



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Αισθητήρας Μέτρησης CO₂, θερμοκρασίας και υγρασίας για εφαρμογή στη κομποστοποίηση.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλης Ε. Αθανασόπουλος
Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ.

Αισθητήρας Μέτρησης CO_2 , θερμοκρασίας και υγρασίας για εφαρμογή στη κομποστοποίηση.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλης Ε. Αθανασόπουλος

Επιβλέπων :Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1 Ιουλίου 2025.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....
Βασίλης Ε. Αθανασόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Βασίλης, Αθανασόπουλος, 2025

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

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμες και αποδοτικές καλλιεργητικές πρακτικές έχει καταστήσει την ευφυή γεωργία (smart farming) έναν από τους βασικούς πυλώνες του σύγχρονου πρωτογενούς τομέα. Η αξιοποίηση τεχνολογιών αισθητήρων και μικροελεγκτών επιτρέπει την ακριβή καταγραφή περιβαλλοντικών παραμέτρων και την σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση των συνθηκών καλλιέργειας, ενισχύοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων. Σε αυτό το πλαίσιο, αναδεικνύεται η ανάγκη για φορητές, ενεργειακά αυτόνομες και οικονομικά προσβάσιμες διατάξεις, ικανές να λειτουργούν σε πεδία με περιορισμένες υποδομές. Η πρόοδος σε πλατφόρμες όπως ο ESP32, σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων αισθητηρίων χαμηλού κόστους, καθιστά δυνατή την ανάπτυξη ευέλικτων και αποδοτικών συστημάτων παρακολούθησης.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μία αυτόνομη φορητή ηλεκτρονική διάταξη για την παρακολούθηση βασικών περιβαλλοντικών παραμέτρων στο εσωτερικό χουμοχώματος, με στόχο την υποστήριξη και αξιολόγηση της διαδικασίας κομποστοποίησης. Η συσκευή καταγράφει τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), δηλαδή κρίσιμες μεταβλητές που σχετίζονται άμεσα με τη βιολογική δραστηριότητα και την πρόοδο της αποσύνθεσης. Η κατασκευή βασίστηκε στην πλακέτα ανάπτυξης FireBeetle ESP32, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες και οθόνη OLED για την άμεση απεικόνιση των μετρήσεων. Η διάταξη τροφοδοτείται από επαναφορτιζόμενη μπαταρία ιόντων λιθίου, διασφαλίζοντας αυτονομία και φορητότητα. Πραγματοποιήθηκε τεκμηριωμένη επιλογή εξαρτημάτων, σχεδίαση κυκλώματος, ανάπτυξη του λογισμικού και πειραματική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες, με σκοπό την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του συστήματος. Η μελέτη καταλήγει σε συγκεκριμένες προτάσεις βελτίωσης, όπως η ενσωμάτωση αποθήκευσης ή ασύρματης μετάδοσης δεδομένων και η χρήση αισθητήρα CO₂ με ευρύτερο εύρος μέτρησης, με στόχο την ενίσχυση της λειτουργικότητας της συσκευής και την αξιοποίησή της σε μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές κομποστοποίησης.

Λέξεις-κλειδιά: Ευφυής γεωργία, κομποστοποίηση, χουμόχωμα, αισθητήρες, IoT, ESP32, θερμοκρασία, υγρασία, διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

ABSTRACT

The increasing demand for sustainable and efficient agricultural practices has established smart farming as a key component of modern primary production. The integration of sensor technologies and microcontrollers enables the accurate monitoring of environmental parameters and real-time observation of cultivation conditions, facilitating informed decision-making and optimized resource management. In this context, the development of portable, energy-autonomous, and low-cost monitoring devices becomes essential, especially in rural areas with limited infrastructure. The advancement of platforms such as the ESP32, in combination with the wide availability of reliable and affordable sensors, enables the creation of flexible and functional environmental monitoring systems.

This diploma thesis presents the design and implementation of a self-contained portable electronic device for recording key environmental parameters within humus soil, with the aim of supporting and evaluating the composting process. The system measures temperature, relative humidity, and carbon dioxide (CO₂) concentration which are critical variables directly linked to biological activity and decomposition dynamics. The hardware is based on the FireBeetle ESP32 development board, integrating appropriate sensors and an OLED display for real-time data visualization. Power is supplied via a rechargeable lithium-ion battery, ensuring portability and autonomous operation. The project included careful component selection, circuit design, software development, and experimental deployment under realistic conditions to evaluate system performance. The results confirm the viability of the implementation, while highlighting improvement opportunities such as expanding the CO₂ measurement range and incorporating data logging or wireless communication. Future enhancements are proposed to increase system functionality, robustness, and applicability in larger-scale composting environments.

Keywords: Smart farming, composting, humus soil, sensors, IoT, ESP32, temperature, humidity, carbon dioxide (CO₂)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Η επιστημονική του προσέγγιση και η διαρκής του διαθεσιμότητα αποτέλεσαν πολύτιμο εφόδιο στην εξέλιξη της εργασίας. Ιδιαίτερη μνεία οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Αριστείδη Μιτρούσια, ο οποίος στάθηκε δίπλα μου σε καθημερινή βάση, με σταθερή διάθεση να βοηθήσει σε κάθε τεχνικό και ερευνητικό στάδιο. Η συνεχής του παρουσία, η υπομονή και η πρακτική του καθοδήγηση συνέβαλαν καθοριστικά στην επιτυχή υλοποίηση της εργασίας, και του είμαι βαθιά ευγνώμων.

Θα ήθελα να απευθύνω έναν ιδιαίτερο λόγο στην Αρετή, την κοπέλα μου, η οποία στάθηκε δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας, με σταθερότητα, κατανόηση και αληθινή διάθεση να βοηθήσει. Η υποστήριξή της, τόσο σε πρακτικό όσο και σε ψυχολογικό επίπεδο, υπήρξε καθοριστική. Ήταν εκεί όταν τη χρειαζόμουν, με λόγια ενθάρρυνσης και πράξεις καθημερινής φροντίδας, που μου έδωσαν δύναμη να συνεχίσω. Η συμβολή της ξεπερνά τις λέξεις και της το αναγνωρίζω με εκτίμηση και βαθύ σεβασμό.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για τη διαρκή της στήριξη σε όλα τα στάδια των σπουδών μου. Η εμπιστοσύνη τους, η ηθική ενίσχυση και η αδιάκοπη παρουσία τους αποτέλεσαν για μένα στήριγμα σε κάθε δυσκολία. Χωρίς τη σταθερότητά τους στο παρασκήνιο, τίποτα από όλα αυτά δεν θα ήταν το ίδιο.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	12
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	16
1 ΕΝΟΤΗΤΑ 1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	17
1.1 Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	17
1.1.1 Ευφυής Γεωργία (Smart Farming)	17
1.1.2 Ιστορική Αναδρομή	17
1.1.3 Χουμόχωμα	19
1.1.3.1 Μορφοποίηση Χουμοχώματος	20
1.1.3.2 Μικρόβια Χουμοχώματος	20
1.1.3.3 Παράγοντες Βελτίωσης Χουμοχώματος	21
1.1.3.4 Οφέλη Χουμοχώματος	21
1.1.4 Κομποστοποίηση	22
1.1.5 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂) και Γεωργία	23
1.1.6 Σκοπός και Στόχος της Εργασίας	26
1.1.7 Διάρθρωση Εργασίας	26
1.2 Κεφάλαιο 2 : Αισθητήρες	28
1.2.1 Αισθητήρες	28
1.2.1.1 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων	29
1.2.2 Τύποι Αισθητήρων	32
1.2.2.1 Αισθητήρας Θερμοκρασίας	32
1.2.2.1.1 Αισθητήρας Τύπου Αντίστασης – RTD	33
1.2.2.1.2 Θερμίστορ	36
1.2.2.1.3 Θερμοζεύγη	38
1.2.2.1.4 Αισθητήρες υπέρυθρων	40
1.2.2.2 Αισθητήρας Υγρασίας	40
1.2.2.3 Αισθητήρας Θερμοκρασίας-Υγρασίας	43
1.2.2.4 Αισθητήρας Αερίων	44
1.2.2.5 Αισθητήρας CO ₂	46
1.2.2.5.1 Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες CO ₂	46
1.2.2.5.2 Οπτικοί Αισθητήρες CO ₂	47
1.2.2.5.3 Αισθητήρες CO ₂ σταθερής κατάστασης	49
1.2.2.6 Αισθητήρες Εδάφους	49
1.2.2.7 Χρήση Αισθητήρων Εδάφους στον Αγρό	50
1.3 Κεφάλαιο 3 : IoT και ενσωματωμένα συστήματα	52
1.3.1 Internet of Things (IoT)	52
1.3.1.1 Αρχιτεκτονική του IoT	53
1.3.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	54
1.3.2.1 Bluetooth	56
1.3.2.2 Wi-Fi	57

1.3.2.3	Zigbee	57
1.3.2.4	LoRa	58
1.3.2.5	NFC	59
1.3.3	Ενσωματωμένα Συστήματα.....	59
1.3.4	Μικροεπεξεργαστές.....	62
1.3.5	Μικροελεγκτές	63
1.3.6	Μικροελεγκτής ESP ₃₂	65
2	Ενότητα 2 : Κατασκευή	69
2.1	Επιλογή Στοιχείων της Διάταξης.....	69
2.1.1	Επιλογή Μικροελεγκτή	69
2.1.2	Επιλογή Αισθητήρων Περιβάλλοντος.....	72
2.1.2.1	Επιλογή Αισθητήρα Θερμοκρασίας	72
2.1.2.2	Επιλογή Αισθητήρα Υγρασίας	74
2.1.2.3	Επιλογή Αισθητήρα Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂).....	75
2.1.3	Επιλογή Μέσου Τροφοδοσίας.....	77
2.1.4	Επιλογή Οθόνης	78
2.1.5	Επιλογή Υλικού Κατασκευής Stick	79
2.1.6	Συνολική Οργάνωση Hardware.....	79
2.1.7	Προστασία Συνολικής Διάταξης Hardware	85
2.2	Τελική Διάταξη	87
3	Ενότητα 3 : Μετρήσεις.....	95
3.1	Εισαγωγή στην Πειραματική Διαδικασία	95
3.2	Ανάλυση Μετρήσεων Θερμοκρασίας	97
3.3	Ανάλυση Μετρήσεων Υγρασίας	100
3.4	Ανάλυση Μετρήσεων Συγκέντρωσης Διοξειδίου του Άνθρακα.....	102
3.5	Σχολιασμός και Συμπεράσματα Μετρήσεων	104
4	Ενότητα 4 : Μελλοντικές Βελτιώσεις	106
4.1	Εισαγωγή στις μελλοντικές βελτιώσεις.....	106
4.2	Προβληματισμοί και λόγοι αντικατάστασης.....	106
4.2.1	Αντικατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας.....	106
4.2.2	Αντικατάσταση αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂).....	107
4.2.3	Αντικατάσταση υλικού κατασκευής : από πλαστικό σε ανοξείδωτο χάλυβα 108	
4.2.4	Προσθήκη θύρας USB για άμεση φόρτιση της διάταξης.....	108
4.3	Χαρακτηριστικά των νέων βελτιώσεων	109
4.3.1	Αντικατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας με SHT31	109
4.3.2	Αντικατάσταση Αισθητήρα CO ₂ με IR11BR.....	111
4.3.3	Αντικατάσταση υλικού κατασκευής με ανοξείδωτο χάλυβα	113
4.3.4	Ενσωμάτωση Θύρας USB για απλοποιημένη φόρτιση.....	114
4.4	Συγκριτική Αξιολόγηση Αρχικού και Αναβαθμισμένου Σχεδιασμού	115
	Συμπεράσματα	116
	Βιβλιογραφία.....	117

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Χρήση Smart Farming [2]	17
Σχήμα 1.2: Τρακτέρ Ατμού για Αλώνισμα Σιτηρών [3]	18
Σχήμα 1.3: Κύκλος Precision Farming [4]	18
Σχήμα 1.4: GPS στις Καλλιέργειες [6]	19
Σχήμα 1.5: Αυτοματοποίηση στη Γεωργία [7].....	19
Σχήμα 1.6: Χουμόχωμα [9]	20
Σχήμα 1.7: Κομποστοποίηση [10].....	22
Σχήμα 1.8: Πλήρης Διαδικασία Κομποστοποίησης [12]	23
Σχήμα 1.9 : Συγκέντρωση CO ₂ με το πέρασμα των χρόνων [14]	23
Σχήμα 1.10: Επίπεδα CO ₂ και οι αντίστοιχες επιδράσεις τους [17]	25
Σχήμα 1.11: Ελεγχόμενο Περιβάλλον προσθήκης CO ₂ για τη καλλιέργεια βασιλικών [20]	26
Σχήμα 1.12: Απλός Αισθητήρας Υγρασίας και Θερμοκρασίας [22]	28
Σχήμα 1.13: Διάφοροι Τύποι Αισθητήρων [23]	29
Σχήμα 1.14: Ποτενσιόμετρο [24]	29
Σχήμα 1.15: Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα [26].....	32
Σχήμα 1.16: Μεταβολή Αντίστασης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [30]	34
Σχήμα 1.17: Wire Wound RTDs [33]	35
Σχήμα 1.18: Coiled Element RTDs [33]	36
Σχήμα 1.19: Thin Film RTDs [33]	36
Σχήμα 1.20: Μεταβολή Αντίστασης συναρτήσει θερμοκρασίας για RTDs, NTCs και PTCs [37]	38
Σχήμα 1.21: Θερμοζεύγος [38]	39
Σχήμα 1.22: Αισθητήρας Υπέρυθρων – Thermopile [42].....	40
Σχήμα 1.23: Δομή Χωρητικού Αισθητήρα Υγρασίας [45]	41
Σχήμα 1.24: Σύγκριση Capacitive και Resistive Αισθητήρα Υγρασίας [46].....	42
Σχήμα 1.25: Λειτουργία Αισθητήρα Υγρασίας Θερμικής Αγωγιμότητας [47]	42
Σχήμα 1.26: Οπτικός Αισθητήρας Υγρασίας [47]	43
Σχήμα 1.27: DHT11 αισθητήρας υγρασίας (και θερμοκρασίας) με ενσωματωμένο μικροελεγκτή [48]	43
Σχήμα 1.28: Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Αισθητήρα DHT11 με χρήση Arduino [48].....	44
Σχήμα 1.29: Αισθητήρας Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO) [51].....	45
Σχήμα 1.30: Ηλεκτροχημικό Στοιχείο [53]	46
Σχήμα 1.31: Ηλεκτρόδιο Αντίδρασης, Ηλεκτρόδιο Αναφοράς και Ηλεκτρόδιο Αντίστασης σε πείραμα μέτρησης συγκέντρωσης CO ₂ [54]	47
Σχήμα 1.32: Λειτουργία Αισθητήρα NDIR [55]	48
Σχήμα 1.33: Λειτουργία Αισθητήρα TDL [56]	48
Σχήμα 1.34: Λειτουργία Αισθητήρα FTIR [57]	49
Σχήμα 1.35: Αισθητήρας Εδάφους Υγρασίας και Θερμοκρασίας [59]	50
Σχήμα 1.36: Αισθητήρες Εδάφους Θερμοκρασίας τοποθετημένοι εσωτερικά [61]	51
Σχήμα 1.37: Internet of Things (IoT) [63].....	52
Σχήμα 1.38: Μέγεθος Αγοράς IoT [66].....	53
Σχήμα 1.39: Αρχιτεκτονική IoT 5 επιπέδων [67].....	54
Σχήμα 1.40: Διάφορα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας [71]	55
Σχήμα 1.41: Εμβέλεια και Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας [72]	56
Σχήμα 1.42: Λογότυπο Bluetooth [74].....	57

Σχήμα 1.43: Λογότυπο Wi-Fi [77]	57
Σχήμα 1.44: Λογότυπο Zigbee [80]	58
Σχήμα 1.45: Λογότυπο LoRa [82].....	58
Σχήμα 1.46: Λογότυπο NFC [84].....	59
Σχήμα 1.47: Εφαρμογές Ενσωματωμένων Συστημάτων [86].....	60
Σχήμα 1.48: Αρχιτεκτονική Ενσωματωμένων Συστημάτων [88]	60
Σχήμα 1.49: Σχεδιάγραμμα Λειτουργίας Ενσωματωμένων Συστημάτων [89]	61
Σχήμα 1.50: Δομή Μικροεπεξεργαστή [91].....	63
Σχήμα 1.51: Τυπική Δομή Μικροελεγκτή [93]	63
Σχήμα 1.52: Σύγκριση Μικροεπεξεργαστή και Μικροελεγκτή [94].....	65
Σχήμα 1.53: ESP ₃₂	65
Σχήμα 1.54: Block Diagram του ESP ₃₂ [97]	67
Σχήμα 1.55: Pinout Diagram του ESP ₃₂ [98].....	68
Σχήμα 2.1: Πλακέτα Ανάπτυξης FireBeetle ESP32 IoT Microcontroller. [100].....	69
Σχήμα 2.2: Pinout Diagram του FireBeetle ESP ₃₂ . [102].....	71
Σχήμα 2.3: Block Diagram του FireBeetle ESP ₃₂ . [103]	71
Σχήμα 2.4: Αισθητήρας Θερμοκρασίας DS18B20.	72
Σχήμα 2.5: Αισθητήρας Υγρασίας SEN0308. [105]	74
Σχήμα 2.6: Αισθητήρας Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂) SKU SEN0220. [107].....	76
Σχήμα 2.7: Μπαταρία λιθίου (Li-ion) 2500mAh 3.7Volt [109].....	77
Σχήμα 2.8: OLED 1.3 ίντσες τύπου B , WaveShare. [110]	78
Σχήμα 2.9: Πλακέτα Ανάπτυξης ESP33 FireBeetle.....	80
Σχήμα 2.10: Μπαταρία Λιθίου 2500mAh.	81
Σχήμα 2.11: Τοποθέτηση Μπαταρίας Λιθίου στη Συνολική Διάταξη.	81
Σχήμα 2.12: Οθόνη OLED.	82
Σχήμα 2.13: Κοντινή Όψη Οθόνης OLED.....	82
Σχήμα 2.14: Σύνδεση Οθόνης με button ON/OFF.	83
Σχήμα 2.17: Reset Button.....	84
Σχήμα 2.18: Συνολική Διάταξη Hardware (1η Εικόνα).	84
Σχήμα 2.19: Συνολική Διάταξη Hardware (2η Εικόνα).	85
Σχήμα 2.20: Πλαστικό Περίβλημα.....	85
Σχήμα 2.21: Οθόνη OLED στο καπάκι του περιβλήματος.	86
Σχήμα 2.22: Χρήση δεματικών.	87
Σχήμα 2.23: Τελική Διάταξη Stick (1η Εικόνα).	88
Σχήμα 2.24: Τελική Διάταξη Stick (2η Εικόνα).	89
Σχήμα 2.25: Περίβλημα Διάταξης Hardware στη συνολική διάταξη του Stick.....	90
Σχήμα 2.26: Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20 πάνω στο Stick.....	91
Σχήμα 2.27: Αισθητήρας υγρασίας SEN0308 πάνω στο Stick.	92
Σχήμα 2.28: Αισθητήρας διοξειδίου του άνθρακα SEN0220 εσωτερικά στο Stick.	93
Σχήμα 2.29: Μικρές οπές για μέτρηση συγκέντρωσης CO ₂ από τον αισθητήρα εσωτερικά.	94
Σχήμα 3.1:Καλαμάτα, μέτρηση σε χουμόχωμα (1η εικόνα).	95
Σχήμα 3.2: Καλαμάτα, μέτρηση σε χουμόχωμα (2η εικόνα).	96
Σχήμα 3.3: Δείγμα Ορισμένων Μετρήσεων.....	97
Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο.....	99
Σχήμα 3.5: Παράδειγμα εκτέλεσης κώδικα για τον υπολογισμό των στατιστικών στις μετρήσεις θερμοκρασίας.	99
Σχήμα 3.6: Γραφική παράσταση σχετικής υγρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο.....	101
Σχήμα 3.7: Παράδειγμα εκτέλεσης κώδικα για τον υπολογισμό των στατιστικών στις μετρήσεις σχετικής υγρασίας.	101

Σχήμα 3.8: Γραφική παράσταση συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο.....	103
Σχήμα 3.9: Παράδειγμα εκτέλεσης κώδικα για τον υπολογισμό των στατιστικών στις μετρήσεις συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα.....	103
Σχήμα 4.1: Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας SHT31 [111]	110
Σχήμα 4.2: Αισθητήρας CO2 IR11BR [113]	111
Σχήμα 4.3: Διαστάσεις IR11BR [115]	112

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Συγκέντρωση διαφόρων αερίων στον ατμοσφαιρικό αέρα [15].....	24
Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά Τυπικών Αισθητήρων Θερμοκρασίας [27].....	32
Πίνακας 1.3: Βασικά Χαρακτηριστικά και Εύρη Τιμών για RTD 3 Βασικών Μετάλλων [32]	35
Πίνακας 1.4: Διάφοροι Τύποι Θερμοζεύγων [40].....	39
Πίνακας 1.5: Τεχνικές Προδιαγραφές του ESP ₃₂ [95]	66
Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά της πλακέτας FireBeetle ESP ₃₂ IoT Microcontroller. [101]	70
Πίνακας 2.2: Τυπικά Χαρακτηριστικά του αισθητήρα DS18B20 [104].....	73
Πίνακας 2.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του SEN0220. [106].....	75
Πίνακας 2.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του SEN0220. [108].....	76
Πίνακας 3.1: Στατιστικά πειραματικής διαδικασίας μέτρησης θερμοκρασίας.	99
Πίνακας 3.2: Στατιστικά πειραματικής διαδικασίας μέτρησης σχετικής υγρασίας.	101
Πίνακας 3.3: Στατιστικά πειραματικής διαδικασίας μέτρησης συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα.	103
Πίνακας 4.1: Πίνακας χαρακτηριστικών του SHT31. [112].....	110
Πίνακας 4.2: Πίνακας χαρακτηριστικών IR11BR. [114].....	112
Πίνακας 4.3: Συγκριτικός πίνακας αρχικού και αναβαθμισμένου Stick.....	115

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1.1: Εξίσωση Σφάλματος Αισθητήρα [26].....	30
Εξίσωση 1.2: Ηλεκτρική Αντίσταση ως συνάρτηση Θερμοκρασίας [29]	33
Εξίσωση 1.3: Ειδική Αντίσταση Αγωγού ως συνάρτηση Θερμοκρασίας [29].....	33
Εξίσωση 1.4: Συντελεστής Θερμοκρασίας Αντίστασης (TCR) ενός RTD [31]	34
Εξίσωση 1.5: Αντίσταση ως συνάρτηση Θερμοκρασίας σε NTC θερμίστορ [35]	37
Εξίσωση 1.6: Εξίσωση Steinhart & Hart [36]	37
Εξίσωση 1.7: Εξίσωση Σχετικής Υγρασίας [43].....	41

1 ΕΝΟΤΗΤΑ 1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1.1 Ευφυής Γεωργία (Smart Farming)

Η ευφυής γεωργία αναφέρεται στη χρήση της τεχνολογίας με σκοπό να κάνει κάθε διεργασία ευκολότερη και κυρίως να βελτιώσει τα πιθανά αποτελέσματα αυτών. Αναλυτικότερα, η ευφυής γεωργία εκμεταλλεύεται τα ευρήματα των νέων τεχνολογιών, όπως τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence), αυτοματισμοί και Internet of Things (IoT) με στόχο να βελτιστοποιήσει και να βελτιώσει τη βιωσιμότητα της αγροτικής παραγωγής. [1]



Σχήμα 1.1: Χρήση Smart Farming [2]

Είναι γεγονός, ότι ενώ οι νέες τεχνολογίες και τα νέα εργαλεία αποτελούν εδώ και καιρό αναπόσπαστο κομμάτι της διαχείρισης αγροκτημάτων και της παραγωγής τροφίμων, επείγουσες ανησυχίες διεγείρονται και οδηγούν στην ανάπτυξη των τεχνολογιών Smart Farming. Μάλιστα σημειώνεται ότι, η παραγωγή τροφίμων πρέπει να αυξηθεί κατά 70% έως το 2050 έτσι ώστε να συμβαδίσει με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού.

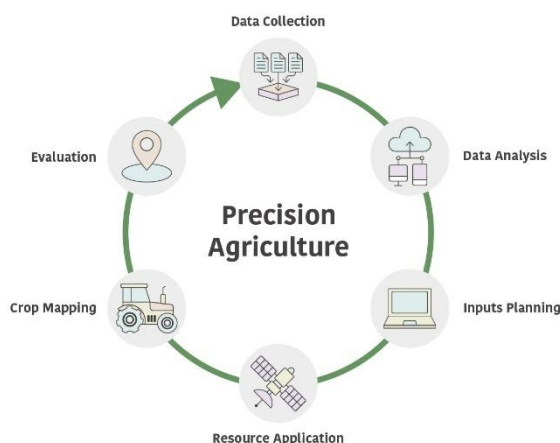
1.1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ευφυής γεωργία (Smart Farming) βρίσκεται σε συνεχή διαδικασία εξέλιξης για πάνω από 10.000 χρόνια. Οι αρχικές αγροτικές διεργασίες επικεντρώνονται στη ανθρώπινη εργασία με χρήση ζώων και απλών εργαλείων χεριού. Ορισμένα αξιοσημείωτα επιτεύγματα της αγροτικής τεχνολογίας ήταν η εφεύρεση του σποροτρύπανου για την αποτελεσματικότερη καλλιέργεια το 1701, τα τρακτέρ με ατμό που ενίσχυαν το αλώνισμα σιτηρών το 1800 και τα τρακτέρ με αέριο στις αρχές του 1900. [1]



Σχήμα 1.2: Τρακτέρ Ατμού για Αλώνισμα Σιτηρών [3]

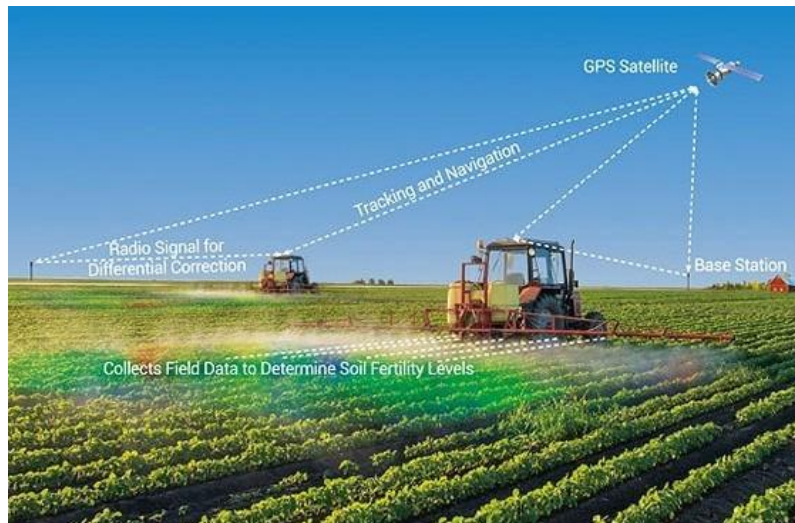
Η εισαγωγή των αγροτικών μηχανών μείωσε σημαντικά την ανάγκη για φυσική εργασία στη γεωργία, ενώ παράλληλα η συλλογή δεδομένων και η ανάλυση αυτών, επέτρεψε στους αγρότες να βελτιώσουν τη καλλιέργεια και τις κτηνοτροφικές τους εκροές. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται Γεωργία Ακρίβειας (Precision Agriculture or Precision Farming) και ξεκίνησε στις αρχές του 1980 από τον Dr.Pierre Robert, γνωστός και ως «Πατέρας της Γεωργίας Ακρίβειας». Εκείνος μελέτησε πως διαφορετικές περιοχές ενός αγρού χρειάζονται ποικίλλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών για τη καλύτερη ανάπτυξη καλλιέργειας. Η δουλειά του Dr.Pierre Robert οδήγησε στη δημιουργία των πρώτων αγροτικών συστημάτων τα οποία διαμοιράζουν διαφορετικές ποσότητες πόρων κατά μήκος του αγρού. [1]



Σχήμα 1.3: Κύκλος Precision Farming [4]

Τη δεκαετία του 1990, αναπτύχθηκε ένα επικοινωνιακό πρωτόκολλο γνωστό και ως ISO 11783 στη Βόρεια Αμερική με σκοπό να σταθεροποιήσει τον αγροτικό εξοπλισμό και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, καθώς και τη συμβατότητά τους μεταξύ των κατασκευαστών. Είναι εμφανές λοιπόν ότι, η αγροτική τεχνολογία είχε αναπτυχθεί ακόμη περισσότερο με τη ψηφιακή παρακολούθηση της απόδοσης των καλλιεργειών και την αυξημένη χρήση παγκόσμιων συστημάτων εντοπισμού θέσης που βασίζονται σε δορυφόρους (GPS). Συνδυάζοντας τα δεδομένα απόδοσης παραγωγής με το GPS, οι αγρότες μπορούσαν να

χαρτογραφούν τους αγρούς τους, δίνοντας τους έτσι σημαντική πληροφορία σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τη ποιότητα της καλλιέργειας τους κατά τη διάρκεια της συγκομιδής. [5]



Σχήμα 1.4: GPS στις Καλλιέργειες [6]

Αργότερα η τεχνολογία του GPS οδήγησε σε μία άλλη μεγάλη ανακάλυψη, την αυτοματοποίηση. Το αυτοοδηγούμενο τρακτέρ προέκυψε από μία συνεργασία μεταξύ της εταιρείας αγροτικού εξοπλισμού John Deere και της NASA στις αρχές του 2000. [1]



Σχήμα 1.5: Αυτοματοποίηση στη Γεωργία [7]

1.1.3 Χουμόχωμα

Το χουμόχωμα αποτελεί έναν από τους πιο εύφορους τύπους εδάφους, καθώς περιέχει μεγάλη ποσότητα οργανικής ύλης που έχει προκύψει από την αποσύνθεση φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων. Το χαρακτηριστικό σκούρο καφέ ή μαύρο χρώμα του υποδηλώνει την υψηλή περιεκτικότητά του σε θρεπτικά συστατικά όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο. Ακόμη, η υφή του είναι σπογγώδης, επιτρέποντας στο έδαφος να συγκρατεί αποτελεσματικά την υγρασία, χωρίς όμως να δημιουργεί προβλήματα αποστράγγισης. Παράλληλα, βελτιώνει τη δομή του εδάφους, διευκολύνοντας την ανάπτυξη των ριζών και την κυκλοφορία του αέρα. Η ύπαρξη χούμου ενισχύει σημαντικά τη μικροβιακή δραστηριότητα, στοιχείο καθοριστικό για τη γονιμότητα και τη βιωσιμότητα του εδάφους.

