλότεροι συντελεστές διασποράς μειώνουν το εύρος των εκπομπών LoRa, επειδή μειώνουν το κέρδος επεξεργασίας και αυξάνουν τον ρυθμό μετάδοσης bit. Η αλλαγή του συντελεστή διασποράς επιτρέπει στο δίκτυο να αυξάνει ή να μειώνει τον ρυθμό δεδομένων για κάθε τελική συσκευή με κόστος εμβέλειας. Το δίκτυο χρησιμοποιεί επίσης συντελεστές διασποράς για τον έλεγχο της συμφόρησης. Οι συντελεστές διασποράς είναι ορθογώνιοι, επομένως τα σήματα που διαμορφώνονται με διαφορετικούς συντελεστές διασποράς και μεταδίδονται στο ίδιο κανάλι συχνότητας την ίδια στιγμή δεν παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Η διαμόρφωση LoRa έχει συνολικά 6 συντελεστές διασποράς από SF7 σε SF12. Οι παράγοντες διασποράς επηρεάζουν τον ρυθμό δεδομένων, το χρόνο μετάδοσης, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την ευαισθησία του δέκτη, όπως περιγράφεται παρακάτω [56].

Data Rate

Σε σύγκριση με έναν υψηλότερο συντελεστή διασποράς, ένας χαμηλότερος συντελεστής διασποράς παρέχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης bit για σταθερό εύρος

ζώνης και ρυθμό κωδικοποίησης. Για παράδειγμα, το SF7 παρέχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης bit από το SF12. Ο διπλασιασμός του εύρους ζώνης διπλασιάζει επίσης τον ρυθμό μετάδοσης bit για σταθερό συντελεστή διασποράς και ρυθμό κωδικοποίησης.

Απόσταση

Μεγαλύτεροι συντελεστές διασποράς σημαίνουν μεγαλύτερο κέρδος επεξεργασίας, και έτσι ένα σήμα που διαμορφώνεται με μεγαλύτερο συντελεστή διασποράς μπορεί να ληφθεί με λιγότερα σφάλματα σε σύγκριση με ένα σήμα με χαμηλότερο συντελεστή διασποράς και επομένως να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Για παράδειγμα, ένα σήμα που διαμορφώνεται με το SF12 μπορεί να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση από ένα σήμα που διαμορφώνεται με το SF7

Time-On-Air

Σε σύγκριση με έναν χαμηλότερο συντελεστή διασποράς, η αποστολή σταθερού όγκου δεδομένων (ωφέλιμο φορτίο) με υψηλότερο συντελεστή διασποράς και σταθερό εύρος ζώνης απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο σε λειτουργία.

Ευαισθησία δέκτη

Οι υψηλότεροι συντελεστές διασποράς παρέχουν υψηλότερη ευαισθησία του δέκτη. Συνήθως, το LoRa χρησιμοποιεί υψηλότερους συντελεστές διασποράς όταν το σήμα είναι αδύναμο. Ο Πίνακας 9 δείχνει πώς οι συντελεστές διασποράς επηρεάζουν την ευαισθησία του δέκτη.

Πίνακας 9. Η ευαισθησία του δέκτη για διάφορες τιμές spreading factor [56]

Spreading factor	Receiver sensitivity for bandwidth at 125 kHz
SF7	-123 dBm
SF8	-126 dBm
SF9	-129 dBm
SF10	-132 dBm
SF11	-134.5 dBm
SF12	-137 dBm

Διάρκεια ζωής μπαταρίας

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μιας τελικής συσκευής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον συντελεστή διασποράς που χρησιμοποιείται. Οι υψηλότεροι συντελεστές διασποράς έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους ενεργοποίησης για τους πομποδέκτες ραδιοφώνου και μικρότερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Μέγιστο EIRP / ERP

Η αποτελεσματική ιστροπική ισχύς ακτινοβολίας (EIRP) είναι η συνολική ισχύς που εκπέμπεται από μια ιστροπική κεραία σε μία μόνο κατεύθυνση. Το κέρδος κεραίας εκφράζεται σε dBi για ισότροπες κεραίες. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη λίστα των τιμών EIRP που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση δεδομένων.

Πίνακας 10. Τιμές EIRP ανάλογα την ισχύ του πομπού [53]

TX Power	EIRP	Calculated value
0	Max EIRP	+16 dBm
1	Max EIRP - 2 dB	+16 dBm - 2 dB = +14 dBm
2	Max EIRP - 4 dB	+16 dBm - 4 dB = +12 dBm
3	Max EIRP - 6 dB	+16 dBm - 6 dB = +10 dBm
4	Max EIRP - 8 dB	+16 dBm - 8 dB = +8 dBm
5	Max EIRP - 10 dB	+16 dBm - 10 dB = +6 dBm
6	Max EIRP - 12 dB	+16 dBm - 12 dB = +4 dBm
7	Max EIRP - 14 dB	+16 dBm - 14 dB = +2 dBm

Το μέγιστο EIRP για το EU863-870 είναι +16dBm. Οι προαναφερθείσες τιμές EIRP και ERP μπορούν επίσης να εκφραστούν σε milliwatt (mW). Για παράδειγμα: +16 dBm = 40 mW, +14 dBm = 25 mW, +27 dBm = 500 mW.

Μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου

Το μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου εφαρμογής (μήκος) ποικίλλει ανάλογα με τον ρυθμό δεδομένων. Ο

Πίνακας 11 δείχνει το μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου εφαρμογής (FRMPayload) για διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων.

Πίνακας 11. Οι μέγιστες τιμές payload για διάφορες τιμές data rate, SF και bandwidth [53]

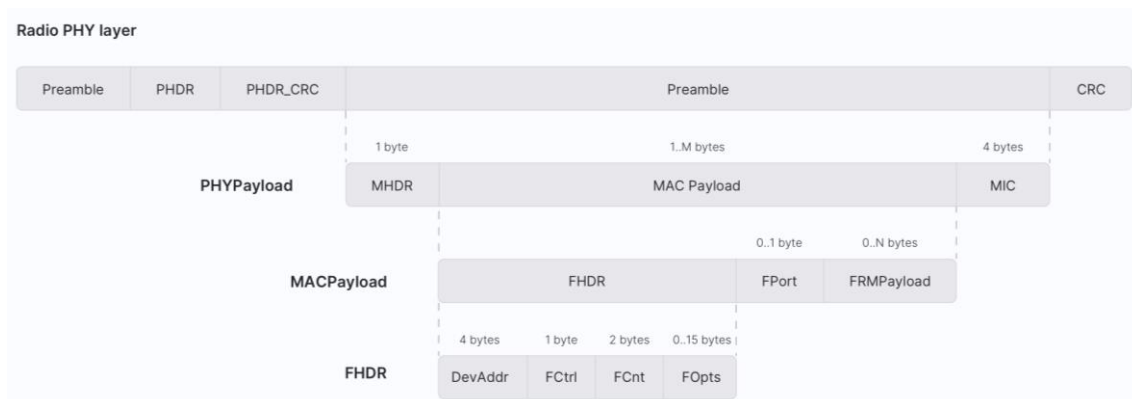
Data Rate	Configuration (SF+BW)	Maximum application payload size (bytes)
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	51
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	51
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	51
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	115
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	242
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	242
6	LoRa: SF7 / 250 kHz	242

Τύποι μηνυμάτων

Τα μηνύματα LoRa μπορούν να χωριστούν σε μηνύματα uplink και downlink (άνω και κάτω ζεύξης) με βάση την κατεύθυνση που ταξιδεύουν.

- Μηνύματα uplink: Τα μηνύματα uplink αποστέλλονται από τελικές συσκευές στον διακομιστή δικτύου που αναμεταδίδονται από μία ή πολλές πύλες. Εάν το μήνυμα uplink ανήκει στον διακομιστή εφαρμογών ή στο διακομιστή σύνδεσης, ο διακομιστής δικτύου το προωθεί στον σωστό δέκτη.
- Μηνύματα downlink: Κάθε μήνυμα downlink αποστέλλεται από τον διακομιστή δικτύου σε μία μόνο τελική συσκευή και αναμεταδίδεται από μία μόνο πύλη. Αυτό περιλαμβάνει ορισμένα μηνύματα που ξεκινούν από τον διακομιστή εφαρμογών και τον διακομιστή σύνδεσης [57].

Υπάρχουν 4 τύποι μηνυμάτων δεδομένων που χρησιμοποιούνται τόσο στο LoRaWAN 1.0.x όσο και στο 1.1. Αυτοί οι τύποι μηνυμάτων δεδομένων χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά τόσο εντολών MAC όσο και δεδομένων εφαρμογής που μπορούν να συνδυαστούν μαζί σε ένα μόνο μήνυμα. Τα μηνύματα δεδομένων μπορούν να επιβεβαιωθούν ή να μην επιβεβαιωθούν. Τα επιβεβαιωμένα μηνύματα δεδομένων πρέπει να επιβεβαιώνονται από τον δέκτη, ενώ τα μη επιβεβαιωμένα μηνύματα δεδομένων δεν χρειάζεται να επιβεβαιώνονται από τον παραλήπτη. Ένα μήνυμα δεδομένων δημιουργείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 75.



Εικόνα 75. Η δομή ενός μηνύματος στο LoRaWAN [57]

Το ωφέλιμο φορτίο MAC των μηνυμάτων δεδομένων αποτελείται από μια κεφαλίδα πλαισίου (FHDR) ακολουθούμενη από ένα προαιρετικό πεδίο θύρας (FPort) και ένα προαιρετικό ωφέλιμο φορτίο πλαισίου (FRMPayload).

7 to 22 bytes	0 to 1 byte	0 to N bytes
FHDR	FPort	FRMPayload

Η κεφαλίδα πλαισίου (FHDR) του ωφέλιμου φορτίου MAC αποτελείται από τα ακόλουθα πεδία [57].

4 bytes	1 byte	2 bytes
DevAddr	FCtrl	FCnt

3.1.4 The Things Network & The Things Stack

Το The Things Network είναι ένα παγκόσμιο οικοσύστημα Internet of Things που δημιουργεί δίκτυα, συσκευές και λύσεις χρησιμοποιώντας το LoRaWAN [58]. Από τον Ιανουάριο του 2021, το The Things Network εκτελεί το The Things Stack Community Edition, μια δωρεάν ανάπτυξη του The Things Stack [59]. Το Things Stack είναι ένας εταιρικός διακομιστής δικτύου LoRaWAN, χτισμένος σε έναν πυρήνα ανοιχτού κώδικα και επιτρέπει τη δημιουργία και τη διαχείριση δικτύων LoRaWAN στο cloud. Το Things Stack αναπτύσσεται και διατηρείται από την The Things Industries, η εταιρεία που είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνη για την ανάπτυξη

του The Things Stack και τη συγγραφή τεκμηρίωσης. Η Things Industries προσφέρει διάφορους τύπους ανάπτυξης του The Things Stack, για παράδειγμα ως διαχειριζόμενη υπηρεσία cloud ή με πρόσθετες ιδιόκτητες λειτουργίες. Προσφέρει επίσης ιδιωτικά δίκτυα LoRaWAN που φιλοξενούνται στο cloud και εντός των εγκαταστάσεων με πρόσθετες επιχειρηματικές δυνατότητες και premium προγράμματα υποστήριξης για εταιρικούς πελάτες [60].

Το Things Stack υποστηρίζει όλες τις κλάσεις LoRaWAN (A, B, C) και τις ομάδες συσκευών πολλαπλής διανομής, όλες τις υπάρχουσες εκδόσεις LoRaWAN (συμπεριλαμβανομένων των v1.0.4 και v1.1) και όλες τις περιφερειακές παραμέτρους όπως ορίζονται από τη LoRa Alliance. Καθώς είναι συμβατό με τα πρότυπα, το The Things Stack υποστηρίζει την παθητική περιαγωγή και θα υποστηρίξει την περιαγωγή παράδοσης στο μέλλον. Αυτή η αναβάθμιση συνοδεύεται από ενημερώσεις υλικολογισμικού over the air και προηγμένες τεχνικές ομαδοποίησης και εξισορρόπησης φορτίου. Τα προηγμένα API προσφέρουν επίσης ενσωματώσεις gRPC, HTTP και MQTT. Για σκοπούς εντοπισμού σφαλμάτων, υπάρχουν ροές συμβάντων που βασίζονται σε API που μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό προβλημάτων, στην παρακολούθηση της συμπεριφοράς της συσκευής και στη λήψη χρήσιμων ειδοποιήσεων. Οι μορφές δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το The Things Stack έχουν διαφορετικό μορφή και έχουν πολύ πιο πλούσια υποστήριξη μεταδεδομένων. Για την αποθήκευση δεδομένων, υπάρχει επίσης διαθέσιμη μια ενσωμάτωση αποθήκευσης [59].

Το Things Stack διατίθεται σε πολλές διαφορετικές μορφές για να καλύψει διάφορες απαιτήσεις. Οι αναπτύξεις που υπάρχουν περιγράφονται παρακάτω:

- Cloud: διακομιστής δικτύου με υποστήριξη SLA (Service Level Agreement) που φιλοξενείται από την The Things Industries
- Dedicated Cloud: όλα τα πλεονεκτήματα του Cloud σε ένα αποκλειστικό cluster
- AWS Launcher: το AWS marketplace διευκολύνει την ανάπτυξη σε νέο ή υπάρχον cluster EC2. Ενσωματώνεται εύκολα με το AWS IoT, ώστε να μπορεί ο χρήστης να χρησιμοποιεί εργαλεία με τα οποία είναι ήδη εξοικειωμένος.
- Enterprise: εγκατάσταση του διακομιστή δικτύου σε third party υλικό, με επαγγελματική υποστήριξη από την The Things Industries.

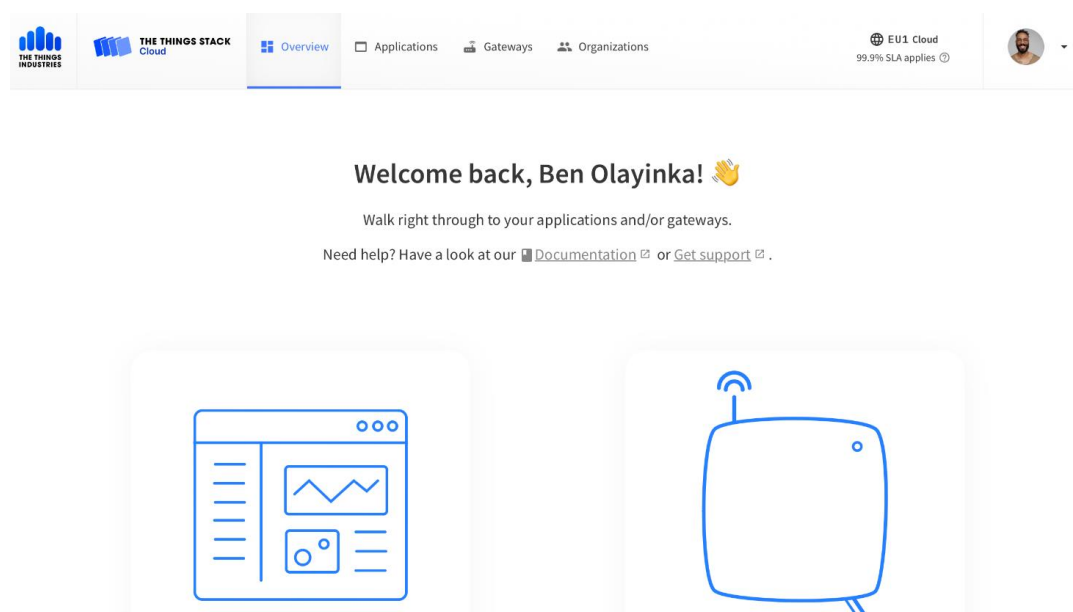
- Community Edition: εκτελείται από το The Things Network, αποτελεί έναν δωρεάν διακομιστή δικτύου και παρέχει το μεγαλύτερο δίκτυο κοινότητας LoRaWAN στον κόσμο.
- Open Source: για χρήστες που ασχολούνται με DIY, ο πυρήνας του The Things Stack είναι ανοιχτού κώδικα. [60].

Το The Things Stack Community Edition είναι μια αναβάθμιση από το προηγούμενο The Things Network V2, το οποίο συνοδεύεται από ένα σύνολο ολοκαίνουργιων δυνατοτήτων, integrations out-of-the-box, εκτεταμένη κάλυψη και βελτιωμένη εμπειρία χρήστη. Το Things Stack Community Edition προσφέρει έναν δωρεάν και φιλικό προς τους προγραμματιστές τρόπο εξοικείωσης με την τεχνολογία LoRaWAN, παρέχοντας ένα δημόσιο δίκτυο κοινότητας LoRaWAN, το οποίο ξεκίνησε από την The Things Industries και υποστηρίζεται από 100k+ μέλη της κοινότητας του The Things Network σε περισσότερες από 100 χώρες σε όλο τον κόσμο. Το Things Stack, σε σύγκριση με το The Things Network V2, είναι πιο επεκτάσιμο, πιο ασφαλές και υποστηρίζει όλες τις τελευταίες εξελίξεις LoRaWAN, όπως τις τελευταίες εκδόσεις LoRaWAN 1.1 και 1.0.4. Η αρχιτεκτονική του Things Stack βασίζεται σε μικροϋπηρεσίες που επιτρέπουν την καλύτερη διανομή των υπηρεσιών, την καλύτερη κλιμάκωση και τη διαλειτουργικότητα με άλλα δίκτυα LoRaWAN [59]. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση των πόρων του The Things Stack Community Edition, καθώς αποτελεί μια δωρεάν λύση για τη δημιουργία και την ανάπτυξη λύσεων IoT βασισμένες στο LoRaWAN. Παρακάτω αναλύονται κάποια χαρακτηριστικά του The Things Stack Community Edition.

Console

Η Κονσόλα (Εικόνα 76) είναι η εφαρμογή διαχείρισης του The Things Stack για το LoRaWAN. Είναι μια εφαρμογή web που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταχώρηση εφαρμογών, τελικών συσκευών ή πυλών, την παρακολούθηση της κυκλοφορίας του δικτύου ή τη διαμόρφωση επιλογών που σχετίζονται με το δίκτυο κτλ. Παρόλο που η διεπαφή ιστού του The Things Stack (η Κονσόλα) υποστηρίζει προς το παρόν όλες τις βασικές δυνατότητες του The Things Stack, για πιο προηγμένες ενέργειες, υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης της διεπαφής της γραμμής εντολών (CLI) [61]. Στην παρούσα εργασία, μέσω της κονσόλας, πραγματοποιήθηκε

η καταχώρηση του The Things Gateway, η δημιουργία της εφαρμογής, η προσθήκη της τελικής συσκευής (του μικροελεγκτή με τους αισθητήρες και η ενεργοποίησή της μέσω του αέρα (over-the-air activation – OTAA, που αποτελεί έναν ασφαλή και επεκτάσιμος τρόπος για την ενεργοποίηση συσκευών LoRaWAN.