Το χουμόχωμα αποτελεί ένα καθαρό φυτικό υπόστρωμα το οποίο παρέχει σταθερά θρεπτικά συστατικά. Όπως ήδη αναφέρθηκε το χουμόχωμα υποκαθιστά πλήρως την κοπριά και άλλα ζωικής προέλευσης λιπάσματα για τη βασική λίπανση δέντρων, υπαίθριων κηπευτικών και θερμοκηπιακών καλλιεργειών. [8]



Σχήμα 1.6: Χουμόχωμα [9]

1.1.3.1 Μορφοποίηση Χουμοχώματος

Το χουμόχωμα σχηματίζεται μέσω της αποσύνθεσης φυτικών και ζωικών αποβλήτων από μικρόβια του εδάφους. Οι οργανικές ενώσεις που περιέχουν διασπώνται σε απλούστερες μορφές, όπως σάκχαρα και αμινοξέα. Αυτές οι ενώσεις στη συνέχεια διασπώνται περαιτέρω σε πιο σταθερές μορφές από τα μικρόβια του εδάφους και σχηματίζουν τελικά το χούμο (humus).

Ο σχηματισμός του χούμου είναι μία αργή διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει χρόνια ή και αιώνες. Ο ρυθμός με τον οποίο αποσυντίθεται η οργανική ύλη και σχηματίζεται ο χούμος επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το pH και από τύπους μικροβίων που υπάρχουν στο έδαφος. [8]

1.1.3.2 Μικρόβια Χουμοχώματος

Ο σχηματισμός του χούμου περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών. [8] Μερικά είδη μικροβίων που σχετίζονται με το σχηματισμό χούμου περιλαμβάνουν :

- Βακτήρια : Ορισμένα είδη βακτηρίων όπως Bacillus, Pseudomonas, Streptomyces και Rhizobium.
- Μύκητες : Η Lignin και οι μύκητες που αποικοδομούν την κυτταρίνη είναι ιδιαίτερα σημαντικοί. Αυτοί περιλαμβάνουν τους Aspergillus, Penicillium και Mycorrhizal fungi όπως Rhizoctonia και Glomus.
- Άλλα μικρόβια : περιλαμβάνουν τους ακτινομύκητες (Actinomycetes), τα πρωτόζωα και ωφέλημα νηματοειδή.

1.1.3.3 Παράγοντες Βελτίωσης Χουμοχώματος

Η βελτίωση της ποιότητας του χουμοχώματος κρίνεται ζωτικής σημασίας και έτσι οι παράγοντες που την προκαλούν κρίνονται κομβικοί. Αναλυτικότερα η προσθήκη οργανικής ύλης αποτελεί έναν από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για την αύξηση της περιεκτικότητας του χούμου στο έδαφος. Συγκεκριμένα οργανικές ύλες όπως κομπόστ, απορρίμματα φύλλων, κοπριά ή καλλιέργειες κάλυψης είναι ορισμένες από τις πιο χαρακτηριστικές, καθώς περιέχουν υψηλά επίπεδα οργανικού άνθρακα, ο οποίος τελικά θα διασπαστεί και θα συμβάλει στον σχηματισμό του χούμου. Επιπλέον, το όργωμα μπορεί να διαταράξει τη δομή του εδάφους και να μειώσει τη περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και έτσι η μείωση του είναι απαραίτητη. Ακόμη, η καλλιέργεια οσπρίων και χόρτων μπορεί να αυξήσει την οργανική ύλη καθώς αυτά δύνανται να ενσωματωθούν στο έδαφος και να παρέχουν τα θρεπτικά τους συστατικά. Τέλος, η χρήση οργανικών λιπασμάτων, όπως λίπασμα ή κοπριά, μπορούν να παρέχουν θρεπτικά συστατικά και να συμβάλουν στη δημιουργία του χούμου. [8]

1.1.3.4 Οφέλη Χουμοχώματος

Το χουμόχωμα είναι αρκετά σημαντικό για την υγεία όλων των φυτικών οργανισμών. [8] Πιο συγκεκριμένα :

- Το χουμόχωμα είναι υπεύθυνο για τη δομή του εδάφους και τη μείωση της διάβρωσης. Ο χούμος δρα ως συνδετικός παράγοντας, βοηθώντας στη δημιουργία μεγαλύτερων σωματιδίων του εδάφους.
- Το χουμόχωμα αποθηκεύει και απελευθερώνει διάφορα θρεπτικά συστατικά. Το χούμο περιέχει μία σειρά από θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φώσφορο και κάλιο τα οποία απελευθερώνονται με αργό ρυθμό καθώς εκείνο διασπάται. Η αργή αυτή απελευθέρωση των θρεπτικών συστατικών βοηθά να διασφαλιστεί ότι τα φυτά θα έχουν σταθερή παροχή θρεπτικών ουσιών που χρειάζονται καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας.
- Το χουμόχωμα είναι ικανό να αποθηκεύει και να απελευθερώνει νερό. Συγκεκριμένα, το χούμο λειτουργεί σαν σφουγγάρι (sponge), το οποίο απορροφά νερό και το συγκρατά στο έδαφος για να το χρησιμοποιήσει το φυτό σε περιόδους ξηρασίας. Γενικά όταν προστίθεται νερό στο έδαφος που περιέχει χουμόχωμα, ένα μέρος του νερού συγκρατείται στην επιφάνεια των σωματιδίων του χουμοχώματος, ενώ το υπόλοιπο συγκρατείται στους χώρους πόρων μεταξύ των σωματιδίων. Καθώς το έδαφος στεγνώνει, το νερό που συγκρατείται στο χουμόχωμα απελευθερώνεται στο περιβάλλον αργά, παρέχοντας μία σταθερή ροή υγρασίας για τις ρίζες των φυτών.
- Το χουμόχωμα είναι επίσης μία σημαντική πηγή αποθήκευσης άνθρακα στο έδαφος, μετριάζοντας τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής καθώς δεσμεύει άνθρακα από την ατμόσφαιρα.
- Το χουμόχωμα αποτελεί έναν βιότυπο για ωφέλιμα μικρόβια που διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην υγεία του εδάφους και κύκλο των θρεπτικών συστατικών.

1.1.4 Κομποστοποίηση

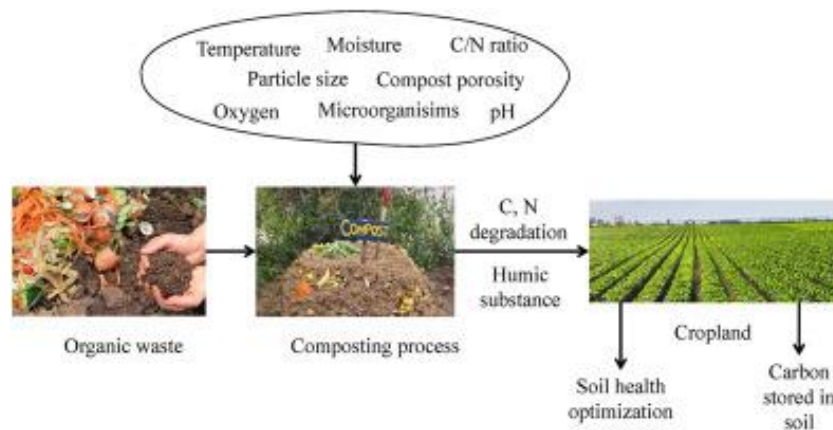
Η κομποστοποίηση αποτελεί μία φυσική διαδικασία αποδόμησης οργανικών υλικών, όπως φυτικά υπολείμματα και οργανικά απορρίμματα, μέσω της δράσης μικροοργανισμών, σε συνθήκες ελεγχόμενης υγρασίας και αερισμού. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το κομπόστ, ένα σταθερό, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά υλικό, το οποίο βελτιώνει τη δομή και τη γονιμότητα του εδάφους. Η πρακτική της κομποστοποίησης όχι μόνο ανακυκλώνει φυσικούς πόρους, αλλά συμβάλλει επίσης στη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής, προάγοντας ένα πιο βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης των οργανικών υπολειμμάτων.



Σχήμα 1.7: Κομποστοποίηση [10]

Στη γεωργία, το κομπόστ προσφέρει σημαντικά οφέλη. Πιο συγκεκριμένα, εμπλουτίζει το έδαφος με οργανική ύλη, αυξάνοντας τη συγκράτηση νερού και τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά. Παράλληλα, ενισχύει τη βιοποικιλότητα του εδαφικού μικροβιώματος, γεγονός που καθιστά τα φυτά πιο ανθεκτικά σε ασθένειες και παράσιτα. Επιπλέον, μέσω της χρήσης κομπόστ μειώνεται η ανάγκη για χημικά λιπάσματα, συμβάλλοντας στη μείωση της ρύπανσης του εδάφους και των υδάτων και προάγοντας πρακτικές φιλικές προς το περιβάλλον. Έτσι, η κομποστοποίηση ενσωματώνεται πλήρως σε στρατηγικές βιώσιμης γεωργικής παραγωγής, αποτελώντας έναν ακρογωνιαίο λίθο της κυκλικής οικονομίας. [11]

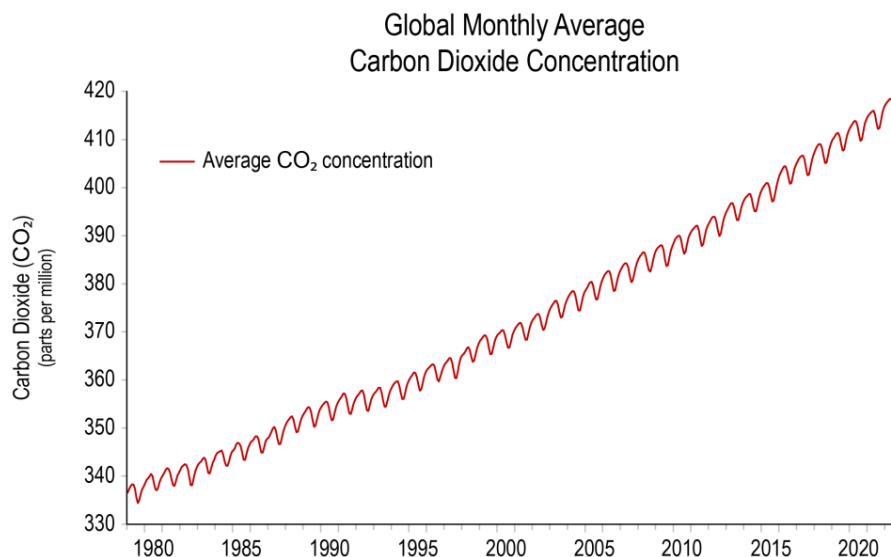
Η παρακολούθηση βασικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) είναι κρίσιμη για τη σωστή διεξαγωγή της κομποστοποίησης. Η θερμοκρασία λειτουργεί ως βασικός δείκτης της μικροβιακής δραστηριότητας και της φάσης εξέλιξης του κομπόστ. Οι υψηλές θερμοκρασίες (μεσοφιλικές και θερμοφιλικές φάσεις) διασφαλίζουν την αποδόμηση παθογόνων και σπόρων ζιζανίων. Επιπροσθέτως, η υγρασία επηρεάζει άμεσα τη βιολογική δραστηριότητα, καθώς οι μικροοργανισμοί χρειάζονται νερό για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Είναι γεγονός ότι η υπερβολική υγρασία οδηγεί σε αναερόβιες συνθήκες, ενώ αντίθετα η έλλειψη υγρασίας επιβραδύνει τη διαδικασία. Παράλληλα, η συγκέντρωση CO_2 αποτελεί ένδειξη της έντασης της μικροβιακής αναπνοής και, κατ' επέκταση, της συνολικής δραστηριότητας του συστήματος. Συνοψίζοντας, η σωστή διαχείριση αυτών των παραμέτρων επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της αποδόμησης, τη μείωση των οσμών και την παραγωγή κομπόστ υψηλής ποιότητας, υποστηρίζοντας έτσι τη βιώσιμη γεωργική πρακτική.



Σχήμα 1.8: Πλήρης Διαδικασία Κομποστοποίησης [12]

1.1.5 Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂) και Γεωργία

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι ένα σημαντικό αέριο το οποίο παγιδεύει θερμότητα και για αυτό είναι γνωστό ως αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου. Προέρχεται από την εξόρυξη και καύση ορυκτών καυσίμων (όπως άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο), από πυρκαγιές και φυσικές διεργασίες, όπως ηφαιστειακές εκρήξεις. Από την έναρξη των βιομηχανικών χρόνων περίπου τον 18^ο αιώνα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αυξήσει το ατμοσφαιρικό διοξείδιο του άνθρακα κατά 50%. Αυτό πρακτικά υποδηλώνει ότι η ποσότητα του CO₂ είναι αυτή τη στιγμή στο 150% από την αντίστοιχη τιμή που είχε περίπου το 1750. [13]



Σχήμα 1.9 : Συγκέντρωση CO₂ με το πέρασμα των χρόνων [14]

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η συγκέντρωση όλων των αερίων μετρείται συχνά σε "Parts per Million" (ppm), δηλαδή μέρη στο εκατομμύριο, επειδή πρόκειται για μια μονάδα που επιτρέπει την ακριβή και κατανοητή περιγραφή πολύ μικρών ποσοτήτων αερίων μέσα σε ένα μείγμα, όπως είναι η ατμόσφαιρα. Τα αέρια που υπάρχουν σε ιχνοποσότητες, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) ή το μεθάνιο (CH₄), έχουν σημαντικές επιδράσεις στο

περιβάλλον και την υγεία, παρόλο που η παρουσία τους είναι ελάχιστη. Η χρήση του ppm διευκολύνει τη σύγκριση και παρακολούθηση αυτών των ποσοτήτων με ακρίβεια, χωρίς την ανάγκη συνεχούς μετατροπής σε πιο σύνθετες μονάδες όπως το ποσοστό επί τοις εκατό. Για παράδειγμα, μια συγκέντρωση 400 ppm CO₂ σημαίνει ότι υπάρχουν 400 μόρια CO₂ για κάθε 1.000.000 μόρια αέρα, προσφέροντας έναν απλό και άμεσο τρόπο να εκφράσουμε χαμηλές συγκεντρώσεις με μεγάλη ακρίβεια.

Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η συγκέντρωση ορισμένων αερίων :

Πίνακας 1.1: Συγκέντρωση διαφόρων αερίων στον ατμοσφαιρικό αέρα [15]

Αέριο	Συγκέντρωση (ppm)
Άζωτο (N ₂)	780840
Οξυγόνο (O ₂)	209460
Αργό (Ar)	9340
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	394.45
Νέο (Ne)	18.18
Ήλιο (He)	5.24
Μεθάνιο (CH ₄)	1.79
Κρύπτο (Kr)	1.14
Υδρογόνο (H ₂)	0.55
Υποξείδιο του Αζώτου (N ₂ O)	0.33
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	0.10
Ξένο (Xe)	0.09
Όζον (O ₃)	0.07
Διοξείδιο του Αζώτου (NO ₂)	0.02

Συγκεκριμένα, τα αποδεκτά επίπεδα συγκέντρωσης CO₂ στον καθαρό αέρα είναι περίπου 400 ppm ή 0.04% CO₂ στον ατμοσφαιρικό αέρα. Σε εσωτερικούς χώρους, οι τυπικές τιμές συγκέντρωσης CO₂ κυμαίνονται από 400 έως 1000 ppm (0.04%-0.1%). Σε επίπεδα που κυμαίνονται από 1000 έως 2000 ppm (0.1%-0.2%) παρατηρούνται συχνά παράπονα ζαλάδας για την κακή ποιότητα αέρα στο χώρο. Από 2000 έως 5000 ppm (0.2%-0.5%) διακρίνονται φαινόμενα πονοκεφάλων, κούρασης, έλλειψης συγκέντρωσης, αυξημένου καρδιακού ρυθμού και ναυτίας. Επιπρόσθετα, σε επίπεδα άνω των 50.000 ppm (>5%) εμφανίζεται τοξικότητα του αέρα λόγω στέρησης οξυγόνου. Τέλος σε επίπεδα άνω των 100.000 ppm (>10%) έχουμε στέρηση του οξυγόνου σε δευτερόλεπτα γεγονός που θα μπορούσε να προκαλέσει σπασμούς και να οδηγήσει σε κόμα ή σε θάνατο. Στο Σχήμα 1.10 , παρατηρούνται ορισμένα από αυτά τα επίπεδα και η επίδραση αυτών στην υγεία μας. [16]

AIRQUALITY

EFFECTS	PPM
 Hazardous prolonged exposure	5000
 Negative health effects	2000
 Ventilation necessary	1200
 Ventilation required	1000
 Acceptable level	800
 Healthy indoor climate	600
 Healthy outside air level	350

Σχήμα 1.10: Επίπεδα CO₂ και οι αντίστοιχες επιδράσεις τους [17]

Η αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ έχει οδηγήσει σε αρκετές αρνητικές περιβαλλοντικές επιδράσεις. Η διαρκής μέτρηση και παρακολούθηση της συγκέντρωσης CO₂ της ατμόσφαιρας, επιτρέπει στους επιστήμονες να κατανοήσουν καλύτερα το κλίμα της Γης και παράλληλα να κάνουν προβλέψεις για μελλοντικές αλλαγές.

Η παρακολούθηση της συγκέντρωσης CO₂ είναι ιδιαίτερα σημαντική σε γεωργικές εφαρμογές. Στη γεωργία, το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί είτε να συνδράμει στην ενίσχυση της ανάπτυξης των φυτών σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα όπως τα θερμοκήπια και τα δικτυοκήπια είτε να προκαλέσει φθορές στις καλλιέργειες εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και της ξηρασίας.

Πιο συγκεκριμένα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα μπορεί να αυξήσουν την αποδοτικότητα χρήσης του νερού στις καλλιέργειες και να μετριάσουν σημαντικά τις απώλειες απόδοσης λόγω της κλιματικής αλλαγής, σύμφωνα με μία νέα μελέτη της NASA. Αναλυτικότερα, μελέτες έχουν δείξει ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας επηρεάζουν τις καλλιέργειες με δύο σημαντικούς τρόπους. Πρώτον, ενισχύουν τις αποδόσεις των καλλιεργειών αυξάνοντας το ρυθμό της φωτοσύνθεσης, η οποία υποκινεί την ανάπτυξη των φυτών και δεύτερον μειώνουν τη ποσότητα νερού που χάνουν οι καλλιέργειες μέσω της διαπνοής. Γενικά, τα φυτά διαπνέουν μέσω των φύλλων τους, που περιέχουν μικροσκοπικούς πόρους που ονομάζονται στόμια. Τα στόμια λοιπόν, ανοίγουν και συλλέγουν μόρια διοξειδίου του άνθρακα για φωτοσύνθεση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας απελευθερώνουν υδρατμούς. Έτσι, καθώς τα επίπεδα συγκέντρωσης CO₂ αυξάνονται, οι πόροι δεν ανοίγουν τόσο πολύ, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται χαμηλότερα επίπεδα διαπνοής από τα φυτά και επομένως αυξημένη αποδοτικότητα χρήσης νερού. [18]

Ωστόσο, αν και η μακροπρόθεσμη προοπτική είναι η αύξηση της παραγωγικότητας, αξίζει να σημειωθεί και το κύριο αρνητικό αντίκτυπο της αύξησης συγκέντρωσης CO₂ στη βλάστηση. Αυτό είναι η κλιματική αλλαγή. Οι αρνητικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής, όπως η ξηρασία και η λειψυδρία, μπορούν εύκολα να υπερκαλύψουν τυχόν οφέλη της αυξημένης παραγωγικότητας. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση των καλλιεργειών καθώς εμφανίζεται έλλειψη υγρασίας

στο έδαφος. Επιπλέον, η αυξημένη θερμότητα δύνανται να καταστρέψει άμεσα τα φυτά και να παρεμποδίσει την αναπαραγωγική τους διαδικασία. Τέλος, τα αυξημένα επίπεδα συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορες καλλιέργειες θα μπορούσαν άμεσα να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία, κρίνοντας από το γεγονός ότι διάφορα τρόφιμα γίνονται λιγότερο θρεπτικά. [19]



Σχήμα 1.11: Ελεγχόμενο Περιβάλλον προσθήκης CO₂ για τη καλλιέργεια βασιλικών [20]

1.1.6 Σκοπός και Στόχος της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη μιας φορητής λύσης παρακολούθησης κρίσιμων παραμέτρων του χουμόχωματος, με στόχο την υποστήριξη γεωργικών εφαρμογών που βασίζονται σε δεδομένα πεδίου. Καθώς το χουμόχωμα αποτελεί βασικό συντελεστή της υγείας του εδάφους και της ποιότητας της καλλιέργειας, η συνεχής παρακολούθηση των φυσικοχημικών του χαρακτηριστικών μπορεί να προσφέρει πολύτιμη πληροφόρηση για την κατανόηση της βιολογικής του δραστηριότητας και της καταλληλότητάς του.

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετήσει και να αποτυπώσει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που θα επιτρέπει στον χρήστη να έχει άμεση και αξιόπιστη εικόνα της κατάστασης του χουμόχωματος. Μέσω της μέτρησης μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), επιδιώκεται η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τον βαθμό αποσύνθεσης του οργανικού υλικού, την επάρκεια οξυγόνου και την ευνοϊκότητα των συνθηκών για καλλιέργεια.

Ο τελικός στόχος είναι η δημιουργία μιας λειτουργικής, πρακτικής και επιστημονικά τεκμηριωμένης μεθόδου αξιολόγησης χουμόχωματος, η οποία να μπορεί να εφαρμοστεί επιτόπου, χωρίς εργαστηριακό εξοπλισμό, και να παρέχει στον αγρότη ή στον χρήστη τα απαραίτητα δεδομένα για να βελτιώσει τις συνθήκες του αγροτεμαχίου του ή να διαπιστώσει την καταλληλότητα ενός δείγματος. Η εργασία τοποθετείται στο ευρύτερο πλαίσιο της ευφυούς γεωργίας, αναδεικνύοντας τον ρόλο της τεχνολογίας στην αποδοτική και βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων.

1.1.7 Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερις κύριες ενότητες, καθεμία από τις οποίες αναπτύσσει διαφορετικές πτυχές του θεωρητικού και τεχνικού

πλαισίου, της μεθοδολογίας και της εφαρμογής της προτεινόμενης διάταξης για την καταγραφή περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Η Ενότητα 1 περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των αισθητήρων θερμοκρασίας, υγρασίας και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενώ εξετάζονται και οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της ασύρματης παρακολούθησης περιβαλλοντικών δεδομένων. Επίσης, παρουσιάζονται παραδείγματα υπαρχουσών διατάξεων και σχετικών εφαρμογών, με στόχο τη συγκριτική θεώρηση και την τεκμηρίωση των επιλογών που υιοθετούνται στη συνέχεια.

Η Ενότητα 2 εστιάζει στη σχεδίαση και την αναλυτική υλοποίηση του έξυπνου αισθητήρα (Compost Stick), τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού. Περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά εξαρτήματα του συστήματος, όπως οι αισθητήρες (DS18B20/SEN0308, SEN0220), ο μικροελεγκτής (ESP32 – FireBeetle), η μονάδα τροφοδοσίας μέσω επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ιόντων λιθίου και η οθόνη απεικόνισης δεδομένων. Παρουσιάζεται επίσης η κατασκευή του περιβλήματος και τα συνδεσμολογικά στοιχεία. Ειδική αναφορά γίνεται στη συνολική διάταξη του κυκλώματος, στην αρχιτεκτονική διασύνδεσης των επιμέρους μονάδων καθώς και στη λογική ροή του προγράμματος που υλοποιεί τη λειτουργία της διάταξης. Τέλος, καταγράφονται πιθανές σχεδιαστικές δυσκολίες και τεχνικές παραδοχές που τέθηκαν κατά τη φάση της ανάπτυξης.

Η Ενότητα 3 περιλαμβάνει τη μεθοδολογία συλλογής μετρήσεων από το ολοκληρωμένο σύστημα, καθώς και την ερμηνεία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται τα δεδομένα που κατέγραψαν οι αισθητήρες σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, και αναλύεται η συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με τις τεχνικές προδιαγραφές και την ακρίβεια των μετρητικών οργάνων. Η ερμηνεία των μετρήσεων συνοδεύεται από σχολιασμό και συσχέτιση με τις παραμέτρους της κομποστοποίησης, αναδεικνύοντας την αξιοπιστία και την πρακτική εφαρμοσιμότητα της υλοποιημένης διάταξης.

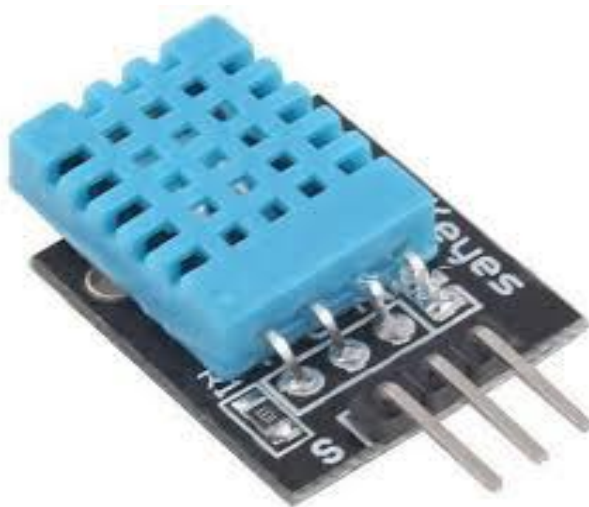
Στην Ενότητα 4 διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντικές αναβαθμίσεις του συστήματος. Συγκεκριμένα, αναφέρονται δυνατότητες αντικατάστασης των αισθητήρων με πιο ακριβή και ευρέως διαβαθμισμένα μοντέλα, βελτιώσεις στο κύκλωμα τροφοδοσίας και φόρτισης, ενίσχυση της μηχανικής αντοχής της κατασκευής μέσω επιλογής καταλληλότερων υλικών και η ενσωμάτωση πρόσθετων λειτουργιών όπως ασύρματη επικοινωνία και καταγραφή ιστορικών δεδομένων.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τη διατύπωση των συμπερασμάτων, όπου συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα της υλοποίησης, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του συστήματος και διατυπώνονται σκέψεις για μελλοντική εξέλιξη και ερευνητική αξιοποίηση.

1.2 Κεφάλαιο 2 : Αισθητήρες

1.2.1 Αισθητήρες

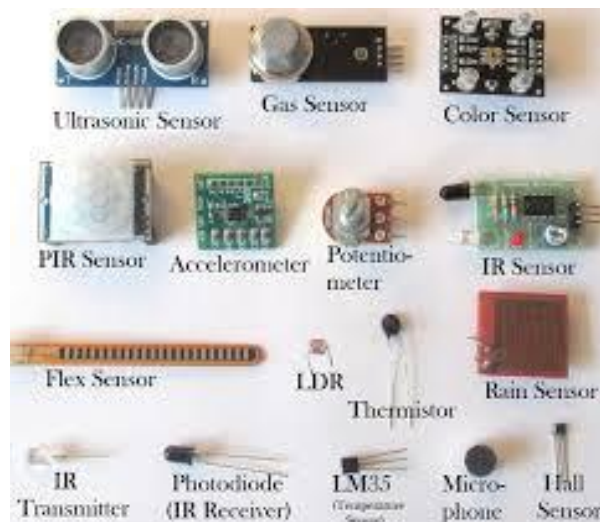
Ένας αισθητήρας ορίζεται συχνά ως μία συσκευή που λαμβάνει και αποκρίνεται σε ένα σήμα ή ερέθισμα. Αυτό το ερέθισμα είναι η ποσότητα, η ιδιότητα ή η κατάσταση που γίνεται αισθητή και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Πρακτικά, ένας αισθητήρας είναι μία συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και παράγει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο, συνήθως σε τάση (Volt) ή σε ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (Ampere). [21]



Σχήμα 1.12: Απλός Αισθητήρας Υγρασίας και Θερμοκρασίας [22]

Στον ευρύτερο ορισμό, ένας αισθητήρας είναι μία συσκευή, μονάδα, μηχανή ή υποσύστημα που ανιχνεύει γεγονότα ή αλλαγές στο περιβάλλον του και στέλνει τις πληροφορίες σε άλλα ηλεκτρονικά όπως σε έναν επεξεργαστή ενός υπολογιστή.

Είναι γεγονός ότι οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως καθημερινά σε ποικίλες εφαρμογές, όπως οι αισθητήρες αφής στους ευαίσθητους στην αφή ανελκυστήρες ή στις λάμπες φωτισμού με μεταβλητή δυνατότητα εκπομπής φωτός αγγίζοντας απλά τις βάσεις τους. Με τις εξελίξεις στις μικρομηχανές και στις εύχρηστες πλατφόρμες μικροελεγκτών, η χρήση των αισθητήρων έχει επεκταθεί πέρα από τα παραδοσιακά πεδία μέτρησης θερμοκρασίας, πίεσης, ροής κ.τ.λ.



Σχήμα 1.13: Διάφοροι Τύποι Αισθητήρων [23]

Οι αναλογικοί αισθητήρες, όπως τα ποτενσιόμετρα και οι αντιστάσεις αντίχνευσης δύναμης, εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται τακτικά. Οι εφαρμογές αυτών περιλαμβάνουν την κατασκευή και τη μηχανική διαφόρων τομέων όπως τα αεροπλάνα, τα αυτοκίνητα, η ιατρική, η ρομποτική και πολλές άλλες πτυχές της καθημερινής μας ζωής. Ακόμη, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα άλλων αισθητήρων που μετρούν τις χημικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών, συμπεριλαμβανομένων των οπτικών αισθητήρων για τη μέτρηση του δείκτη διάθλασης, των αισθητήρων δόνησης για τη μέτρηση ιξώδους του υγρού και των ηλεκτροχημικών αισθητήρων για τη παρακολούθηση του pH των υγρών.



Σχήμα 1.14: Ποτενσιόμετρο [24]

1.2.1.1 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων

Οι αισθητήρες, ως βασικά συστατικά για την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, διακρίνονται για την ποικιλία και την εξειδίκευσή τους σε σχέση με τις ανάγκες των εφαρμογών τους. Αν και η λειτουργία τους εξαρτάται από τη τεχνολογία και το αντικείμενο εφαρμογής, τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την αποδοτικότητά τους παραμένουν σταθερά και κρίσιμα για τη βέλτιστη λειτουργία τους. Στην παρούσα ενότητα, θα εξεταστούν οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των αισθητήρων, όπως το εύρος, ο

χρόνος απόκρισης, η ακρίβεια, η ευαισθησία και άλλοι, που αποτελούν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά τους και καθορίζουν τη χρησιμότητά τους σε διάφορα περιβάλλοντα και εφαρμογές. [25], [26] Ακολουθεί μία εις βάθος ανάλυση των χαρακτηριστικών αυτών :

- Εύρος (Range) : είναι το φάσμα τιμών ενός φυσικού χαρακτηριστικού που ένας αισθητήρας μπορεί να μετρήσει με αξιοπιστία, από το ελάχιστο ως το μέγιστο. Πρακτικά, ορίζει το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα.
- Ακρίβεια (Precision) : είναι ο βαθμός στον οποίο μία μετρούμενη τιμή μοιάζει με την πραγματική ή αποδεκτή τιμή αναφοράς. Οι μετρήσεις ενός ακριβή αισθητήρα είναι γενικά πολύ κοντά στην πραγματική τιμή. Προσδιορίζει το βαθμό επαναληψιμότητας μίας μετρούμενης τιμής για σταθερή είσοδο.
- Χρόνος Απόκρισης (Response Time) : είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εντοπίσει και να αντιδράσει ένας αισθητήρας σε μεταβολές. Πρόκειται, για το χρόνο που απαιτείται για να λάβει τη τελική της τιμή η έξοδος.
- Υστέρηση (Hysteresis) : είναι το φαινόμενο που παρατηρείται σε αισθητήρες όπου η τιμή εξόδου του αισθητήρα δεν αλλάζει αμέσως καθώς η τιμή εισόδου ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο. Προκαλεί ασυνέπειες στις μετρήσεις του αισθητήρα, όταν η είσοδος του παρουσιάζει περιοδικές διακυμάνσεις.
- Ορθότητα (Accuracy) : είναι το πόσο σωστή είναι μία μέτρηση του αισθητήρα (για κοινή χρήση $\pm 10\%$).
- Ανοχή (Tolerance) : είναι η μέγιστη αναμενόμενη απόκλιση.
- Γραμμικότητα (Linearity) : είναι ο βαθμός στον οποίο η γραφική παράσταση της εξόδου ως προς την είσοδο ενός αισθητήρα προσεγγίζει την ευθεία γραμμή. Ένας αισθητήρας μπορεί να είναι γραμμικός σε μία περιοχή τιμών εισόδου και η γραμμικότητα του να δίνεται ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του.
- Ευαισθησία (Sensitivity) : εκφράζει το κατά πόσο μεταβάλλεται η έξοδος του αισθητήρα ανά μονάδα μεταβολής εισόδου του.
- Σφάλμα (Error) : είναι η διαφορά ανάμεσα στην έξοδο του αισθητήρα με τη πραγματική τιμή.

$$e = \frac{\text{Πραγματική Τιμή} - \text{Μετρούμενη Τιμή}}{\text{Πραγματική Τιμή}} * 100\%$$

Εξίσωση 1.1: Εξίσωση Σφάλματος Αισθητήρα [26]

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες : τα συστηματικά σφάλματα και τα τυχαία σφάλματα.

- Βαθμονόμηση (Calibration) : είναι η βαθμολόγηση της κλίμακας σε μονάδες.
- Ολίσθηση (Drift) : είναι η φυσική τάση ενός αισθητήρα να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του με το χρόνο λόγω γήρανσης υλικών και λόγω

περιβαλλοντικών μεταβολών (π.χ μεταβολή θερμοκρασίας). Αποτέλεσμα είναι να εμφανίζεται μεταβολή στην έξοδο ενώ η είσοδος παραμένει αμετάβλητη.

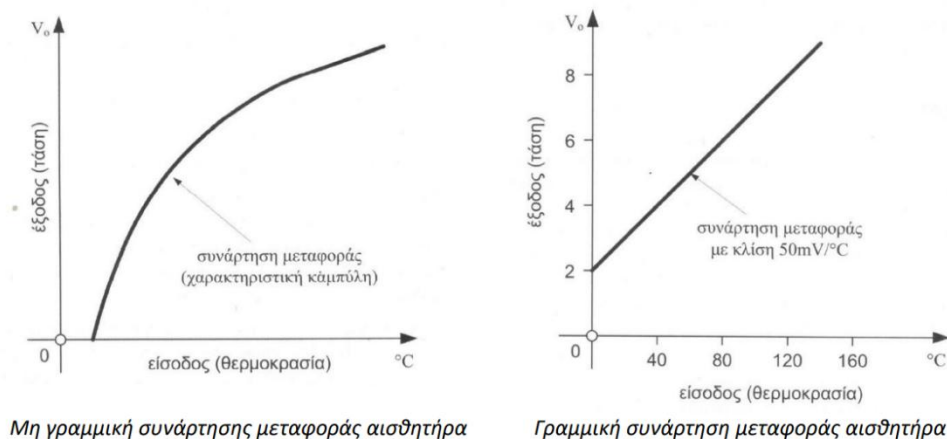
- Αξιοπιστία (Reliability): είναι η ικανότητα της συσκευής να λειτουργήσει στα πλαίσια των προδιαγραφών της , κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και για μία δεδομένη περίοδο ή αριθμό κύκλων λειτουργίας.
- Διακριτική Ικανότητα (Resolution) : αναφέρεται στη μικρότερη αλλαγή εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει (μετρήσει) ένας αισθητήρας (σύστημα). Όσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα, τόσο μικρότερο είναι το βήμα που μπορεί να μετρηθεί.
- Επαναληψιμότητα (Repeatability) : είναι η ικανότητα του αισθητήρα να δίνει παρόμοια έξοδο πολλές φορές για συγκεκριμένη είσοδο.
- Ευστάθεια (Stability) : είναι το φαινόμενο όπου η είσοδος του αισθητήρα διατηρείται σταθερή για αρκετό χρονικό διάστημα και έτσι ενδέχεται με τη πάροδο του χρόνου η έξοδος του αισθητήρα να εμφανίσει αργή μεταβολή.
- Νεκρή Ζώνη (Dead Zone) : είναι το φαινόμενο όπου η είσοδος του αισθητήρα αυξάνεται ξεκινώντας από μικρές τιμές και έτσι ενδέχεται να μην γίνει αντιληπτή η μεταβολή από τον αισθητήρα, έως η τιμή της εισόδου να ξεπεράσει ένα κατώφλι.
- Χρόνος Λειτουργίας (Operating Life) : είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο αναμένεται να λειτουργεί ο αισθητήρας στα πλαίσια των προδιαγραφών του (σε μονάδες χρόνου ή αριθμό φορών ή κύκλων λειτουργίας).

Όπως είναι αντιληπτό η επιλογή ενός αισθητήρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και είναι σημαντικό τα χαρακτηριστικά του να είναι κατάλληλα για την ποιότητα της εξόδου που απαιτούμε. Ένας καλός αισθητήρας θα πρέπει να είναι ευαίσθητος στο μετρούμενο μέγεθος, να μην είναι ευαίσθητος σε κανένα άλλο μέγεθος και να μην επηρεάζει το υπό μέτρηση μέγεθος. Επιπλέον η επιλογή ενός αισθητήρα επηρεάζεται επίσης και από το κόστος του. Επομένως σε κάθε περίπτωση η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα καταλήγει στην εύρεση της «χρυσής τομής» μεταξύ όλων των προαναφερθέντων παραγόντων και χαρακτηριστικών. Είναι εμφανές ότι ανάλογα με τη χρήση του αισθητήρα δίνουμε περισσότερη βάση και σε άλλα χαρακτηριστικά. Παραδείγματος χάριν, κατά την επιλογή ενός αισθητήρα θερμοκρασίας είναι σημαντικό να επιλέξουμε έναν αισθητήρα με υψηλή ακρίβεια για τον ακριβή προσδιορισμό θερμοκρασίας και χαμηλό χρόνο απόκρισης για την άμεση μέτρηση θερμοκρασίας. Ωστόσο και σε αυτή τη περίπτωση αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του αισθητήρα θερμοκρασίας μπορεί να διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή και τα χαρακτηριστικά στα οποία δίνουμε έμφαση ενδέχεται να μεταβάλλονται.

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά Τυπικών Αισθητήρων Θερμοκρασίας [27]

Χαρακτηριστικά Τυπικών Αισθητήρων Θερμοκρασίας				
Τυπικά Χαρακτηριστικά	Θερμίστορ Γενικού Σκοπού	Αισθητήρας Τύπου Αντίστασης (RTDs)	Θερμοζεύγη (TCs)	Ημιαγώγιμοι Αισθητήρες Θερμοκρασίας
Εύρος Θερμοκρασίας	-55°C έως +125°C	-200°C έως +850°C	-600°C έως +2000°C	-50°C έως +150°C
Γραμμικότητα	Εκθετική	Σχεδόν Γραμμική	Σχεδόν Γραμμική	Βέλτιστη
Ευαισθησία	Υψηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψιστη
Χρόνος Απόκρισης	Γρήγορος	Αργός	Γρήγορος προς Αργός	Αργός
Μακροχρόνια Ευστάθεια	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
Αυτοθέρμανση	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι
Κόστος	Χαμηλό	Χαμηλό (film) Υψηλό (wire wound)	Μέτριο προς Υψηλό	Χαμηλό προς Μέτριο

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι, κάθε αισθητήρας συνοδεύεται από το διάγραμμα της συνάρτησης μεταφοράς του (Transfer Function). Πρόκειται για το διάγραμμα στο οποίο αντικατοπτρίζεται η σύνδεση μεταξύ εισόδου και εξόδου ενός αισθητήρα, ή του ερεθίσματος και της απόκρισης. Είναι μία μαθηματική αναπαράσταση που δείχνει τη σχέση μεταξύ μετρούμενης ποσότητας του αισθητήρα (γενικά ένα φυσικό μέγεθος, όπως θερμοκρασία, πίεση κ.α.) και της εξόδου του, που είναι συνήθως τάση ή ρεύμα.



Σχήμα 1.15: Συνάρτηση Μεταφοράς Αισθητήρα [26]

1.2.2 Τύποι Αισθητήρων

1.2.2.1 Αισθητήρας Θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία είναι ένα μετρήσιμο μέγεθος που αναπαριστά τη θερμική ενέργεια ενός σώματος. Η μέτρησή της μπορεί να γίνει με χρήση αισθητήρων ή κατασκευή διατάξεων.

Γενικά, η βασική αρχή λειτουργίας των αισθητήρων θερμοκρασίας είναι η τάση στους ακροδέκτες μία διόδου. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της τάσης και αντίστοιχη μείωση της τάξης μεταξύ της βάσης ενός τρανζίστορ και των ακροδεκτών του εκπομπού.

Η μέθοδος μέτρησης της θερμοκρασίας αξιοποιεί τις ιδιότητες των υλικών, οι οποίες μεταβάλλονται με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Πρακτικά, η μεταβολή της θερμοκρασίας ενδέχεται να μεταβάλλει την ωμική αντίσταση, τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών, την ακτινοβολούμενη ενέργεια, τις διαστάσεις κ.α. Ωστόσο η διαφορά αυτή της θερμοκρασίας ενδέχεται να προκαλέσει και μία διαφορά δυναμικού. [28]

1.2.2.1.1 Αισθητήρας Τύπου Αντίστασης – RTD

Γνωρίζουμε ότι, η ηλεκτρική αντίσταση των μετάλλων μεταβάλλεται με την μεταβολή της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον τύπο [29] :

$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

Εξίσωση 1.2: Ηλεκτρική Αντίσταση ως συνάρτηση Θερμοκρασίας [29]

Όπου :

- R : η ηλεκτρική (ωμική) αντίσταση
- ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού (αγωγού)
- l : το μήκος του υλικού
- A : η επιφάνεια του υλικού (αγωγού)

Η ειδική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία T δίνεται από τον τύπο :

$$\rho = \rho_0 * [1 + \alpha * (T - T_0)]$$

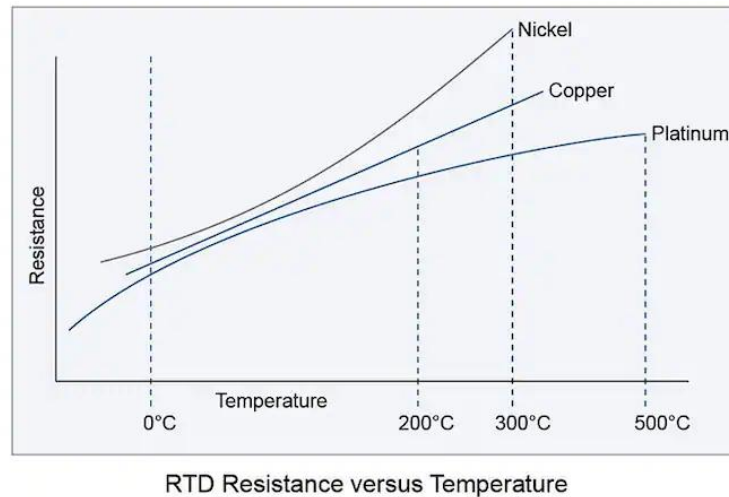
Εξίσωση 1.3: Ειδική Αντίσταση Αγωγού ως συνάρτηση Θερμοκρασίας [29]

Όπου :

- ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού (αγωγού) σε θερμοκρασία T
- ρ_0 : η ειδική αντίσταση του υλικού (αγωγού) σε θερμοκρασία T_0
- α : θερμικός συντελεστής του υλικού (αγωγού) της ηλεκτρικής αντίστασης

Από τους τύπους που προηγήθηκαν είναι εμφανές ότι η αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας του μετάλλου προκαλεί την αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης και αντιστρόφως.

Ένας RTD (Resistance Temperature Detector) είναι ένας αισθητήρας του οποίου η αντίσταση αλλάζει καθώς αλλάζει η θερμοκρασία του. Η σχέση της αντίστασης με τη θερμοκρασία προκύπτει από τους δύο παραπάνω τύπους. Αυτή η σχέση είναι γνωστή και μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Η μεταβολή της αντίστασης ως συνάρτηση της μεταβολής της θερμοκρασίας για 3 βασικά μέταλλα (Νικέλιο, Χαλκός και Πλατίνα) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.16. [30]



Σχήμα 1.16: Μεταβολή Αντίστασης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας [30]

Ο RTD είναι μία παθητική συσκευή και έτσι δεν παράγει από μόνος του αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται εξωτερικές ηλεκτρονικές συσκευές για τη μέτρηση της αντίστασης του αισθητήρα, περνώντας ένα μικρό ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του αισθητήρα για τη δημιουργία τάσης. Το ρεύμα μέτρησης αυτό είναι της τάξης του 1 mA ή λιγότερο και φτάνει έως 5 mA χωρίς κίνδυνο υπερθέρμανσης. Η ακρίβεια στις μετρήσεις αυτών των αισθητήρων είναι της τάξης του $\pm 15\%$. Το αισθητήριο στοιχείο ενός ανιχνευτή θερμοκρασίας με αντίσταση (RTD) αποτελείται συνήθως από κάποιο μέταλλο το οποίο επιλέγεται με βάση τις τιμές θερμοκρασίας που πρόκειται να ανιχνευθούν, καθώς διαφορετικά μέταλλα διαθέτουν διαφορετικά πεδία τιμών.

Είναι γεγονός ότι υπάρχουν πάρα πολλοί τύποι RTDs, οι οποίοι συνήθως χαρακτηρίζονται από το υλικό τους, την ονομαστική τους αντίσταση και το συντελεστή θερμοκρασίας αντίστασης TCR (Temperature Coefficient Resistance). Ο συντελεστής αυτός ενός RTD αποτελεί το μέσο συντελεστή θερμοκρασίας αντίστασης ενός RTD από 0 °C έως 100 °C και είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του [31]. Σε γενικές γραμμές, ο τύπος υπολογισμού του TCR είναι :

$$TCR = \frac{R_{100^{\circ}\text{C}} - R_{0^{\circ}\text{C}}}{R_{0^{\circ}\text{C}} * 100^{\circ}\text{C}}$$

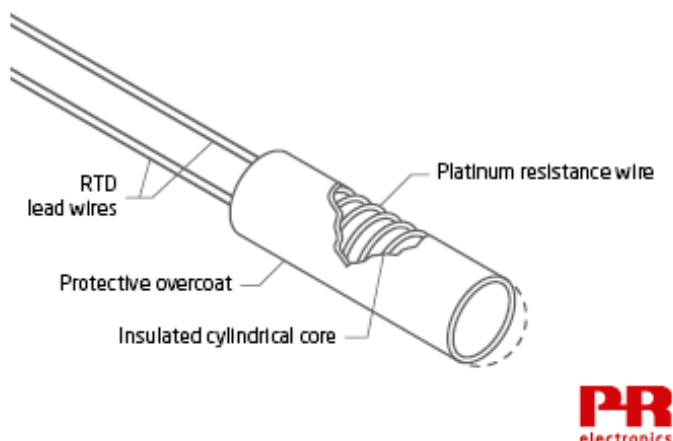
Εξίσωση 1.4: Συντελεστής Θερμοκρασίας Αντίστασης (TCR) ενός RTD [31]

Πίνακας 1.3: Βασικά Χαρακτηριστικά και Εύρη Τιμών για RTD 3 Βασικών Μετάλλων [32]

Στοιχείο Μετάλλου	Εύρος Θερμοκρασίας	Οφέλη	Αντίσταση Βάσης	TCR($\Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$)
Πλατίνα	-260 $^{\circ}\text{C}$ έως +850 $^{\circ}\text{C}$	Βέλτιστη ευστάθεια, Καλή Γραμμικότητα	100 Ω στους 0 $^{\circ}\text{C}$	0.00385 (IEC-751) 0.003916 (JIS 1604-1981)
Χαλκός	-100 $^{\circ}\text{C}$ έως 260 $^{\circ}\text{C}$	Βέλτιστη Γραμμικότητα	10 Ω στους 0 $^{\circ}\text{C}$	0.00427
Νικέλιο	-100 $^{\circ}\text{C}$ έως 260 $^{\circ}\text{C}$	Χαμηλό Κόστος, Υψηλή Ευαισθησία	120 Ω στους 0 $^{\circ}\text{C}$	0.00672

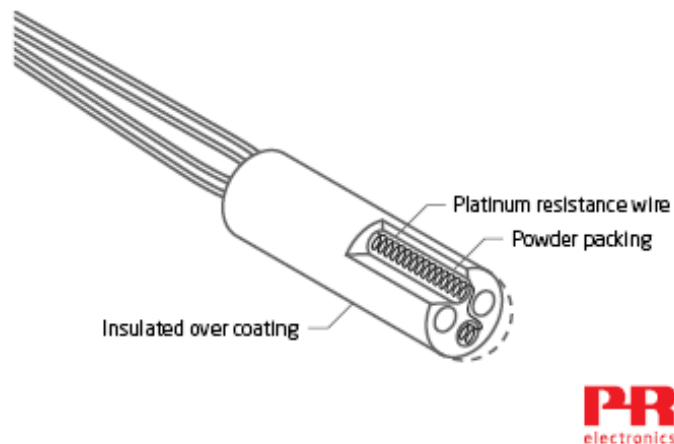
Γενικά υπάρχουν 3 τρόποι για τη κατασκευή αισθητήρων RTDs και αυτοί είναι :

- Wire Wound RTDs : σε αυτή τη περίπτωση ένα σύρμα αντίστασης τυλίγεται γύρω από έναν αγωγίμο πυρήνα, ο οποίος συνήθως είναι κατασκευασμένος από κεραμικό υλικό. Ο κατασκευαστής του αισθητήρα κόβει προσεκτικά το μήκος του σύρματος αντίστασης για να πετύχει την καθορισμένη αντίσταση στους 0 $^{\circ}\text{C}$. Αυτό ακριβώς ονομάζεται αντίσταση R_0 . Παραδείγματος χάριν, στα θερμόμετρα Pt100 η αντίσταση R_0 είναι 100 Ω . [33]



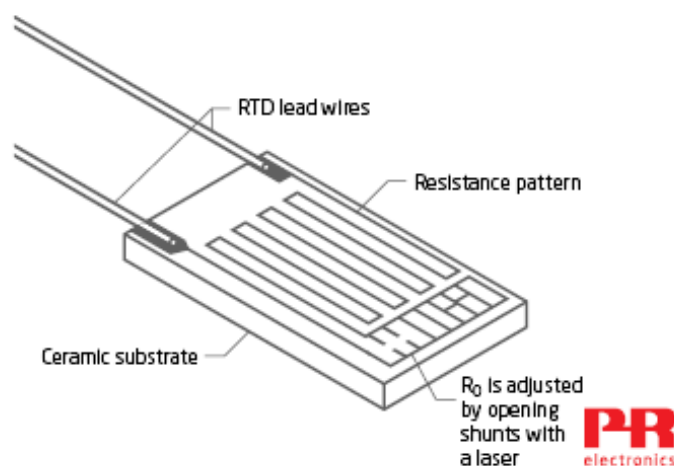
Σχήμα 1.17: Wire Wound RTDs [33]

- Coiled Element RTDs : σε αυτή τη περίπτωση ένα σύρμα αντίστασης τυλίγεται σε μικρά πηνία, τα οποία εφαρμόζουν χαλαρά σε μία κεραμική μορφή που στη συνέχεια γεμίζεται με μη αγωγίμη σκόνη. Το σύρμα αντίστασης είναι ελεύθερο να διαστέλλεται και να συστέλλεται καθώς αλλάζει η θερμοκρασία, ελαχιστοποιώντας έτσι το σφάλμα που προκαλείται από μηχανική καταπόνηση. Η σκόνη αυξάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στα πηνία, βελτιώνοντας έτσι το χρόνο απόκρισης. Τα κουλουριασμένα στοιχεία RTD προστατεύονται συνήθως από ένα μεταλλικό περίβλημα κατά το σχηματισμό των ανιχνευτών θερμοκρασίας RTD. [33]



Σχήμα 1.18: Coiled Element RTDs [33]

- Thin Film RTDs : σε αυτή τη περίπτωση ο κατασκευαστής προσαρμόζει την αντίσταση στους 0°C (R_0) ανοίγοντας παράλληλες παραδιακλαδώσεις στο μονοπάτι με μία δέσμη λέιζερ. Όσα περισσότερα ανοίγματα ανοίγουν, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση στους 0°C . Είναι γεγονός ότι τέτοιου είδους RTDs παράγονται μαζικά και κοστίζουν λιγότερο από οποιονδήποτε άλλο τύπο RTDs. Γενικά είναι μικρότεροι και έχουν χαμηλότερους χρόνους απόκρισης, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό σε πολλές εφαρμογές. [33]



Σχήμα 1.19: Thin Film RTDs [33]

1.2.2.1.2 Θερμίστορ

Τα θερμίστορ είναι αισθητήρες που προκύπτουν από ημιαγώγιμα υλικά που υπόκεινται σε επεξεργασία με οξείδια χρωμίου, κοβαλτίου, σιδήρου, μαγγανίου και νικελίου, ενώ συνήθως έχουν τη μορφή δισκιδίων, στυλίσκων ή καψουλών. Έπειτα ενθυλακώνονται με ένα αδιαπέραστο υλικό όπως είναι το γυαλί ή το εποξειδικό. Ένα θερμίστορ είναι ένα

θερμόμετρο αντιστάτης ή πιο απλά ένας αντιστάτης του οποίου η αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. [34]

Υπάρχουν δύο είδη θερμίστορ: τα NTC (Negative Temperature Coefficient) και τα PTC (Positive Temperature Coefficient), δηλαδή με αρνητικό και θετικό θερμικό συντελεστή αντίστοιχα. Στα NTC θερμίστορ, με αύξηση της θερμοκρασίας η αντίσταση μειώνεται και αντιστρόφως. Τα NTC θερμίστορ χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές. Αντίθετα, στα PTC θερμίστορ, με αύξηση της θερμοκρασίας η αντίσταση αυξάνεται και αντιστρόφως.

Στα NTC θερμίστορ η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία είναι :

$$R_{th} = R_{ref} * e^{\beta * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}})}$$

Εξίσωση 1.5: Αντίσταση ως συνάρτηση Θερμοκρασίας σε NTC θερμίστορ [35]

Όπου :

- R_{Th} : η αντίσταση του θερμίστορ
- R_{REF} : η αντίσταση στη θερμοκρασία αναφοράς
- T : η θερμοκρασία
- T_{REF} : η θερμοκρασία αναφοράς του θερμίστορ
- β : ο συντελεστής βαθμόνόμησης του θερμίστορ

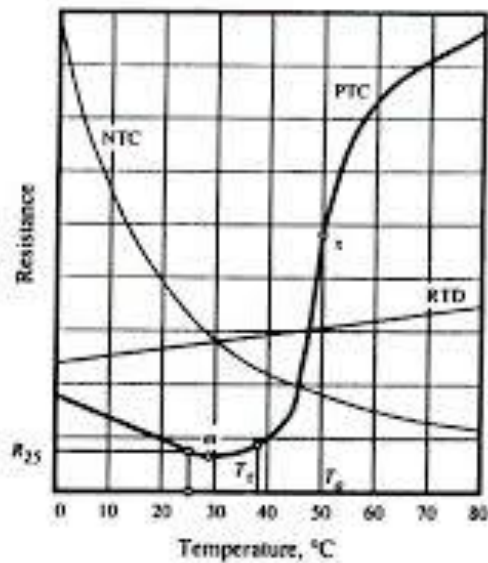
Στα θερμίστορ PTC η σχέση της αντίστασης και της θερμοκρασίας δίνεται από την εξίσωση Steinhart & Hart και είναι η εξής :

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

Εξίσωση 1.6: Εξίσωση Steinhart & Hart [36]

Όπου :

- T : η θερμοκρασία σε K σε θερμοκρασία αναφοράς 20 °C
- R : η αντίσταση σε θερμοκρασία αναφοράς 20 °C
- A, B, C : οι συντελεστές του θερμίστορ, οι οποίοι ποικίλουν ανάλογα με το τύπο του θερμίστορ που χρησιμοποιείται και το εύρος των θερμοκρασιών που ανιχνεύονται. Συνήθως δίνονται από την εταιρεία κατασκευής

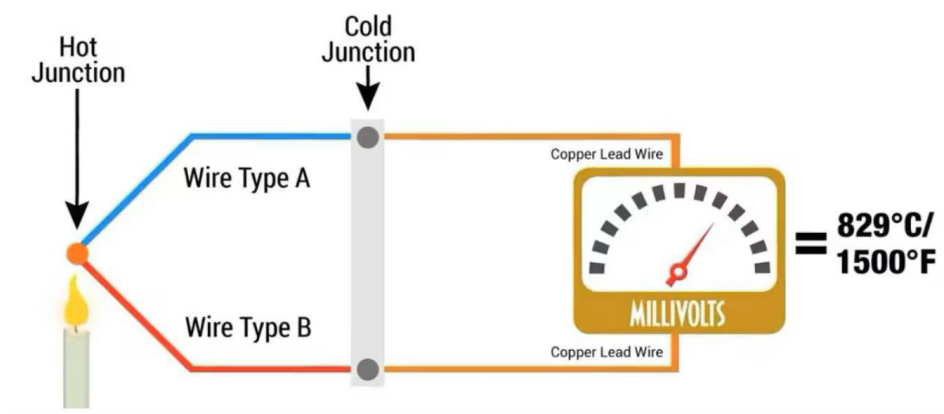


Σχήμα 1.20: Μεταβολή Αντίστασης συναρτήσει θερμοκρασίας για RTDs, NTCs και PTCs [37]

Στο Σχήμα 1.20, φαίνονται οι καμπύλες μεταβολής της αντίστασης για αισθητήρες RTDs, NTCs και PTCs συναρτήσει της θερμοκρασίας. Είναι εμφανές ότι στη περίπτωση των θερμίστορ NTC και PTC, για μικρές μεταβολές θερμοκρασίας παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή αντίστασης, καθιστώντας τα περισσότερο ευαίσθητα. Αντίθετα παρατηρούμε ότι τα RTD χαρακτηρίζονται από γραμμικότητα.

1.2.2.1.3 Θερμοζεύγη

Το θερμοζεύγος είναι ένας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, το οποίο κατασκευάζεται ενώνοντας δύο ανόμοιους μεταλλικούς αγωγούς στο ένα άκρο το οποίο αποτελεί και τη «θερμή ένωση» (Hot Junction). Εκεί εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού. Το άλλο άκρο των δύο ανόμοιων μεταλλικών αγωγών αποτελεί τη «ψυχρή ένωση» (Cold Junction) και συνδέεται με ένα βολτόμετρο για τον υπολογισμό αυτής της διαφοράς δυναμικού. Έτσι με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στη «θερμή ένωση» μπορεί να μετρηθεί η αντίστοιχη τάση στη «ψυχρή ένωση» και με αυτό το τρόπο δημιουργούνται ορισμένοι πίνακες αναφοράς όπου ανάλογα με τη μετρούμενη τάση συγκεκριμένου θερμοζεύγους μπορούμε να γνωρίζουμε και τη θερμοκρασία στη «θερμή ένωση». [38]



Σχήμα 1.21: Θερμοζεύγος [38]

Η λειτουργία του θερμοζεύγους βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck ή θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Στο φαινόμενο αυτό, μία διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο ανόμοιων ηλεκτρικών αγωγών ή ημιαγωγών παράγει μία διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών. Όταν εφαρμόζεται θερμότητα σε έναν από τους δύο αγωγούς ή ημιαγωγούς, θερμαινόμενα ηλεκτρόνια ρέουν προς τον ψυχρότερο αγωγό ή ημιαγωγό, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής στάθμης που βρίσκονται. [39]

Γενικά, υπάρχουν πολλοί τύποι θερμοζεύγων, το καθένα με τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά όσον αφορά το εύρος θερμοκρασίας, την ανθεκτικότητα, την αντοχή στους κραδασμούς, την αντοχή στα χημικά και τη συμβατότητα εφαρμογής. Είναι προφανές ότι η επιλογή του κατάλληλου τύπου θερμοζεύγους εξαρτάται αποκλειστικά από την εφαρμογή στην οποία θέλουμε να το χρησιμοποιήσουμε.