Εικόνα 76. Το περιβάλλον της κονσόλας του *The Things Stack*

Clusters

Η Things Stack Community Edition (που εκτελείται από το The Things Network) είναι μια ανάπτυξη πολλαπλών συμπλεγμάτων (clusters). Αυτό σημαίνει ότι ενώ οι πληροφορίες του λογαριασμού αποθηκεύονται σε μια κεντρική τοποθεσία, η σύνδεση των πυλών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα πιο κοντινό σύμπλεγμα και να δρομολογηθεί όλη η επισκεψιμότητα του IoT σε αυτό το σύμπλεγμα. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά την καθυστέρηση, επειδή η κίνηση (traffic) δεν θα χρειάζεται να διασχίσει τον μισό πλανήτη [58]. Το The Things Stack Community Edition έχει αυτήν τη στιγμή τα ακόλουθα συμπλέγματα:

Πίνακας 12. Τα διαθέσιμα cluster του *The Things Stack Community Edition*

Cluster ID	Name	Location
au1	Australia 1	Sydney, Australia
eu1	Europe 1	Ireland
nam1	North America 1	California, USA

Integrations

Το The Things Stack προσφέρει τη δυνατότητα προσθήκης εφαρμογών, δημιουργίας integration με πολλές δημοφιλείς πλατφόρμες cloud, τους ενσωματωμένους διακομιστές Webhooks και MQTT και πολλά άλλα [62]. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των διαθέσιμων integration.

Cloud Integration

Οι περισσότερες ενσωματώσεις Cloud είναι ενεργοποιημένες μόνο για μηνύματα ανοδικής ζεύξης από προεπιλογή. Το TTS έχει τη δυνατότητα integration με πολλές cloud πλατφόρμες όπως το AWS IoT, Azure IoT Hub, Akenza Core, AllThingsTalk Maker, thethings.iO, ThingsBoard κ.α [62].

MQTT Server

Το The Things Stack εκθέτει έναν διακομιστή MQTT για να λειτουργεί με συμβάντα ροής. Υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι MQTT πελάτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση στον διακομιστή The Things Stack MQTT. Για τη χρήση του διακομιστή MQTT, απαιτείται η δημιουργία ενός νέου κλειδιού API για έλεγχο ταυτότητας [62].

Pub/Sub

Το integration Pub/Sub επιτρέπει στον διακομιστή εφαρμογών να κάνει pub και sub σε topics, χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο MQTT client ή το NATS client του The Things Stack [62].

LoRa Cloud

Η πλατφόρμα LoRa Cloud προσφέρει API που επιτρέπουν απλές λύσεις για κοινές εργασίες που σχετίζονται με τα δίκτυα LoRaWAN και συσκευές που βασίζονται σε LoRa. Το The Things Stack υποστηρίζει ενσωματώσεις με LoRa Cloud Device & Application Services και LoRa Cloud Geolocation API [62].

Node-RED

Το Node-RED είναι ένα δωρεάν εργαλείο ανάπτυξης βασισμένο σε JavaScript για οπτικό προγραμματισμό, που αναπτύχθηκε για να διευκολύνει τη διαδικασία

σύνδεσης συσκευών υλικού, API και διαδικτυακών υπηρεσιών. Ο διακομιστής MQTT που εκτίθεται από το The Things Stack μπορεί να συνδεθεί στο Node-RED. Αυτό το integration επιτρέπει τη ρύθμιση μιας ροής Node-RED που ακούει συμβάντα και μηνύματα uplink και είναι επίσης δυνατός ο προγραμματισμός μηνυμάτων downlink [62].

IFTTT

Το IFTTT είναι μια υπηρεσία που δημιουργεί αλυσίδες conditional εντολών, που ονομάζονται μικροεφαρμογές (applets), οι οποίες μπορούν να ενεργοποιηθούν από τα συμβάντα που συμβαίνουν σε διάφορες υπηρεσίες web. Αυτές οι μικροεφαρμογές συνδέουν πολλαπλές εφαρμογές για την εκτέλεση αυτοματοποιημένων εργασιών [62].

Payload formatters

Οι μορφοποιητές δεδομένων (Payload formatters) επιτρέπουν τη επεξεργασία δεδομένων από και προς τελικές συσκευές. Αυτό είναι χρήσιμο για τη μετατροπή δυαδικών δεδομένων payload σε πεδία αναγνώσιμα από τον άνθρωπο ή για την πραγματοποίηση οποιουδήποτε άλλου είδους μετατροπής δεδομένων σε uplinks και downlinks [62].

Storage Integration

Το integration αποθηκευτικού χώρου επιτρέπει την αποθήκευση των ληφθέντων μηνυμάτων σε μια μόνιμη βάση δεδομένων και την ανάκτησή τους σε μεταγενέστερο χρόνο. Η ενσωμάτωση αποθήκευσης υλοποιείται ως πακέτο εφαρμογών και μπορεί να ενεργοποιηθεί ανά εφαρμογή ή τελική συσκευή. Το Storage Integration εκτελείται στον διακομιστή εφαρμογών και παρακολουθεί το upstream traffic (join requests, data uplink message, data downlink message κτλ). Όταν λαμβάνεται ένα μήνυμα upstream από μια τελική συσκευή για την οποία έχει διαμορφωθεί το integration, τα δεδομένα του μηνύματος (Payload, FPort, Decoded Fields, καθώς και όλα τα σχετικά μεταδεδομένα) εγγράφονται σε μια μόνιμη βάση δεδομένων [62].

Webhooks

Η δυνατότητα Webhooks επιτρέπει στο The Things Stack να στέλνει μηνύματα σχετικά με την εφαρμογή σε συγκεκριμένα τελικά σημεία HTTP(S). Τα Webhooks

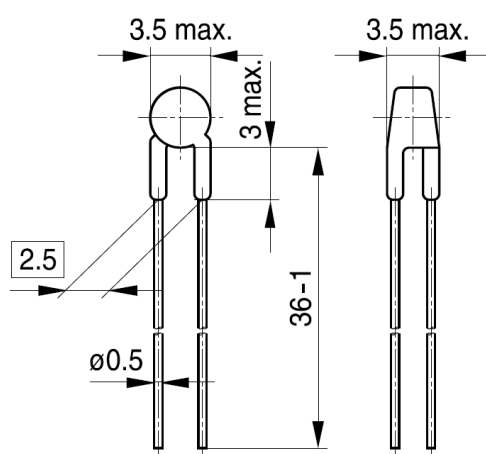
μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία integration μεταξύ του The Things Stack και οποιασδήποτε third party υπηρεσίας. Για παράδειγμα, το The Things Stack μπορεί να στέλνει ένα webhook κάθε φορά που λαμβάνεται ένα μήνυμα uplink, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να οπτικοποιηθεί σε ένα εξωτερικό dashboard [62].

3.2 Πειραματική διαδικασία

3.2.1 Ανάλυση λειτουργίας και βαθμονόμηση των αισθητήρων

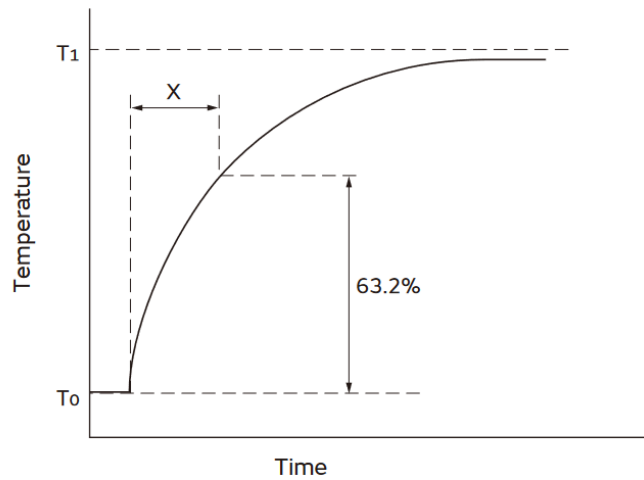
Αισθητήρας θερμοκρασίας NTC θερμίστορ

Το αισθητήριο στοιχείο του NTC θερμίστορ είναι η αντίστασή του, η οποία μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία με αρνητικό συντελεστή, δηλαδή όσο αυξάνεται η θερμοκρασία η αντίσταση μειώνεται και το αντίστροφο. Στην Εικόνα 77 φαίνονται οι διαστάσεις ενός τυπικού θερμίστορ με απόσταση 2,5 mm ανάμεσα στις ακίδες μολύβδου.



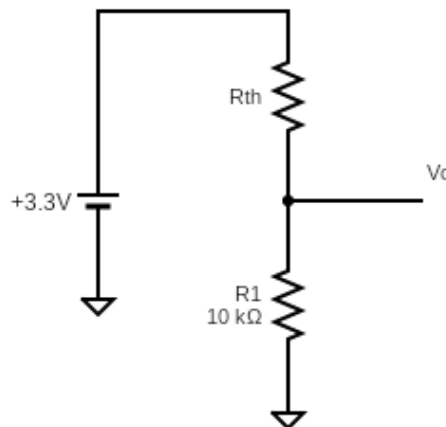
Εικόνα 77. Διαστάσεις ενός 2,5 mm θερμίστορ [63]

Στην Εικόνα 78 φαίνεται η σταθερά θερμικού χρόνου, δηλαδή το χρονικό διάστημα το οποίο χρειάζεται ένα θερμίστορ για να αλλάξει η θερμοκρασία του στο 63,2 % της τιμής ανάμεσα σε δύο θερμοκρασίες T_0 και T_1 .



Εικόνα 78. Σταθερά θερμικού χρόνου [64]

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας με το NTC θερμίστορ χρειάζεται αρχικά να γίνει γνωστή η αντίσταση του θερμίστορ. Γι' αυτό το λόγο, και καθώς ο μικροελεγκτής δεν έχει κάποιο ενσωματωμένο μετρητή αντίστασης, χρησιμοποιείται ένας διαιρέτης τάσης με τη χρήση μιας γνωστής αντίστασης για την μέτρηση της τάσης στα άκρα του θερμίστορ. Η τιμή της γνωστής αντίστασης που χρησιμοποιείται είναι ίση με την τιμή του θερμίστορ σε θερμοκρασία δωματίου, δηλαδή 10 kΩ. Το κύκλωμα του διαιρέτη τάσης φαίνεται στην Εικόνα 79.



Εικόνα 79. Κύκλωμα διαιρέτη τάσης

Η τάση V_o στα άκρα του θερμίστορ δίνεται από τη σχέση

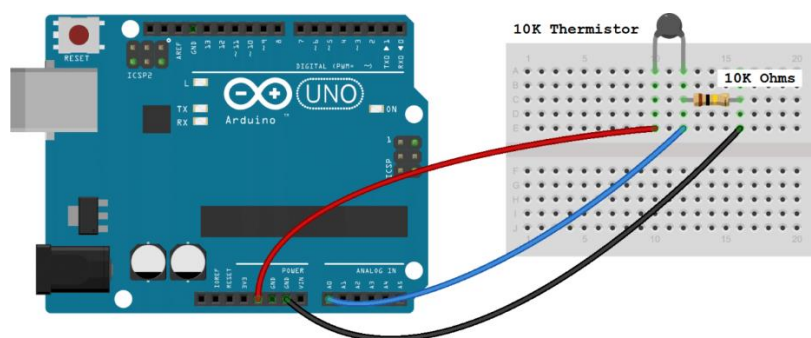
$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_{TH}} \times 3,3V \quad (3.2.1)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί και στην παρακάτω μορφή:

$$R_{TH} = R_1 \cdot \frac{3,3V - V_o}{V_o} \quad (3.2.2)$$

Επομένως, εάν είναι γνωστή η τιμή της τάσης στα άκρα του θερμίστορ, μπορεί να υπολογιστεί η αντίστασή του.

Η συνδεσμολογία του NTC θερμίστορ με έναν μικροελεγκτή Arduino φαίνεται στην Εικόνα 80. Στην συγκεκριμένη εικόνα το ένα άκρο του θερμίστορ είναι συνδεδεμένο στο A0 pin του μικροελεγκτή, ενώ φαίνεται και ο διαιρέτης τάσης με τη χρήση του θερμίστορ και μιας ωμικής αντίστασης.



Εικόνα 80. Η σύνδεση του θερμίστορ με τον μικροελεγκτή

Για τον προσδιορισμό της τάσης στα άκρα του θερμίστορ χρησιμοποιείται η εντολή `analogRead(A0)`, η οποία «διαβάζει» την τάση στην είσοδο A0. Πιο συγκεκριμένα, το LoRa32u4 II v1.3 διαθέτει ενσωματωμένο μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converter - ADC) και μετατρέπει τα σήματα εισόδου 0-3,3 V σε ακέραιους αριθμούς μεταξύ 0 και 1023 μέσω της εντολής `analogRead()`. Επομένως οι τιμές της τάσης εισόδου αντιστοιχίζονται σε ακέραιους αριθμούς μέσω της σχέσης:

$$ADC \text{ value} = V_i * 1023 / V_{ref} \quad (3.2.3)$$

όπου

ADC value η τιμή του ακέραιου αριθμού μετά τη μετατροπή,

V_i η τάση εισόδου και

V_{aref} η τιμή της τάσης αναφοράς (3,3 V).

Με γνωστή την τάση του θερμίστορ μπορεί να υπολογιστή η αντίστασή του μέσω της εξίσωσης 3.2.2, η οποία γράφεται στην μορφή:

$$R_{TH} = R_1 \cdot \left(\frac{1023}{ADC\ value} - 1 \right) \quad (3.2.4)$$

Εφόσον είναι γνωστή η τιμή της αντίστασης του θερμίστορ, μπορεί να γίνει υπολογισμός της θερμοκρασίας με τη χρήση της εξίσωσης 2.1.3, η οποία μπορεί να γραφτεί στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{REF}} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R_{TH}}{R_{REF}} \right) \quad (3.2.5)$$

όπου:

T η θερμοκρασία σε Κέλβιν,

T_{REF} η θερμοκρασία αναφοράς του θερμίστορ (25 °C ή 298,15 K)

B ο συντελεστής βαθμονόμησης του θερμίστορ, ο οποίος εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του και λαμβάνει τιμές από 3000 έως 5000 K,

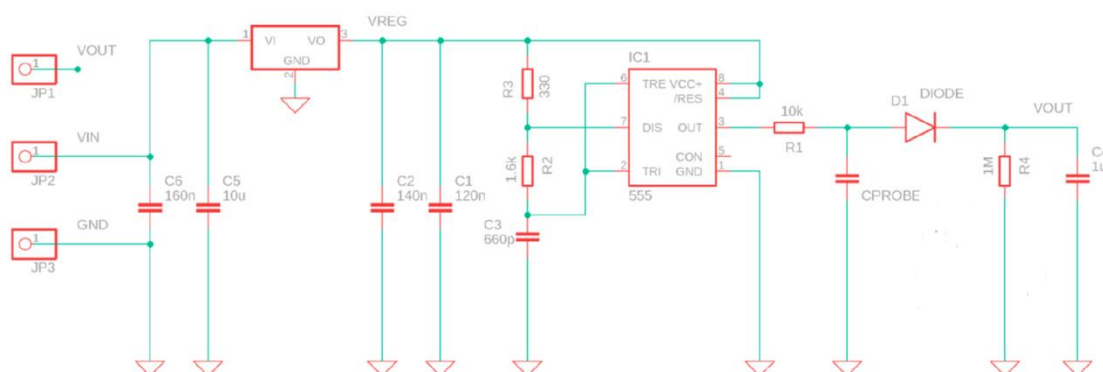
R_{TH} η αντίσταση του θερμίστορ και

R_{REF} η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς.

Όλα τα παραπάνω, με εξαίρεση την εντολή `analogRead()` που διαβάζει την τάση στα άκρα του θερμίστορ, δεν αποτελούν μέρος του κώδικα του μικροελεγκτή καθώς λόγω της μικρής χωρητικότητας σε μνήμη δεν θα ήταν δυνατή η δέσμευση μνήμης για μεταβλητές και πράξεις για τον υπολογισμό της θερμότητας. Για τον λόγο αυτό, ο μικροελεγκτής απλώς διαβάζει την τιμή της τάσης του θερμίστορ και στέλνει αυτή την τιμή μέσω του LoRaWAN στην πλατφόρμα του The Things Stack, όπως αναλύεται παρακάτω. Η μετατροπή της τιμής της τάσης σε θερμοκρασία γίνεται στον αποκωδικοποιητή που διαθέτει η πλατφόρμα με χρήση Javascript, όπως παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα.

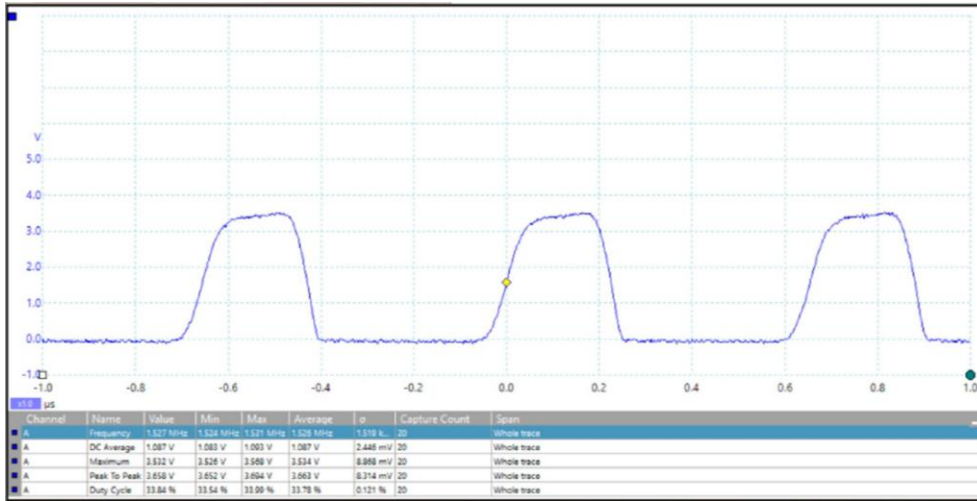
Αισθητήρας υγρασίας

Το αισθητήριο στοιχείο του αισθητήρα είναι ένας πυκνωτής συνεπίπεδων πλακών με μεταβλητή χωρητικότητα, η οποία εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους στο οποίο εισέρχεται. Η ανάλυση του κυκλώματος του αισθητήρα βασίζεται στο επιστημονικό άρθρο του Πανεπιστημίου της Περούτζα [65] και σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της σχολής. Το κύκλωμα του αισθητήρα φαίνεται στην Εικόνα 81.