Στον Πίνακα 2.5 που ακολουθεί έχουν συγκεντρωθεί διάφοροι τύποι θερμοζεύγων:

Πίνακας 1.4: Διάφοροι Τύποι Θερμοζεύγων [40]

Διάφοροι Τύποι Θερμοζεύγων			
Τύπος	Συνδυασμός Αγωγών	Εύρος Θερμοκρασίας	
		°F	°C
B	Πλατίνα 30% Ρόδιο/ Πλατίνα 6% Ρόδιο	2500 έως 3100	1370 έως 1700
E	Νικέλιο-Χρώμιο/ Constantan	32 έως 1600	0 έως 870
J	Σίδηρος/ Constantan	32 έως 1400	0 έως 760
K	Νικέλιο-Χρώμιο/Νικέλιο-Αλουμίνιο	32 έως 2300	0 έως 1260
N	Nicrosil/Nisil	32 έως 2300	0 έως 1260
R	Πλατίνα 13% Ρόδιο/ Πλατίνα	1600 έως 2640	870 έως 1450
S	Πλατίνα 10% Ρόδιο/ Πλατίνα	1800 έως 2640	980 έως 1450
T	Χαλκός/ Constantan	-75 έως +700	-59 έως +370

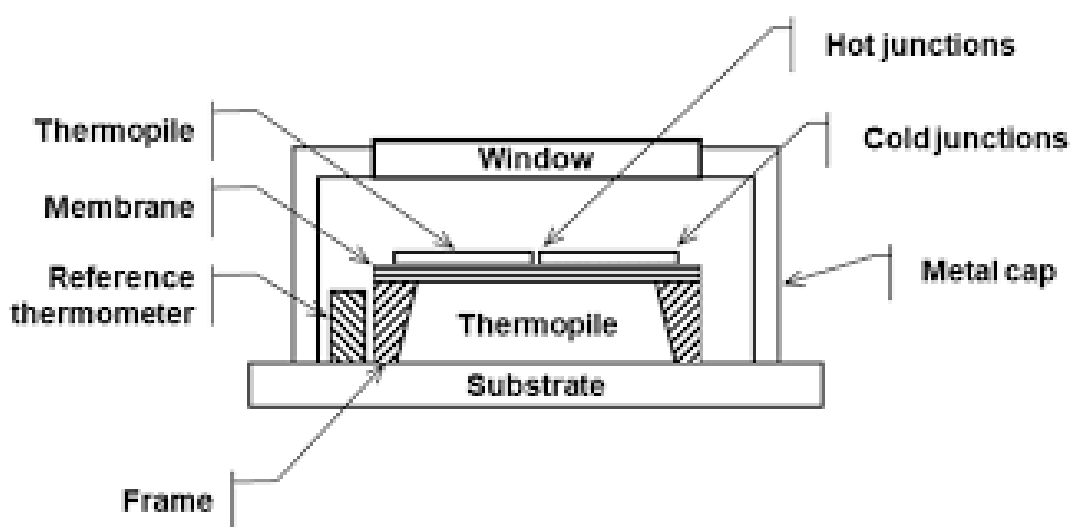
** Το Constantan αποτελεί ένα κράμα σιδήρου-νικελίου (55% σίδηρος - 45% νικέλιο).

** Το Nicrosil αποτελεί κράμα νικελίου (14.4% χρώμιο, 1.4% πυρίτιο και 0.1% μαγνήσιο).

** Το Nisil αποτελεί κράμα νικελίου (4.4% πυρίτιο και 0.1% μαγνήσιο).

1.2.2.1.4 Αισθητήρες υπέρυθρων

Οι αισθητήρες υπέρυθρων (IR-Infrared) είναι χρήσιμοι για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ανέπαφα και λειτουργούν άρτια σε περιπτώσεις όπου το αντικείμενο είναι εύθραυστο και επικίνδυνο να πλησιάσει κανείς. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούν την ιδέα της υπέρυθρης ακτινοβολίας για το προσδιορισμό της θερμοκρασίας επιφανειών των αντικειμένων χωρίς φυσική επαφή. Αναλυτικότερα, οι αισθητήρες υπέρυθρων χρησιμοποιούν έναν φακό για να εστιάζουν το υπέρυθρο φως που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε έναν ανιχνευτή, που είναι γνωστός και ως thermopile. Ο thermopile αποτελείται από θερμοζεύγη συνδεδεμένα είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Όταν η υπέρυθρη ακτινοβολία πέφτει πάνω στην επιφάνεια του thermopile, τότε απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Γενικά, η τάση εξόδου παράγεται ανάλογα με την προσπίπτουσα υπέρυθρη ενέργεια. Έτσι ο ανιχνευτής χρησιμοποιεί αυτή την έξοδο για να προσδιορίσει τη θερμοκρασία. [41]



Σχήμα 1.22: Αισθητήρας Υπέρυθρων – Thermopile [42]

1.2.2.2 Αισθητήρας Υγρασίας

Ο αισθητήρας υγρασίας μετρά ουσιαστικά την υγρασία στον αέρα. Αυτή η ένδειξη της υγρασίας μπορεί να εκφραστεί είτε ως σχετική υγρασία είτε ως απόλυτη υγρασία. Η σχετική υγρασία συγκρίνει την υγρασία του αέρα με τη μέγιστη χωρητικότητα του σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, ενώ η απόλυτη υγρασία αντιπροσωπεύει τη συνολική περιεκτικότητα σε υγρασία στον αέρα ανεξαρτήτως θερμοκρασίας.

Οι περισσότεροι αισθητήρες υγρασίας λειτουργούν αξιολογώντας τα επίπεδα σχετικής υγρασίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών που τροποποιούν τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά, όπως η χωρητικότητα ή η αντίσταση ως απόκριση στις αλλαγές των επιπέδων υγρασίας. Έτσι ο αισθητήρας ανιχνεύοντας αυτές τις μεταβολές, μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τα επίπεδα υγρασίας. Γενικά η σχετική υγρασία δίνεται από τον τύπο :

$$RH = \left(\frac{p_w}{p_s} \right) * 100\%$$

Εξίσωση 1.7: Εξίσωση Σχετικής Υγρασίας [43]

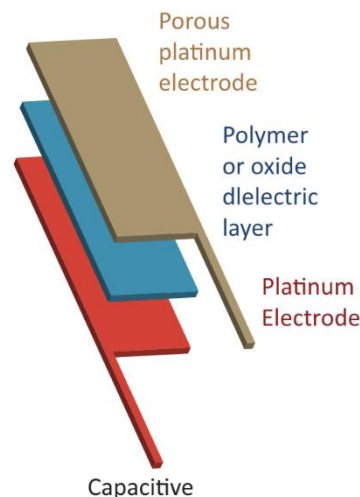
Όπου :

- p_w : η πυκνότητα υδρατμών σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία
- p_s : η πυκνότητα των υδρατμών σε κορεσμό σε αυτή τη θερμοκρασία

Αντιθέτως τα όργανα που μετρούν την απόλυτη υγρασία, μετρούν ουσιαστικά τη μάζα των υδρατμών σε καθορισμένο όγκο αέρα. Αυτοί οι αισθητήρες παίζουν σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή επίπεδα υγρασίας, όπως στις επιστημονικές μελέτες και στις εξειδικευμένες βιομηχανίες.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων υγρασίας ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν. Αναλυτικότερα έχουμε τους χωρητικούς αισθητήρες υγρασίας, τους αισθητήρες υγρασίας αντίστασης, τους αισθητήρες υγρασίας θερμικής αγωγιμότητας και τους οπτικούς αισθητήρες θερμοκρασίας.

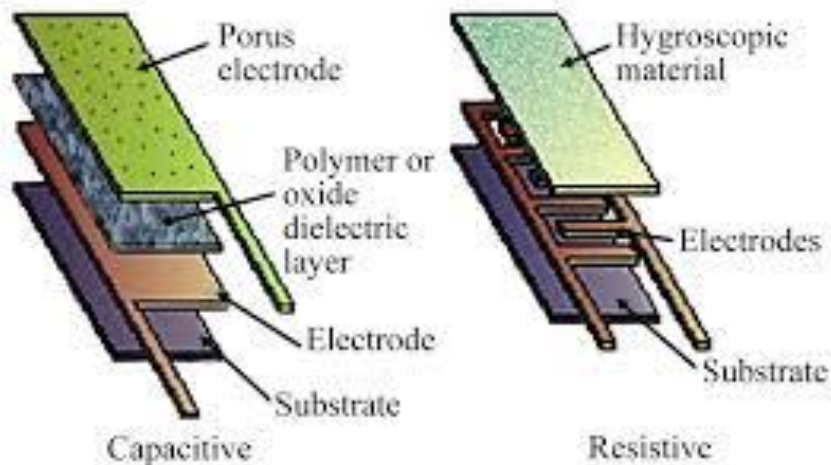
Οι χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας (Capacitive) λειτουργούν ενσωματώνοντας ένα λεπτό φιλμ πολυμερούς ή οξειδίου μετάλλου που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο αγωγίμες πλάκες. Η μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία στον αέρα έχει ως αποτέλεσμα τη τροποποίηση της της διηλεκτρικής σταθεράς του φιλμ, επηρεάζοντας στη συνέχεια τη μέτρηση της χωρητικότητας. Αυτή η αλλαγή στη χωρητικότητα στη συνέχεια ποσοτικοποιείται και μετατρέπεται σε ακριβή ένδειξη υγρασίας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτοί οι αισθητήρες βρίσκουν εκτεταμένες εφαρμογές σε μετεωρολογικούς σταθμούς συστημάτων HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). [44]



Σχήμα 1.23: Δομή Χωρητικού Αισθητήρα Υγρασίας [45]

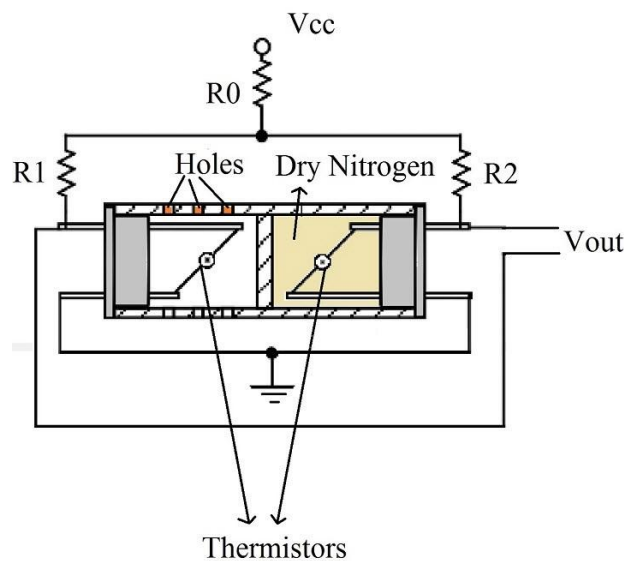
Οι αισθητήρες υγρασίας αντίστασης (Resistive) χρησιμοποιούν ένα υγροσκοπικό υλικό (πρόκειται για υλικό που απορροφά την υγρασία) που αλλάζει την αντίσταση του καθώς αλλάζει η υγρασία. Ο αισθητήρας μετρά αυτή την αλλαγή στην αντίσταση για να καθορίσει το επίπεδο της υγρασίας. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου έχουν εφαρμογές κυρίως σε οικιακές συσκευές, σε αυτοκίνητα και σε συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης. [44]

Electronic Humidity Sensor



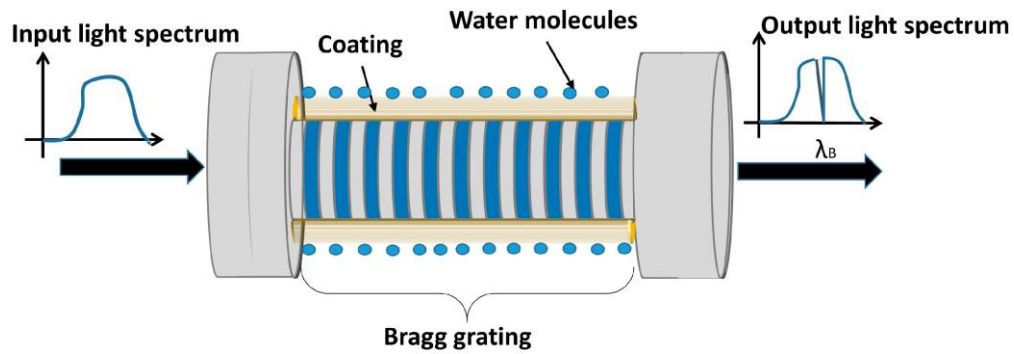
Σχήμα 1.24: Σύγκριση Capacitive και Resistive Αισθητήρα Υγρασίας [46]

Οι αισθητήρες υγρασίας θερμικής αγωγιμότητας μετρούν τη θερμική αγωγιμότητα του αέρα, η οποία αλλάζει με την υγρασία. Συνήθως χρησιμοποιούν ένα NTC θερμίστορ για τη μέτρηση της μεταβολής αυτής και έτσι μπορούν να παρέχουν μία ακριβή μέτρηση. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται συχνά σε βιομηχανικές διαδικασίες ξήρανσης, σε μετεωρολογικά όργανα και σε συστήματα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). [44]



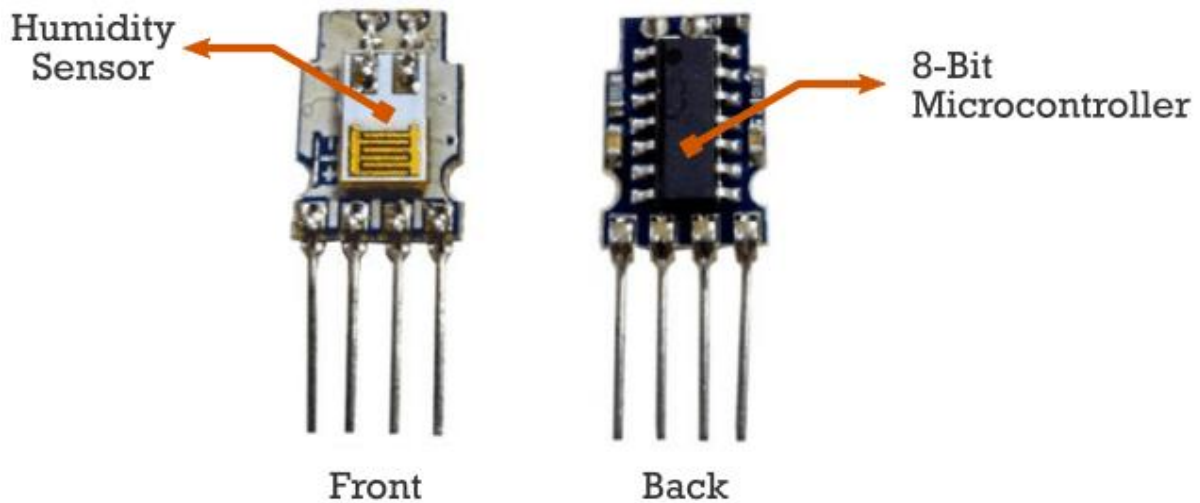
Σχήμα 1.25: Λειτουργία Αισθητήρα Υγρασίας Θερμικής Αγωγιμότητας [47]

Οι οπτικοί αισθητήρες υγρασίας χρησιμοποιούν το φως για να μετρήσουν την υγρασία ανιχνεύοντας αλλαγές στο δείκτη διάθλασης ή την απορρόφηση του φωτός με παρουσία υδρατμών. Η λειτουργία τους βασίζεται συχνά στη χρήση οπτικών ινών ή άλλων φωτοευαίσθητων υλικών. Τέλος οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας όπως σε εργαστηριακά όργανα, στη περιβαλλοντική παρακολούθηση και σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. [44]



Σχήμα 1.26: Οπτικός Αισθητήρας Υγρασίας [47]

Οι περισσότεροι αισθητήρες υγρασίας συνήθως συνοδεύονται από μία πλακέτα η οποία διαθέτει ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Η χρήση αυτής της πλακέτας είναι να βαθμονομήσει και να μετατρέψει τα αναλογικά δεδομένα σε ψηφιακά με σκοπό να αποσταλούν σε μία άλλη συσκευή για την ανάλυση ή απλή καταγραφή αυτών. [48]



Σχήμα 1.27: DHT11 αισθητήρας υγρασίας (και θερμοκρασίας) με ενσωματωμένο μικροελεγκτή [48]

1.2.2.3 Αισθητήρας Θερμοκρασίας-Υγρασίας

Ένας συνδυαστικός αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας αποτελεί μια ενιαία διάταξη που είναι σχεδιασμένη να μετρά και τις δύο αυτές φυσικές παραμέτρους του περιβάλλοντος. Τέτοιοι αισθητήρες ενσωματώνουν συνήθως δύο διαφορετικά υποσυστήματα: έναν αισθητήρα θερμοκρασίας (όπως ένας θερμίστορ) και έναν αισθητήρα υγρασίας (συνήθως χωρητικού τύπου – Capacitive). [48]

Η λειτουργία τους βασίζεται στην ανεξάρτητη αλλά ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, με την επεξεργασία των δεδομένων να γίνεται συνήθως από ένα ενσωματωμένο μικροελεγκτή. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων αισθητήρων είναι οι DHT11, DHT22 και SHT3x, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως στους οικιακούς αυτοματισμούς, στους μετεωρολογικούς σταθμούς, στα συστήματα HVAC και σε άλλες έξυπνες συσκευές.

Αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για μία από τις δύο μετρήσεις (π.χ. μόνο για θερμοκρασία ή μόνο για υγρασία), αυτό συνήθως δεν αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητές

τους και μπορεί να επηρεάσει την οικονομία ή την αποδοτικότητα του συστήματος, αφού υπάρχουν πιο εξειδικευμένοι και οικονομικοί αισθητήρες για τέτοιες περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα διπλής μέτρησης με ένα μόνο εξάρτημα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές που απαιτούν απλότητα, χαμηλό κόστος και μικρό μέγεθος.



Σχήμα 1.28: Ολοκληρωμένο Κύκλωμα Αισθητήρα DHT11 με χρήση Arduino [48]

1.2.2.4 Αισθητήρας Αερίων

Οι αισθητήρες αερίων χρησιμοποιούν φυσικές ή χημικές αντιδράσεις για να μετατρέψουν τη συγκέντρωση διαφόρων αερίων σε ηλεκτρικά σήματα και σε τιμές εξόδου μετά τον υπολογισμό. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση τοξικών και επιβλαβών αερίων και διαρροών φυσικού αερίου, για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και για να εξασφαλίζουν ασφάλεια σε μέρη όπως τα ορυχεία, τα νοσοκομεία και τα εργοστάσια. [49], [50]

Οι αισθητήρες αερίων είναι ιδιαίτερα σημαντικοί επειδή παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τα επίπεδα αερίου, συμβάλλοντας έτσι στον έλεγχο τόσο του περιβάλλοντος όσο και την ασφάλεια των εργαζομένων σε μέρη που προαναφέρθηκαν. Ακόμη υπάρχουν διάφορα είδη τέτοιων αισθητηρίων, όπως οι ηλεκτροχημικοί, οι υπέρυθροι και οι αισθητήρες ημιαγωγών. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο κάθε αισθητήρας αερίου στοχεύει στο να εντοπίζει ένα συγκεκριμένο είδος αερίου και για αυτό το λόγο καθένας από αυτούς είναι διαφορετικά κατασκευασμένος. [49], [50]



Σχήμα 1.29: Αισθητήρας Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO) [51]

Ένας αισθητήρας αερίου είναι ένα όργανο που έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει και να ποσοτικοποιεί τη συγκέντρωση συγκεκριμένων αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Αν και οι λειτουργικοί μηχανισμοί ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο αερίου που προσπαθούμε να ανιχνεύσουμε, η αρχή λειτουργίας όλων των αισθητήρων αερίων είναι κοινή. Το κύριο συστατικό κάθε τέτοιου αισθητήρα είναι το στοιχείο αίσθησης, το οποίο αλληλεπιδρά με το αέριο που έχει θέσει ως στόχο να ανιχνεύσει. Κατά την επαφή με το αισθητήριο υλικό, εμφανίζεται μία μεταβολή, η οποία μπορεί να είναι είτε φυσικής είτε χημικής φύσης. Αυτή η μεταβολή μπορεί να αφορά αλλαγή της ηλεκτρικής αντίστασης, του ρεύματος ή ακόμη και της τάσης. Έπειτα, η μεταβολή αυτή εντοπίζεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, το μέγεθος του οποίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένου με τη συγκέντρωση αερίου που εμφανίζεται στην εκάστοτε εφαρμογή. Στη συνέχεια, το ηλεκτρικό σήμα αυτό επεξεργάζεται από το κύκλωμα του αισθητήρα και το βαθμονομεί για να δώσει μία έξοδο με νόημα, όπως είναι η συγκέντρωση του αερίου που μετριέται σε ppm (Parts per Million). Τέλος, το τελικό σήμα εμφανίζεται σε μία συσκευή παρακολούθησης (Monitor) ή μεταδίδεται σε ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο μπορεί να ενεργοποιήσει έναν συναγερμό ή να ενεργοποιήσει συστήματα εξαερισμού, όπου αυτό απαιτείται. [49], [50]

Οι αισθητήρες αερίου είναι βασικά εξαρτήματα σε διάφορες βιομηχανίες τα οποία στοχεύουν αποκλειστικά στη παρακολούθηση των συγκεντρώσεων αερίου για την ασφάλεια και τη προστασία του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες αυτοί διατίθενται στην αγορά σε διαφορετικούς τύπους, όπου προφανώς ο καθένας είναι κατάλληλος για συγκεκριμένες εφαρμογές με βάση τους μηχανισμούς ανίχνευσης και τα αέρια που έχουν σχεδιαστεί να ανιχνεύουν. Οι βασικότεροι τύποι αισθητήρων αερίου που αξίζει να αναφερθούν είναι [49] :

- Αισθητήρες Αερίων Ημιαγωγών (Αισθητήρες Οξειδίου Μετάλλου)
- Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες Αερίων
- Αισθητήρες Αερίων Υπέρυθρων (IR)
- Καταλυτικοί Αισθητήρες Σφαιριδίων (Pellistor)
- Ανιχνευτές Φωτοϊοντισμού
- Αισθητήρες Αερίων Θερμικής Αγωγιμότητας
- Αισθητήρες Αερίων Ακουστικών Κυμάτων

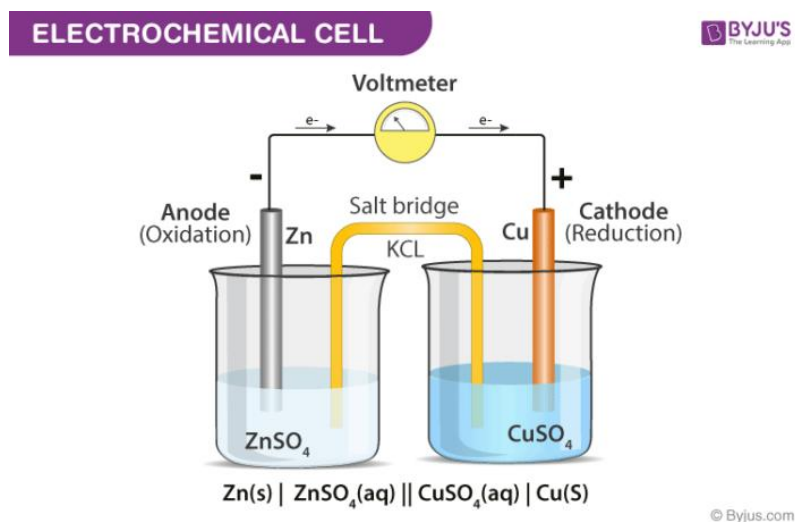
1.2.2.5 Αισθητήρας CO₂

Οι αισθητήρες CO₂ χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του αέριου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ο έλεγχος των επιπέδων συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα και η διατήρηση αυτών σε επιθυμητά επίπεδα είναι ζωτικής σημασίας για περιβαλλοντικές, βιομηχανικές και οικιακές διεργασίες.

Είναι γεγονός ότι πολλά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και παρακολούθηση του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτά τα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 3 κατηγορίες : ηλεκτροχημικά, οπτικά και σταθερής κατάστασης. Ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή των 3 αυτών κατηγοριών και ορισμένες βασικές εφαρμογές τους που πρωταγωνιστούν στην αγορά. [52]

1.2.2.5.1 Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες CO₂

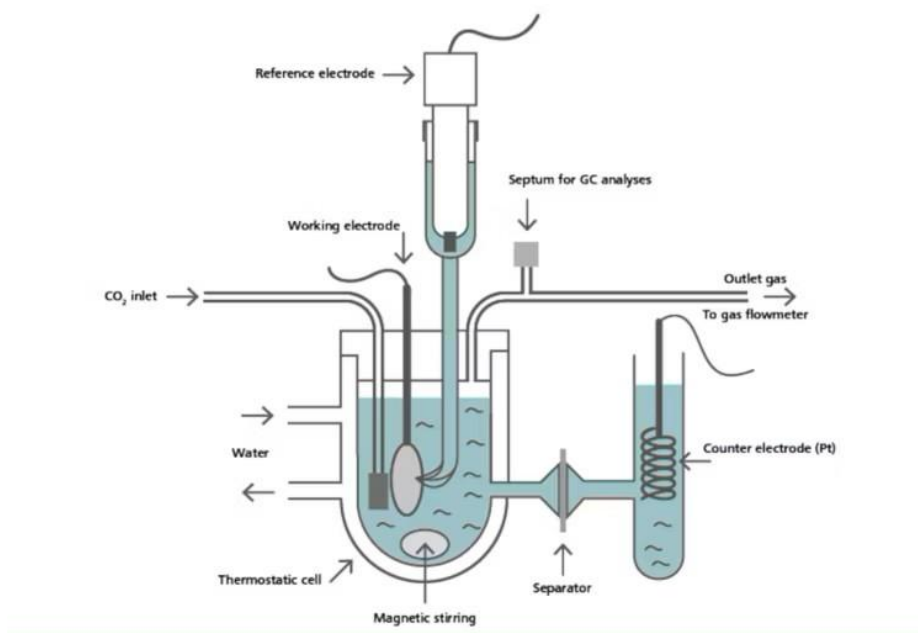
Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα ηλεκτρόδιο για τη μέτρηση των μεταβολών της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος ή της τάσης λόγω μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂. Οι αισθητήρες αυτοί είναι συνήθως φθηνότεροι και με μεγαλύτερη διάρκεια από τους οπτικούς αισθητήρες, αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητοι και έχουν μεγαλύτερους χρόνους απόκρισης. Ένας από τους πιο σύνηθες τύπους ηλεκτροχημικού αισθητήρα CO₂ είναι το ηλεκτροχημικό στοιχείο (Electrochemical cell), το οποίο αποτελεί μία απλή συσκευή που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από χημικές αντιδράσεις, όπως π.χ η ηλεκτρόλυση. [52]



Σχήμα 1.30: Ηλεκτροχημικό Στοιχείο [53]

Αυτοί οι αισθητήρες διοξειδίου του άνθρακα συνήθως αποτελούνται από τρία βασικά εξαρτήματα : ένα ηλεκτρόδιο αντίδρασης (Sensing), ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (Reference) και ένα ηλεκτρόδιο αντίστασης (Counter). Το ηλεκτρόδιο αντίδρασης περιβάλλεται από ένα υλικό που αντιδρά με το CO₂ και μετατρέπει την αλληλεπίδραση αυτή σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο είναι ανάλογο της συγκέντρωσης CO₂ του δείγματος. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς απλά διατηρεί μία σταθερή πηγή τάσης. Το ηλεκτρόδιο αντίστασης επιχειρεί να ισορροπίσει τη

χημική αντίδραση στον ηλεκτρόδιο αντίδρασης. Τα τρία αυτά εξαρτήματα δουλεύουν μαζί αρμονικά, ανιχνεύουν με ακρίβεια και μετρούν τη συγκέντρωση CO_2 στο περιβάλλον. [52]



Σχήμα 1.31: Ηλεκτρόδιο Αντίδρασης, Ηλεκτρόδιο Αναφοράς και Ηλεκτρόδιο Αντίστασης σε πείραμα μέτρησης συγκέντρωσης CO_2 [54]

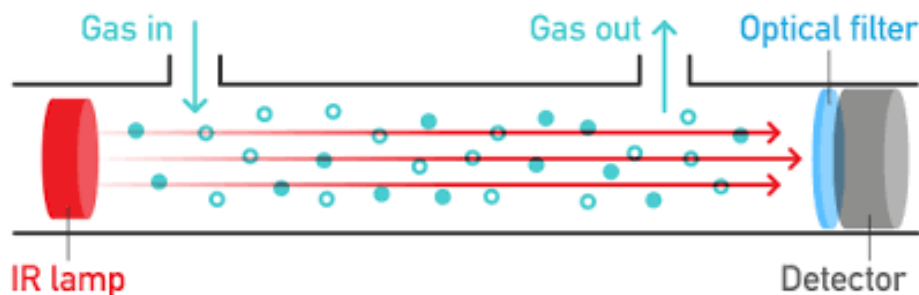
Ένας άλλος τύπος ηλεκτροχημικού αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα είναι ο GS-FET (Gas-Sensitive Field-Effect-Transistor). Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν μία λεπτή μεμβράνη ενός υλικού ευαίσθητου σε αέριο, όπως είναι το οξείδιο του κασσίτερου (SnO_2), σε ένα ημιαγώγιμο υπόστρωμα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα της μεμβράνης αλλάζει όταν μεταβάλλεται η συγκέντρωση του CO_2 , το οποίο με τη σειρά του αλλάζει και το ηλεκτρικό ρεύμα του κυκλώματος. [52]

1.2.2.5.2 Οπτικοί Αισθητήρες CO_2

Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν υπέρυθρο φως για να μετρήσουν τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα σε κάθε περιβάλλον. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούνται από μία πηγή φωτός, από έναν ανιχνευτή υπέρυθρου και από μία συσκευή που μετράει την ένταση του φωτός που περνάει από ένα δείγμα αερίου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι οπτικών αισθητήρων CO_2 , όπως οι αισθητήρες με μη διασπορά υπέρυθρων (NDIR-Non Dispersive Infrared Sensors), αισθητήρες με χρήση ρυθμιζόμενου λείζερ διόδου (TDL-Tunable Diode Laser) και αισθητήρες μετασχηματισμού Fourier υπέρυθρης (FTIR- Fourier Transfer Infrared).

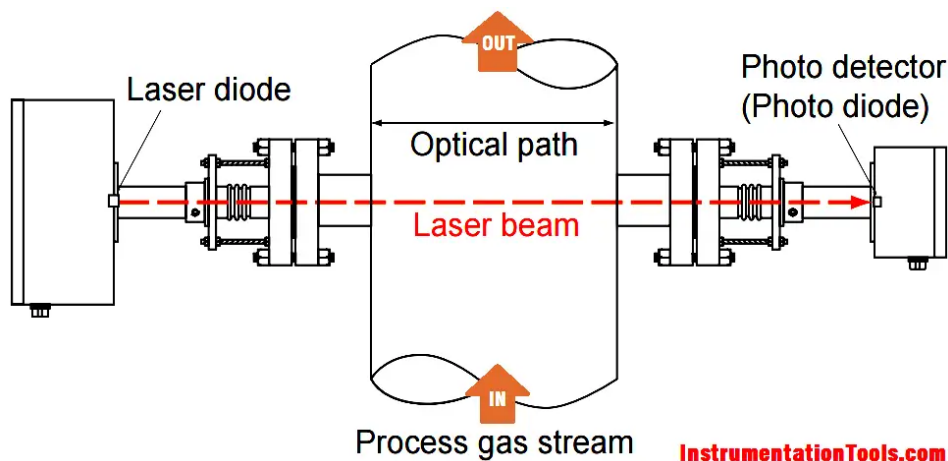
Οι αισθητήρες NDIR είναι αισθητήρες αερίων που χρησιμοποιούν υπέρυθρη ακτινοβολία για να μετρήσουν τη συγκέντρωση αερίων. Η αρχή λειτουργίας τους περιλαμβάνει την εκπομπή υπέρυθρου φωτός σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος μέσα από ένα δείγμα του αερίου, του οποίου θέλουμε να υπολογίσουμε τη συγκέντρωση. Ένα μέρος του φωτός απορροφάται από το αέριο και το ποσό αυτό είναι ανάλογο της συγκέντρωσης του αερίου. Το φως που παραμένει ανιχνεύεται από έναν ανιχνευτή και χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η συγκέντρωση αερίων. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση συγκέντρωσης αερίων όπως το CO_2 , το μεθάνιο CH_4 και οι υδρατμοί. Συγκεκριμένα, το μήκος κύματος υπολογισμού συγκέντρωσης για το διοξείδιο του άνθρακα είναι περίπου

τα 4,26 μm . Ωστόσο, οι αισθητήρες αυτοί ενδέχεται να επηρεαστούν από τη παρέμβαση άλλων αερίων που απορροφούν επίσης το υπέρυθρο φως στο ίδιο μήκος κύματος, όπως ακριβώς κάνουν οι υδρατμοί και το μεθάνιο. Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι αισθητήρες NDIR χρησιμοποιούνται ευρέως σε ποικίλλες εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε εσωτερικούς χώρους, ο βιομηχανικός έλεγχος διεργασιών και στη παρακολούθηση των αερίων του θερμοκηπίου. Ακόμη, οι αισθητήρες αυτοί διακρίνονται για την ακρίβεια που παρέχουν και τη μακροχρόνια σταθερότητα, καθιστώντας τους κατάλληλους για τη διαρκή παρακολούθηση σε εφαρμογές που προαναφέρθηκαν. Τέλος, οι αισθητήρες NDIR είναι σχετικά οικονομικοί και εύκολοι στη συντήρηση, γεγονός που δικαιολογεί την επιλογή τους σε πληθώρα τέτοιων εφαρμογών. [52]



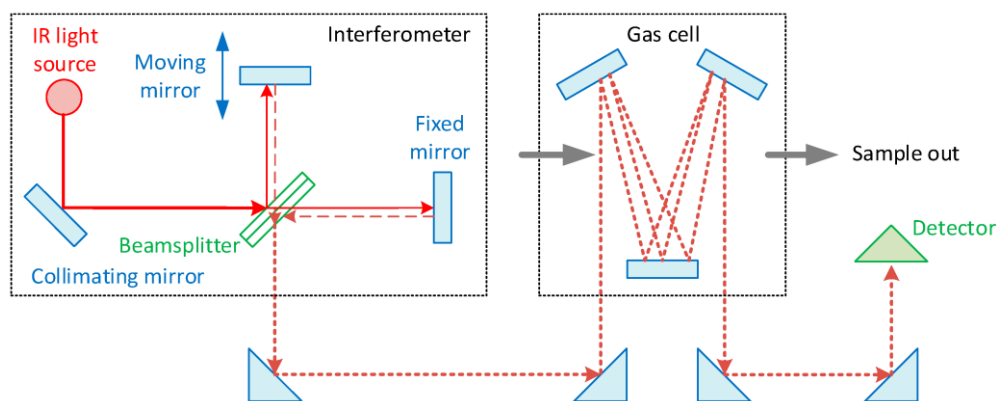
Σχήμα 1.32: Λειτουργία Αισθητήρα NDIR [55]

Οι αισθητήρες TDL χρησιμοποιούν ένα λέιζερ ως πηγή φωτός και μετρούν τη συγκέντρωση CO_2 σε πολλά μήκη κύματος. Η λειτουργία αυτή τους καθιστά ικανούς για πιο ακριβείς μετρήσεις, ενώ παράλληλα διακρίνεται η ικανότητα αυτών για διαχωρισμό μεταξύ CO_2 και άλλων αερίων. Οι αισθητήρες TDL είναι τυπικά πιο ακριβοί και πολύπλοκοι από τους αισθητήρες NDIR, αλλά γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλείς σε επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές λόγω της ακρίβειας των μετρήσεων. [52]



Σχήμα 1.33: Λειτουργία Αισθητήρα TDL [56]

Οι αισθητήρες FTIR χρησιμοποιούν το συμβολόμετρο του Michelson για να μετρήσουν την απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα σε πολλαπλά μήκη κύματος. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την ανίχνευση πολλών αερίων ταυτόχρονα με υψηλά επίπεδα ακρίβειας. Οι αισθητήρες FTIR είναι πιο ακριβοί και πολύπλοκοι από τους NDIR και TDL αισθητήρες και χρησιμοποιούνται ευρέως στην έρευνα και σε βιομηχανικές εφαρμογές. [52]



Σχήμα 1.34: Λειτουργία Αισθητήρα FTIR [57]

1.2.2.5.3 Αισθητήρες CO₂ σταθερής κατάστασης

Οι αισθητήρες σταθερής κατάστασης χρησιμοποιούνται ως γενικά εργαλεία ερευνών λόγω της έλλειψης επιλεκτικότητας, καθώς έχουν ένα μικρό εύρος λειτουργίας από 1 έως 50 ppm. Για τη λειτουργία τους, μία ποικιλία αισθητήρων MOS είναι διαθέσιμη για την ανίχνευση εύφλεκτων αερίων, χλωριωμένων διαλυτών και τοξικών αερίων, όπως είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρόθειο. Αρχικά το αισθητήριο στοιχείο θερμαίνεται στους 250 με 300 °C. Έτσι όταν το αέριο εισέρχεται στον αισθητήρα, αντιδρά με το οξείδιο επικάλυψης, προκαλώντας μείωση της αντίστασης μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, η οποία στη συνέχεια και υπολογίζεται.

Οι αισθητήρες σταθερής κατάστασης διακρίνονται για τους χαμηλούς χρόνους απόκρισης, την υψηλή ευαισθησία και τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος, κάτι που τους κάνει κατάλληλους για φορητές και ασύρματες εφαρμογές. Ακόμη, υπάρχουν και άλλα υλικά όπως νανοϋλικά (nanomaterials), τα οποία αναπτύσσονται για την ανίχνευση διοξειδίου του άνθρακα, όπως το γραφένιο (graphene), οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes) και νανοσύνθετα οξείδια μετάλλων (metal oxide nanocomposites). Αυτά τα υλικά έχουν υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο, γεγονός που αυξάνει την ευαισθησία τους και την επιλεκτικότητα τους ως προς το CO₂. [52]

1.2.2.6 Αισθητήρες Εδάφους

Οι αισθητήρες εδάφους είναι συσκευές που έχουν σχεδιαστεί για να παρακολουθήσουν τις παραμέτρους του εδάφους και να μετρούν ένα ευρύ φάσμα φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους σε πραγματικό χρόνο και με ακρίβεια. Αυτοί οι αισθητήρες μετρούν βασικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία του εδάφους, η υγρασία, το pH, η αγωγιμότητα, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και η μικροβιακή δραστηριότητα, παρέχοντας σημαντικά δεδομένα για τη γεωργική παραγωγή, την προστασία του περιβάλλοντος, τη γεωλογική εξερεύνηση και άλλα πεδία. [58]



Σχήμα 1.35: Αισθητήρας Εδάφους Υγρασίας και Θερμοκρασίας [59]

Οι αισθητήρες εδάφους λειτουργούν με βάση διαφορετικές φυσικές και χημικές αρχές, όπως χωρητικά, ωμικά και ιοντοεκλεκτικά ηλεκτρόδια για την επίτευξη ακριβών μετρήσεων των ιδιοτήτων του εδάφους. Μέσω των αισθητήρων του εδάφους, οι αγρότες μπορούν να διαχειριστούν την άρδευση και τη λίπανση πιο αποτελεσματικά για να βελτιώσουν την απόδοση και τη ποιότητα των καλλιεργειών τους. Έτσι, οι περιβαλλοντικοί επιστήμονες μπορούν να αξιολογήσουν τη ρύπανση και την υποβάθμιση του εδάφους και να εφαρμόσουν προστατευτικά μέτρα. Ακόμη, οι γεωλόγοι μπορούν να αναγνωρίσουν διάφορα ορυκτά και τύπους πετρωμάτων στο έδαφος για να παρέχουν πληροφορίες για την ανάπτυξη των ορυκτών πόρων.

Οι διάφοροι τύποι αισθητήρων στη γεωργία χρησιμοποιούν ποικίλες μεθόδους, όπως ηλεκτρικά σήματα και μέτρηση ανάκλασης των κυμάτων φωτός, για να εξακριβώσουν τα βασικά χαρακτηριστικά του πεδίου.

1.2.2.7 Χρήση Αισθητήρων Εδάφους στον Αγρό

Όπως προαναφέρθηκε οι αισθητήρες εδάφους παρέχουν λεπτομερή και αξιόπιστα δεδομένα σχετικά με βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση κ.α. Επιπλέον, είναι γεγονός ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι σημαντικές τόσο για τη καθημερινότητα μας όσο και για τη παραγωγή πρώτων υλών. Η τακτική επίβλεψη λοιπόν αυτών των περιβαλλοντικών συνθηκών είναι απαραίτητη, με αποτέλεσμα να επιβάλλεται η εφεύρεση νέων μηχανημάτων και συσκευών που θα έχουν ως πρωταρχικό στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Οι δύο σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να βρίσκονται σε διαρκή παρακολούθηση είναι η θερμοκρασία και η υγρασία. Πράγματι, κάθε νέο σύστημα Smart Farming περιλαμβάνει σίγουρα αισθητήρες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας σε κάθε χρονική στιγμή.

Η θερμοκρασία είναι ο παράγοντας που ρυθμίζει την ταχύτητα των βιολογικών και χημικών αντιδράσεων των φυτών. Κάθε είδος φυτού έχει ένα βέλτιστο εύρος θερμοκρασίας εκτός του οποίου η ανάπτυξη και η παραγωγικότητα μειώνονται ή διακόπτονται. Γενικά τα φυτά χρειάζονται υψηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας για να ευνοήσουν τη φωτοσύνθεση και χαμηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της νύχτας για να ευνοήσουν την αναπνοή. Συνεπώς είναι εμφανές ότι η θερμοκρασία επηρεάζει τη βλάστηση, την ανάπτυξη των φυτών, τη γονιμότητα του εδάφους και την ένταση της εξάτμισης. Έτσι, αισθητήρες που τοποθετούνται και εκτίθενται στο άμεσο ηλιακό φως τείνουν να δείχνουν

υψηλότερες θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό, μία σύνηθες πρακτική είναι η τοποθέτηση αυτών των αισθητήρων στο εσωτερικό του εδάφους όπου εκεί θα παρέχουν πιο αξιόπιστες μετρήσεις. [60]



Σχήμα 1.36: Αισθητήρες Εδάφους Θερμοκρασίας τοποθετημένοι εσωτερικά [61]

1.3 Κεφάλαιο 3 : IoT και ενσωματωμένα συστήματα

1.3.1 Internet of Things (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ή γενικά Internet of Things (IoT) αποτελεί τη δικτύωση φυσικών αντικειμένων που περιέχουν ηλεκτρονικά ενσωματωμένα στην αρχιτεκτονική τους προκειμένου να επικοινωνούν και να αισθάνονται αλληλεπιδράσεις τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, οι φυσικές αυτές συσκευές περιέχουν λογισμικό και αισθητήρες, με αποτέλεσμα η συνδεσιμότητά τους να επιτρέπει να αυτά τα αντικείμενα να ανταλλάσσουν πληροφορίες. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη συλλογή και το διαμοιρασμό της πληροφορίας από ένα τεράστιο δίκτυο συσκευών, δημιουργώντας κατά αυτό το τρόπο ευκαιρίες για πιο αποτελεσματικά αυτοματοποιημένα συστήματα. [62]



Σχήμα 1.37: Internet of Things (IoT) [63]

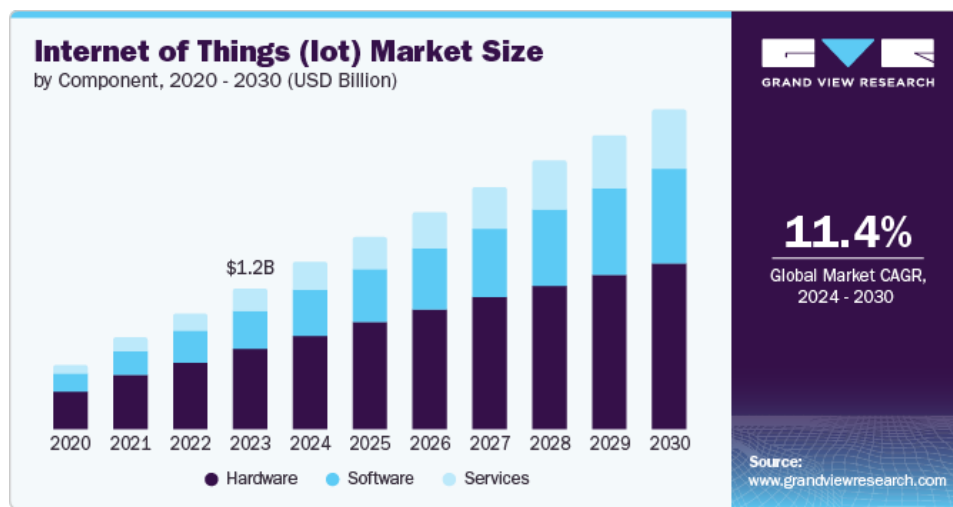
Σε γενικές γραμμές η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται κυρίως στους ενσωματωμένους αισθητήρες και στο εγκαταστημένο λογισμικό. Αναλυτικότερα, οι συσκευές IoT διαθέτουν hardware, όπως ακριβώς οι αισθητήρες, το οποίο συλλέγει τα δεδομένα. Έπειτα, τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες διαμοιράζονται μέσω του cloud και ενσωματώνονται μέσω του λογισμικού. Τότε, το λογισμικό αναλύει και μεταβιβάζει τα δεδομένα στους τελικούς χρήστες μέσω μίας εφαρμογής (app) ή ενός website. [64]

Η ιδέα του Internet of Things βασίζεται κυρίως σε τεχνολογίες, οι οποίες συνδέουν συσκευές και τους επιτρέπουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Συνεπώς, οι επιλογές συνδεσιμότητας έχουν ένα εύρος πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, διακρίνοντας έτσι τη χρήση αυτών. Παραδείγματος χάριν, ορισμένες επιλογές συνδεσιμότητας είναι κατάλληλες για τις περιπτώσεις των έξυπνων σπιτιών (smart homes) και άλλες είναι κατάλληλες για βιομηχανικές αυτοματοποιήσεις. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες :

- Πρωτόκολλα Δεδομένων IoT που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συσκευών ακόμη και χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο, και
- Πρωτόκολλα Δικτύου IoT που συνδέουν συσκευές μεταξύ τους και με το διαδίκτυο.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχει καταστεί καθοριστικό για την ενίσχυση τόσο των προσωπικών όσο και των επαγγελματικών πτυχών της ζωής των ανθρώπων, προσφέροντας αυξημένη ευκολία και έλεγχο. Πέρα από τον αντίκτυπό του στον οικιακό αυτοματισμό, το

IoT διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον μετασχηματισμό των επιχειρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, παρέχοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τις λειτουργίες ενός συστήματος, το IoT δίνει τη δυνατότητα σε εταιρείες να αποκτήσουν μία ολοκληρωμένη κατανόηση των διαδικασιών τους, που εκτείνονται από την απόδοση του μηχανήματος έως τις λειτουργίες της αλυσίδας εφοδιασμού. Ακόμη, ελαχιστοποιεί τη σπατάλη και ενισχύει τη παροχή υπηρεσιών, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κόστους στην κατασκευή, παρέχοντας παράλληλα διαφάνεια στις συναλλαγές των πελατών. Ως αποτέλεσμα, το IoT αποτελεί μία από τις κρισιμότερες τεχνολογίες στη καθημερινή μας ζωή. Η σημασία του θα συνεχίσει να αυξάνεται διαρκώς, καθώς περισσότερες επιχειρήσεις αρχίζουν να αναγνωρίζουν τις δυνατότητες των συνδεδεμένων συσκευών στη διατήρηση του ανταγωνιστικού τους πλεονεκτήματος. Τέλος η υιοθέτηση του IoT προσφέρει στις επιχειρήσεις την ευκαιρία να βελτιστοποιήσουν τις δραστηριότητές τους, να βελτιώσουν τη λήψη αποφάσεων και να προσφέρουν βελτιωμένα προϊόντα και υπηρεσίες, με σκοπό να ανταποκριθούν στις εξελισσόμενες απαιτήσεις των πελατών. [65]

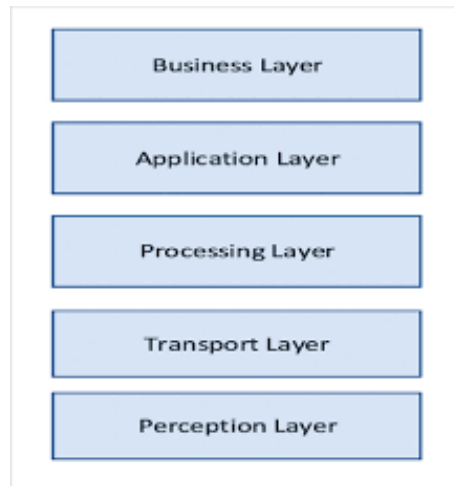


Σχήμα 1.38: Μέγεθος Αγοράς IoT [66]

1.3.1.1 Αρχιτεκτονική του IoT

Ο όρος Αρχιτεκτονική του IoT αναφέρεται στο πλαίσιο που ορίζει τον τρόπο με τον οποίο διάφορα στοιχεία IoT αλληλεπιδρούν μέσα σε ένα περιβάλλον IoT. Μία συνήθης πρακτική για την αρχιτεκτονική του IoT, είναι να αποτελείται από πολλά επίπεδα και στοιχεία που εκτελούν μία ποικιλία λειτουργιών, από φυσικές συσκευές και συστήματα απόκτησης δεδομένων, έως συσκευές δικτύου που επικοινωνούν δεδομένα IoT σε εφαρμογές επεξεργασίας δεδομένων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αρχιτεκτονική ενός συστήματος IoT δύνανται να αποτελείται από διάφορα επίπεδα. Ωστόσο μία συχνή πρακτική είναι η χρήση πέντε επιπέδων, όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.39 που ακολουθεί.



Σχήμα 1.39: Αρχιτεκτονική IoT 5 επιπέδων [67]

Η αρχιτεκτονική 5 επιπέδων απαρτίζεται από τα 5 επίπεδα που φαίνονται στο Σχήμα 1.39. Τα επίπεδα αυτά είναι το Perception Layer (Επίπεδο Αντίληψης), το Transport Layer (Επίπεδο Μεταφοράς), το Processing Layer (Επίπεδο Επεξεργασίας), το Application Layer (Επίπεδο Εφαρμογής) και το Business Layer (Επιχειρηματικό Επίπεδο). [68], [69]

Το επίπεδο αντίληψης αλληλεπιδρά με το φυσικό περιβάλλον για να συγκεντρώσει ακατέργαστα δεδομένα. Τέτοιες συσκευές που συνδέονται με το IoT, όπως αισθητήρες και κάμερες, συλλέγουν παθητικά πληροφορίες και εικόνες, οι οποίες θα μεταδοθούν μέσω του επιπέδου μεταφοράς.

Το επίπεδο μεταφοράς, γνωστό και ως επίπεδο δικτύου (Network Layer), είναι υπεύθυνο για τη ροή δεδομένων και τη μεταφορά αυτών μεταξύ του επιπέδου αντίληψης και του επιπέδου επεξεργασίας. Η μεταφορά αυτή γίνεται μέσω διαφόρων δικτύων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWan, NFC κ.τ.λ.

Το επίπεδο επεξεργασίας, που συχνά αναφέρεται και ως στρώμα ενδιάμεσου λογισμικού, αποθηκεύει, αναλύει και προεπεξεργάζεται τα δεδομένα που προέρχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Ακόμη, το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει δραστηριότητες όπως η συγκέντρωση δεδομένων, η μετάφραση πρωτοκόλλου και η επιβολή ασφάλειας σε έτοιμα επίπεδα για το επίπεδο εφαρμογής.

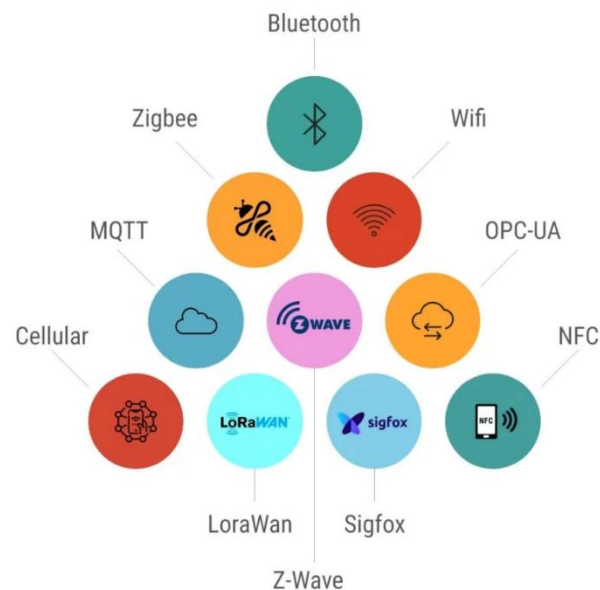
Το επίπεδο εφαρμογής περιέχει εφαρμογές λογισμικού που χρησιμοποιούν τα επεξεργασμένα δεδομένα που συγκεντρώνονται από το επίπεδο αντίληψης, με σκοπό να ολοκληρώσουν εργασίες ή να αντλήσουν πληροφορίες μέσω προηγμένων αναλυτικών στοιχείων. Σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνονται οι βάσεις δεδομένων.

Το επιχειρηματικό επίπεδο είναι το επίπεδο της αρχιτεκτονικής IoT που συναντάται πιο συχνά, καθώς περιλαμβάνει διεπαφές με το χρήστη μέσω κατάλληλων UI, πίνακες εργαλείων και διάφορα εργαλεία οπτικοποίησης των δεδομένων, που οι περισσότεροι επιχειρηματίες συνηθίζουν να χρησιμοποιούν καθημερινά. Στο επιχειρηματικό επίπεδο, όλα τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και υποβληθεί σε επεξεργασία, δείχνουν την αξία τους, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες και τροφοδοτώντας καίριες επιχειρηματικές αποφάσεις.

1.3.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Για την ορθή λειτουργία ενός συστήματος IoT, απαιτείται η μετάβαση από το επίπεδο αντίληψης στο επιχειρηματικό επίπεδο, μέσω των ενδιάμεσων επιπέδων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι είναι γεγονός, ότι ο ρόλος του επιπέδου μεταφοράς δεδομένων είναι αρκετά σημαντικός, καθώς εξασφαλίζει τη μεταφορά των δεδομένων, τα οποία στέλνει για

περεταίρω επεξεργασία. Η επικοινωνία αυτή με το δίκτυο για την ορθή μεταφορά διακρίνεται από αξιοπιστία και ασφάλεια. Συγκεκριμένα, τα πρωτόκολλα IoT είναι χρήσιμα για την κρυπτογράφηση (μέσω TLS/SSL, DTSL) με σκοπό να προστατεύσουν τα δεδομένα κατά την ασύρματη επικοινωνία IoT. Επιπλέον χρησιμοποιούνται για το καθορισμό των στοιχείων ελέγχου πρόσβασης, τον περιορισμό της μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης συσκευής ή χρήστη στο δίκτυο IoT. Παράλληλα, τα πρωτόκολλα IoT προσφέρουν δυνατότητες όπως ανίχνευση σφαλμάτων, αναμετάδοση χαμένων πακέτων και μηχανισμούς επιβεβαίωσης για να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα μεταδίδονται αξιόπιστα, ακόμη και σε περιβάλλοντα με πιθανές παρεμβολές ή αδύναμα σήματα. [70]



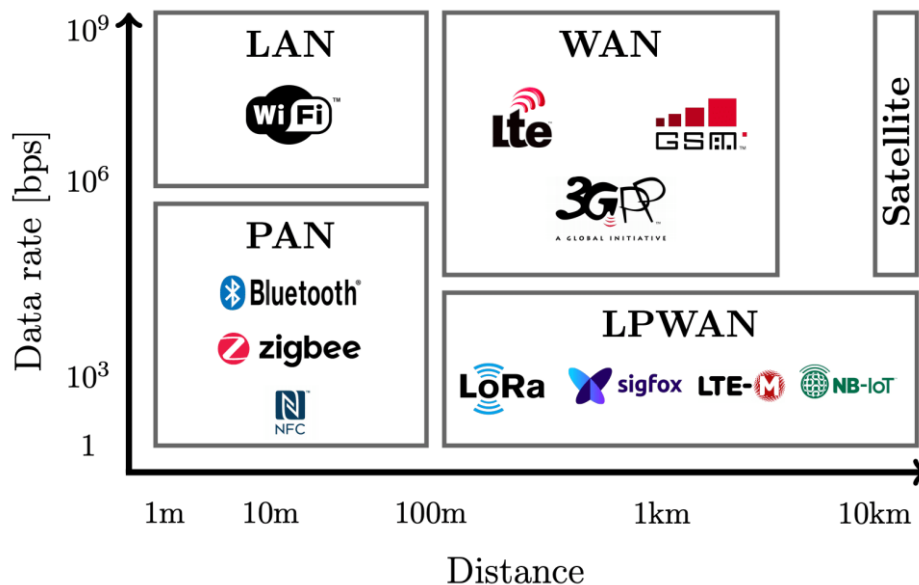
Σχήμα 1.40: Διάφορα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας [71]

Σε ένα οικοσύστημα IoT, υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα, το καθένα από τα οποία διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά και δυνατότητες. Είναι εμφανές ότι το κάθε πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι κατάλληλο για διαφορετική εφαρμογή, ανάλογα με τις αρετές που διαθέτει. Ανάλογα με την οπτική, με την οποία κοιτάμε τα IoT πρωτόκολλα, μπορούμε να τα ταξινομήσουμε σε διάφορες κατηγορίες.

Από λειτουργική άποψη, μπορούμε να διαχωρίσουμε τα IoT πρωτόκολλα στις εξής κατηγορίες : Πρωτόκολλο Επιπέδου Φυσικής Στρώσης / Σύνδεσης Δεδομένων και Πρωτόκολλο Επιπέδου Εφαρμογής. Γενικά, η πρώτη κατηγορία απαρτίζεται από πρωτόκολλα που είναι υπεύθυνα για τη διευκόλυνση της δικτύωσης και της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, όπως τα πρωτόκολλα 2G/3G/4G/5G, Wi-Fi, Zigbee, LoRa κ.α. Σε αυτή τη πρώτη κατηγορία ανήκουν ασύρματα πρωτόκολλα μικρής απόστασης, όπως RFID, NFC και Bluetooth, καθώς και ενσύρματα πρωτόκολλα όπως RS232 και USB. Αντίθετα, τα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής είναι κυρίως πρωτόκολλα επικοινωνίας της συσκευής που εκτελείται το παραδοσιακό πρωτόκολλο Internet TCP/IP. Αυτά τα πρωτόκολλα επιτρέπουν στις συσκευές να ανταλλάσσουν δεδομένα και να επικοινωνούν με τη πλατφόρμα Cloud, μέσω του διαδικτύου. Ορισμένα παραδείγματα τέτοιων πρωτοκόλλων είναι τα HTTP, MQTT, CoAP, LwM2M και XAMPP. [70]

Από τη προοπτική της εφαρμογής του πρωτοκόλλου στο σύστημα IoT, μπορούμε να τα διαχωρίσουμε σε Πρωτόκολλα Cloud και Πρωτόκολλα Gateway. Η πρώτη κατηγορία αφορά πρωτόκολλα που βασίζονται στην αρχή λειτουργίας TCP/IP. Εκεί, τα δεδομένα από συσκευές IoT, όπως αισθητήρες και συσκευές ελέγχου, πρέπει συνήθως να μεταδίδονται στο

Cloud. Αυτό διευκολύνει τη σύνδεση τους με τους τελικούς χρήστες και την εισαγωγή τους σε εταιρικά συστήματα. Γενικά, οι συσκευές IoT που υποστηρίζουν την αρχή λειτουργίας TCP/IP μπορούν να έχουν πρόσβαση στο Cloud μέσω διαφόρων πρωτοκόλλων επιπέδου εφαρμογής, όπως HTTP, MQTT, CoAP, LwM2M, XAMPP, χρησιμοποιώντας Wi-Fi, Ethernet κ.α. Αντίθετα, οι συσκευές που δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο Cloud μέσω επικοινωνίας μικρής εμβέλειας, χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα gateway, όπως είναι το Bluetooth, Zigbee, LoRa κ.α. [70]



Σχήμα 1.41: Εμβέλεια και Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας [72]

1.3.2.1 Bluetooth

Το Bluetooth αποτελεί ένα βιομηχανικό πρότυπο για ασύρματα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών (Wireless Personal Area Networks - WPAN). Πρόκειται για μία ασύρματη τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία μικρών αποστάσεων, η οποία μπορεί να μεταδώσει σήματα μέσω μικροκυμάτων σε ψηφιακές συσκευές. Συνεπώς, το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο περιέχει τυποποιημένη, ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα σε PDA, κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές κ.α. Γενικά, το Bluetooth λειτουργεί στο αδέσμευτο φάσμα συχνοτήτων των 2,4 GHz, ώστε οι συσκευές που το ενσωματώνουν να μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς πρόβλημα σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Ακόμη, επιτρέπει τις απευθείας συνδέσεις από συσκευή σε συσκευή (M2M), καθώς και τη ταυτόχρονη σύνδεση έως και επτά συσκευών με τη χρήση μίας μοναδικής συχνότητας. Τέλος, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι περίπου 1Mbps. [73]



Σχήμα 1.42: Λογότυπο Bluetooth [74]

1.3.2.2 Wi-Fi

Το Wi-Fi, που προέρχεται από το Wireless Fidelity (Ασύρματη Πιστότητα), αποτελεί μία τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης που επιτρέπει σε ηλεκτρονικές συσκευές να συνδέονται σε ένα δίκτυο μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Το Wi-Fi λειτουργεί μεταδίδοντας ραδιοκύματα σε διάφορες συχνότητες για να παρέχει ασύρματο διαδίκτυο και συνδέσεις δικτύου σε διάφορες ταχύτητες. Τα εύρη συχνοτήτων στα οποία συνήθως ομαδοποιούνται είναι 2,4 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Γενικά όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα της ζώνης Wi-Fi, τόσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες διαδικτύου. Για να παρέχει μία αποτελεσματική και αξιόπιστη σύνδεση, το Wi-Fi χρησιμοποιεί ένα από τα πολλά πρωτόκολλα IEEE 802.11 για το προσδιορισμό των προδιαγραφών WLAN (Wireless Local Area Network). Ανάλογα με το εύρος μετάδοσης των ραδιοκυμάτων οι συνδέσεις Wi-Fi διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες: Wireless Local Area Network (WLAN- οικιακές αποστάσεις), Wireless Personal Area Network (WPAN- περίπου στα 10 μέτρα), Wireless Metropolitan Area Network (WMAN- περίπου 50 χιλιόμετρα) και Wireless Wide Area Network (WWAN- παγκόσμια απόσταση). Τέλος, ο ρυθμός μετάδοσης ποικίλει ανάλογα με το είδος πρωτοκόλλου που ακολουθεί και τη συχνότητα λειτουργίας. [75], [76]