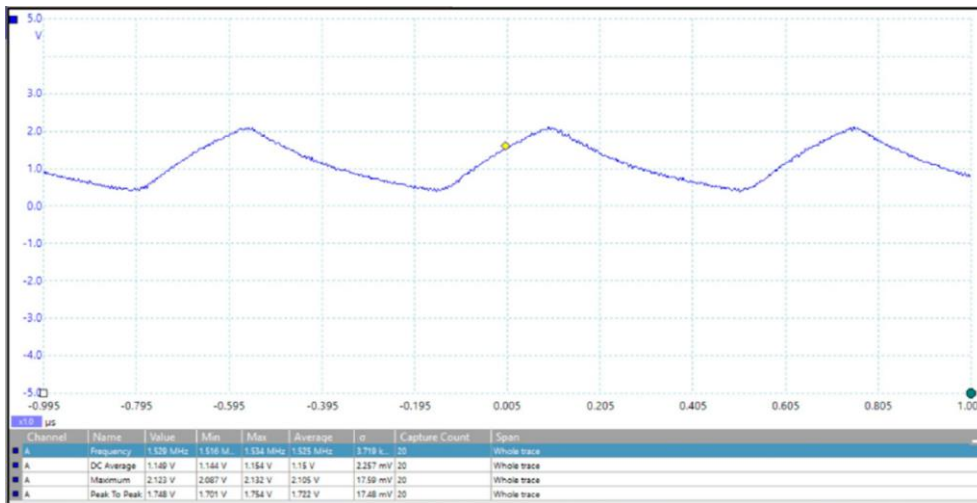


Εικόνα 81. Κύκλωμα του αισθητήρα SEN 0193 v1.2

Ένας ρυθμιστής χαμηλής τάσης 3,3 V τροφοδοτεί ένα χρονόμετρο TL555I CMOS του οποίου το σήμα εξόδου οδηγείται σε ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (η αντίσταση R1 και ο πυκνωτής ανίχνευσης υγρασίας CPROBE). Το σήμα εξόδου του TL555I, σύμφωνα με το άρθρο του Πανεπιστημίου της Περούτζα, είναι μια τραπεζοειδής κυματομορφή με συχνότητα περίπου 1,5 MHz (Εικόνα 82α) και duty cycle (κύκλος λειτουργίας) περίπου 33%, ενώ στο εργαστήριο της σχολής με τη βοήθεια παλμογράφου, το σήμα εξόδου του TL555I φαίνεται σαν μια τραπεζοειδής παλμοσειρά με συχνότητα 400 kHz και duty cycle περίπου 55% (Εικόνα 83α). Από την άλλη πλευρά, είναι γνωστό ότι οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας εδάφους πρέπει να λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα καθώς όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα λειτουργίας, τόσο χαμηλότερη είναι η επίδραση των απωλειών που σχετίζονται με το φανταστικό μέρος της διαπερατότητας [65].



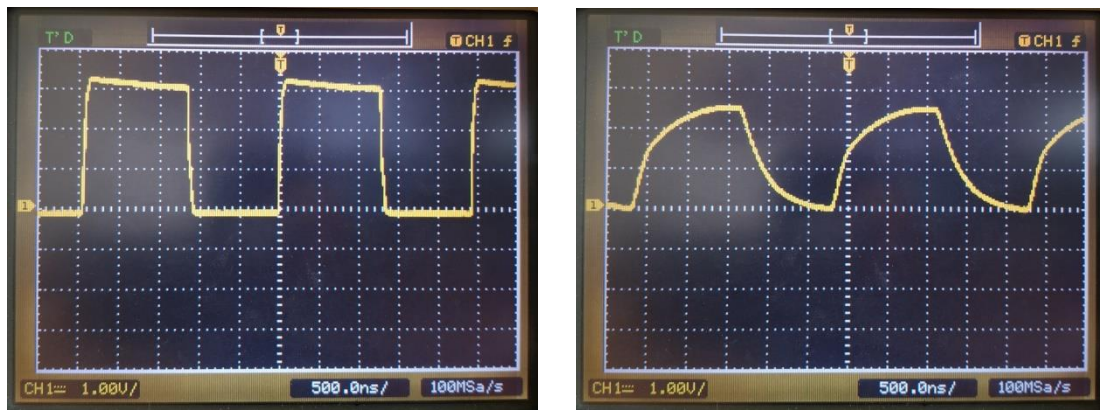
(α)



(β)

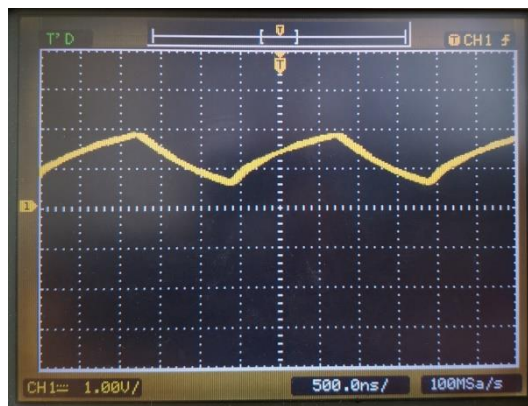
Εικόνα 82. α) Το σήμα εξόδου του TL555I, β) το σήμα στην άνοδο της διόδου D1 όπως μετρήθηκε από το Πανεπιστήμιο της Περούτζα [65]

Ο ρόλος του χαμηλοπερατού φίλτρου είναι η παραγωγή μιας σταθερής διπλά εκθετικής πριονωτής κυματομορφής της οποίας η μέση τιμή είναι η ίδια μέση τιμή της εξόδου TL555I (Εικόνα 82β και Εικόνα 83β). Ωστόσο, η τιμή peak to peak της τάσης της κυματομορφής εξαρτάται από τη διηλεκτρική σταθερά του πυκνωτή Cprobe. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 83γ, η τοποθέτηση του πυκνωτή σε περιβάλλον υγρασίας επηρεάζει την τριγωνική κυματομορφή μειώνοντας το πλάτος της. Στη συνέχεια, ένας ανιχνευτής μέγιστης τάσης (ο πυκνωτής C4 και η αντίσταση R4) παρέχει το αναλογικό σήμα εξόδου σταθερής τάσης που διαβάζουμε μέσω του ADC του μικροελεγκτή. Η χωρητικότητα του αισθητήρα στον αέρα στα 1,5 MHz είναι της τάξης των 6,5 pF.



(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 83. α) Το σήμα εξόδου του TL555I, β) το σήμα στην άνοδο της διόδου D1 όταν ο αισθητήρας βρίσκεται στον αέρα και γ) το σήμα στην άνοδο της διόδου D1 όταν ο αισθητήρας βρίσκεται σε υγρό έδαφος όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο της σχολής

Στην συνέχεια, το κύκλωμα του ανιχνευτή μέγιστης τάσης, που αποτελείται από την δίοδο D1, την αντίσταση R4 και τον πυκνωτή C4, υπολογίζει την αναλογική απόλυτη τιμή της κυματομορφής στο άκρο του CPROBE σε σταθερή συχνότητα περίπου 1,5 MHz. Επειδή η διαφορά φάσης λόγω του ισοδύναμου κυκλώματος του CPROBE χάνεται στην έξοδο του ανιχνευτή μέγιστης τάσης, η τάση εξόδου του κυκλώματος σε σταθερή συχνότητα εξαρτάται από την αλατότητα, την περιεκτικότητα σε νερό, την περιεκτικότητα σε ιόντα και το πορώδες του εδάφους [65]. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα έγινε σύμφωνα με το επιστημονικό άρθρο του Πανεπιστημίου Gadjah Mada της Ινδονησίας [66]. Συγκεκριμένα, η μέθοδος βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Σε πέντε δοχεία δύο διαφορετικών μεγεθών τοποθετήθηκε ξηρό δείγμα αμμοπηλώδους υφής χώματος στα οποία στη συνέχεια τοποθετήθηκε νερό έως το σημείο κορεσμού. Τα δοχεία ζυγίστηκαν αρχικά πριν την τοποθέτηση χώματος, μετά την τοποθέτηση χώματος και στη συνέχεια, μετά την τοποθέτηση νερού, ζυγίζονταν κάθε οκτώ ώρες. Η μείωση της μάζας του δοχείου με

το χρώμα και το νερό οφείλεται μόνο στην εξάτμιση ποσότητας νερού. Έτσι, η θεωρητική τιμή της ποσοστιαίας περιεκτικότητας σε υγρασία του χρώματος δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_m \% = \frac{(b - c) - (c - a)}{(c - a)} \times 100\% \quad (3.2.6)$$

όπου:

- θ_m η ποσοστιαία βαρομετρική περιεκτικότητα υγρασίας,
- a η μάζα του άδειου δοχείου σε γραμμάρια,
- b η μάζα του δοχείου μαζί με το υγρό χρώμα σε γραμμάρια και
- c η μάζα του δοχείου μαζί με το ξηρό χρώμα σε γραμμάρια.

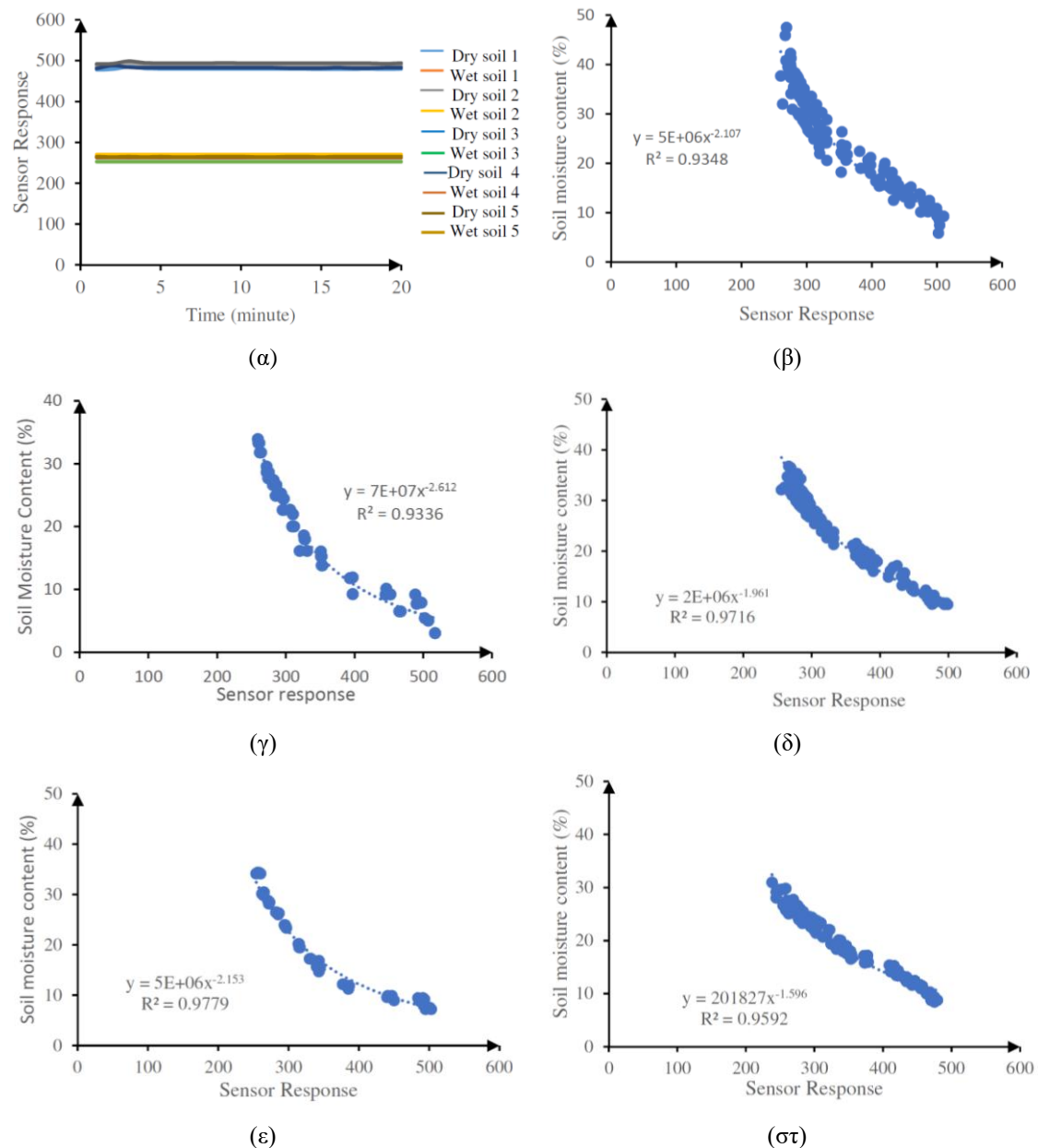
Πέντε δοχεία από κάθε μέγεθος τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα για μέτρηση. Το ένα περιβάλλον ήταν σε εσωτερικό χώρο με μέση θερμοκρασία 26 °C και το άλλο ήταν σε εξωτερικό χώρο με μέση θερμοκρασία 30 °C, ενώ η διαδικασία έγινε και σε περιβάλλον με μέση θερμοκρασία 40 °C. Σε κάθε δοχείο τοποθετήθηκε ένας χωρητικός αισθητήρας υγρασίας και τα δεδομένα των αισθητήρων συλλέγονταν για τιμές περιεκτικότητας σε υγρασία μεταξύ του κορεσμού και ποσοστιαίας περιεκτικότητας σε υγρασία 10 %. Στη συνέχεια, τα δείγματα με υγρασία 10 % τοποθετούνταν σε φούρνο θερμοκρασίας 105 °C για 24 ώρες ώστε να μην περιέχουν καθόλου υγρασία. Έπειτα, η τιμή απόκρισης του αισθητήρα και η θεωρητική τιμή της περιεκτικότητας σε υγρασία συσχετίστηκαν σε πέντε διαγράμματα, ένα για κάθε περιβάλλον, το οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 84. Ο Πίνακας 13 παρουσιάζει τις συναρτήσεις συσχέτισης μεταξύ των δύο μεταβλητών, τον συντελεστή συσχέτισης R , τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 και το μέγιστο σφάλμα για κάθε αισθητήρα σε κάθε περιβάλλον μέτρησης. Ο υπολογισμός των συναρτήσεων συσχέτισης έγινε με τη μέθοδο της παλινδρόμησης, ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 σε κάθε περίπτωση είναι κοντά στο 1, που είναι μια αρκετά ικανοποιητική τιμή.

Πίνακας 13. Οι συναρτήσεις συσχέτισης, ο συντελεστής συσχέτισης (R), ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και το μέγιστο σφάλμα για κάθε αισθητήρα σε κάθε περιβάλλον μέτρησης [66]

Treatment	Sensor	Calibration Equation	R^2	R	RMSE
Small pot indoor	1	$33950x^{-2.015}$	0.981	0.992	0.97
	2	$37196x^{-2.048}$	0.975	0.993	0.53
	3	$9737.9x^{-1.839}$	0.982	0.988	1.23
	4	$621995x^{-2.54}$	0.966	0.992	0.96
	5	$33712x^{-2.022}$	0.972	0.989	0.77
Large pot indoor	1	$26861x^{-2.008}$	0.988	0.986	1.42
	2	$18555x^{-1.94}$	0.983	0.985	1.30
	3	$19754x^{-1.95}$	0.979	0.993	0.90
	4	$3E+06x^{-2.927}$	0.842	0.989	1.10
	5	$19010x^{-1.964}$	0.989	0.992	1.12
Small pot outdoor	1	$46355x^{-2.138}$	0.984	0.990	1.19
	2	$345996x^{-2.489}$	0.986	0.988	1.15
	3	$8E+06x^{-3.048}$	0.976	0.991	1.19
	4	$50564x^{-2.156}$	0.983	0.983	1.31
	5	$8E+06x^{-3.051}$	0.978	0.986	1.74
Large pot outdoor	1	$34706x^{-2.092}$	0.972	0.994	1.56
	2	$46016x^{-2.144}$	0.971	0.992	0.84
	3	$73671x^{-2.224}$	0.987	0.989	1.12
	4	$40291x^{-2.119}$	0.978	0.918	2.09
	5	$57224x^{-2.18}$	0.984	0.994	1.00
Temperature 40°C	1	$1050.3x^{-1.489}$	0.969	0.984	0.89
	2	$3435.5x^{-1.68}$	0.974	0.987	0.78
	3	$3882.5x^{-1.711}$	0.974	0.987	0.72
	4	$2118x^{-1.611}$	0.977	0.988	0.69
	5	$1679x^{-1.558}$	0.968	0.984	0.99

Επίσης, στην Εικόνα 84α φαίνεται η απόκριση των πέντε αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση όταν αυτοί βρίσκονταν σε ξηρό χώμα (μέγιστη απόκριση) και σε χώμα σε συνθήκες κορεσμού (ελάχιστη απόκριση). Εδώ να σημειωθεί πως η απόκριση του αισθητήρα είναι οι τιμές εξόδου που «διαβάζει» ο μικροελεγκτής Arduino στο pin αναλογικής εισόδου που διαθέτει μέσω του

ενσωματωμένου μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα και την εντολή analogRead() όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Επομένως οι τιμές απόκρισης 250 και 500 αντιστοιχούν στις τιμές τάσης εξόδου 1,22 και 2,45 V αντίστοιχα.