Σχήμα 1.43: Λογότυπο Wi-Fi [77]

1.3.2.3 Zigbee

Το Zigbee είναι μία προδιαγραφή που βασίζεται στο IEEE 802.15.4 για μία σειρά πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία

προσωπικών δικτύων περιοχής με μικρά ψηφιακά ραδιόφωνα χαμηλής κατανάλωσης, όπως για οικιακούς αυτοματισμούς, συλλογή δεδομένων ιατρικών συσκευών και άλλες ανάγκες χαμηλού εύρους ζώνης και χαμηλής κατανάλωσης. Έτσι, το Zigbee αποτελεί ένα ad hoc ασύρματο δίκτυο (δηλαδή δεν βασίζεται σε προϋπάρχουσα υποδομή, όπως δρομολογητές ή σημεία ασύρματης πρόσβασης) χαμηλής κατανάλωσης. Οι συσκευές Zigbee βασίζονται σε έναν κεντρικό κόμβο Zigbee (gateway), ο οποίος είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο και ελέγχει όλες τις συσκευές. Οι ίδιες οι συσκευές επικοινωνούν μέσω ενός λεγόμενου δικτύου πλέγματος (mesh network). Έτσι, κάθε συσκευή όχι μόνο λαμβάνει σήματα, αλλά τα προωθεί και σε άλλες συσκευές, δημιουργώντας έτσι ένα σταθερό και εκτεταμένο δίκτυο. Τέλος, ο ρυθμός μετάδοσης είναι περίπου 250 kbits/sec. [78], [79]



Σχήμα 1.44: Λογότυπο Zigbee [80]

1.3.2.4 LoRa

Το LoRa αποτελεί ένα ασύρματο πρωτόκολλα επικοινωνίας, το οποίο ανήκει στη κατηγορία WWAN. Το πρωτόκολλο αυτό καθιστά εφικτή τη μετάδοση δεδομένων σε αρκετά μεγάλη απόσταση καλύπτοντας ένα εύρος περίπου στα 10 χιλιόμετρα κατά μέσο όρο σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι, το πρωτόκολλο LoRa διακρίνεται για τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος, παράγοντας κομβικός για την επιλογή του πρωτοκόλλου αυτού σε ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών (Ευφυή Γεωργία, Έξυπνες Πόλεις κ.τ.λ). Επιπλέον, το πρωτόκολλο LoRa διαθέτει δυνατότητες γεωεντοπισμού, εξαλείφοντας με αυτό το τρόπο την ανάγκη για πρόσθετο υλικό GPS για τη παρακολούθηση και τον εντοπισμό διάφορων συσκευών. [81]



Σχήμα 1.45: Λογότυπο LoRa [82]

1.3.2.5 NFC

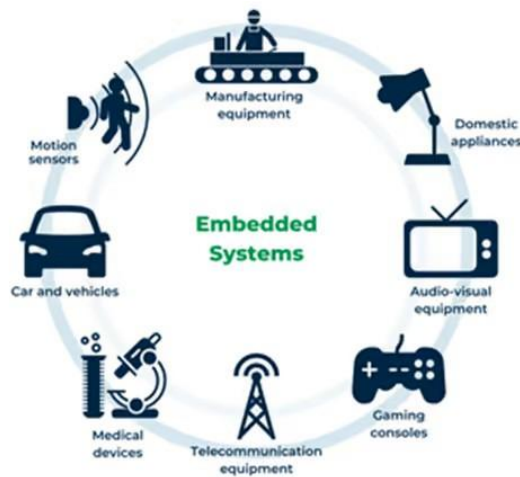
Το NFC (Near Field Communication) είναι ένα σετ από πρωτόκολλα επικοινωνίας το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ δύο ηλεκτρονικών συσκευών σε απόσταση 4 cm ή λιγότερο. Το NFC προσφέρει μία σύνδεση χαμηλής ταχύτητας μέσα από μία απλή διάταξη. Επιπροσθέτως, το NFC βασίζεται στην επαγωγική σύζευξη μεταξύ δύο ηλεκτρομαγνητικών πηνίων που υπάρχουν σε μία συσκευή με δυνατότητα NFC, όπως ένα smartphone. Γενικά, το NFC χρησιμοποιεί συχνότητα 13,56 MHz στην παγκοσμίως διαθέσιμη χωρίς άδεια ραδιοσυχνότητα στη ζώνη ISM (μερίδες του ραδιοφάσματος κρατημένες διεθνώς για εμπορικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς). Τα τελευταία χρόνια, οι συσκευές NFC χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα ανέπαφων πληρωμών, παρόμοια με εκείνα που χρησιμοποιούνται σε πιστωτικές κάρτες και σε ηλεκτρονικά εισιτήρια. [83]



Σχήμα 1.46: Λογότυπο NFC [84]

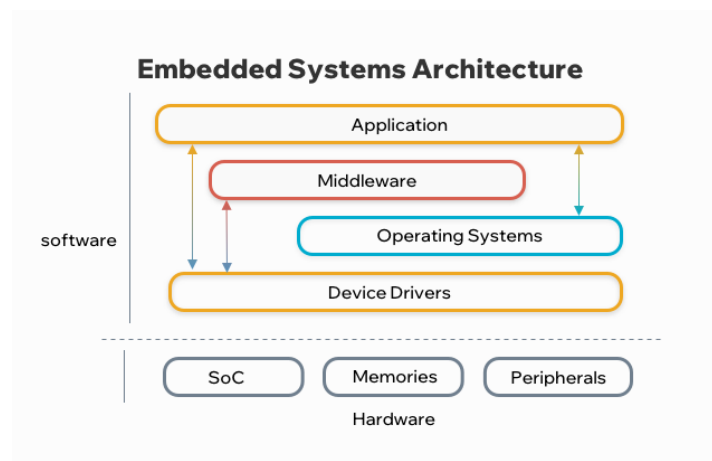
1.3.3 Ενσωματωμένα Συστήματα

Τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) είναι ορισμένα υπολογιστικά συστήματα τα οποία αναλαμβάνουν συγκεκριμένες λειτουργίες εντός ενός μεγαλύτερου συστήματος. Τα ενσωματωμένα συστήματα καλούνται επίσης και ενσωματωμένοι υπολογιστές. Γενικά, από άποψη δομής το μέγεθός τους είναι μικρό και εξειδικεύονται σε μία συγκεκριμένη υπολογιστική διαδικασία. Παρόλο που αποτελούν ένα κομμάτι ενός ευρύτερου συστήματος, μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά και ως μονάδες, ως συσκευές δηλαδή για την εκάστοτε λειτουργία που υλοποιούν. Έτσι τα ενσωματωμένα συστήματα είναι χρήσιμα σε εφαρμογές που βασικοί παράγοντες είναι το μέγεθος, το κόστος, το βάρος και η ισχύς. Συνεπώς, είναι λογικό να χρησιμοποιούνται σε μία ευρεία γκάμα εφαρμογών, όπως στην ιατρική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις τηλεπικοινωνίες, σε στρατιωτικά προγράμματα, στην αεροδιαστημική και γενικά σε κάθε βιομηχανικό τομέα. [85]



Σχήμα 1.47: Εφαρμογές Ενσωματωμένων Συστημάτων [86]

Συνήθως, αποτελούνται από τρία βασικά στοιχεία, έναν επεξεργαστή, μία μονάδα μνήμης και διάφορες μονάδες εισόδου και εξόδου. Προφανώς τα εξαρτήματα αυτά των ενσωματωμένων συστημάτων διαθέτουν και hardware και software στοιχεία για να πετύχουν την αρμονική τους λειτουργία έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αναλυτικότερα, όπως κάθε υπολογιστής, τα ενσωματωμένα συστήματα διαθέτουν ένα συνδυασμό hardware και software για την υλοποίηση της εκάστοτε διαδικασίας. Παραδείγματος χάριν, τέτοιες συσκευές είναι οι επεξεργαστές, οι μικροελεγκτές, η πτητική και μη-πτητική μνήμη, οι μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPUs), οι διεπαφές επεξεργασίας εισόδου/εξόδου, οι θύρες, τα τροφοδοτικά και ο κώδικας του συστήματος της εφαρμογής. Ωστόσο, τα ενσωματωμένα συστήματα ξεχωρίζουν για τέσσερις κύριους λόγους από οποιοδήποτε τυπικό σταθμό εργασίας ή διακομιστή και αυτοί είναι : ο σκοπός τους, ο σχεδιασμός τους, το κόστος τους και η ανθρώπινη συμμετοχή. Ακόμη, τα ενσωματωμένα συστήματα αξιοποιούν πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCBs) που είναι κατάλληλα προγραμματισμένες με λογισμικό έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ορθή λειτουργία και διαχείριση δεδομένων χρησιμοποιώντας διασυνδέσεις επικοινωνίας μνήμης και εισόδου/εξόδου. [87]



Σχήμα 1.48: Αρχιτεκτονική Ενσωματωμένων Συστημάτων [88]

Κρίνοντας από τις αποδοτικές και τις λειτουργικές απαιτήσεις, τα ενσωματωμένα συστήματα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες [87]:

- Real-Time ενσωματωμένα συστήματα :

Δίνουν προτεραιότητα στην άμεση παραγωγή και ανάλογα με τις επιθυμητές προθεσμίες διακρίνονται σε soft real-time (επιεικής χρονικές προθεσμίες) και hard real-time (αυστηρές χρονικές προθεσμίες).

- Standalone ενσωματωμένα συστήματα :

Λειτουργούν ανεξάρτητα χωρίς την ύπαρξη ενός υπολογιστή host.

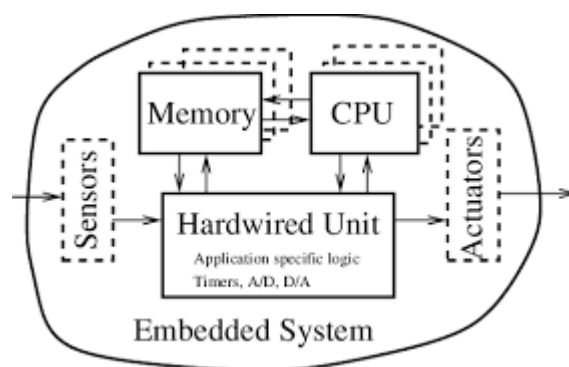
- Networked ενσωματωμένα συστήματα :

Βασίζονται σε συνδέσεις δικτύου και επικοινωνίας για την παραγωγή εξόδου.

- Mobile ενσωματωμένα συστήματα :

Αποτελούν μικρές και φορητές συσκευές όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι υπολογιστές.

Γενικά, η αρχή λειτουργίας των ενσωματωμένων συστημάτων ξεκινά με τη χρήση ενός αισθητήρα ο οποίος μετρά και μετατρέπει μία φυσικό ποσότητα σε ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να ερμηνευτεί από έναν μηχανικό ενσωματωμένων συστημάτων ή από οποιοδήποτε ηλεκτρικό όργανο. Επιπλέον, ο αισθητήρας αποθηκεύει τη μετρούμενη αυτή ποσότητα στη διαθέσιμη μνήμη. Έπειτα, ένας ADC μετατροπέας (Analog to Digital Converter), μετατρέπει το αναλογικό σήμα που αποστέλλεται από τον αισθητήρα σε ψηφιακό. Στη συνέχεια οι διαθέσιμοι επεξεργαστές αξιολογούν τα δεδομένα για να μετρήσουν την έξοδο και να την αποθηκεύσουν στη διαθέσιμη μνήμη. Τότε, ένας DAC μετατροπέας (Digital to Analog Converter) αλλάζει τα ψηφιακά δεδομένα που τροφοδοτούνται από τον επεξεργαστή σε αναλογικά. Τέλος, ένας ενεργοποιητής (actuator) συγκρίνει το παραγόμενο αποτέλεσμα του D-A μετατροπέα με την πραγματική έξοδο που αποθηκεύτηκε και αποθηκεύει το εγκεκριμένο αποτέλεσμα.



Σχήμα 1.49: Σχεδιάγραμμα Λειτουργίας Ενσωματωμένων Συστημάτων [89]

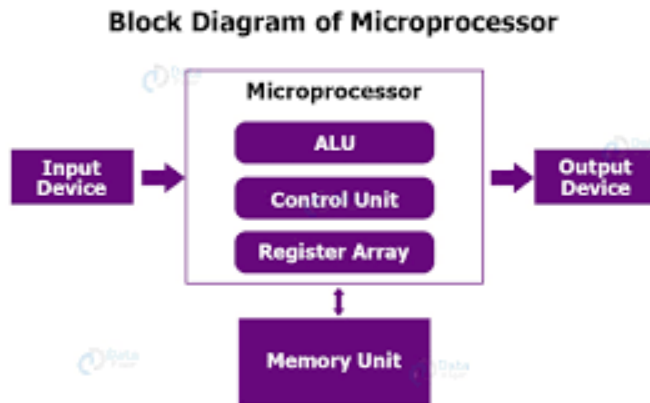
Είναι εμφανές ότι η βιομηχανία των ενσωματωμένων συστημάτων αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται πολύ γρήγορα, κρίνοντας από τη ραγδαία ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence- AI), της Εικονικής Πραγματικότητας (Virtual Reality-VR), της Επαυξημένης Πραγματικότητας (Augmented Reality-AR), της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things-IoT).

Τα ενσωματωμένα συστήματα θα βρίσκονται στο επίκεντρο όλων των μελλοντικών τάσεων και συγκεκριμένα σε εφαρμογές μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης, αυξημένης ασφάλειας των ενσωματωμένων συσκευών, συνδεσιμότητας στο Cloud, βαθιάς μάθησης (Deep Learning) και οπτικοποίησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αξιοσημείωτο είναι επίσης, ότι σύμφωνα με μία έρευνα που δημοσιεύτηκε το 2018 από την εταιρεία QYResearch, το 2017 η παγκόσμια αγορά για τη βιομηχανία ενσωματωμένων συστημάτων κοστολογήθηκε στα 68,9 δισεκατομμύρια δολάρια και αναμένεται να ανελιχθεί στα 105,7 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το τέλος του 2025. [85]

1.3.4 Μικροεπεξεργαστές

Ο μικροεπεξεργαστής είναι ο κυρίαρχος τύπος σύγχρονου επεξεργαστή υπολογιστών, καθώς συνδυάζει τα εξαρτήματα και τη λειτουργία μίας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) ή σε μερικά συνδεδεμένα ICs. Όμοια με τις CPU, οι μικροεπεξεργαστές θεωρούνται συχνά ως ο «εγκέφαλος» ενός υπολογιστή. Αντίθετα με τις CPU, οι μικροεπεξεργαστές ενσωματώνουν κυκλώματα αριθμητικής, λογικής και ελέγχου από πιο παραδοσιακές CPU σε ένα ψηφιακό κύκλωμα πολλαπλών χρήσεων, που βασίζεται σε ρολόι και σε διάφορους καταχωρητές. Γενικά οι όροι μικροεπεξεργαστής και κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) μοιάζουν αρκετά και χρησιμοποιούνται εναλλάξ. Πρακτικά, ο μικροεπεξεργαστής είναι μία CPU με όλα τις τα χαρακτηριστικά, πάνω σε ένα μόνο chip. Η χρήση ενός μόνο chip μειώνει τον αριθμό των τρωτών ηλεκτρικών συνδέσεων, βελτιώνοντας με αυτό το τρόπο την αξιοπιστία μειώνοντας τα πιθανά σημεία αποτυχίας. Συνεπώς, οι μικροεπεξεργαστές έχουν σχεδόν αντικαταστήσει πλήρως τις παραδοσιακές CPU που είχαν πολλαπλά εξαρτήματα. Ορισμένα εξαρτήματα ενός μικροεπεξεργαστή που συνδράμουν στην υλοποίηση των διαφόρων διαδικασιών είναι : η Αριθμητική Λογική Μονάδα (Arithmetic Logic Unit - ALU), η Μονάδα Ελέγχου (Control Unit - CU), οι Καταχωρητές (Registers), η Προσωρινή Μνήμη (Cache Memory), τα Τρανζιστορς (Transistors) κ.α. [90]

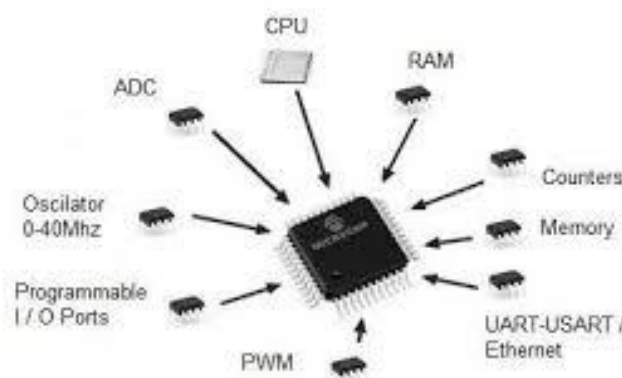
Οι σύγχρονοι μικροεπεξεργαστές συνδυάζουν εκατομμύρια μικρά transistors, αντιστάτες και διόδους πάνω σε ένα ημιαγώγιμο υλικό για να μπορέσουν να δημιουργήσουν τα βασικά στοιχεία μίας CPU. Αυτά τα στοιχεία είναι ταξινομημένα σε διάφορους τύπους μοναδικής υπολογιστικής αρχιτεκτονικής με σκοπό να εκτελούν υπολογισμούς και εντολές. Αρχικά, ο μικροεπεξεργαστής ανακτά εντολές από τη μνήμη του υπολογιστή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ξεκινήσει είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα μέσω μίας εισόδου. Έπειτα, ο μικροεπεξεργαστής αποκωδικοποιεί τις εντολές, ερμηνεύοντας ουσιαστικά την είσοδο ή την εντολή σε ένα αίτημα , υποκινώντας έτσι μία συγκεκριμένη διαδικασία ή έναν υπολογισμό. Στη συνέχεια, ο μικροεπεξεργαστής απλά εκτελεί τη λειτουργία που απαιτήθηκε ή ζητήθηκε. Τέλος το αποτέλεσμα της εκτέλεσης αποθηκεύεται στη μνήμη του υπολογιστή.



Σχήμα 1.50: Δομή Μικροεπεξεργαστή [91]

1.3.5 Μικροελεγκτές

Μία μονάδα μικροελεγκτή (Microcontroller Unit - MCU) είναι ουσιαστικά ένας μικρός υπολογιστής πάνω σε ένα μόνο chip. Ο μικροελεγκτής είναι σχεδιασμένος να περατώνει συγκεκριμένες διαδικασίες εντός ενός ενσωματωμένου συστήματος χωρίς να απαιτείται απαραίτητα ένα σύνθετο λειτουργικό σύστημα. Πράγματι, αυτά τα συμπαγή ενσωματωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits - ICs) διαθέτουν έναν ή περισσότερους πυρήνες επεξεργασίας, RAM και EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) με σκοπό να αποθηκεύουν τα προγράμματα που τρέχουν στους μικροελεγκτές, ακόμη και όταν η μονάδα είναι αποσυνδεδεμένη από τη πηγή τροφοδοσίας ή το τροφοδοτικό. Αντίθετα με τους μικροεπεξεργαστές, οι μικροελεγκτές ενσωματώνουν περιφερειακές συσκευές επεξεργασίας, μνήμης και εισόδου/εξόδου (I/O), συμπεριλαμβάνοντας χρονομετρητές (Clocks) και μετατροπείς ADC (Analog to Digital Converter), καθιστώντας με αυτό το τρόπο τη μονάδα πιο αποτελεσματική, οικονομική και αυτόνομη. [92]



Σχήμα 1.51: Τυπική Δομή Μικροελεγκτή [93]

Τα βασικά εξαρτήματα των μικροεπεξεργαστών είναι :

- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU) :

Η CPU αποτελεί το βασικό εξάρτημα που είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση εντολών και τον έλεγχο των λειτουργιών.

- Μνήμη (Memory) :

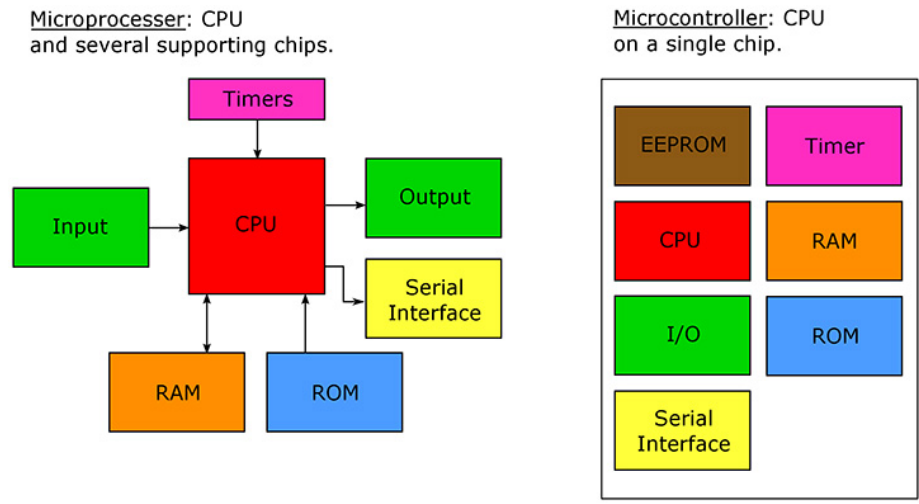
Οι μικροελεγκτές διαθέτουν πτητική μνήμη (RAM), η οποία σε αντίθεση με τη μνήμη του προγράμματος, αποθηκεύει προσωρινά δεδομένα τα οποία κινδυνεύουν να χαθούν εάν το σύστημα χάσει ισχύ. Ακόμη, διαθέτουν και μη πτητική μνήμη για να αποθηκεύουν το σετ εντολών προγραμματισμού του μικροελεγκτή (Firmware).

- Περιφερειακές Συσκευές :

Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να αξιοποιηθεί ο εκάστοτε μικροελεγκτής, μπορεί να διαθέτει μία ευρεία γκάμα από βοηθητικά εξαρτήματα, όπως διεπαφές εισόδου/εξόδου σαν χρονομετρητές, μετρητές , ADC, DAC μετατροπείς και διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας σαν UART, SPI και I2C. Επιπλέον, ενδέχεται να διαθέτουν στοιχεία όπως οθόνες LCD, θύρες συνδεσιμότητας για Ethernet ή γενικά διεπαφές για τέτοιου τύπου μονάδες.

Οι μικροελεγκτές χαμηλού κόστους και οι μικροελεγκτές ανάπτυξης πλακετών, όπως εκείνες που φτιάχνονται από την Arduino και την Adafruit, μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) χρησιμοποιώντας κοινές γλώσσες προγραμματισμού όπως C, C++ και Python. Παρόλο που είναι εύκολα προσβάσιμοι ακόμη και σε αρχάριους προγραμματιστές, οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα ελέγχου επαγγελματικών εφαρμογών, όπως στη ρομποτική, στα αυτοματοποιημένα συστήματα βιομηχανιών και σε ποικίλλες εφαρμογές IoT.

Οι μικροελεγκτές και οι μικροεπεξεργαστές παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες, καθώς είναι γεγονός πως και οι δύο μπορούν να χαρακτηριστούν ως επεξεργαστές πάνω σε ένα chip, ικανοί να εκτελέσουν υπολογιστικές λογικές. Επιπλέον, και οι δύο είναι κομβικοί στην ανάπτυξη και στη διάδοση της γενικής τεχνολογίας υπολογιστών. Ωστόσο, τα δύο αυτά εξαρτήματα διαφέρουν σημαντικά τόσο στην αρχιτεκτονική hardware τους όσο και τις εφαρμογές αυτών. Πιο συγκεκριμένα, οι μικροελεγκτές αποτελούνται από ένα συνδυασμό όλων των απαραίτητων υπολογιστικών στοιχείων πάνω σε ένα ενιαίο chip και δεν απαιτούν πρόσθετα εξωτερικά κυκλώματα για να λειτουργήσουν. Αντίθετα, οι μικροεπεξεργαστές αποτελούνται από μία CPU και αρκετά υποστηρικτικά chips τα οποία προσφέρουν λειτουργίες μνήμης , σειριακής διεπαφής, εισόδου/εξόδου και αρκετά άλλα (Σχήμα 1.52). Η κύρια διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τύπων είναι ότι οι μικροελεγκτές λειτουργούν αυτόνομα, ενώ οι μικροεπεξεργαστές είναι σχεδιασμένοι για να διασυνδέονται με βοηθητικά εξωτερικά εξαρτήματα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ως αποτέλεσμα, γενικευμένες και απαιτητικές εργασίες που μπορεί να απαιτούν εξειδικευμένο υλικό με αυξημένη επεξεργαστική ισχύ είναι κατάλληλες για τους μικροεπεξεργαστές, ενώ συγκεκριμένες εργασίες εντός ενός ενσωματωμένου συστήματος, όπως ο έλεγχος αισθητήρων ή κινητήρων, είναι κατάλληλες για χρήση μικροελεγκτών. [92]



Σχήμα 1.52: Σύγκριση Μικροεπεξεργαστή και Μικροελεγκτή [94]

1.3.6 Μικροελεγκτής ESP₃₂

Ο ESP₃₂ είναι ένας ισχυρός, ευέλικτος και εξαιρετικά δημοφιλής μικροελεγκτής που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Espressif Systems. Πρόκειται για ένα σύστημα σε ένα chip (System-on-Chip, SoC), που ενσωματώνει έναν ή δύο επεξεργαστές Xtensa® 32-bit LX6 της Tensilica και προσφέρει δυνατότητες Wi-Fi και Bluetooth χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (Bluetooth Low Energy - BLE). Η αρχιτεκτονική του τον καθιστά ιδανικό για εφαρμογές Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), έξυπνων συσκευών, συστημάτων αυτοματισμού και φορητών ηλεκτρονικών. [95]



Σχήμα 1.53: ESP₃₂

Μερικές από τις τεχνικές προδιαγραφές του ESP₃₂ διαφαίνονται στο παρακάτω πίνακα [95] :

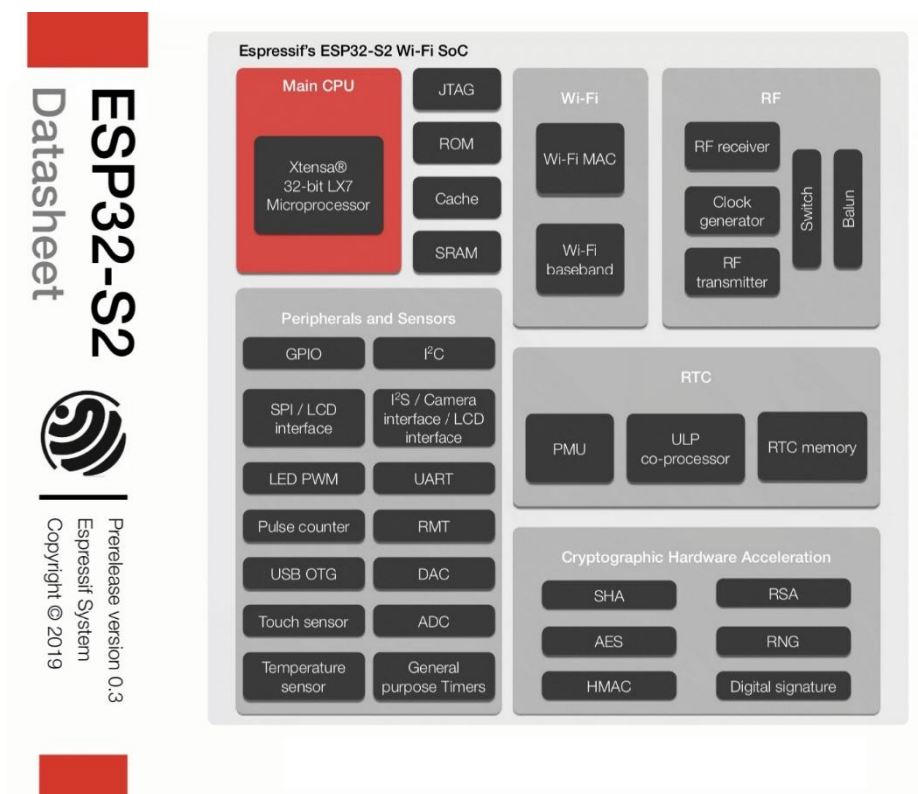
Πίνακας 1.5: Τεχνικές Προδιαγραφές του ESP₃₂ [95]

Κατηγορία	Προδιαγραφή
Επεξεργαστής	Xtensa® 32-bit LX6, μονός ή διπλός πυρήνας (dual-core) στα 160 ή 240 MHz
RAM	520 KiB SRAM
ROM	448 KiB ROM
Flash Μνήμη	Υποστήριξη έως 16 MB (εξωτερική)
Wi-Fi	802.11 b/g/n (2.4 GHz), έως 150 Mbps
Bluetooth	v4.2 BR/EDR και BLE
Χρονιστής	RTC (Real-Time Clock)
GPIOs	34 προγραμματιζόμενες θύρες εισόδου/εξόδου
Αναλογικοί Μετατροπείς (ADC)	12-bit SAR ADC, έως 18 κανάλια
Ψηφιακοί Μετατροπείς (DAC)	2 × 8-bit DAC
Αισθητήρες Αφής	10 αισθητήρες αφής
Serial Interfaces (SPI)	4 διεπαφές SPI
Inter-IC Sound (I2S)	2 διεπαφές I2S
Inter-IC Communication (I2C)	2 διεπαφές I2C
Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)	3 διεπαφές UART
SD/eMMC/SDIO	Υποστήριξη μέσω κεντρικού και βοηθητικού ελεγκτή
CAN Bus	CAN 2.0 υποστήριξη
RMT	Υποστήριξη RMT (TX/RX Remote Control)
PWM	Motor PWM και LED PWM έως 16 κανάλια
Αισθητήρας Hall	Ναι
Λειτουργίες Ύπνου	Light Sleep, Deep Sleep, Hibernation
Υποστήριξη Κρυπτογράφησης	AES, SHA-2, RSA, ECC, Random Number Generator
Εύρος Τάσης Λειτουργίας	2.2V έως 3.6V
Θερμοκρασία Λειτουργίας	-40°C έως +125°C
Διαστάσεις Chip	Περίπου 7mm × 7mm

Το οικοσύστημα του ESP₃₂ υποστηρίζεται ευρέως από πλατφόρμες ανάπτυξης, όπως το Arduino IDE, το Espressif IDF (IoT Development Framework), καθώς και άλλες γλώσσες και περιβάλλοντα προγραμματισμού όπως MicroPython, PlatformIO και NodeMCU (Lua scripting). [96]

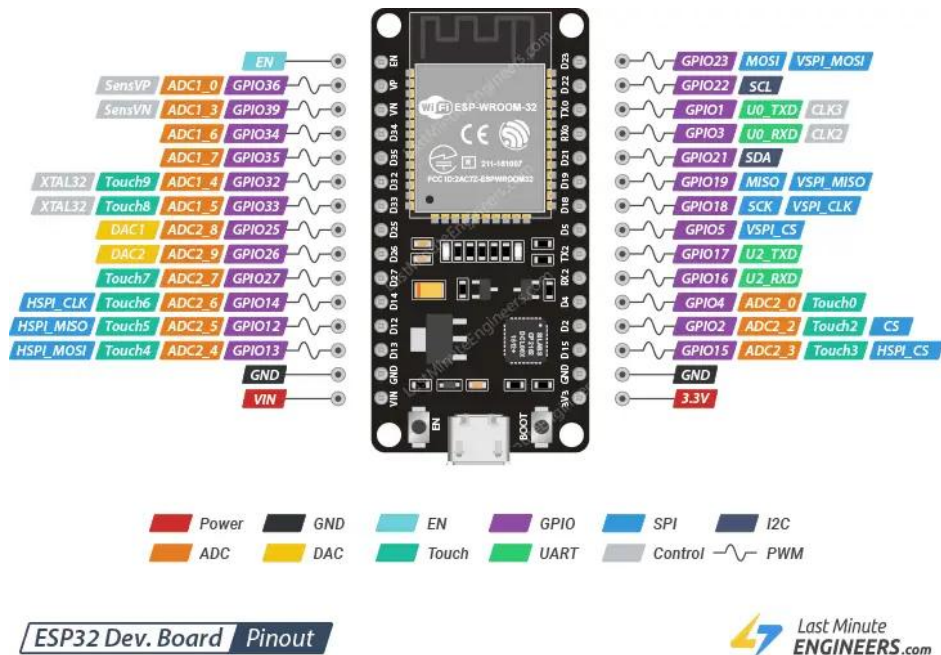
Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο ESP₃₂ είναι ένα υψηλά ολοκληρωμένο σύστημα σε chip (SoC) που βασίζεται σε μία αρχιτεκτονική πολλαπλών υπομονάδων, ενσωματώνοντας επεξεργαστική ισχύ, συνδεσιμότητα και πλήθος περιφερειακών σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Στην καρδιά του ESP₃₂ βρίσκονται ένας ή δύο επεξεργαστικοί πυρήνες Xtensa® 32-bit LX6, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν είτε ανεξάρτητα είτε συντονισμένα για να αυξήσουν την απόδοση, φτάνοντας συχνότητες έως 240 MHz. Επιπλέον, διαθέτει υποσυστήματα ειδικών σκοπών όπως Crypto Accelerators για ασφαλή επεξεργασία δεδομένων, Real-Time Clock (RTC) χρονιστής για διαχείριση λειτουργιών ύπνου, καθώς και DMA (Direct Memory Access) για ταχεία μεταφορά δεδομένων μεταξύ μονάδων χωρίς την εμπλοκή της CPU.

Το Block Diagram του ESP₃₂ απεικονίζει τη δομή και την αλληλεπίδραση των επιμέρους υπομονάδων. Αναλυτικότερα, περιλαμβάνει υπομονάδες Wi-Fi και Bluetooth, που επικοινωνούν μέσω κοινού ραδιοσυστήματος RF και διαχειρίζονται από εξειδικευμένους ελεγκτές πρωτοκόλλου. Υπάρχουν επίσης συγκεκριμένες διεπαφές όπως SPI, I2C, UART, CAN και I2S, οι οποίες επιτρέπουν στο chip να επικοινωνεί με πληθώρα εξωτερικών συσκευών και αισθητήρων. Ακόμη, ο εσωτερικός memory controller διαχειρίζεται την πρόσβαση στη RAM και στη Flash μνήμη, ενώ τα ειδικά modules όπως οι ADC και DAC επιτρέπουν την αλληλεπίδραση με αναλογικά σήματα.



Σχήμα 1.54: Block Diagram του ESP₃₂ [97]

Το Pinout Diagram του ESP₃₂ απεικονίζει τη διάταξη και τη λειτουργικότητα των ακίδων (pins) του chip. Πιο συγκεκριμένα, ο ESP₃₂ διαθέτει έως και 34 προγραμματιζόμενες ακίδες εισόδου/εξόδου (GPIOs), με δυνατότητες πολλαπλής χρήσης. Στη πραγματικότητα, η κάθε ακίδα μπορεί να εκτελεί διάφορες λειτουργίες ανάλογα με τον προγραμματισμό της, όπως ακίδες ψηφιακής εισόδου/εξόδου, αναλογικής εισόδου μέσω ADC, παραγωγής σήματος PWM, ή επικοινωνίας μέσω σειριακών πρωτοκόλλων. Τέλος, ορισμένες ακίδες είναι εξειδικευμένες για συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως αισθητήρες αφής ή είσοδοι για λειτουργίες χαμηλής κατανάλωσης.



Σχήμα 1.55: Pinout Diagram του ESP₃₂ [98]

Χάρη στις δυνατότητες του και στο χαμηλό του κόστος, ο ESP₃₂ έχει εδραιωθεί ως μία από τις κορυφαίες επιλογές στην ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών που απαιτούν συνδεσιμότητα και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ορισμένοι τομείς στους οποίους δραστηριοποιείται ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής είναι [99] :

- Οικιακός αυτοματισμός (Smart Home Systems)
- Ασύρματη επικοινωνία
- Ρομποτική
- Φορητές συσκευές
- Συσκευές IoT
- Βιομηχανικός αυτοματισμός
- Εκπαίδευση
- Τηλεμετρία και απομακρυσμένη παρακολούθηση
- Συστήματα ασφαλείας
- Έξυπνες πόλεις (Smart Cities)
- Ιατρική

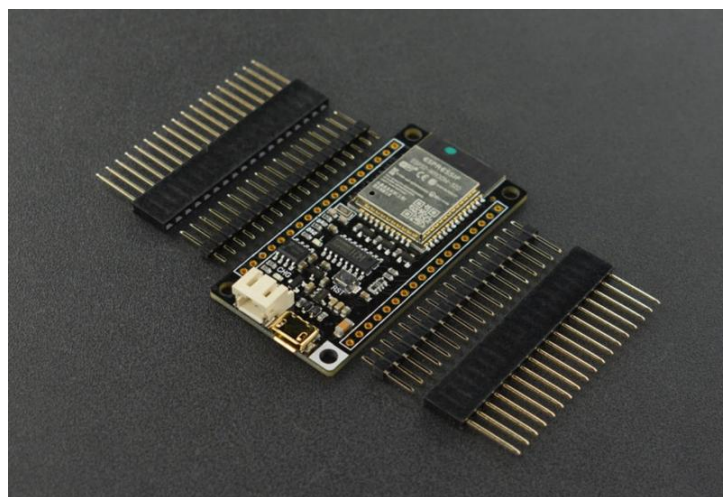
2 Ενότητα 2 : Κατασκευή

2.1 Επιλογή Στοιχείων της Διάταξης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά υλικά και οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή της συσκευής μέτρησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων και συγκεκριμένα τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), τη θερμοκρασία και την υγρασία. Αναλυτικότερα, η σχεδίαση της κατασκευής περιλαμβάνει την ενσωμάτωση σε μία κατακόρυφη ράβδο (Stick) διαφόρων αισθητηρίων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η παρακολούθηση των κρίσιμων παραμέτρων. Ακόμη, η αυτοματοποίηση της διαδικασίας στηρίζεται στην αρμονική λειτουργία των αισθητήρων και των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, τα οποία εν τέλει συνδέονται σε έναν κατάλληλα προγραμματισμένο μικροελεγκτή. Στη συνέχεια, ακολουθεί ολόκληρη η σχεδίαση και ο τρόπος λειτουργίας της συσκευής που κατασκευάστηκε.

2.1.1 Επιλογή Μικροελεγκτή

Για την υλοποίηση της μονάδας ελέγχου του υπό ανάπτυξη συστήματος, επιλέχθηκε η πλακέτα ανάπτυξης FireBeetle ESP32 IoT Microcontroller, η οποία ενσωματώνει τον μικροελεγκτή ESP32-WROOM-32D της εταιρείας Espressif Systems. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα αποτελεί μία προηγμένη λύση για εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), συνδυάζοντας υψηλή υπολογιστική ισχύ, ενσωματωμένες δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας (Wi-Fi και Bluetooth) και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 2.1: Πλακέτα Ανάπτυξης FireBeetle ESP32 IoT Microcontroller. [100]

Η αρχιτεκτονική του ESP32 βασίζεται στον διπύρρηνο επεξεργαστή Tensilica LX6, προσφέροντας υποστήριξη για ταυτόχρονες διεργασίες και ανεξάρτητο προγραμματισμό. Η πλακέτα είναι συμβατή με περιβάλλοντα ανάπτυξης όπως το Arduino IDE, MicroPython και FreeRTOS, επιτρέποντας την ευέλικτη ανάπτυξη και αποσφαλμάτωση εφαρμογών. Επιπλέον, προσφέρει υποστήριξη για πρότυπα επικοινωνίας SPI, I2C και I2S, διευκολύνοντας τη διασύνδεση με αισθητήρες, ενεργοποιητές και άλλες περιφερειακές μονάδες.

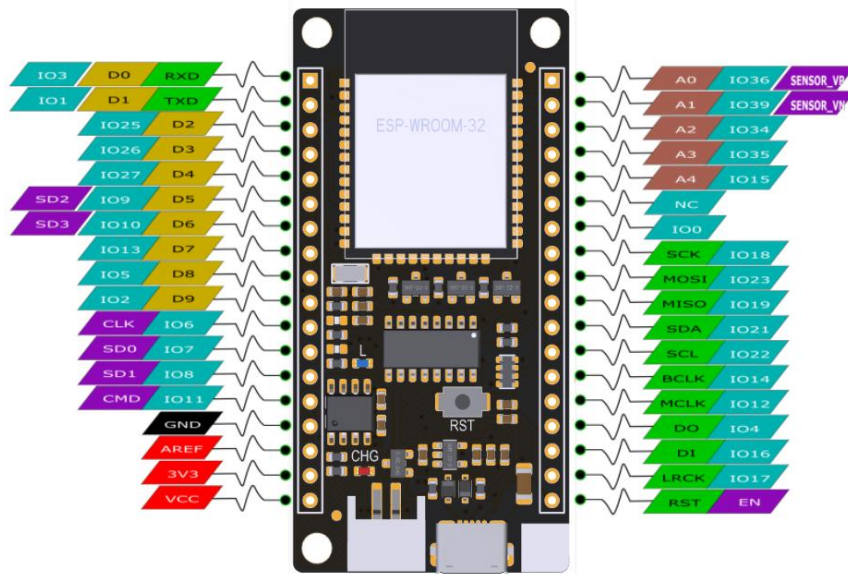
Η επιλογή της FireBeetle ESP32 τεκμηριώνεται από τη βέλτιστη σχέση υπολογιστικής απόδοσης και ενεργειακής κατανάλωσης, την ευρεία υποστήριξη από κοινότητες ανάπτυξης λογισμικού ανοικτού κώδικα, καθώς και τη δυνατότητα διασύνδεσης με πληθώρα περιφερειακών. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν την πλακέτα κατάλληλη για την ανάπτυξη αυτόνομων, φορητών ή συνδεδεμένων συστημάτων, χαρακτηριστικά απαραίτητα για σύγχρονες IoT εφαρμογές.

Στον Πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της πλακέτας FireBeetle ESP32 IoT Microcontroller:

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά της πλακέτας FireBeetle ESP₃₂ IoT Microcontroller. [101]

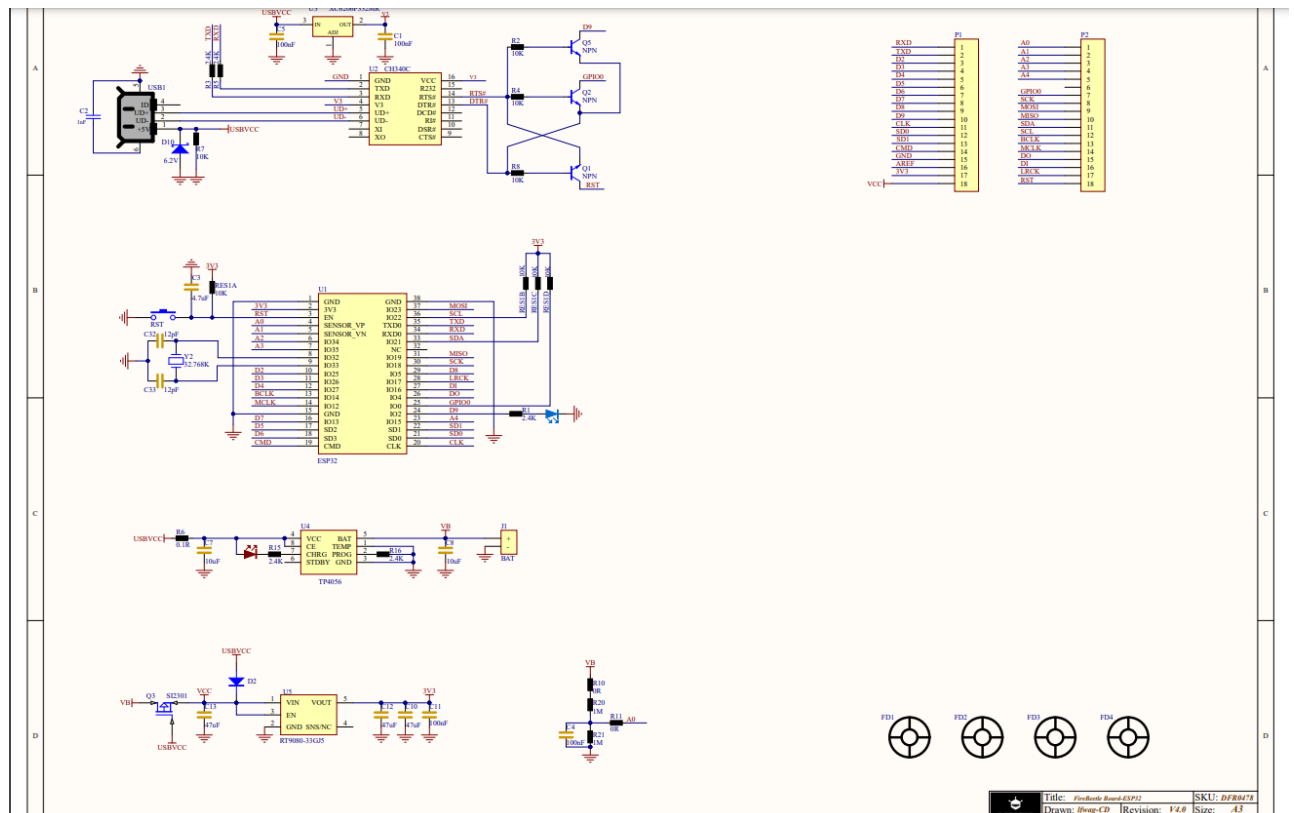
Τεχνικά Χαρακτηριστικά	Τιμές
Τάση Λειτουργίας	3.3V
Τάση Εισόδου	3.3V – 5V
Αρχιτεκτονική Επεξεργαστή	Tensilica LX6 dual-core processor (έναν πυρήνα για δικτυακές διεργασίες, έναν για ανεξάρτητο προγραμματισμό)
SRAM	520KB
Flash Μνήμη	16MB
Πρωτόκολλο Wi-Fi	802.11 b/g/n/d/e/I/k/r, έως 150 Mbps, συμβατότητα με FCC/CE/TELEC/KCC, συχνότητες 2.4–2.5 GHz
Πρωτόκολλο Bluetooth	Ενσωματωμένο v4.2 με υποστήριξη BR/EDR και BLE, υποστήριξη για CVSD και SBC
Ψηφιακές Είσοδοι/Εξοδοι (I/O)	10 ψηφιακές, 5 αναλογικές εισοδοι
Υποστηριζόμενα Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	SPI, I2C, I2S
Μέση Κατανάλωση Ρεύματος	80 mA
Κατανάλωση σε Λειτουργία Βαθιού Ύπνου	10 μ A
Εύρος Θερμοκρασίας Λειτουργίας	-40°C έως +85°C

Επιπλέον, η πλακέτα ανάπτυξης FireBeetle ESP32 υποστηρίζει τη λειτουργία "one-key download", η οποία επιτρέπει την απλοποιημένη μεταφόρτωση προγράμματος μέσω USB, ενώ παράλληλα παρέχει και δυνατότητα φόρτισης μέσω της ίδιας θύρας.



Σχήμα 2.2: Pinout Diagram του FireBeetle ESP₃₂. [102]

Στο Σχήμα 2.2, παρουσιάζεται η πλακέτα ανάπτυξης FireBeetle ESP32 με αναλυτική αποτύπωση των ακίδων εισόδου/εξόδου (Pinout Diagram). Διακρίνονται οι δυνατότητες επικοινωνίας μέσω διαύλων SPI, I2C, UART, καθώς και οι αναλογικές εισόδους ADC, οι ψηφιακές εξόδους PWM, και οι επιπλέον λειτουργικές μονάδες όπως USB φόρτιση, DAC, και αισθητήρες τάσης. Η οπτική απεικόνιση των ακίδων διευκολύνει τη σχεδίαση του υλικού και την εύκολη ενσωμάτωση εξωτερικών περιφερειακών.



Σχήμα 2.3: Block Diagram του FireBeetle ESP₃₂. [103]

Η επιλογή της FireBeetle ESP32 τεκμηριώνεται από τη βέλτιστη σχέση υπολογιστικής απόδοσης – ενεργειακής κατανάλωσης, την ευρεία υποστήριξη από κοινότητες ανάπτυξης λογισμικού ανοιχτού κώδικα, και τη συμβατότητα με πληθώρα αισθητήρων και περιφερειακών. Οι ιδιότητές της καθιστούν την πλακέτα κατάλληλη για την ανάπτυξη αυτόνομων, φορητών ή συνδεδεμένων συστημάτων, χαρακτηριστικά απαραίτητα για σύγχρονες IoT εφαρμογές.

2.1.2 Επιλογή Αισθητήρων Περιβάλλοντος

2.1.2.1 Επιλογή Αισθητήρα Θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ο ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20, σε αδιάβροχη μορφή (encapsulated), ο οποίος διατίθεται σε πλήρως προστατευμένο περίβλημα με καλώδιο, καθιστώντας τον ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή σε υγρασία ή άμεση επαφή με υγρά στοιχεία.



Σχήμα 2.4: Αισθητήρας Θερμοκρασίας DS18B20.

Ο DS18B20 αποτελεί έναν ψηφιακό θερμοκρασιακό αισθητήρα που βασίζεται στο πρωτόκολλο επικοινωνίας 1-Wire, επιτρέποντας την επικοινωνία πολλαπλών αισθητήρων με έναν μόνο ακροδέκτη ενός μικροελεγκτή. Τα βασικά του χαρακτηριστικά συνοψίζονται ως εξής:

Πίνακας 2.2: Τυπικά Χαρακτηριστικά του αισθητήρα DS18B20 [104]

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
Μοντέλο	DS18B20 (Αδιάβροχη έκδοση)
Τύπος αισθητήρα	Ψηφιακός αισθητήρας θερμοκρασίας
Εύρος μέτρησης	-55°C έως +125°C
Ακρίβεια	±0.5°C (στο εύρος -10°C έως +85°C)
Ανάλυση	9 έως 12 bits (προγραμματιζόμενη)
Τάση Τροφοδοσίας	3.0V έως 5.5V
Κατανάλωση ρεύματος	~1.5 mA κατά τη διάρκεια μετατροπής
Πρωτόκολλο επικοινωνίας	1-Wire (ψηφιακό)
Μοναδικός σειριακός αριθμός	Ναι (για χρήση πολλών αισθητήρων ταυτόχρονα στο 1-Wire Bus)
Χρόνος μετατροπής θερμοκρασίας	94ms έως 750ms (ανάλογα με την ανάλυση)
Μήκος καλωδίου	~1 μέτρο (μπορεί να διαφέρει)
Υλικό περιβλήματος	Ανοξείδωτο ατσάλι (αδιάβροχο περίβλημα)
Διαστάσεις	~6 x 50 mm (ανάλογα την κατασκευή)

Η επιλογή του DS18B20 βασίζεται σε έναν συνδυασμό αξιοπιστίας, ευκολίας ενσωμάτωσης και υψηλής ακρίβειας, καθιστώντας τον εξαιρετικά δημοφιλή τόσο σε διάφορα projects. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

- Απλότητα καλωδίωσης, χάρη στην υποστήριξη του 1-Wire, όπου απαιτείται μόνο ένα data pin για πολλαπλούς αισθητήρες.
- Ψηφιακή έξοδος, που μειώνει τα σφάλματα που σχετίζονται με την αναλογική μετατροπή.
- Αδιάβροχη κατασκευή, η οποία του επιτρέπει να λειτουργεί με αξιοπιστία σε εξωτερικά περιβάλλοντα ή εντός υγρών.
- Κάθε αισθητήρας φέρει μοναδικό σειριακό αριθμό, διευκολύνοντας την ταυτοποίηση και χρήση πολλών αισθητήρων ταυτόχρονα.
- Τέλος, πρόκειται για έναν εξαιρετικά οικονομικό αισθητήρα (< 4€) , γεγονός που τον καθιστά ιδανική λύση για εφαρμογές με περιορισμένο προϋπολογισμό.

Λόγω της ευελιξίας του, ο αισθητήρας DS18B20 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών, καλύπτοντας ανάγκες τόσο σε πειραματικά όσο και σε πραγματικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, είναι ιδανικός για την παρακολούθηση θερμοκρασίας σε αγροτικά ή θερμοκηπιακά συστήματα, την ενσωμάτωσή του σε έξυπνα οικιακά συστήματα (home automation), καθώς και για βιομηχανικές μετρήσεις σε συστήματα HVAC. Επιπλέον, λόγω της ψηφιακής του φύσης και της απλότητας στη συνδεσμολογία του, αποτελεί εξαιρετική επιλογή για εργαστηριακά projects με Arduino, Raspberry Pi και άλλους μικροελεγκτές.

2.1.2.2 Επιλογή Αισθητήρα Υγρασίας

Για την ανίχνευση της υγρασίας στο έδαφος, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ο αδιάβροχος χωρητικός αισθητήρας υγρασίας εδάφους Gravity SEN0308. Πρόκειται για έναν αναλογικό αισθητήρα βασισμένο στην χωρητική τεχνολογία μέτρησης, ο οποίος δεν διαθέτει εκτεθειμένα μεταλλικά ηλεκτρόδια, αποφεύγοντας έτσι φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται συχνά σε κλασικούς αντιστατικούς αισθητήρες.



Σχήμα 2.5: Αισθητήρας Υγρασίας SEN0308. [105]

Ο αισθητήρας αυτός είναι κατασκευασμένος με πλήρως σφραγισμένο περίβλημα, επιτρέποντας τη χρήση του σε εξωτερικές ή υγρές συνθήκες χωρίς κίνδυνο βραχυκυκλώματος ή φθοράς, ενώ ταυτόχρονα παρέχει υψηλή αξιοπιστία και μακροχρόνια σταθερότητα στις μετρήσεις. Η λειτουργία του βασίζεται σε μεταβολές της χωρητικότητας του αισθητήρα ανάλογα με την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, οι οποίες αποδίδονται ως αναλογική έξοδος τάσης (0–3 V), αντιστρόφως ανάλογη της υγρασίας (όσο μεγαλύτερη η υγρασία, τόσο μικρότερη η τάση εξόδου).

Ο αισθητήρας SEN0308 μπορεί να τροφοδοτηθεί είτε με 3.3 V είτε με 5 V, καθιστώντας τον κατάλληλο για πλατφόρμες όπως Arduino, ESP32, ή Raspberry Pi (με τη χρήση εξωτερικού ADC). Η κατανάλωση ρεύματος είναι εξαιρετικά χαμηλή (περίπου 5 mA), γεγονός που επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία του χωρίς σημαντική επιβάρυνση του συστήματος.

Πίνακας 2.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του SEN0220. [106]

Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
Μοντέλο	SEN0308 (DFRobot Gravity Series)
Τεχνολογία Μέτρησης	Χωρητική (Capacitive)
Τροφοδοσία	3.3 V έως 5.5 V DC
Έξοδος	Αναλογική τάση 0–3 V (αντιστρόφως ανάλογη της υγρασίας)
Κατανάλωση Ρεύματος	~5 mA
Σύνδεση	3-pin PH2.0 / Gravity connector
Μήκος καλωδίου	~1.5 μέτρο
Διαστάσεις Αισθητήρα	175 mm × 30 mm × 7 mm
Ανθεκτικότητα	Αδιάβροχος, ανθεκτικός στη διάβρωση
Θερμοκρασία Λειτουργίας	–30 °C έως +80 °C

Η επιλογή του αισθητήρα SEN0308 βασίστηκε στη χωρητική του αρχή λειτουργίας, η οποία προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και σταθερότητα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αισθητήρες αντίστασης. Χάρη στην πλήρως αδιάβροχη κατασκευή του και την ανθεκτικότητά του σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αξιοπιστία σε εξωτερικά ή υγρά περιβάλλοντα. Ενδείκνυται ιδιαίτερα για εφαρμογές όπως η αυτόματη άρδευση σε γεωργικές και αστικές καλλιέργειες, τα συστήματα έξυπνης γεωργίας (smart farming), η περιβαλλοντική παρακολούθηση και μελέτη μικροκλίματος, καθώς και για εκπαιδευτικά ή εργαστηριακά έργα με πλατφόρμες όπως Arduino ή Raspberry Pi. Επιπλέον, είναι ιδανικός για συστήματα IoT που απαιτούν έλεγχο των συνθηκών εδάφους από απόσταση. Ο συνδυασμός αξιοπιστίας, συμβατότητας με πλήθος μικροελεγκτών και ιδιαίτερα προσιτού κόστους (< 25 €) καθιστά τον SEN0308 εξαιρετική επιλογή για εφαρμογές με περιορισμένο προϋπολογισμό, χωρίς συμβιβασμό στην ποιότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων.

2.1.2.3 Επιλογή Αισθητήρα Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης CO₂ στον αέρα επιλέχθηκε ο Gravity UART Infrared CO₂ Sensor (SKU SEN0220) της DFRobot. Ο αισθητήρας βασίζεται στην τεχνολογία NDIR (Non-Dispersive Infra-Red), η οποία παρέχει υψηλή επιλεκτικότητα στο CO₂ και είναι απαλλαγμένη από προβλήματα δηλητηρίασης (no poisoning). Παράλληλα, διαθέτει ενσωματωμένο μηχανισμό θερμοκρασιακής αντιστάθμισης για μεγαλύτερη ακρίβεια. Η έξοδός του είναι ψηφιακή UART (TTL 0–3.3 V), εξασφαλίζοντας απλή διασύνδεση με μικροελεγκτές όπως Arduino, ESP32 ή Raspberry Pi.



Σχήμα 2.6: Αισθητήρας Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂) SKU SEN0220. [107]

Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί μία υπέρυθρη πηγή και έναν φωτοανιχνευτή τοποθετημένους σε θάλαμο μέτρησης. Το διοξείδιο του άνθρακα απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία στα 4.26 μm. Ο ενσωματωμένος αλγόριθμος θερμοκρασιακής αντιστάθμισης εξαλείφει σφάλματα λόγω μεταβολών περιβάλλοντος, ενώ ένα μικροελεγκτικό κύκλωμα μετατρέπει τη μέτρηση σε σειριακό πλαίσιο δεδομένων (UART).

Πίνακας 2.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά του SEN0220. [108]

Χαρακτηριστικά	Περιγραφή
Εύρος μέτρησης CO ₂	0 – 50 000 ppm
Ακρίβεια	± (50 ppm + 5 % της ένδειξης)
Χρόνος απόκρισης (T90)	< 30 s
Χρόνος προθέρμανσης	≈ 3 min
Τάση τροφοδοσίας	4.5 – 5.5 V DC
Μέση κατανάλωση ρεύματος	< 85 mA
Διεπαφή εξόδου	UART (9600 baud, 8-N-1)
Θερμοκρασία λειτουργίας	0 – 50 °C
Υγρασία λειτουργίας	0 – 95 % RH (χωρίς συμπύκνωση)
Διάρκεια ζωής	> 5 έτη
Διαστάσεις πλακέτας	21 × 27.11 mm
Βάρος	≈ 42 g
Επιπλέον δυνατότητες	Θερμοκρασιακή αντιστάθμιση, αντι-υδρατμική προστασία, μεγάλη γραμμικότητα

Ο αισθητήρας CO₂ SEN0220 προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων, καθώς διαθέτει ευρεία κλίμακα μέτρησης από 0 έως 50,000 ppm, εξασφαλίζοντας ακρίβεια τόσο σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου όσο και σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η τεχνολογία NDIR του προσδίδει υψηλή επιλεκτικότητα στο CO₂, απομονώνοντας την επίδραση άλλων αερίων, ενώ η μακροχρόνια σταθερότητά του (διάρκεια ζωής άνω των πέντε ετών) περιορίζει τις απαιτήσεις τακτικής βαθμονόμησης. Παράλληλα, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε

συνδυασμό με την ψηφιακή έξοδο UART διευκολύνει την ένταξή του σε ενεργειακά φειδωλά συστήματα IoT. Τέλος, η ενσωματωμένη θερμοκρασιακή αντιστάθμιση και ο γρήγορος χρόνος απόκρισης εγγυώνται αξιόπιστες μετρήσεις ακόμη και σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Χάρη στα παραπάνω χαρακτηριστικά, ο SEN0220 είναι κατάλληλος για συστήματα HVAC και παρακολούθησης της ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων, συμβάλλοντας στον βέλτιστο εξαερισμό και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε γεωργικά θερμοκήπια και εκτροφεία, όπου ο έλεγχος της συγκέντρωσης CO₂ επηρεάζει άμεσα τη φωτοσύνθεση των φυτών ή τον μεταβολισμό των ζώων. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως ζυθοποιίες, μονάδες τροφίμων & ποτών και αποθήκες, λειτουργεί ως αισθητήρας ασφάλειας για την έγκαιρη ανίχνευση υπερβολικών επιπέδων CO₂. Τέλος, η συμβατότητά του με πλατφόρμες Arduino ή ESP32 επιτρέπει την ανάπτυξη έξυπνων κόμβων IoT, παρέχοντας απομακρυσμένη παρακολούθηση και ειδοποίηση όταν τα επίπεδα του αερίου υπερβούν προκαθορισμένα όρια.