Εικόνα 84. Γραφήματα της ποσοστιαίας περιεκτικότητας σε υγρασία συναρτήσει της απόκρισης του αισθητήρα σε (β) μικρό δοχείο σε εσωτερικό χώρο, (γ) μικρό δοχείο σε εξωτερικό χώρο, (δ) μεγάλο δοχείο σε εσωτερικό χώρο, (ε) μεγάλο δοχείο σε εξωτερικό χώρο και (στ) μικρό δοχείο σε περιβάλλον με 40 °C [66]

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην Εικόνα 84, η απόκριση του αισθητήρα είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, καθώς στις συνθήκες θερμοκρασίας 40 °C δεν φάνηκε να υπάρχει σημαντική διαφορά

στις συναρτήσεις συσχέτισης. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά των αισθητήρων, χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ των εξισώσεων βαθμονόμησης. Αυτό σημαίνει πως η λειτουργία του αισθητήρα δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον όγκο του χώματος ή από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για τον αισθητήρα της εργασίας επιλέχθηκε η συνάρτηση συσχέτισης των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε μεγάλο δοχείο σε εξωτερικό χώρο, δηλαδή:

$$\theta_m \% = 5 \cdot 10^6 \cdot x^{-2,153} \quad (3.2.7)$$

όπου:

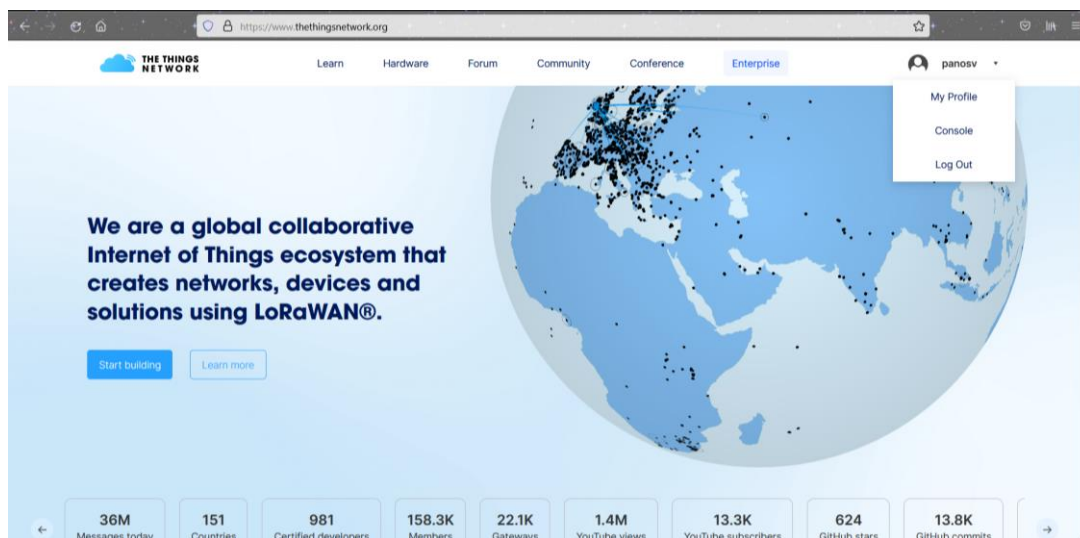
θ_m η ποσοστιαία βαρομετρική περιεκτικότητα υγρασίας και
 x η απόκριση του αισθητήρα

Ωστόσο, επειδή ο μικροελεγκτής Lora χρησιμοποιεί ως τάση αναφοράς τα 3,3 Volt και όχι τα 5 Volt που χρησιμοποιεί το Arduino, χρειάζεται να γίνει μια προσαρμογή της τιμής της απόκρισης του αισθητήρα προτού γίνει χρήση της εξίσωσης 3.2.7, ώστε να συνάδει με την συνάρτηση συσχέτισης της δημοσιευμένης εργασίας. Επομένως, μετά την εντολή `analogRead()` η τιμή που διαβάζει ο μικροελεγκτής πολλαπλασιάζεται επί $\frac{3,3V}{5V} = 0,66$. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, λόγω της περιορισμένης μνήμης του μικροελεγκτή οι συναρτήσεις μετατροπής του σήματος εισόδου σε τιμή υγρασίας δεν αποτελούν μέρος του προγράμματος του μικροελεγκτή αλλά προστέθηκαν στις συναρτήσεις αποκωδικοποίησης της πλατφόρμας The Things Stack.

3.2.2 Δημιουργία της εφαρμογής στο The Things Stack

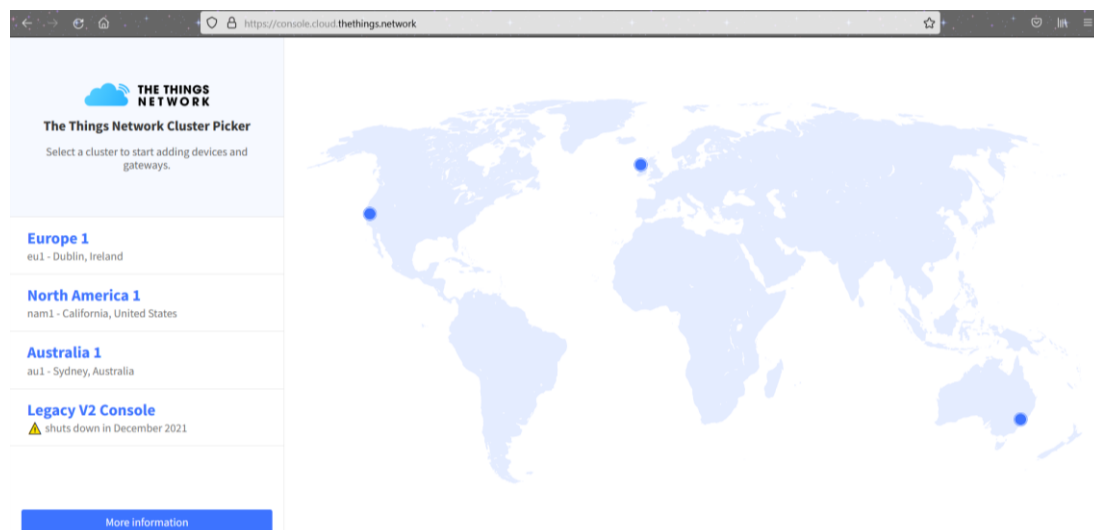
Η πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία είναι το The Things Stack Community Edition, η οποία είναι δωρεάν και παρέχει διακομιστή δικτύου για το LoRaWAN. Η αρχική επιλογή για την εργασία ήταν η χρήση της πλατφόρμας The Things Network (Εικόνα 85), όμως καθώς αυτή η πλατφόρμα παύει την υποστήριξή της μετά το τέλος του 2021 για όλες τις εφαρμογές και προτείνεται migration στο The Things Stack. Για την χρήση της πλατφόρμας απαιτείται η δημιουργία λογαριασμού

στο The Things Network ή στο The Things Stack με email. Παρακάτω φαίνεται το περιβάλλον της πλατφόρμας αφού έχει γίνει είσοδος στον λογαριασμό.



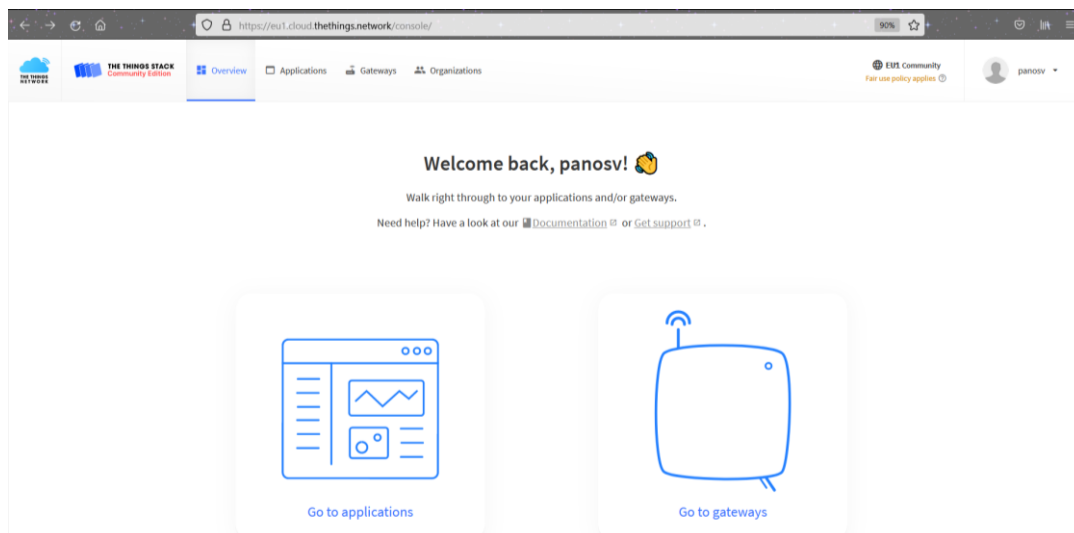
Εικόνα 85. Το περιβάλλον του The Things Network

Επιλέγοντας την επιλογή «Console» ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το cluster στο οποίο θα μπορεί να δημιουργήσει εφαρμογές και να προσθέσει συσκευές και gateways, όπως φαίνεται στην Εικόνα 86. Οι επιλογές αφορούν την τοποθεσία του κάθε cluster επομένως οι διαθέσιμες επιλογές είναι τα cluster Europe 1, North America 1 και Australia 1, ενώ υπάρχει και η επιλογή εισόδου στην παλιά έκδοση του The Things Network με την επιλογή Legacy V2 Console. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε προφανώς το cluster Europe 1.



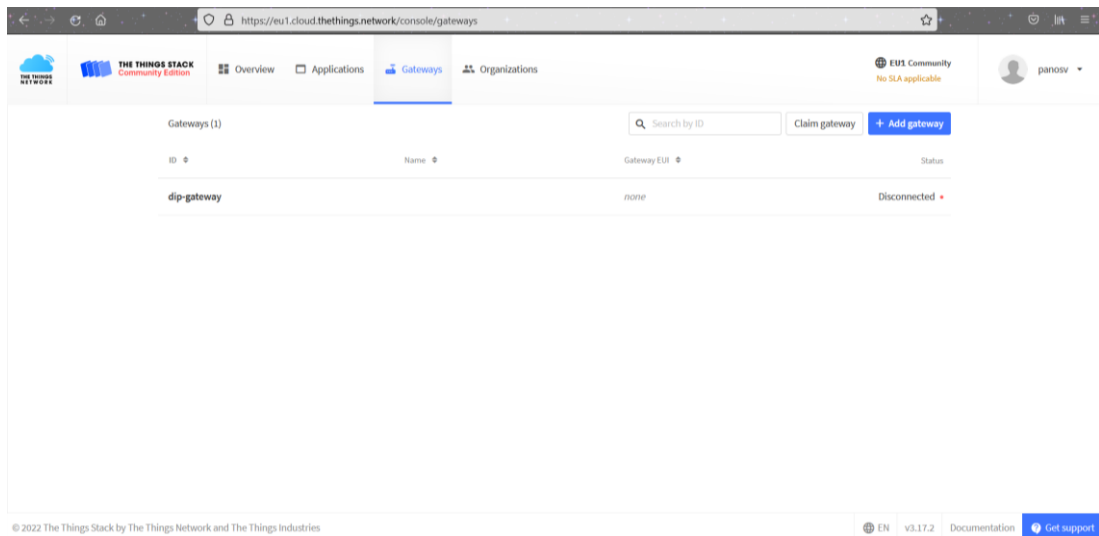
Εικόνα 86. Επιλογή TTN Cluster

Μετά την επιλογή cluster, ο χρήστης βλέπει το περιβάλλον της κονσόλας του στο The Things Stack Community Edition όπου μπορεί να προσθέσει, αφαιρέσει και να διαχειριστεί εφαρμογές και gateways του LoRaWAN (Εικόνα 87). Για την παρούσα εργασία εκτός από την δημιουργία της εφαρμογής ήταν απαραίτητη και η προσθήκη του LoRaWAN gateway, καθώς δεν υπήρχε κάποιο διαθέσιμο στον χώρο της σχολής για την επικοινωνία της συσκευής της εργασίας με το δίκτυο. Η διαδικασία αυτή ήταν πολύ απλή, καθώς το gateway που επιλέχθηκε ήταν προϊόν της ίδιας της πλατφόρμας, το The Things Gateway, επομένως το μόνο που απαιτούνταν ήταν η ενεργοποίησή του και η σύνδεσή του στο Διαδίκτυο μέσω WiFi ή LAN.



Εικόνα 87. Το περιβάλλον της κονσόλας του The Things Stack

Επιλέγοντας το “Go to gateways” μπορεί ο χρήστης να δει και να διαχειριστεί τα καταχωρημένα LoRaWAN gateways καθώς και να καταχωρήσει κάποιο νέο gateway. Στην Εικόνα 88 φαίνεται το gateway της εργασίας στην πλατφόρμα του The Things Stack και στην Εικόνα 89 μια φωτογραφία του gateway με το όνομα “dip-gateway” αφότου έχει ενεργοποιηθεί και καταχωρηθεί.

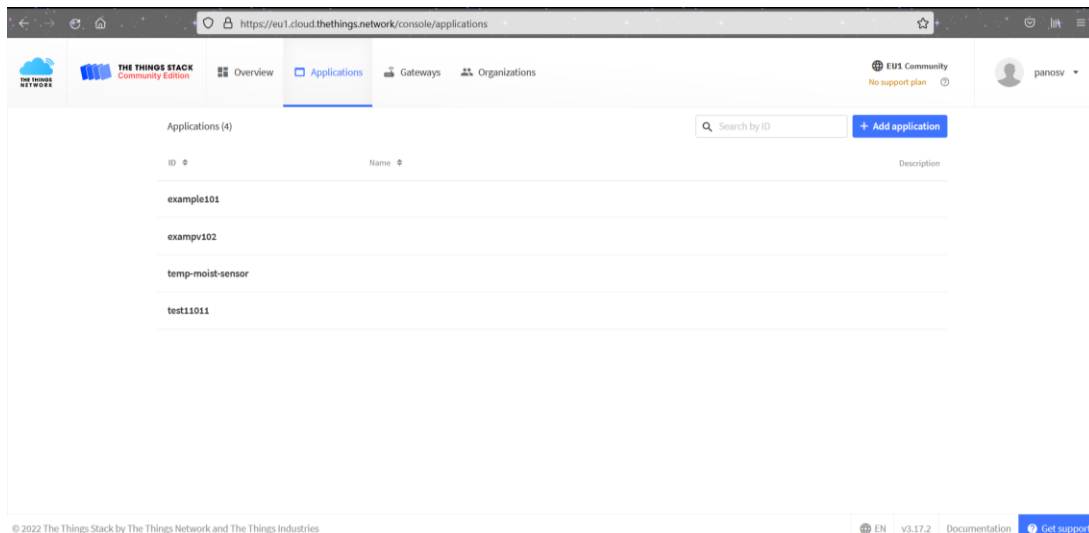


Εικόνα 88. Το καταχωρημένο gateway της εργασίας



Εικόνα 89. Η συσκευή gateway συνδεδεμένη με καλώδιο LAN

Επιλέγοντας την επιλογή “Go to Applications” μπορεί να δει και να διαχειριστεί τις υπάρχουσες εφαρμογές καθώς και να δημιουργήσει κάποια νέα εφαρμογή. Στην Εικόνα 90 φαίνονται κάποιες από τις εφαρμογές που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.



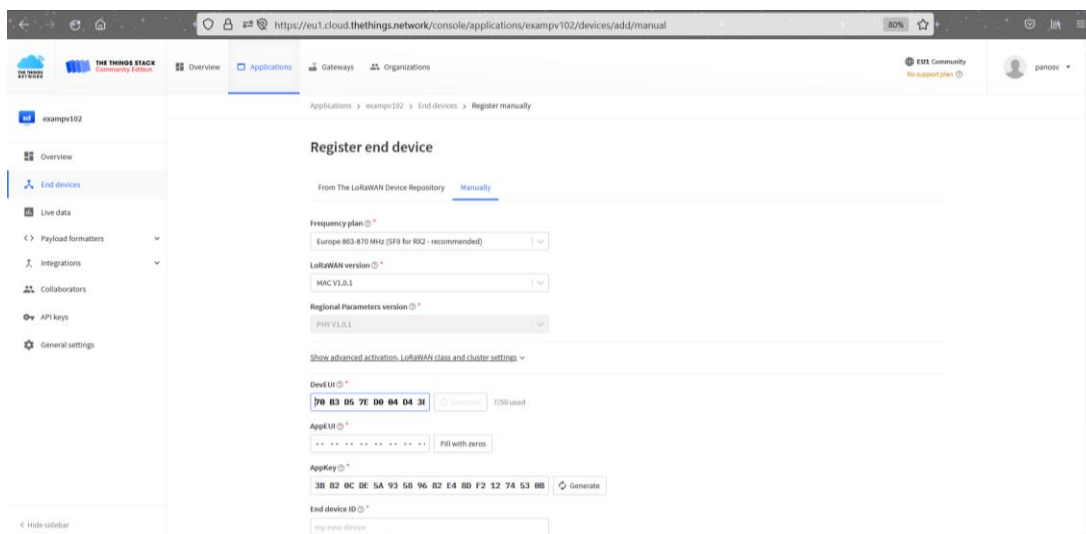
Εικόνα 90. Οι εφαρμογές που δημιουργήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας

Η προσθήκη της συσκευής έγινε με την επιλογή “Add end device” στην καρτέλα End Devices. Ύστερα, επιλέγοντας την επιλογή Manually, εμφανίζονται κάποια χαρακτηριστικά της συσκευής. Στο Frequency Plan επιλέχθηκε το Europe 863-870 MHz (SF9 for RX2), στο LoRaWAN version επιλέχθηκε το MAC V1.0.1, ενώ στο Regional Parameters επιλέχθηκε αυτόματα το PHY V1.0.1. Στην επιλογή Frequency Plan επιλέχθηκε ο συντελεστής διασποράς SF9 αντί του SF12, καθώς λόγω της πολιτικής δίκαιης χρήσης που αναφέρθηκε παραπάνω, ο συνολικός χρόνος επικοινωνίας κάθε κόμβου για uplink μηνύματα περιορίζεται στα 30 δευτερόλεπτα την ημέρα. Επομένως, παρόλο που ο συντελεστής διασποράς SF12 θα προσέφερε μεγαλύτερο airtime, και άρα μεγαλύτερη σταθερότητα στην επικοινωνία του κόμβου με το δίκτυο, θα περιόριζε τον κόμβο σε περίπου 20 uplink μηνύματα την ημέρα, ενώ με το SF9, ο μέγιστος αριθμός μηνυμάτων την ημέρα είναι 145, αν υποθεθεί ότι το μέγεθος του payload των μηνυμάτων είναι 12 byte. Στην Εικόνα 91 παρουσιάζεται το μέγιστο airtime, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση του payload, ο συνολικός απαιτούμενος χρόνος για κάθε μήνυμα και ο μέγιστος αριθμός μηνυμάτων ανά ώρα λαμβάνοντας υπόψιν το 1% duty cycle που ορίζει η ζώνη EU863-870 και ο μέγιστος αριθμός μηνυμάτων ανά ημέρα λαμβάνοντας υπόψιν την πολιτική δίκαιης χρήσης για κάθε τιμή data rate στην ζώνη EU863-870, για μέγεθος payload 12 bytes. Στο μέγεθος των μηνυμάτων υπολογίζεται και η κεφαλίδα πλαισίου (FHDR) μεγέθους 13 bytes.

	DR5	DR4	DR3	DR2	DR1	DR0
<i>data rate</i>	SF7 ^{BW} ₁₂₅	SF8 ^{BW} ₁₂₅	SF9 ^{BW} ₁₂₅	SF10 ^{BW} ₁₂₅	SF11 ^{BW} ₁₂₅	SF12 ^{BW} ₁₂₅
<i>airtime</i>	61.7 _{ms}	113.2 _{ms}	205.8 _{ms}	411.6 _{ms}	823.3 _{ms}	1,482.8 _{ms}
<i>1% max duty cycle</i>	6.2 _{sec} 583 ^{msg} / _{hour}	11.3 _{sec} 318 ^{msg} / _{hour}	20.6 _{sec} 174 ^{msg} / _{hour}	41.2 _{sec} 87 ^{msg} / _{hour}	82.3 _{sec} 43 ^{msg} / _{hour}	148.3 _{sec} 24 ^{msg} / _{hour}
<i>fair access policy</i>	177.7 ^{sec} _(avg) 20.3 ^{avg} / _{hour} 480 ^{msg} / _{24h}	325.9 ^{sec} _(avg) 11.0 ^{avg} / _{hour} 265 ^{msg} / _{24h}	592.8 ^{sec} _(avg) 6.1 ^{avg} / _{hour} 145 ^{msg} / _{24h}	1,185.5 ^{sec} _(avg) 3.0 ^{avg} / _{hour} 72 ^{msg} / _{24h}	2,371.1 ^{sec} _(avg) 1.5 ^{avg} / _{hour} 36 ^{msg} / _{24h}	4,270.3 ^{sec} _(avg) 0.8 ^{avg} / _{hour} 20 ^{msg} / _{24h}

Εικόνα 91. Μέγιστος χρόνος *airtime*, χρόνος και αριθμός μηνυμάτων με 1% *duty cycle* και χρόνος και αριθμός μηνυμάτων σύμφωνα με την πολιτική δίκαιης χρήσης για κάθε τιμή *data rate* [67]

Επίσης, στην επιλογή *Activation mode* επιλέχθηκε το *over the air activation* (OTAA). Για την ενεργοποίηση OTAA χρησιμοποιήθηκαν τα κλειδιά *DevEUI*, *AppEUI* και *AppKey* που δημιουργήθηκαν αυτόματα κατά την δημιουργία της συσκευής και εμφανίζονται κάτω από τις επιλογές που αναφέρθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 92. Τα κλειδιά αυτά είναι μοναδικά για κάθε συσκευή και εκτός από την ενεργοποίηση OTAA χρησιμοποιούνται και στην ταυτοποίηση της κάθε συσκευής.



Εικόνα 92. Προσθήκη νέας συσκευής σε μία εφαρμογή

Τα κλειδιά αυτά χρησιμοποιήθηκαν και στον κώδικα για τον προγραμματισμό της τελικής συσκευής, και συγκεκριμένα στο κομμάτι που παρουσιάζεται παρακάτω.

```
static const u1_t PROGMEM APPEUI[8]={ 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
void os_getArtEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8);}
```

```
static const u1_t PROGMEM DEVEUI[8]={ 0x5C, 0x5E, 0x04, 0xD0, 0x7E, 0xD5,
0xB3, 0x70 };
void os_getDevEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);}
```

```
static const u1_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0x43, 0xC5, 0xB6, 0x71, 0x1E,
0xDC, 0x4C, 0x5B, 0x2C, 0xD5, 0x8E, 0x33, 0x2D, 0xCF, 0x2E, 0xFD };
void os_getDevKey (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16);}
```

Τονίζεται ότι τα κλειδιά DevEUI και AppKey στον κώδικα πρέπει να είναι γραμμένα σε μορφή little endian format και big endian format αντίστοιχα. Το little endian format σημαίνει πως το λιγότερο σημαντικό bit (lsb) είναι πρώτο, ενώ το big endian format σημαίνει πως το περισσότερο σημαντικό bit (msb) είναι πρώτο. Το κλειδί AppEUI αποτελείται από μηδενικά.

3.2.3 Επικοινωνία με τη συσκευή και αποστολή δεδομένων

Για την αξιοποίηση του ενσωματωμένου LoRa Chipset του μικροελεγκτή ήταν απαραίτητη η εγκατάσταση της βιβλιοθήκης MCCI LoRaWAN LMIC στο περιβάλλον Arduino IDE καθώς και η συμπερίληψη του παρακάτω κώδικα, που ορίζει το pin mapping της πλακέτας για το LMIC.

```
const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 8,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 4,
    .dio = { /*dio0*/ 7, /*dio1*/ 5, /*dio2*/ LMIC_UNUSED_PIN}
};
```

Η αρχική συνάρτηση του κώδικα είναι η void setup() στην οποία γίνονται οι απαραίτητες αρχικοποιήσεις τόσο για τις εισόδους των αισθητήρων όσο και για την επικοινωνία μέσω LoRa. Η συνάρτηση φαίνεται παρακάτω:

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(F("Starting"));

    #ifdef VCC_ENABLE
    pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
    digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
    delay(1000);
    #endif
```

```

os_init();
LMIC_reset();

#define LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE 3
LMIC_setClockError(LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE * (MAX_CLOCK_ERROR /
100.0));

do_send(&sendjob);
}

```

Η συνάρτηση `LMIC_setClockError` χρησιμοποιήθηκε για επιτευχθεί η επικοινωνία της συσκευής με το gateway, καθώς χωρίς την χρήση της για την διόρθωση του χρονισμού στο ρολόι του μικροελεγκτή και του LoRa chip, η επικοινωνία δεν ήταν δυνατή, με ένδειξη σφάλματος “Unknown event: 20”. Η κύρια συνάρτηση του κώδικα είναι η `void loop()`, η οποία καλεί την συνάρτηση `os_runloop_once()`, η οποία με τη σειρά της καλεί τον επεξεργαστή `runloop` LMIC. Αυτός ο βρόχος προκαλεί την εμφάνιση ραδιοφωνικών συμβάντων (radio events) βάσει συμβάντων και χρόνου, όπως επανακλήσεις (callbacks) όταν ολοκληρωθεί η μετάδοση.

```

void loop() {
    os_runloop_once();
}

```

Η λήψη τιμών από τους αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας γίνεται στην συνάρτηση `do_send(&sendjob)`, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

```

void do_send(osjob_t* j){
    T = analogRead(A1);
    T = T / 1000;

    M = analogRead(A0)*0.66;
    M = M / 1000;

    uint16_t payloadTemp = LMIC_f2sf1t16(T);
    byte tempLow = lowByte(payloadTemp);
    byte tempHigh = highByte(payloadTemp);
    payload[0] = tempLow;
    payload[1] = tempHigh;
}

```

```

uint16_t payloadHumid = LMIC_f2sflt16(M);
byte humidLow = lowByte(payloadHumid);
byte humidHigh = highByte(payloadHumid);
payload[2] = humidLow;
payload[3] = humidHigh;

if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
    Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
} else {
    LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload)-1, 0);
    Serial.println(F("Packet queued"));
}
}

```

Στις συναρτήσεις `analogRead()` γίνεται η λήψη των τιμών εξόδου των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας στα pins A1 και A0 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι ακέραιοι αριθμοί με τιμές μεταξύ 0 και 1023 καθώς έχουν μετατραπεί από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα από τον ADC μετατροπέα του μικροελεγκτή. Η τιμή της τάσης στην έξοδο του αισθητήρα υγρασίας πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό 0,66 καθώς η τάση αναφοράς του μικροελεγκτή είναι στα 3,3 Volt, ενώ η τάση αναφοράς στην εξίσωση του αισθητήρα είναι στα 5 Volt, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, λόγω της μικρής χωρητικότητας μνήμης του μικροελεγκτή LoRa32u4 II, η μετατροπή των δεδομένων εισόδου σε τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας δεν λαμβάνει χώρα στον μικροελεγκτή αλλά στο περιβάλλον του The Things Stack. Με τη χρήση της συνάρτησης `LMIC_f2sflt16()` οι τιμές τάσης μετατρέπονται από floating αριθμοί σε κωδικοποιημένα δεδομένα `sflt16`. Η μορφή δεδομένων `sflt16` αντιστοιχίζει έναν floating αριθμό σε έναν αριθμό στο εύρος [0, 1.0] ο οποίος μεταδίδεται ως πεδίο 16-bit, ή αλλιώς 2 byte. Ο Πίνακας 14 δείχνει τον ρόλο των bit στην κωδικοποίηση:

Πίνακας 14. Η αντιστοίχιση των 16 bit κατά την κωδικοποίηση `sflt16`

bits	description
15	Sign bit
14..11	binary exponent
10..0	fraction

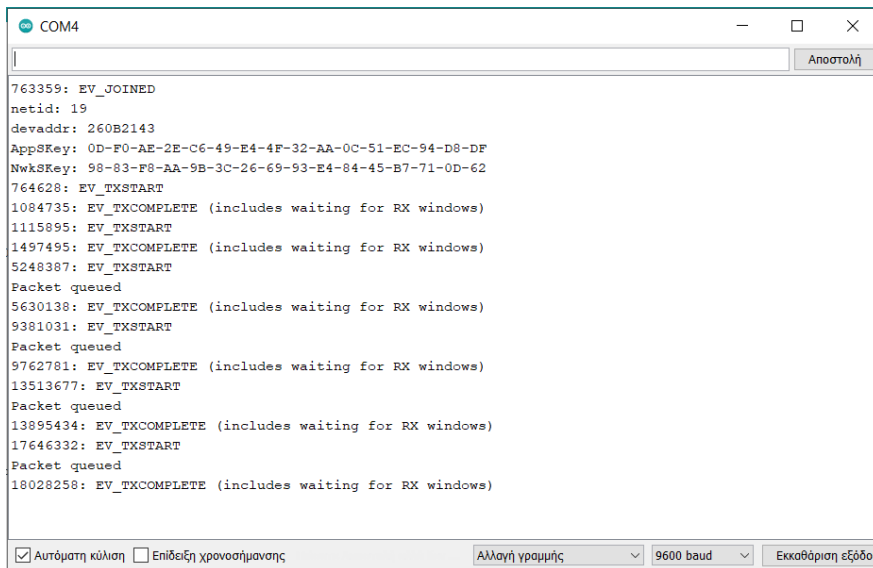
Όπως φαίνεται και παραπάνω, το bit 15 δείχνει το πρόσημο του αριθμού, τα bit 11-14 δείχνουν τον εκθέτη και τα bit 0-10 τον πολλαπλασιαστή (mantissa) του κωδικοποιημένου αριθμού. Ο αριθμός δηλαδή είναι κωδικοποιημένος σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$x = (-1)^S \times M \times 2^{E-15} \quad (3.2.8)$$

όπου:

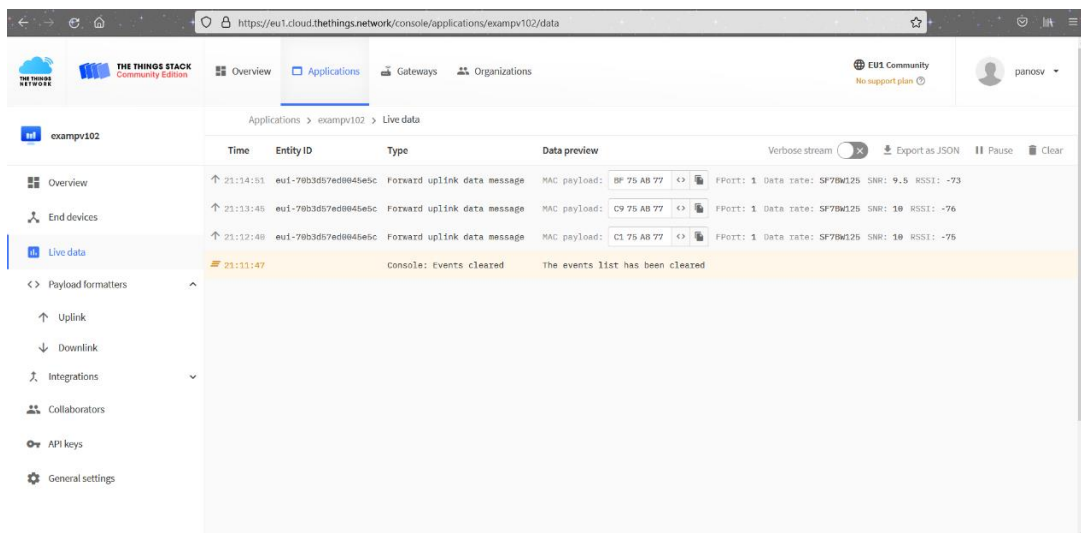
- x ο αριθμός προς κωδικοποίηση,
- S το bit του προσήμου,
- M ο πολλαπλασιαστής ή mantissa και
- E ο εκθέτης με biased notation -15 .

Έπειτα, με τη χρήση των συναρτήσεων `lowByte()` και `highByte()` «φορτώνεται» στις μεταβλητές `payload` το μικρό και μεγάλο byte από το πεδίο 16-bit αντίστοιχα και έτσι δημιουργείται ο πίνακας του ωφέλιμου φορτίου του πακέτου που αποστέλλεται κατά την επικοινωνία. Ο πίνακας `payload[5]` έχει οριστεί στην αρχή του προγράμματος ως πίνακας 5 στοιχείων, όπου κάθε στοιχείο είναι μια λέξη με μήκος ένα byte. Τέλος, με την χρήση της συνάρτησης `LMIC_setTxData2()` ετοιμάζεται το πακέτο με το `payload` για αποστολή στο The Things Stack στον επόμενο διαθέσιμο χρόνο. Στην Εικόνα 93 φαίνεται η έξοδος της σειριακής επικοινωνίας του προγράμματος στο Arduino IDE κατά την αρχική επικοινωνία της τελικής συσκευής με το The Things Stack και στην συνέχεια κατά την αποστολή πακέτων.



Εικόνα 93. Η έξοδος της σειριακής επικοινωνίας στο Arduino IDE κατά την αρχική σύνδεση της τελικής συσκευής με το The Things Stack και κατά την αποστολή πακέτων

Στην Εικόνα 94 φαίνεται η λήψη των δεδομένων στην καρτέλα “Live Data” της εφαρμογής στο The Things Stack. Συγκεκριμένα διακρίνονται η ώρα αποστολής του κάθε μηνύματος, το ID της τελικής συσκευής, ο τύπος του μηνύματος (uplink ή downlink), το payload σε δεκαεξαδική μορφή καθώς και άλλα δεδομένα σχετικά με το κάθε μήνυμα, όπως το data rate, το RSSI και το SNR (Signal-to-Noise Ratio).



Εικόνα 94. Τα λαμβανόμενα δεδομένα στην εφαρμογή του The Things Stack

3.2.4 Αποκωδικοποίηση και Integration με το TagoIO

Αποκωδικοποίηση δεδομένων

Το The Things Stack παρουσιάζει τα λαμβανόμενα δεδομένα σε δεκαεξαδική μορφή. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα δεδομένα αποστέλλονται σε κωδικοποιημένη μορφή sflt16, επομένως πρέπει να γίνει μετατροπή σε κατάλληλη μορφή ώστε να αποκτήσουν νόημα. Το The Things Stack διαθέτει ενσωματωμένο αποκωδικοποιητή και κωδικοποιητή που επιτρέπει να την αποκωδικοποίηση uplink μηνυμάτων και την κωδικοποίηση downlink μηνυμάτων ώστε να επιτυγχάνεται η μετατροπή δεδομένων στην κατάλληλη μορφή. Στην καρτέλα “Payload formatters” δίνεται η δυνατότητα προσθήκης κωδικοποίησης ή αποκωδικοποίησης μηνυμάτων με τη μορφή JavaScript, GRPC Service, CayenneLPP και Repository. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε αποκωδικοποιητής uplink μηνυμάτων σε γλώσσα JavaScript για την μετατροπή των δεδομένων sflt16 στις τιμές της ποσοστιαίας υγρασίας και της θερμοκρασίας του εδάφους. Ο κώδικας του αποκωδικοποιητή παρουσιάζεται και αναλύεται παρακάτω.

```
function Decoder(bytes) {  
  
    var decoded = {};  
  
    rawTemp = bytes[0] + bytes[1] * 256;  
    Tvadc = sflt162f(rawTemp) * 1000;  
    Vin = Tvadc * 3.3 / 1023.0;  
    Rth = 10000 * (3.3 - Vin) / Vin;  
    log1 = Math.log(Rth/10000);  
    T1 = (1/298.15) + (log1/3950);  
    T = 1/T1;  
    decoded.Temperature = T - 273.15;  
  
    rawHumid = bytes[2] + bytes[3] * 256;  
    Moistvin = sflt162f(rawHumid) * 1000;  
    decoded.Moisture = 5000000 * Math.pow(Moistvin, -2.153);  
    return decoded;  
}  
  
function sflt162f(rawSflt16) {  
  
    rawSflt16 &= 0xFFFF;  
  
    if (rawSflt16 == 0x8000)  
        return -0.0;  
}
```

```

var sSign = ((rawSflt16 & 0x8000) != 0) ? -1 : 1;

var exp1 = (rawSflt16 >> 11) & 0xF;

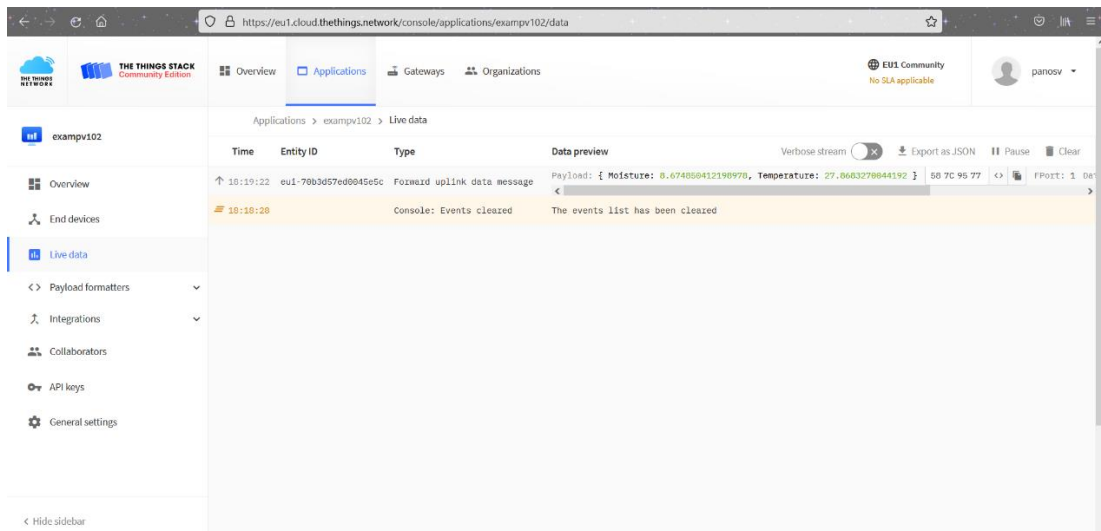
var mant1 = (rawSflt16 & 0x7FF) / 2048.0;

var f_unscaled = sSign * mant1 * Math.pow(2, exp1 - 15);

return f_unscaled;
}

```

Στην συνάρτηση Decoder() αρχικά ορίζεται η μεταβλητή decoded ως αντικείμενο, στην οποία θα αποθηκευτούν τα δεδομένα μετά τη μετατροπή στη σωστή τους μορφή. Έπειτα τα bytes του payload που αντιστοιχούν στα bytes της θερμοκρασίας, δηλαδή τα byte[0] και byte[1] ενώνονται ξανά σε μία λέξη δύο byte στη μεταβλητή rawTemp. Με τη χρήση της συνάρτησης sflt162f() γίνεται η μετατροπή του δεκαδικού κωδικοποιημένου αριθμού στην αρχική του μορφή, δηλαδή στην τιμή της τάσης εισόδου του μικροελεγκτή. Η μετατροπή γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση 3.2.8, η οποία φαίνεται στην προτελευταία γραμμή της συνάρτησης sflt162f(). Όμως, όπως είχε αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, η τιμή της τάσης εισόδου δεν είναι η πραγματική τιμή, αλλά μία τιμή μεταξύ 0 και 1023, που έχει προκύψει από τον ADC μετατροπέα του μικροελεγκτή με τάση αναφοράς τα 3,3 Volt. Επομένως ο υπολογισμός της πραγματικής τιμής της τάσης εισόδου γίνεται στην μεταβλητή Vin σύμφωνα με την σχέση 3.2.3. Με γνωστή την τάση εισόδου, ο υπολογισμός της αντίστασης του Thermistor και άρα της θερμοκρασίας γίνεται στις μεταβλητές Rth και T αντίστοιχα μέσω των σχέσεων (3.2.4) και (3.2.5). Παρομοίως για την τιμή του ποσοστού υγρασίας, τα byte[2] και byte[3] του payload ενώνονται σε μία λέξη των δύο byte στη μεταβλητή rawHumid. Έπειτα μέσω της συνάρτησης sflt162f() γίνεται η αποκωδικοποίηση της δεκαδικής τιμής που έχει προκύψει από την κωδικοποίηση πριν την αποστολή. Με γνωστή την τιμή εισόδου από τον αισθητήρα υγρασίας και μέσω της σχέσης 3.2.7 επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του βαρομετρικού ποσοστού υγρασίας στο έδαφος. Στην Εικόνα 95 φαίνεται το λαμβανόμενο πακέτο στο The Things Stack και η απεικόνιση των δεδομένων μετά την αποκωδικοποίησή τους μέσω του Payload formatter, όπου φαίνονται οι μεταβλητές Moisture και Temperature και οι τιμές τους.



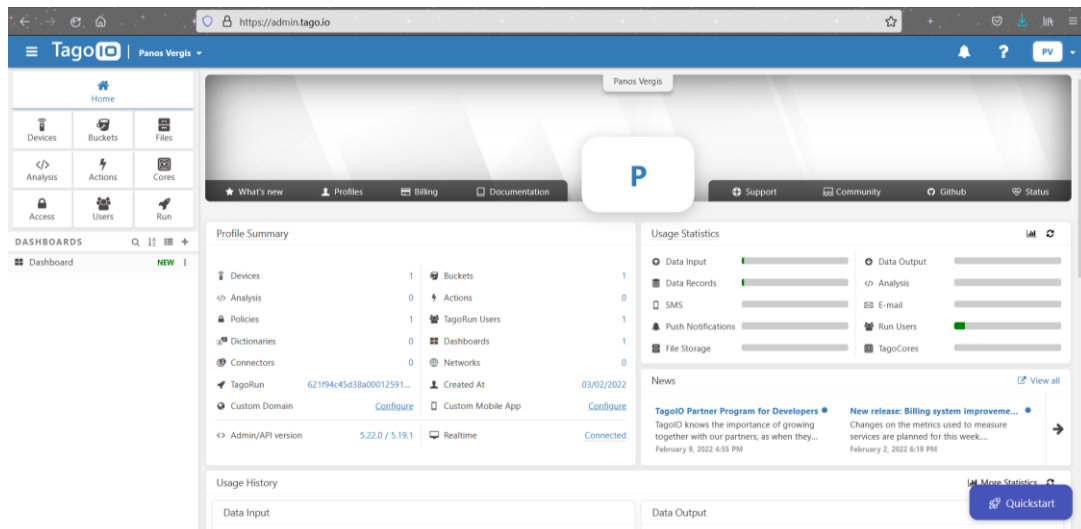
Εικόνα 95. Τα δεδομένα μετά την αποκωδικοποίηση

Integration με το TagoIO

Το The Things Stack διαθέτει ενσωματωμένο integration για την αποθήκευση, δεν διαθέτει όμως εργαλεία οπτικοποίησης ή παρουσίασης των δεδομένων. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε η Cloud πλατφόρμα TagoIO, που διαθέτει εργαλεία και υπηρεσίες διαχείρισης συσκευών, αποθήκευσης δεδομένων, οπτικοποίησης και ανάλυσης σε ένα εύχρηστο και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον. Το TagoIO προσφέρει αυτές τις υπηρεσίες μέσω διάφορων πλάνων με διαφορετική ή καθόλου χρέωση, ανάλογα τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της εκάστοτε λύσης.

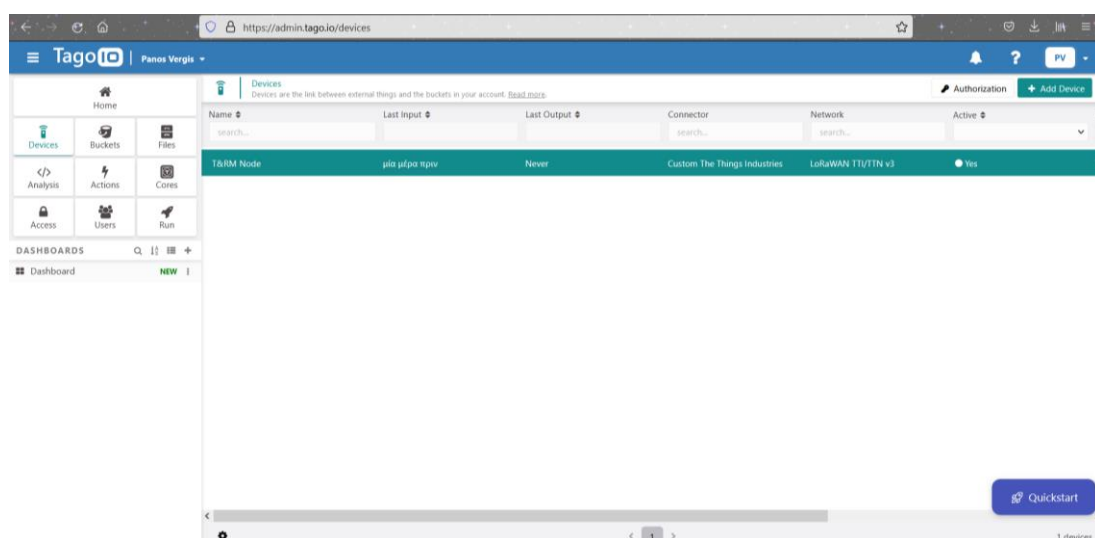
- Δωρεάν: 5 συσκευές, 5 dashboards, 5 scripts για analytics, αποθήκευση δεδομένων έως 30 μέρες
- Starter: 100 συσκευές, 100 dashboards, απεριόριστος αριθμός script, προσθήκη υπηρεσιών και add-ons, υποστήριξη Help Desk, τιμή 49 \$/μήνα
- Scale: ό,τι περιλαμβάνει το starter συν 1000000 συσκευές, 10000 dashboards, πλήρες αρχείο καταγραφής ελέγχου, επιλογή ανεξάρτητης βάσης δεδομένων, λειτουργίες για scale up, πολλαπλές γλώσσες, Single Sign On (SSO), τιμή 199 \$/μήνα

Για την εργασία επιλέχθηκε το δωρεάν πλάνο και δημιουργήθηκε λογαριασμός χρήστη με email. Το περιβάλλον της πλατφόρμας φαίνεται στην Εικόνα 96.



Εικόνα 96. Το περιβάλλον της πλατφόρμας TagoIO

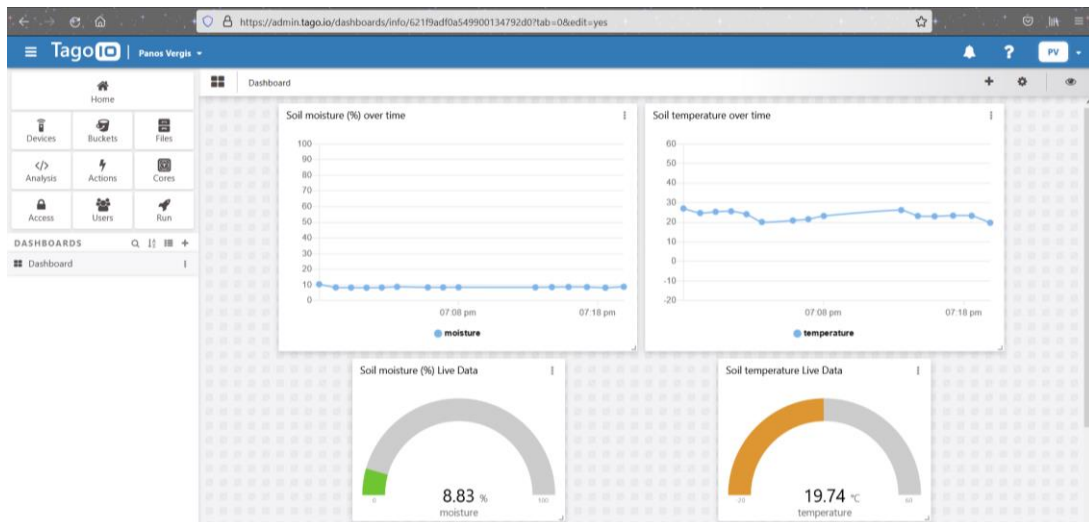
Επιλέγοντας “Devices” και στη συνέχεια “Add Device” εμφανίζονται οι διαθέσιμες συσκευές για σύνδεση με την πλατφόρμα. Για την προσθήκη της συσκευής της εργασίας επιλέχθηκε η επιλογή “Custom The Things Industries”. Σε αυτό το στάδιο απαιτείται η προσθήκη ενός ονόματος για τη συσκευή αλλά και του κλειδιού DevEUI που έχει δοθεί στην συσκευή από το The Things Stack. Έπειτα το TagoIO δημιουργεί ένα κλειδί για το integration, το οποίο έγινε αντιγραφή και επικόλληση στο πεδίο “Authorization” στην καρτέλα “Webhooks Integration” στο περιβάλλον της εφαρμογής στο The Things Stack. Στην Εικόνα 97 φαίνεται η συσκευή (T&RM Node) που προστέθηκε στα πλαίσια της εργασίας.



Εικόνα 97. Η συσκευή T&RM Node στο TagoIO

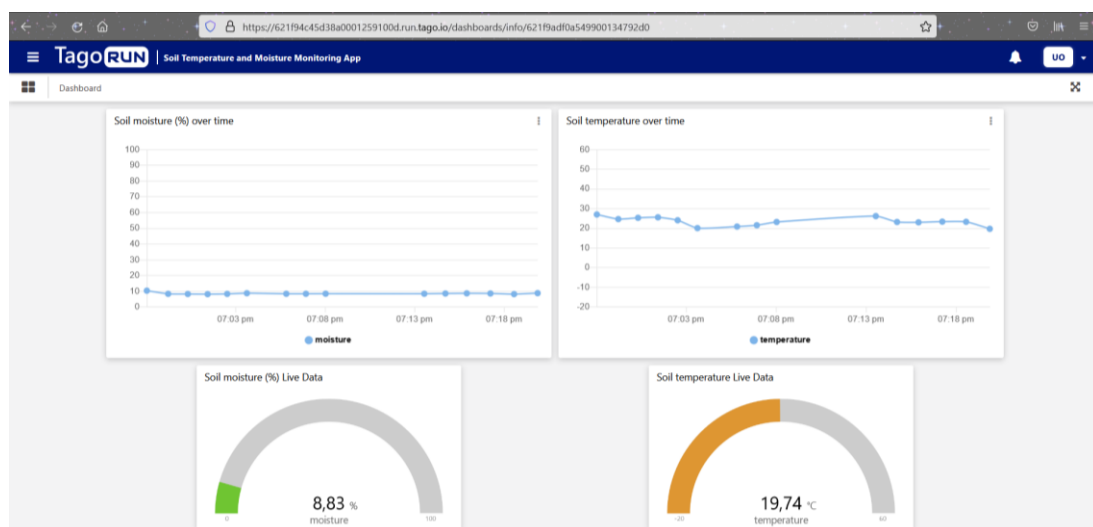
Τα webhooks είναι ένας τρόπος με τον οποίο οι εφαρμογές μπορούν να στέλνουν αυτοματοποιημένα μηνύματα ή πληροφορίες σε άλλες εφαρμογές. Μπορούν να θεωρηθούν ως ένας τύπος API που καθοδηγείται από συμβάντα και όχι από αιτήματα. Δηλαδή αντί μια εφαρμογή να ζητά από μια άλλη να λάβει απάντηση, ένα webhook είναι μια υπηρεσία που επιτρέπει σε ένα πρόγραμμα να στέλνει δεδομένα σε άλλο μόλις λάβει χώρα ένα συγκεκριμένο συμβάν. Τα webhook μερικές φορές αναφέρονται ως "αντίστροφα API", επειδή η επικοινωνία ξεκινά από την εφαρμογή που στέλνει τα δεδομένα και όχι από αυτήν που τα λαμβάνει. Ο απλούστερος τρόπος αποστολής δεδομένων σε μια URL διεύθυνση webhook είναι με ένα αίτημα HTTP GET. Όταν συμβαίνει ένα συμβάν στην εφαρμογή ενεργοποίησης, τα δεδομένα σχετικά με αυτό το συμβάν «σειριοποιούνται» και αποστέλλονται σε μια διεύθυνση URL webhook της εφαρμογή ενεργειών.

Το TagoIO δημιουργεί αυτόματα ένα Bucket στο οποίο συνδέεται η συσκευή για την αποθήκευση των δεδομένων. Για την οπτικοποίηση των δεδομένων χρειάζεται η δημιουργία ενός Dashboard. Επιλέγοντας της επιλογή "Add dashboard", μετά "Normal" και "Add widget" εμφανίζονται οι διαθέσιμες επιλογές για τα dashboard. Για την εργασία επιλέχθηκε ένα widget "line" και ένα widget "solid" για την απεικόνιση των δεδομένων σε συνάρτηση με το χρόνο αλλά και την απεικόνιση της τιμής της πιο πρόσφατης μέτρησης. Κάθε widget μπορεί να προσαρμοστεί και να παραμετροποιηθεί ανάλογα με τις ανάγκες ή της προτιμήσεις του χρήστη. Τα dashboard για τις τιμές της θερμοκρασίας και της υγρασίας που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 98.



Εικόνα 98. Τα dashboard στο TagoIO που απεικονίζουν τη θερμοκρασία και το ποσοστό υγρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο αλλά και τις τρέχουσες τιμές τους.

Για την παροχή των οπτικοποιημένων δεδομένων ως υπηρεσία σε τελικούς χρήστες, το TagoIO διαθέτει το εργαλείο TagoRUN, το οποίο επιτρέπει την δημιουργία πλατφόρμας για την ανάπτυξη των λύσεων. Στην ουσία δημιουργεί ένα domain, στο οποίο μπορούν να εισέλθουν χρήστες που έχουν δημιουργηθεί από τον διαχειριστή της ανάπτυξης και μπορούν να έχουν πρόσβαση και μερικό έλεγχο στο περιβάλλον της εφαρμογής. Για την δοκιμή της πλατφόρμας εφαρμογής δημιουργήθηκε ένας χρήστης με email και password από την επιλογή “Users”, στον οποίο δόθηκε άδεια πρόσβασης μέσω του Access Management από την επιλογή “Access”. Η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε φαίνεται στην Εικόνα 99, αφού έχει γίνει είσοδος με τα στοιχεία του χρήστη που δημιουργήθηκε.



Εικόνα 99. Το περιβάλλον της εφαρμογής στο TagoRUN

3.2.5 Μετρήσεις και Αποτελέσματα

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων κρίθηκε αρχικά σκόπιμο να πραγματοποιηθεί έλεγχος της εγκυρότητας των μετρήσεων του θερμίστορ, το οποίο μετράει τη θερμοκρασία σύμφωνα με τις σχέσεις (3.2.4) και (3.2.5) και με τη σταθερά $B = 3950$, σύμφωνα με την σελίδα του καταστήματος από το οποίο αγοράστηκε. Με τη χρήση ενός θερμομέτρου περιβάλλοντος εξωτερικού χώρου και ενός αισθητήρα DS18B20 συμπληρώθηκε ο Πίνακας 15, ο οποίος παρουσιάζει τις μετρήσεις των δύο αισθητήρων και του θερμομέτρου σε νερό.

Πίνακας 15. Οι μετρήσεις σε νερό των αισθητήρων DS18B20 και θερμίστορ με βάση την ένδειξη ενός θερμομέτρου περιβάλλοντος

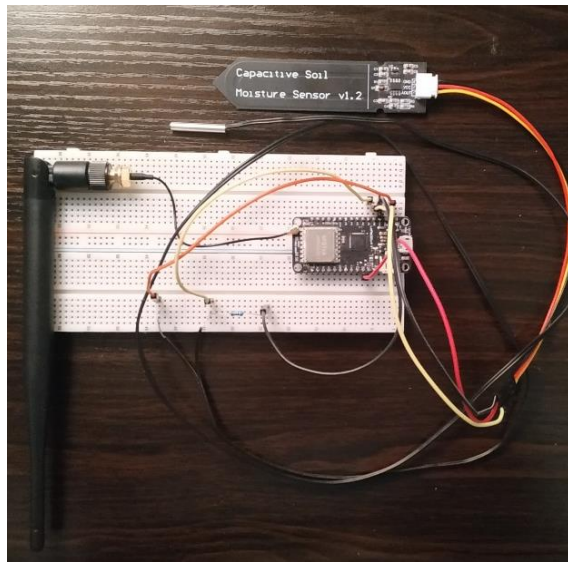
Θερμόμετρο περιβάλλοντος (°C)	DS18B20 (°C)	Θερμίστορ 10 kΩ NTC (°C)
50	49,94	54,49
48	47,88	51,88
46	46,06	49,82
44	44,00	47,29
42	42,06	45,08
40	40,19	42,45
38	38,13	40,61
36	36,06	38,52
34	34,06	35,88
32	32,19	33,66
30	30,19	31,93
28	27,94	29,82
26	26,00	27,61
24	24,12	25,72
22	22,12	23,73
20	20,25	21,49
18	18,08	19,14
16	16,00	17,18
14	14,00	15,22
12	12,13	12,71
10	10,56	11,38
8	8,50	10,17
6	6,81	7,42

4	4,19	5,01
2	2,13	3,25

Όπως φαίνεται, ενώ ο αισθητήρας DS18B20 έχει πολύ καλή ακρίβεια σε όλο το εύρος των υπό μέτρηση θερμοκρασιών, το θερμίστορ με την τρέχουσα εξίσωση βαθμονόμησης έχει σχετικά καλή ακρίβεια στο εύρος 2 - 32 °C και για θερμοκρασίας άνω των 32 °C έχει εμφανώς μειωμένη ακρίβεια. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην εξίσωση βαθμονόμησης είτε στην ποιότητα του συγκεκριμένου θερμίστορ.

Ο αισθητήρας υγρασίας μετράει την υγρασία του εδάφους σύμφωνα με τη σχέση βαθμονόμησης 3.2.7, η οποία αφορά αμμοπηλώδεις τύπους χώματος. Όμως για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά την εγκυρότητα των μετρήσεων του, απαιτείται βαθμονόμηση για κάθε τύπο χώματος στο οποίο πρόκειται να πραγματοποιηθούν μετρήσεις από χωρητικούς αισθητήρες, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Επίσης κάθε τύπος χώματος έχει διαφορετικές ιδιότητες και επομένως διαφορετικά σημεία κορεσμού, υδατοϊκανότητας και μόνιμου μαρασμού. Γνωρίζοντας την τιμή της ποσοστιαίας υγρασίας στο σημείο κορεσμού για τον εκάστοτε τύπο εδάφους, η εξίσωση βαθμονόμησης μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να μετράει την τιμή της σχετικής υγρασίας του εδάφους. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα για κάθε τύπο εδάφους είναι εκτός του σκοπού αυτής της εργασίας, επαφίεται όμως ως πιθανή μελλοντική επέκταση.

Για την λήψη μετρήσεων σε χώμα η διάταξη του μικροελεγκτή με τους αισθητήρες (Εικόνα 100α) τοποθετήθηκε σε μια μικρή γλάστρα, όμως φαίνεται στην Εικόνα 100β.



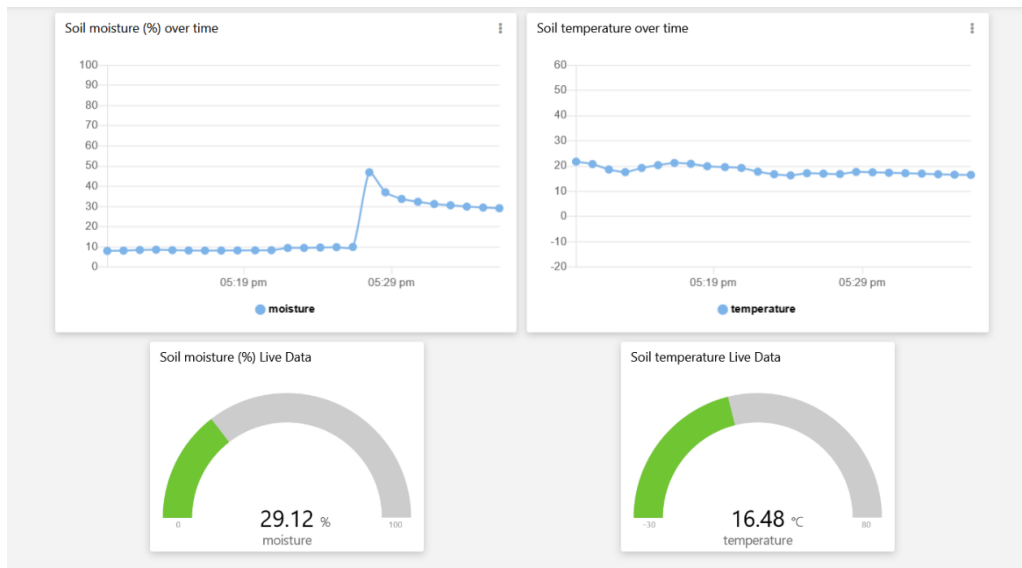
(α)



(β)

Εικόνα 100. α) Η διάταξη με τον μικροελεγκτή και όμως αισθητήρες και β) η τοποθέτηση των αισθητήρων σε χώμα για τη λήψη μετρήσεων

Αφήνοντας την διάταξη για λίγη ώρα και προσθέτοντας στη συνέχεια λίγο νερό, οι τιμές ελήφθησαν από το integration του TagoIO όπου και ενημερώθηκαν τα dashboards που είχαν δημιουργηθεί, όμως φαίνεται στην Εικόνα 101. Η προσθήκη νερού στο χώμα προκάλεσε αρχικά μια μεγαλύτερη τιμή στα επίπεδα υγρασίας, όμως καθώς το νερό εισχώρησε βαθύτερα στο χώμα, η τιμή σταθεροποιήθηκε κοντά στο 29 % για κάποιο χρονικό διάστημα. Στην θερμοκρασία δεν υπήρξε κάποια σημαντική αλλαγή καθώς το νερό ήταν στα ίδια επίπεδα θερμοκρασίας με το χώμα, εκτός από μία μικρή μείωση κατά την εγκατάσταση του αισθητήρα στο χώμα.



Εικόνα 101. Τα dashboards του TagoIO στα οποία φαίνεται η αλλαγή στην υγρασία του χώματος

Τέλος, για τη μέτρηση του εύρους απόστασης που μπορεί να επιτευχθεί με την επικοινωνία μέσω LoRaWAN, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τη λήψη δεδομένων σε εξωτερικό χώρο. Αρχικά δεν ήταν δυνατή η επίτευξη επικοινωνίας μικροελεγκτή και gateway σε απόσταση μεγαλύτερη από 10 μέτρα, όμως με την προσθήκη μιας κεραίας LoRa κατάλληλης για τις συχνότητες 868MHz και 915MHz, η οποία φαίνεται και στην Εικόνα 100α παραπάνω, το εύρος απόστασης βελτιώθηκε αισθητά. Συγκεκριμένα, η κεραία η οποία χρησιμοποιήθηκε αποτελούταν από ένα RP-SMA (Female) JK-IPEX MHF U.FL 1.13 100mm και ένα RP-SMA (Male) Tilt Swivel 1/2 Wave Whip antenna. Με τη χρήση της κεραίας ήταν δυνατή η επίτευξη ζεύξης σε απόσταση έως και 250 μέτρα από το gateway με RSSI -841 dBm και SNR 7 dB. Δεδομένου ότι για το LoRaWAN οι τιμές RSSI κυμαίνονται μεταξύ -30 και -120 dBm και οι τιμές SNR μεταξύ -20 και +10 dB, οι τιμές που επιτεύχθηκαν κατά την ζεύξη σε απόσταση 250 μέτρων θεωρούνται καλές. Σε μεγαλύτερη απόσταση δεν ήταν δυνατή η επίτευξη ζεύξης, πιθανότατα λόγω της μορφολογίας της περιοχής στην οποία έγιναν οι μετρήσεις, καθώς υπήρχαν πολλά κτήρια που παρεμβάλλονταν μεταξύ μικροελεγκτή και gateway. Επομένως συμπεραίνεται πως σε αστικό περιβάλλον η χρήση του LoRaWAN έχει περιορισμένη δυνατότητα κάλυψης σε μεγάλες αποστάσεις, όμως σε αγροτικό περιβάλλον όπου υπάρχει χαμηλή έως καθόλου δόμηση, είναι δυνατή η κάλυψη σε μεγάλη απόσταση.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Αξιολόγηση του συστήματος

Το τελικό σύστημα της εργασίας αποτελείται από έναν μικροελεγκτή, έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και έναν αισθητήρα υγρασίας εδάφους που λαμβάνουν μετρήσεις και τις αναμεταδίδουν μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN. Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελείται από τον μικροελεγκτή LoRa32u4II v1.3, ένα θερμίστορ NTC 10 kΩ ως αισθητήρα θερμοκρασίας και έναν χωρητικό αισθητήρα υγρασίας εδάφους SEN 0193 v1.2. Οι αισθητήρες παράγουν στην έξοδό τους τιμές τάσης που επηρεάζονται από τα υπό μέτρηση μεγέθη και μεταδίδουν τις τιμές τάσεις μέσω του LoRaWAN στον διακομιστή του The Things Stack Community Edition. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω ενός gateway, συγκεκριμένα του The Things Gateway, το οποίο αγοράστηκε από το Εργαστήριο Αισθητήρων της σχολής στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα δεδομένα στο The Things Stack αποκωδικοποιούνται και μετατρέπονται στις αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας και ποσοστό υγρασίας σύμφωνα με τις εξισώσεις βαθμονόμησης 3.2.5 και 3.2.7 αντίστοιχα. Έπειτα τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω ενός webhook integration στην Cloud πλατφόρμα TagoIO, όπου γίνεται η αποθήκευσή του καθώς και η οπτικοποίησή τους σε dashboard. Τέλος, μέσω του TagoRUN, υλοποιήθηκε μία εφαρμογή για την πρόσβαση στα οπτικοποιημένα δεδομένα από τελικούς χρήστες.

Η ακρίβεια των μετρήσεων του θερμίστορ ως αισθητήρα θερμοκρασίας φαίνεται πως δεν ήταν η καλύτερη δυνατή, αφού όπως δείχνει και ο Πίνακας 15 οι τιμές της θερμοκρασίας αποκλίνουν από τις πραγματικές. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην εξίσωση βαθμονόμησης είτε στην ποιότητα του συγκεκριμένου θερμίστορ. Για την επίτευξη μετρήσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια πιθανόν να χρειάζεται πιο αναλυτική βαθμονόμηση για την εύρεση της ακριβούς τιμής της σταθεράς B ή η χρήση της εξίσωσης 2.1.2. Ωστόσο, για εφαρμογές που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και σε εύρος ήπιων θερμοκρασιών, το συγκεκριμένο θερμίστορ μπορεί να παρέχει ικανοποιητικές μετρήσεις θερμοκρασίας.

Ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους φαίνεται πως έχει καλή απόκριση με τη χρήση της συγκεκριμένης εξίσωσης βαθμονόμησης και πως είναι αρκετά αξιόπιστος. Για την ανάλυση του κυκλώματός του χρησιμοποιήθηκαν ερευνητικές εργασίες που αναφέρονται στην βιβλιογραφία καθώς και μετρήσεις με παλμογράφο στο

Εργαστήριο Αισθητήρων. Ωστόσο για τον έλεγχο μεγαλύτερης ακρίβειας της εγκυρότητας των μετρήσεών του, απαιτείται βαθμονόμηση ανάλογα με τον τύπο εδάφους στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι ένα δεύτερο βελτιωμένο μοντέλο της ίδιας έκδοσης v1.2, καθώς το παλιό μοντέλο του αισθητήρα έχει κάποια σφάλματα στο κύκλωμά του, με αποτέλεσμα να μην έχει καθαρές κυματομορφές εξόδου.

Η επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου LoRaWAN επετεύχθη χάρις στην χρήση του Semtech SX1276 Chipset του μικροελεγκτή LoRa32u4Π v1.3 και του The Things Gateway, καθώς και τη χρήση του διακομιστή δικτύου The Things Stack Community Edition. Για την λήψη μετρήσεων και την επικοινωνία γράφτηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα C++ στο περιβάλλον ανάπτυξης Arduino IDE, το οποίο είναι διαθέσιμο στο Παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Με τη χρήση του LoRaWAN επετεύχθη ζεύξη της τελικής συσκευής με το gateway σε απόσταση έως 250 μέτρα. Παρόλο που δεν κατέστη δυνατή η επιτυχής ζεύξη σε μεγαλύτερη απόσταση, πιθανότατα λόγω της ύπαρξης κτηρίων ανάμεσα στη συσκευή και το gateway, σε αγροτικό περιβάλλον είναι δυνατή η κάλυψη σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η χρήση του The Things Stack με το TagoIO ήταν εύκολη χάρις στα διαθέσιμα integration του The Things Stack. Επίσης, οι ενσωματωμένοι Payload formatters του The Things Stack επέτρεψαν την υλοποίηση ενός αποκωδικοποιητή για τα κωδικοποιημένα δεδομένα που παρήγαγε η τελική συσκευή, καθώς και την μετατροπή τους σε τιμές θερμοκρασίας και ποσοστό υγρασίας μέσω ενός προγράμματος σε γλώσσα JavaScript. Τέλος, η χρήση της πλατφόρμας TagoIO επέτρεψε την αποθήκευση των δεδομένων της τελικής συσκευής, την οπτικοποίησή τους καθώς και την δημιουργία εφαρμογής για τελικούς χρήστες.

Το κόστος της τελικής διάταξης υπολογίστηκε στα 34,18 €. Σε αυτή την τιμή περιλαμβάνεται το κόστος του θερμίστορ (1,80 €), του αισθητήρα υγρασίας (4,80 €), του μικροελεγκτή (15,60 €) και της κεραίας LoRa (11,98 €). Το gateway κόστισε 308.12 €, ενώ για τον διακομιστή δικτύου και την Cloud πλατφόρμα επιλέχθηκαν οι δωρεάν λύσεις του The Things Stack Community Edition και TagoIO, που όμως προσφέρουν περιορισμένες δυνατότητες σε σχέση με τις επί πληρωμή λύσεις.

4.2 Προκλήσεις και Προβλήματα

Ο αρχικός σχεδιασμός της διάταξης των αισθητήρων ήταν η χρήση του αισθητήρα DS18B20 καθώς έχει μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι βαθμονομημένος και έχει παρόμοιο κόστος. Όμως η περιορισμένη μνήμη του μικροελεγκτή LoRa32u4Π v1.3 δεν ήταν αρκετή για τον κώδικα και τις βιβλιοθήκες του DS18B20 και για τον κώδικα και τις βιβλιοθήκες του MCCI LoRaWAN LMIC. Επομένως επιλέχθηκε το θερμίστορ ως εναλλακτική λύση, το οποίο όμως υστερεί σε ακρίβεια μετρήσεων. Επίσης η περιορισμένη μνήμη του μικροελεγκτή δεν επέτρεπε την επεξεργασία των τιμών τάσεων από τις εξόδους των αισθητήρων στην τελική συσκευή. Για τον λόγο αυτό, η μετατροπή των τιμών τάσεων εξόδου των αισθητήρων σε θερμοκρασία και υγρασία έγινε στον αποκωδικοποιητή payload του The Thing Stack. Παράλληλα, δεν ήταν αρχικά δυνατή η επίτευξη επικοινωνίας της συσκευής με το gateway λόγω θεμάτων χρονισμού του μικροελεγκτή και του Lora Chipset, που διορθώθηκαν στον κώδικα του προγράμματος. Επίσης, λόγω της Πολιτική Δίκαιης Χρήσης του The Things Stack Community Edition, η κάθε συσκευή δικαιούται περιορισμένο αριθμό uplink μηνυμάτων ανά ημέρα, ανάλογα με το Data Rate της συσκευής, και μέχρι 10 downlink μηνύματα ανά ημέρα ανά συσκευή. Έτσι, η χρήση της δωρεάν έκδοσης του The Things Stack καθίσταται ακατάλληλη για εφαρμογές που απαιτείται μεγάλος αριθμός downlink μηνυμάτων. Τέλος, η δωρεάν έκδοση του TagoIO παρέχει περιορισμένο αριθμό συσκευών και μέγιστο όριο αποθήκευσης δεδομένων τις 30 ημέρες, επομένως για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερο διάστημα αποθήκευσης δεδομένων χρειάζεται η χρήση κάποιας επί πληρωμή έκδοσης.

4.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η διάταξη που προτείνεται στην παρούσα εργασία μπορεί με ορισμένες προσθήκες και βελτιώσεις να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκήπια, καλλιέργειες ή χωράφια για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και υγρασίας του εδάφους. Επίσης μπορεί να επεκταθεί έτσι ώστε εκτός από το κομμάτι της παρακολούθησης, να υλοποιεί και αυτοματισμούς, όπως πχ το αυτόματο πότισμα για την διατήρηση των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας στα ιδανικά για την εκάστοτε καλλιέργεια επίπεδα.

Για την εγκατάσταση της διάταξης στο έδαφος είναι απαραίτητο το πακετάρισμά της και η τροφοδοσία της από επαναφορτιζόμενη μπαταρία, πιθανώς συνδεδεμένη σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ ώστε η φόρτιση να γίνεται αυτόματα. Επίσης, για την βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων, μία πρόταση είναι η χρήση αισθητήρων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, κάτι τέτοιο θα ανέβαζε αισθητά το συνολικό κόστος της συσκευής, επομένως μία εναλλακτική λύση θα μπορούσε να είναι ο προσδιορισμός των εξισώσεων βαθμονόμησης των παρόντων αισθητήρων με μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια και η βαθμονόμησή τους για τον συγκεκριμένο τύπο εδάφους. Η χρήση ενός διαφορετικού μικροελεγκτή με μεγαλύτερη χωρητικότητα σε μνήμη θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει την προσθήκη και άλλων αισθητήρων για την μέτρηση περισσότερων ιδιοτήτων του εδάφους, καθώς και την επεξεργασία κάποιων από των δεδομένων στην τελική συσκευή. Τέλος, με την χρήση προγραμματιστικών εργαλείων όπως το Node-RED ή διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface - API), η συσκευή θα μπορούσε να συνδέεται με περισσότερες συσκευές και υπηρεσίες με στόχο την υλοποίηση αυτοματισμών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κωνσταντίνος Καλοβρέκτης, Νικόλαος Κατέβας, *Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017
- [2] Kufre Esenowo Jack, Emmanuel O. Nwangwu Israel Agwu Etu Ernest Ugwunna Osuagwu, “A Simple Thermistor Design for Industrial Temperature Measurement”, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, no. 5, pp 57-66, 2016
- [3] Radojle Radetić, Marijana Pavlov-Kagadejev, Nikola Milivojević, “The analog linearization of Pt100 Working Characteristic”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 345-357, 2015
- [4] “Temperature”, *sensorwiki.org*, 2018, [Online]. Available: <https://sensorwiki.org/sensors/temperature> [Accessed Sept, 2021]
- [5] “Introduction to Semiconductor Temperature Sensors”, *capgo.com*, 2013, [Online]. Available: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/Semiconductor/Semi.html> [Accessed Sept, 2021]
- [6] Σπαρτάλη Ηλιάνα, «Σχεδιασμός και Ανάλυση Κυκλωμάτων Τάσης Αναφοράς (Bandgap Reference)», Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009
- [7] David J. Sample, James S. Owen, Stefani Barlow, “Understanding Soil Moisture Sensors: A Fact Sheet for Irrigation Professionals in Virginia”, Virginia State University, 2016
- [8] Clinton C. Shock, J. Michael Barnum, and Majid Seddigh, “Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors”, Malheur Experiment Station, Oregon State University, Ontario, Oregon, 1998
- [9] Clint Shock, “Granular Matrix Sensors”, *oregonstate.edu*, [Online]. Available: <https://agsci.oregonstate.edu/mes/irrigation/granular-matrix-sensors> [Accessed Sept, 2021]
- [10] Joshua Hrisko, “Capacitive Soil Moisture Sensor Theory, Calibration, and Testing”, Maker Portal LLC, New York, 2020

-
- [11] Jeffrey P. Walker, Garry R. Willgoose, Jetse D. Kalma, “In situ measurements of soil moisture: a comparison of techniques”, *Journal of Hydrology*, vol. 293, pp. 85–99, 2004
- [12] Fedro S. Zazueta and Jiannong Xin, “Soil Moisture Sensors”, University of Florida, 1994
- [13] Pedro Carvalhaes Dias, Wellington Roque, Elnatan C. Ferreira, José A. Siqueira Dias, “Proposal of a Novel Heat Dissipation Soil Moisture Sensor”, University of Campinas, 2011
- [14] C. J. Phene, G. J. Hoffman, S. L. Rawlins, “Measuring Soil Matric Potential in situ by Sensing Heat Dissipation within a Porous Body”, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 35, 1971
- [15] Dr. Peter Ling, “A Review of Soil Moisture Sensors”, The Ohio State University, 2004
- [16] Jen Clark, “What is the Internet of Things”, *ibm.com*, 2016, [Online]. Available: <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/> [Accessed Oct, 2021]
- [17] “IoT Applications”, *arm.com*, [Online]. Available: <https://www.arm.com/glossary/iot-applications> [Accessed Oct, 2021]
- [18] Pallavi Sethi, Smruti R. Sarangi, “Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications”, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, no. 1, pp. 1-25, 2017
- [19] Ahmed El Hakim, “Internet of Things (IoT) System Architecture and Technologies”, 2018
- [20] K. Swathi, T. Uday Sandeep, A. Roja Ramani, “Performance Analysis of Microcontrollers Used in Iot Technology”, *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 4, 2018
- [21] Olakunle Elijah, Tharek Abdul Rahman, Igbafe Orikumhi, Chee Yen Leow, MHD Nour Hindia, “An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3758-3773, 2018

-
- [22] Xuyang Liu, K. H. Lam, Ke Zhu, Chao Zheng, Xu Li, Yimeng Du, Chunhua Liu, Philip W. T. Pong, “Overview of Spintronic Sensors With Internet of Things for Smart Living”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 11, 2019
- [23] Chang-Le Zhong; Zhen Zhu; Ren-Gen Huang, “Study on the IOT Architecture and Gateway Technology”, *2015 14th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*, 2015
- [24] “What is an IoT Gateway?”, *openautomationsoftware.com*, [Online]. Available: <https://openautomationsoftware.com/open-automation-systems-blog/what-is-an-iot-gateway/> [Accessed Oct, 2021]
- [25] André Glória, Francisco Cercas, Nuno Souto, “Design and implementation of an IoT gateway to create smart environments”, *Procedia Computer Science*, vol. 109C, pp. 568–575, 2017
- [26] Dan Ledger, “Making sense of the myriad of IoT standards and protocols”, 2016, [Online]. Available: <https://medium.com/@dledge/making-sense-of-the-myriad-of-iot-standards-and-protocols-88dc4792ba1f> [Accessed Oct, 2021]
- [27] Shadi Al-Sarawi, Mohammed Anbar, Kamal Alieyan, Mahmood Alzubaidi, “Internet of Things (IoT) Communication Protocols: Review”, *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, 2017
- [28] Alessio Botta, Walter de Donato, Valerio Persico, Antonio Pescapé, “Integration of Cloud Computing and Internet of Things: A Survey”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 56, pp. 684-700, 2016
- [29] Ala Al-Fuqaha, Mohsen Guizani, Mehdi Mohammadi, Mohammed Aledhari, Moussa Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015
- [30] T. Pflanzner, A. Kertesz, “A survey of IoT cloud providers”, 2016 *39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2016
- [31] Amin Shaqrah, “Cloud CRM: State-of-the-Art and Security Challenges”, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, no. 4, 2016

-
- [32] Hany F. Atlam, Ahmed Alenezi, Abdulrahman Alharthi, Robert J. Walters, Gary B. Wills, “Integration of Cloud Computing with Internet of Things: Challenges and Open Issues”, *2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, 2017
- [33] Antonis Tzounis, Nikolaos Katsoulas, Thomas Bartzanas, Constantinos Kittas, “Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges”, *Biosystems Engineering*, vol. 164, pp. 31-48, 2017
- [34] Onwuka, B.M., “Effects of soil temperature on Some Soil properties and plant growth”, *Scholarly Journal of Agricultural Science*, vol. 6, pp. 89-93, 2016
- [35] “Physical factors affecting soil organisms”, *fao.org*, [Online]. Available: <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/soil-biodiversity/soil-organisms/physical-factors-affecting-soil-organisms/en/> [Accessed Oct, 2021]
- [36] Xuming Huang, Alan N. Lakso, David M. Eissenstat, “Interactive effects of soil temperature and moisture on Concord grape root respiration”, *Journal of Experimental Botany*, vol. 56, no. 420, pp. 2651–2660, 2005
- [37] “Why do we need to know the soil moisture content of soil?”, *vanwalt.com*, 2015, [Online]. Available: <https://www.vanwalt.com/news/2015/04/08/why-do-we-need-to-know-the-soil-moisture-content-of-soil/> [Accessed Oct, 2021]
- [38] Anthony Toby O'Geen, “Soil Water Dynamics”, *nature.com*, 2013, [Online]. Available: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/soil-water-dynamics-103089121/> [Accessed Oct, 2021]
- [39] “Effects of soil moisture on plants”, *ursalink.com*, [Online]. Available: <https://www.ursalink.com/en/blog/effects-of-soil-moisture-on-plants/> [Accessed Oct, 2021]
- [40] Martin Thalheimer, “A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential”, *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 44, 2013

-
- [41] Pavankumar Naik, Arun Kumbi, Kirthishree Katti, Nagaraj Telkar, “Automation of Irrigation System using IoT”, *International Journal of Engineering and Manufacturing Science*, vol. 8, no. 1, pp. 77-88, 2018
- [42] S.R. Jino Ramson, Walter D. Le’on-Salas, Zachary Brecheisen, Erika J. Foster, Cliff T. Johnston, Darrell G. Schulze, Timothy Filley, Rahim Rahimi, Mart’ in J. C. Villalta Soto, Juan A. Lopa Bolivar, Mauricio Postigo M’alaga, “A Self-Powered, Real-Time, LoRaWAN IoT-based Soil Health Monitoring System”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 9278–9293, 2021
- [43] Fangming Deng, Pengqi Zuo, Kaiyun Wen, Xiang Wu, “Novel soil environment monitoring system based on RFID sensor and LoRa”, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol.169, 2020
- [44] Antonio Valente, Sérgio Silva, Diogo Duarte, Filipe Cabral Pinto, Salviano Soares, “Low-Cost LoRaWAN Node for Agro-Intelligence IoT”, *MDPI Electronics*, vol. 9, pp. 987, 2020
- [45] “Soil Moisture, Temperature and Electrical Conductivity Sensor”, *milesight-iot.com*, [Online]. Available: <https://www.milesight-iot.com/lorawan/sensor/em500-smtc/> [Accessed Dec, 2021]
- [46] “LoRaWAN-Based Temperature & Humidity Sensor”, *mokosmart.com*, [Online]. Available: https://www.mokosmart.com/lorawan-based-temperature-humidity-sensor-lw002-th/?gclid=EAIaIQobChMIg4-9j_H19QIVgrLVCh2q7AKkEAAYASAAEgJBMPD_BwE [Accessed Dec, 2021]
- [47] DFROBOT, “Capacitive Soil Moisture Sensor SKU: SEN0193”, Datasheet, 2017, [Online]. Available: <https://www.sigmaelectronica.net/wp-content/uploads/2018/04/sen0193-humedad-de-suelos.pdf> [Accessed Dec, 2021]
- [48] “Big LoRa32u4 boards topic”, *thethingsnetwork.org*, 2019, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/big-lora32u4-boards-topic/15273/152> [Accessed Dec, 2021]
- [49] BSFrance, “LoRa32u4II”, Datasheet, 2017, [Online]. Available: file:///C:/Users/User/AppData/Local/Temp/Datasheet_LoRa32u4II_1.1.pdf [Accessed Dec, 2021]
- [50] The Things Network, “The Things Gateway”, Datasheet

-
- [51] “What are LoRa and LoRaWAN?”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> [Accessed Jan, 2022]
- [52] “LoRaWAN Architecture”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/> [Accessed Jan, 2022]
- [53] “Regional Parameters”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/> [Accessed Jan, 2022]
- [54] “Duty Cycle”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/> [Accessed Jan, 2022]
- [55] Richard Wenner, “LoRa CHIRP”, 2018 [Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dxYY097QNs0&t=3s>
- [56] “Spreading Factors”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/> [Accessed Jan, 2022]
- [57] “Message Types”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/message-types/> [Accessed Jan, 2022]
- [58] “The Things Network”, *thethingsindustries.com*, [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/ttn/> [Accessed Jan, 2022]
- [59] “Quick Start”, *thethingsnetwork.org*, [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/quick-start/> [Accessed Jan, 2022]
- [60] “What Is The Things Stack?”, *thethingsindustries.com*, [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/what-is-tts/> [Accessed Jan, 2022]
- [61] “Console”, *thethingsindustries.com*, [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/getting-started/console/> [Accessed Jan, 2022]

-
- [62] “Integrations”, *thethingsindustries.com*, [Online]. Available: <https://www.thethingsindustries.com/docs/integrations/> [Accessed Jan, 2022]
- [63] EPCOS, “NTC thermistors for temperature measurement”, 2006. Available: <https://www.tme.eu/Document/7f93a3d121ea8402378cf8bc6239e8d2/B57164K104J-EPCOS-datasheet-10192.pdf>
- [64] Murata Manufacturing, “NTC Thermistors”, 2020. Available: <https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/thermistor/ntc/r44e.ashx>
- [65] Pisana Placidi, Laura Gasperini, Alessandro Grassi, Manuela Cecconi, Andrea Scorzoni, “Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks”, *MDPI Sensors*, vol. 20, no. 12, pp. 3585, 2020
- [66] Radi, Murtiningrum, Ngadisih, Fajar Siti Muzdrikah, M. Shohibun Nuha, Fathi A. Rizqi, “Calibration of Capacitive Soil Moisture Sensor (SKU: SEN0193)”, *4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia, 2018
- [67] “Airtime calculator for LoRaWAN” [Online]. Available: <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868> [Accessed Jan, 2022]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κώδικας μικροελεγκτή

```
#include <lmic.h>
#include <hal/hal.h>
#include <SPI.h>

float M;
float T;

#ifdef COMPILE_REGRESSION_TEST
# define FILLMEIN 0
#else
# define FILLMEIN
#endif

static const u1_t PROGMEM APPEUI[8]={ 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00 };
void os_getArtEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8);}

static const u1_t PROGMEM DEVEUI[8]={ 0x5C, 0x5E, 0x04, 0xD0, 0x7E, 0xD5,
0xB3, 0x70 };
void os_getDevEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);}

static const u1_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0x43, 0xC5, 0xB6, 0x71, 0x1E,
0xDC, 0x4C, 0x5B, 0x2C, 0xD5, 0x8E, 0x33, 0x2D, 0xCF, 0x2E, 0xFD };
void os_getDevKey (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16);}

static uint8_t payload[5];
static osjob_t sendjob;

const unsigned TX_INTERVAL = 60;

const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 8,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 4,
    .dio = { /*dio0*/ 7, /*dio1*/ 5, /*dio2*/ LMIC_UNUSED_PIN} //
};

void printHex2(unsigned v) {
    v &= 0xff;
    if (v < 16)
        Serial.print('0');
    Serial.print(v, HEX);
}

void onEvent (ev_t ev) {
    Serial.print(os_getTime());
    Serial.print(": ");
    switch(ev) {
        case EV_SCAN_TIMEOUT:
            Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
            break;
        case EV_BEACON_FOUND:
            Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
            break;
```



```

case EV_BEACON_MISSED:
    Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
    break;
case EV_BEACON_TRACKED:
    Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
    break;
case EV_JOINING:
    Serial.println(F("EV_JOINING"));
    break;
case EV_JOINED:
    Serial.println(F("EV_JOINED"));
    {
        u4_t netid = 0;
        devaddr_t devaddr = 0;
        u1_t nwkKey[16];
        u1_t artKey[16];
        LMIC_getSessionKeys(&netid, &devaddr, nwkKey,
            artKey);
        Serial.print("netid: ");
        Serial.println(netid, DEC);
        Serial.print("devaddr: ");
        Serial.println(devaddr, HEX);
        Serial.print("AppSKey: ");
        for (size_t i=0; i<sizeof(artKey); ++i) {
            if (i != 0)
                Serial.print("-");
            printHex2(artKey[i]);
        }
        Serial.println("");
        Serial.print("NwkSKey: ");
        for (size_t i=0; i<sizeof(nwkKey); ++i) {
            if (i != 0)
                Serial.print("-");
            printHex2(nwkKey[i]);
        }
        Serial.println();
    }

    LMIC_setLinkCheckMode(0);
    break;

case EV_JOIN_FAILED:
    Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
    break;
case EV_REJOIN_FAILED:
    Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
    break;
case EV_TXCOMPLETE:
    Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for
    RX windows)"));
    if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
        Serial.println(F("Received ack"));
    if (LMIC.dataLen) {
        Serial.print(F("Received "));
        Serial.print(LMIC.dataLen);
        Serial.println(F(" bytes of payload"));
    }
    // Schedule next transmission

```

```

        os_setTimedCallback(&sendjob,
        os_getTime()+sec2osticks(TX_INTERVAL), do_send);
        break;
    case EV_LOST_TSYNC:
        Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
        break;
    case EV_RESET:
        Serial.println(F("EV_RESET"));
        break;
    case EV_RXCOMPLETE:
        // data received in ping slot
        Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
        break;
    case EV_LINK_DEAD:
        Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
        break;
    case EV_LINK_ALIVE:
        Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
        break;
    case EV_TXSTART:
        Serial.println(F("EV_TXSTART"));
        break;
    case EV_TXCANCELED:
        Serial.println(F("EV_TXCANCELED"));
        break;
    case EV_RXSTART:
        break;
    case EV_JOIN_TXCOMPLETE:
        Serial.println(F("EV_JOIN_TXCOMPLETE: no JoinAccept"));
        break;

    default:
        Serial.print(F("Unknown event: "));
        Serial.println((unsigned) ev);
        break;
}
}

void do_send(osjob_t* j){

    T = analogRead(A1);
    T = T / 1000;

    M = analogRead(A0)*0.66;
    M = M / 1000;

    uint16_t payloadTemp = LMIC_f2sf1t16(T);

    byte tempLow = lowByte(payloadTemp);
    byte tempHigh = highByte(payloadTemp);

    payload[0] = tempLow;
    payload[1] = tempHigh;

    uint16_t payloadHumid = LMIC_f2sf1t16(M);

    byte humidLow = lowByte(payloadHumid);
    byte humidHigh = highByte(payloadHumid);

```

```

        payload[2] = humidLow;
        payload[3] = humidHigh;

    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) {
        Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
    } else {

        LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload)-1, 0);
        Serial.println(F("Packet queued"));
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(F("Starting"));

    #ifdef VCC_ENABLE
    pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
    digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
    delay(1000);
    #endif

    os_init();
    LMIC_reset();

    #define LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE 3
    LMIC_setClockError(LMIC_CLOCK_ERROR_PERCENTAGE * (MAX_CLOCK_ERROR /
    100.0));

    do_send(&sendjob);
}

void loop() {
    os_runloop_once();
}

```

Κώδικας αποκωδικοποιητή

```

function Decoder(bytes) {

    var decoded = {};

    rawTemp = bytes[0] + bytes[1] * 256;
    Tadc = sflt162f(rawTemp) * 1000;
    Vin = Tadc * 3.3 / 1023.0;
    Rth = 10000 * (3.3 - Vin) / Vin;
    log1 = Math.log(Rth/10000);
    T1 = (1/298.15) + (log1/3950);
    T = 1/T1;
    decoded.Temperature = T - 273.15;

    rawHumid = bytes[2] + bytes[3] * 256;
    Moistvin = sflt162f(rawHumid) * 1000;
    decoded.Moisture = 5000000 * Math.pow(Moistvin, -2.153);

    return decoded;
}

```

```
function sflt162f(rawSflt16) {  
    rawSflt16 &= 0xFFFF;  
    if (rawSflt16 == 0x8000)  
        return -0.0;  
    var sSign = ((rawSflt16 & 0x8000) != 0) ? -1 : 1;  
    var exp1 = (rawSflt16 >> 11) & 0xF;  
    var mant1 = (rawSflt16 & 0x7FF) / 2048.0;  
    var f_unscaled = sSign * mant1 * Math.pow(2, exp1 - 15);  
    return f_unscaled;  
}
```