2.1.3 Επιλογή Μέσου Τροφοδοσίας

Για την τροφοδοσία του Stick επιλέχθηκε μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου (Li-ion) χωρητικότητας 2500mAh και τάσης 3.7 Volt, η οποία προέρχεται από τον κατασκευαστή ZonCell. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε με γνώμονα τη σταθερότητα λειτουργίας, την ικανοποιητική αυτονομία του συστήματος, καθώς και την ευκολία ενσωμάτωσης σε φορητές εφαρμογές πεδίου.



Σχήμα 2.7: Μπαταρία λιθίου (Li-ion) 2500mAh 3.7Volt [109]

Γενικά, η τεχνολογία λιθίου προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τέτοιου είδους κατασκευές, όπως :

- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας χωρίς αύξηση του όγκου
- Σταθερή τάση εξόδου, που διασφαλίζει την ορθή λειτουργία των ηλεκτρονικών αισθητήρων και του μικροελεγκτή
- Χαμηλό βάρος, χαρακτηριστικό ζωτικής σημασίας για φορητά ή ενσωματωμένα συστήματα

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλεγμένη μπαταρία ιόντων λιθίου 3.7 V δεν επαρκεί απευθείας για τη λειτουργία του αισθητήρα CO₂ (SEN0220), ο οποίος απαιτεί τάση μεταξύ 4.5 V και 5.5 V. Για τον λόγο αυτό, ενσωματώθηκε DC Boost Converter, με στόχο την ανύψωση της τάσης στα 5 V και τη διασφάλιση της σταθερής και αξιόπιστης λειτουργίας του αισθητήρα, κατά την αυτοτελή (φορητή) λειτουργία της διάταξης.

2.1.4 Επιλογή Οθόνης

Για την προβολή των μετρήσεων του συστήματος σε πραγματικό χρόνο επιλέχθηκε η οθόνη τεχνολογίας OLED 1.3 ιντσών τύπου B της εταιρείας Waveshare. Η συγκεκριμένη οθόνη ενσωματώνει μονοχρωματικό πάνελ ανάλυσης 128x64 pixels, προσφέροντας με αυτό το τρόπο υψηλή ευκρίνεια και αντίθεση, ακόμη και σε εξωτερικές συνθήκες φωτισμού.



Σχήμα 2.8: OLED 1.3 ίντσες τύπου B , Waveshare. [110]

Η τεχνολογία OLED (Organic Light Emitting Diode) επιτρέπει την απευθείας εκπομπή φωτός από κάθε pixel χωρίς την ανάγκη οπίσθιου φωτισμού, με αποτέλεσμα να διακρίνεται από εξαιρετική ενεργειακή απόδοση, καθιστώντας την ιδανική για συστήματα χαμηλής ισχύος όπως το Stick.

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της οθόνης περιλαμβάνουν :

- Διαγώνιο 1.3 ιντσών, το οποίο αποτελεί ένα πρακτικό μέγεθος για ενσωματωμένα συστήματα.
- Ανάλυση 128x64 pixels, η οποία είναι κατάλληλα για εμφάνιση κειμένου και ενδεχομένως ορισμένων γραφικών.
- Ενσωματωμένος controller SSD1306, ο οποίος είναι συμβατός με κοινά πρωτόκολλα επικοινωνίας.
- Υποστήριξη I²C και SPI, γεγονός που διευκολύνει την ενσωμάτωσή της με μία ευρεία γκάμα μικροελεγκτών (όπως Arduino, ESP32 κ.τ.λ).

- Τάση λειτουργίας στα 3.3V ή 5V παρέχοντας με αυτό το τρόπο ευελιξία στη τροφοδοσία.

Η οθόνη χρησιμοποιήθηκε για την άμεση και τοπική παρουσίαση των βασικών μετρήσεων θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης CO₂. Ακόμη, η δυνατότητα δυναμικής ανανέωσης και ενημέρωσης του περιεχομένου επιτρέπει την ταχεία παρακολούθηση των τιμών σε πραγματικό χρόνο χωρίς να απαιτείται απαραίτητα η σύνδεση με εξωτερικό υπολογιστή ή μία κινητή συσκευή.

Τέλος η επιλογή της οθόνης OLED της Waveshare στηρίχθηκε στην αξιοπιστία, την ευκολία χρήσης και τη συμβατότητα της με συστήματα χαμηλής κατανάλωσης, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για ολοκληρωμένες λύσεις απομακρυσμένης μέτρησης σε εξωτερικό περιβάλλον.

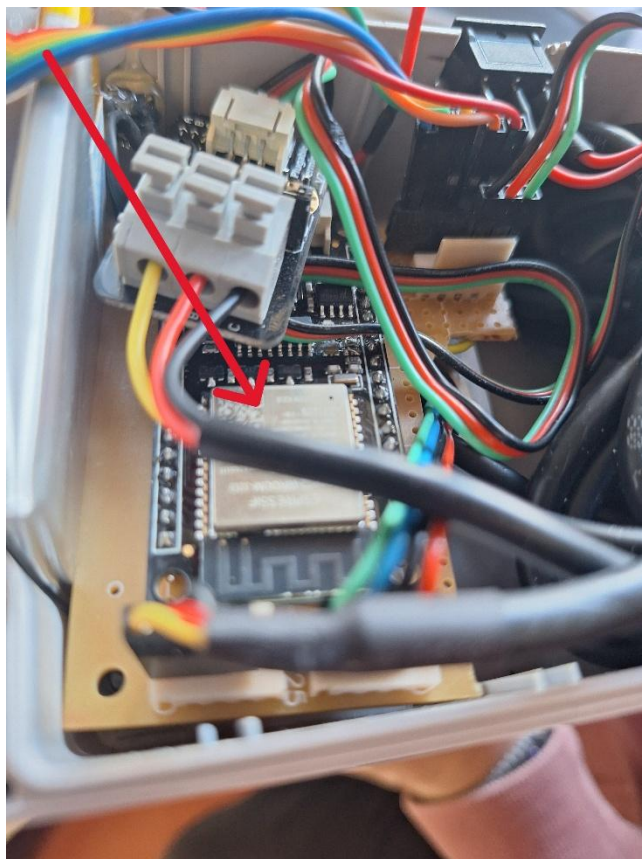
2.1.5 Επιλογή Υλικού Κατασκευής Stick

Η επιλογή του πλαστικού ως κύριο υλικό κατασκευής για την πρώτη έκδοση του "Stick" βασίστηκε σε συνδυασμό πρακτικών, μηχανικών και οικονομικών παραμέτρων. Γενικά, τα θερμοπλαστικά υλικά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τα ιδανική επιλογή για πρωτότυπες και πειραματικές διατάξεις.

Αρχικά, το πλαστικό χαρακτηρίζεται από χαμηλό βάρος, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τη φορητότητα της κατασκευής, ιδιαίτερα σε πεδία χρήσης όπου η ευκινησία και η εργονομία είναι καθοριστικοί παράγοντες. Παράλληλα, η ευκολία μορφοποίησης του υλικού, μέσω τεχνικών όπως η κοπή, η κόλληση και η 3D εκτύπωση, επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη και προσαρμογή των εξαρτημάτων στις εκάστοτε λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος. Ακόμη, η χημική ανθεκτικότητα του πλαστικού προσφέρει προστασία έναντι υγρασίας, σκόνης και ήπιων χημικών ουσιών, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε υπαίθρια ή αγροτικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το κόστος παραγωγής παραμένει σημαντικά χαμηλό συγκριτικά με μεταλλικές λύσεις, γεγονός που ενισχύει τη βιωσιμότητα της πρότασης, ειδικά σε εφαρμογές με περιορισμένο προϋπολογισμό ή για σκοπούς εκπαιδευτικής χρήσης. Τέλος, η ηλεκτρική μονωτικότητα των πλαστικών υλικών αποτελεί κρίσιμο πλεονέκτημα όταν η κατασκευή συνδυάζεται με ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα, προσφέροντας επιπλέον προστασία έναντι ανεπιθύμητων ηλεκτρικών παρεμβολών ή βραχυκυκλωμάτων.

2.1.6 Συνολική Οργάνωση Hardware

Η υλοποίηση του συστήματος βασίστηκε στον μικροελεγκτή ESP32 FireBeetle, ο οποίος επιλέχθηκε λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, της ενσωματωμένης δυνατότητας Wi-Fi/Bluetooth και της υποστήριξης πολλαπλών διασυνδέσεων. Ο μικροελεγκτής αποτελεί τον κεντρικό κόμβο επικοινωνίας και επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέγονται από τους επιμέρους αισθητήρες. Η ηλεκτρονική διάταξη οργανώθηκε επάνω σε τυπωμένο διάτρητο κύκλωμα (proto-board), στο οποίο τοποθετήθηκαν επιλεγμένα στοιχεία και διασυνδέθηκαν με χρήση jumper wires και push-in κλεμμών, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και ευελιξία στην καλωδίωση.

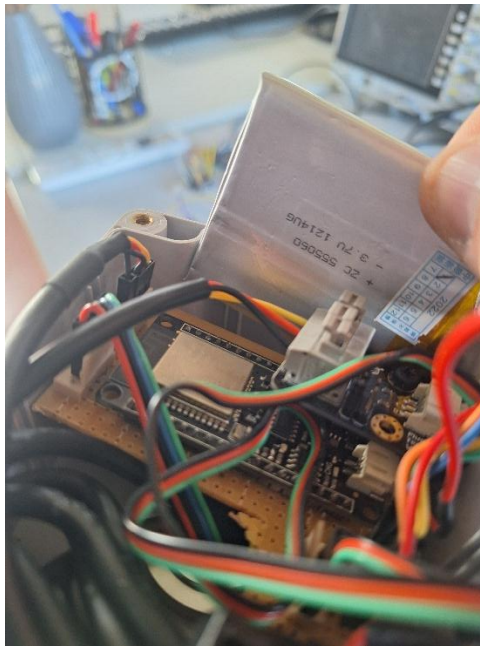


Σχήμα 2.9: Πλακέτα Ανάπτυξης ESP33 FireBeetle.

Το υποσύστημα τροφοδοσίας βασίζεται σε επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου 3.7V, χωρητικότητας 2500 mAh, η οποία ενσωματώνεται στο εσωτερικό του περιβλήματος. Για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του συστήματος, ενσωματώθηκε διακόπτης ο οποίος τοποθετήθηκε σε σειρά με τον αρνητικό πόλο της τροφοδοσίας, επιτρέποντας πλήρη απομόνωση του κυκλώματος από την πηγή.



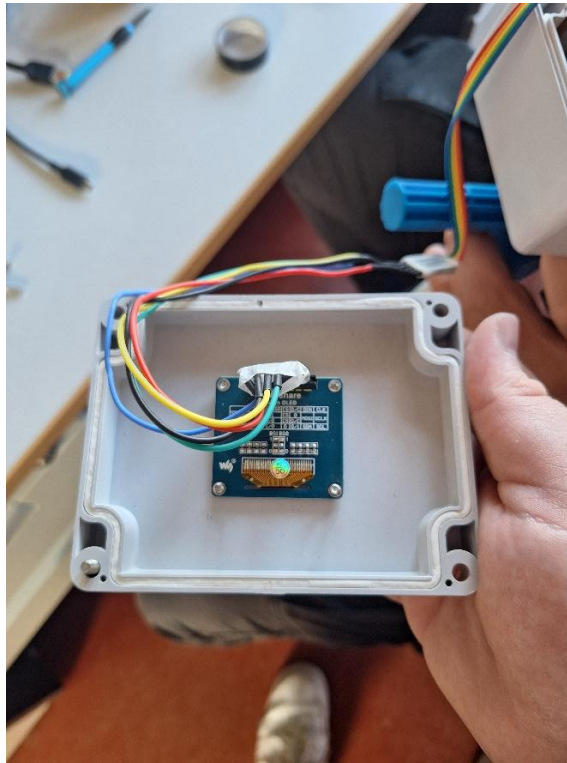
Σχήμα 2.10: Μπαταρία Λιθίου 2500mAh.



Σχήμα 2.11: Τοποθέτηση Μπαταρίας Λιθίου στη Συνολική Διάταξη.

Όσον αφορά την απεικόνιση, χρησιμοποιήθηκε OLED οθόνη 1.3 ιντσών (Waveshare), η οποία συνδέθηκε μέσω διαύλου I²C στις αντίστοιχες γραμμές SDA και SCL του ESP32. Η οθόνη τοποθετήθηκε στην εσωτερική πλευρά του καπακιού του κουτιού, με κατάλληλη όδευση καλωδίων ώστε να αποφεύγεται η αλληλοεπικάλυψη με τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος. Στο Σχήμα 2.14, είναι εμφανής η σύνδεση των πολύχρωμων

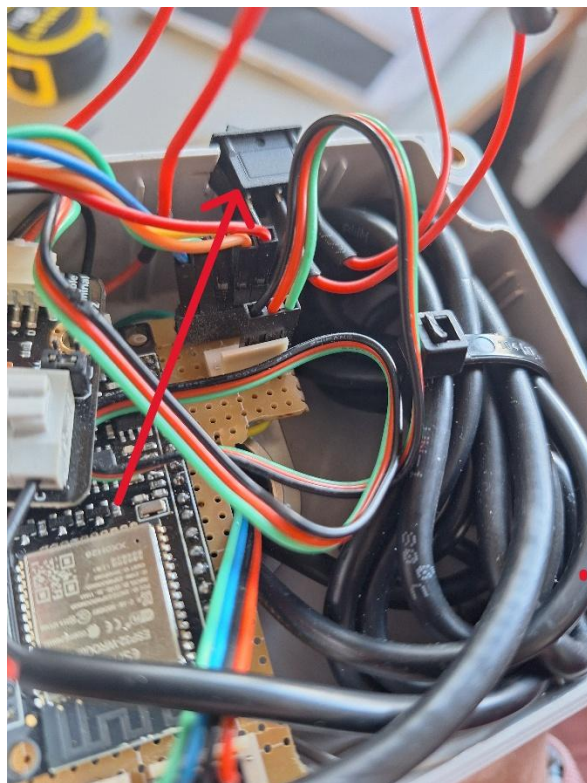
καλωδίων σε ένα button ON/OFF (2 θέσεων) για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση αντίστοιχα της οθόνης.



Σχήμα 2.12: Οθόνη OLED.



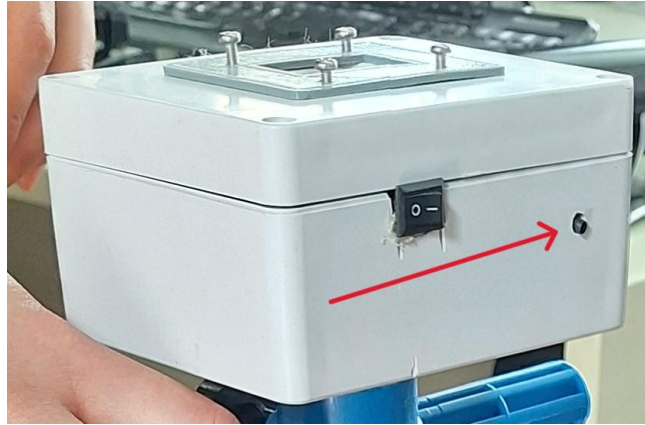
Σχήμα 2.13: Κοντινή Όψη Οθόνης OLED.



Σχήμα 2.14: Σύνδεση Οθόνης με button ON/OFF.

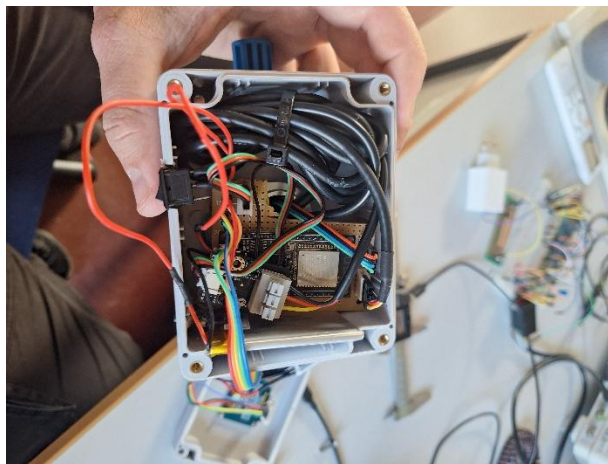
Το σύστημα ενσωματώνει τρεις αισθητήρες: έναν αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20, έναν χωρητικό αισθητήρα υγρασίας εδάφους SEN0308 και έναν αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα SEN0220. Ο DS18B20 είναι τύπου 1-Wire και επιτρέπει την ψηφιακή μέτρηση θερμοκρασίας με υψηλή ακρίβεια. Ο SEN0308 παρέχει αναλογική έξοδο για την ανίχνευση υγρασίας στο έδαφος και έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε υγρό περιβάλλον. Ο αισθητήρας SEN0220 είναι τύπου NDIR και παρέχει μετρήσεις CO₂ με καλή γραμμικότητα και σταθερότητα. Όλοι οι αισθητήρες συνδέονται στον μικροελεγκτή μέσω των αντίστοιχων θυρών, με χρήση κατάλληλων συνδετήρων και υποδοχών, που διασφαλίζουν τη μηχανική και ηλεκτρική αξιοπιστία της σύνδεσης.

Επιπλέον, ενσωματώθηκε εξωτερικό πλήκτρο Reset, το οποίο τοποθετήθηκε πλευρικά στο enclosure, επιτρέποντας την επανεκκίνηση του μικροελεγκτή χωρίς να απαιτείται άνοιγμα του κουτιού.

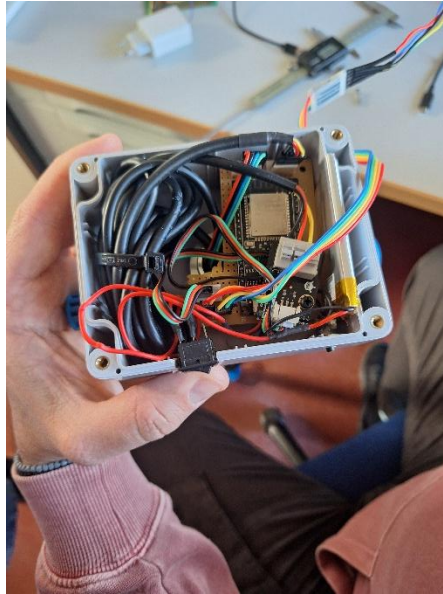


Σχήμα 2.15: Reset Button.

Η εσωτερική καλωδίωση έχει οργανωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Τα καλώδια τροφοδοσίας και σήματος είναι σαφώς διαχωρισμένα, τόσο χρωματικά όσο και χωρικά, και η στερέωσή τους εντός του κουτιού επιτυγχάνεται με χρήση δεματικών καλωδίων (zip ties) και θερμοσυστελλόμενων σωλήνων όπου απαιτείται. Η επιλογή αυτής της διάταξης εξυπηρετεί την εργονομία, τη συντηρησιμότητα και τη λειτουργική αξιοπιστία του συστήματος. Η συνολική διάταξη των επιμέρους εξαρτημάτων και η φυσική τους τοποθέτηση στο εσωτερικό του περιβλήματος παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.9 έως 2.14, όπου απεικονίζονται αναλυτικά η καλωδίωση, η σύνδεση των αισθητήρων και η γενικότερη συναρμολόγηση του συστήματος.



Σχήμα 2.16: Συνολική Διάταξη Hardware (1η Εικόνα).



Σχήμα 2.17: Συνολική Διάταξη Hardware (2η Εικόνα).

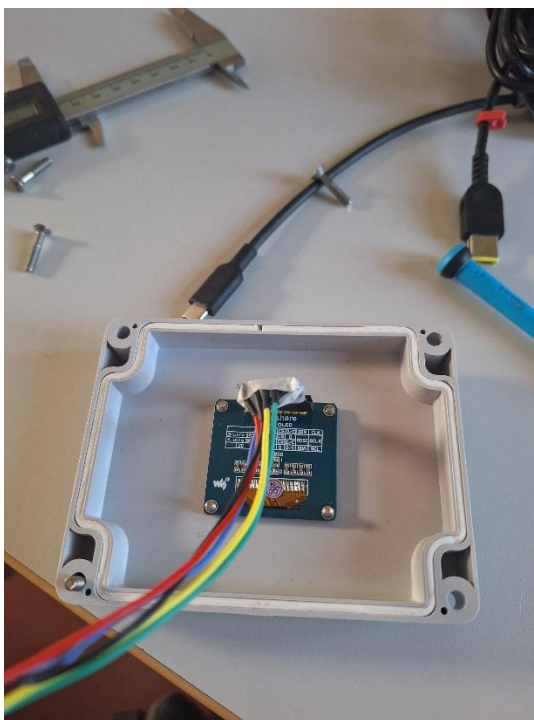
2.1.7 Προστασία Συνολικής Διάταξης Hardware

Η ηλεκτρονική διάταξη του συστήματος απαιτεί μηχανική και περιβαλλοντική προστασία, προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή και αδιάλειπτη λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες χρήσης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται στεγανό πλαστικό περίβλημα, κατασκευασμένο από υλικό τύπου ABS/PC, με πιστοποίηση προστασίας IP65. Το κουτί φέρει περιμετρικό ελαστικό παρέμβυσμα (O-ring) σιλικόνης και σύστημα βιδωτής σύσφιξης, το οποίο εξασφαλίζει αντοχή σε υγρασία, σκόνη και μικροσωματίδια. Επιπλέον, το συνολικό μέγεθος του περιβλήματος επιλέχθηκε ώστε να χωρά άνετα όλη τη διάταξη (πλακέτα, αισθητήρες, μπαταρία, οθόνη) χωρίς να προκαλείται υπερθέρμανση. Τέλος, το επιλεγμένο υλικό του περιβλήματος παρουσιάζει καλή μηχανική αντοχή και σταθερότητα σε θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για υπαίθριες ή ημι-εξωτερικές εφαρμογές.



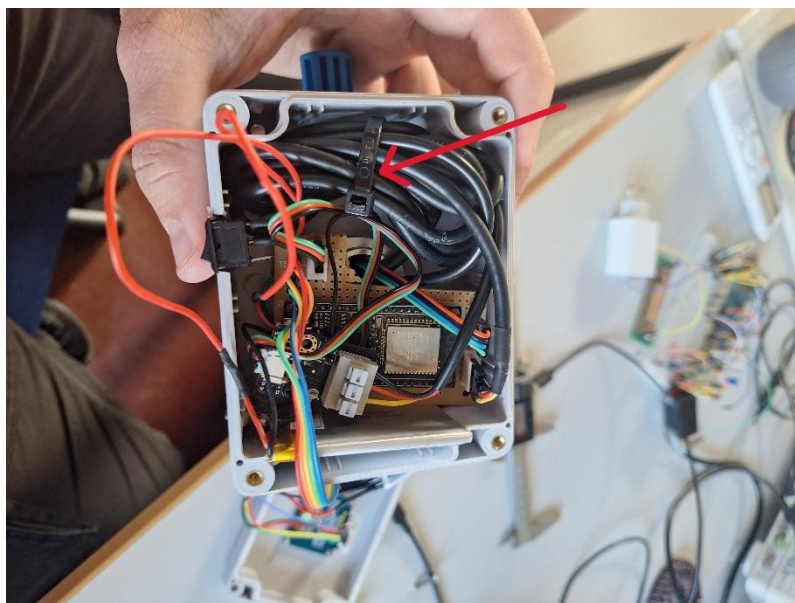
Σχήμα 2.18: Πλαστικό Περίβλημα.

Αναλυτικότερα, στο εσωτερικό του κουτιού, όλα τα επιμέρους εξαρτήματα έχουν στερεωθεί μηχανικά με χρήση αποστατών και διπλής όψεως ταινίας υψηλής πρόσφυσης. Ο μικροελεγκτής (ESP32 FireBeetle) είναι τοποθετημένος σε πλακέτα τύπου proto-board, η οποία με τη σειρά της βιδώνεται σε σταθερή βάση μέσω μεταλλικών αποστατών M3. Η μπαταρία λιθίου έχει τοποθετηθεί σε κάθετη θέση, με τρόπο ώστε να μην επιβαρύνεται από δονήσεις ή κραδασμούς. Η OLED οθόνη έχει ενσωματωθεί στην εσωτερική πλευρά του καπακιού του περιβλήματος, και είναι ορατή από το εξωτερικό μέσω ειδικής εγκοπής ή διαφανούς παραθύρου.



Σχήμα 2.19: Οθόνη OLED στο καπάκι του περιβλήματος.

Η είσοδος των καλωδίων εντός του περιβλήματος υλοποιείται μέσω πλαστικών γκρομμέτων (τύπου IP67), τα οποία προσφέρουν υψηλή στεγανότητα και αντοχή σε μηχανική καταπόνηση. Οι ηλεκτρικές συνδέσεις έχουν ενισχυθεί με θερμοσυστελλόμενους σωλήνες και, σε επιλεγμένα σημεία, με πρόσθετο σιλικονούχο μονωτικό υλικό. Η καλωδίωση είναι οργανωμένη με χρήση δεματικών καλωδίων και οδηγών, έτσι ώστε να διαχωρίζονται οι γραμμές ισχύος από τις γραμμές δεδομένων, μειώνοντας το ενδεχόμενο παρεμβολών. Το συνολικό σύστημα έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη συντηρησιμότητα: οι αισθητήρες μπορούν να αποσυνδεθούν εύκολα μέσω push-in κλεμμών, ενώ η αφαίρεση του καπακιού του κουτιού παρέχει άμεση πρόσβαση σε όλα τα κρίσιμα κυκλώματα. Οι μηχανισμοί στήριξης επιτρέπουν την ασφαλή τοποθέτηση του κουτιού σε κάθετη ή οριζόντια θέση, ανάλογα με το εκάστοτε σενάριο εγκατάστασης.



Σχήμα 2.20: Χρήση δεματικών.

Η χρήση πιστοποιημένων υλικών και η τήρηση ορθών πρακτικών συναρμολόγησης διασφαλίζουν ότι η συνολική διάταξη ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ανθεκτικότητας για εφαρμογές σε αγροτικά ή υπαίθρια περιβάλλοντα, όπου επικρατούν συχνά συνθήκες σκόνης, υγρασίας ή κραδασμών.

2.2 Τελική Διάταξη

Η συνολική κατασκευή βασίζεται σε έναν κυλινδρικό σωλήνα στήριξης (Stick), επάνω στον οποίο έχει τοποθετηθεί το βασικό enclosure της διάταξης. Ο σωλήνας έχει συνολικό μήκος 73,5 cm, με διάμετρο 30,62 mm, ενώ στο κάτω άκρο διαθέτει μεταλλική μύτη μήκους 19 cm για εύκολη εισχώρηση στο έδαφος και σταθερή τοποθέτηση στο πεδίο.



Σχήμα 2.21: Τελική Διάταξη Stick (1η Εικόνα).



Σχήμα 2.22: Τελική Διάταξη Stick (2η Εικόνα).

Το enclosure είναι στερεωμένο στο άνω μέρος του Stick και φιλοξενεί το σύνολο των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, συμπεριλαμβανομένων του μικροελεγκτή, των αισθητήρων, της μπαταρίας και της οθόνης OLED. Πρόκειται για στεγανό περίβλημα εξωτερικών διαστάσεων 11,5 cm μήκος $\times$ 9 cm πλάτος $\times$ 6,4 cm ύψος, το οποίο παρέχει επαρκή προστασία και χώρο για την ασφαλή τοποθέτηση του κυκλώματος.



Σχήμα 2.23: Περίβλημα Διάταξης Hardware στη συνολική διάταξη του Stick.

Η κατασκευή του Stick φιλοξενεί τρεις διαφορετικούς αισθητήρες, καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για την καταγραφή κρίσιμων περιβαλλοντικών μεταβλητών. Η τοποθέτηση τους έγινε με τρόπο που εξασφαλίζει τη λειτουργικότητά τους εντός του χουμοχώματος και προστατεύει τα ηλεκτρονικά μέρη από τις αντίξοες συνθήκες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η θέση καθενός αισθητήρα, μαζί με την κατάλληλη φωτογραφική απεικόνιση.

- Αισθητήρας θερμοκρασίας (DS18B20) : Τοποθετημένος χαμηλά στο Stick, όπως φαίνεται, ώστε να επιτυγχάνεται η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας του χουμοχώματος.



Σχήμα 2.24: Αισθητήρας θερμοκρασίας DS18B20 πάνω στο Stick.

- Αισθητήρας υγρασίας (SEN0308) : Τοποθετημένος σε ειδική θέση ψηλότερα στο Stick, όπως φαίνεται στην εικόνα, για την αξιόπιστη μέτρηση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.25: Αισθητήρας υγρασίας SEN0308 πάνω στο Stick.

- Αισθητήρας διοξειδίου του άνθρακα (SEN0220) : Τοποθετημένος στο κάτω άκρο του Stick, ακριβώς πάνω από τη πλαστική μύτη. Ο αισθητήρας λαμβάνει τιμές μέσω μικρών πλευρικών οπών που επιτρέπουν την κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό του περιβλήματος.



Σχήμα 2.26: Αισθητήρας διοξειδίου του άνθρακα SEN0220 εσωτερικά στο Stick.

Για την υποστήριξη της ορθής λειτουργίας του αισθητήρα CO₂ (SEN0220), ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος στο εσωτερικό του Stick για λόγους προστασίας, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τοπικά μικρές οπές διαμέτρου περίπου 1,5 mm, περιμετρικά γύρω από το ύψος του αισθητήρα, σε όλη την πλευρική επιφάνεια του κυλίνδρου. Οι οπές αυτές επιτρέπουν την επαρκή κυκλοφορία αέρα στο εσωτερικό, διασφαλίζοντας ότι ο αισθητήρας μπορεί να πραγματοποιεί αξιόπιστες μετρήσεις διοξειδίου του άνθρακα χωρίς να εκτίθεται άμεσα σε υγρασία ή σωματίδια από το περιβάλλον.



Σχήμα 2.27: Μικρές οπές για μέτρηση συγκέντρωσης CO₂ από τον αισθητήρα εσωτερικά.

Επιπλέον, ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στη σωστή μηχανική ενσωμάτωση και προστασία των αισθητήρων στη ράβδο. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας τοποθετήθηκαν “πρόσωπο” με την εξωτερική επιφάνεια του Stick, ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος φθοράς τους κατά την εισαγωγή της διάταξης στο χουμόχωμα. Η στερέωσή τους πραγματοποιήθηκε με χρήση θερμοανθεκτικής σιλικόνης, η οποία προσφέρει σταθερότητα και προστασία από διείσδυση υγρασίας, χωρίς να επηρεάζει την απόδοση των μετρήσεων.

Για την ενίσχυση της μηχανικής σταθερότητας και την αποφυγή μετακίνησης των εξαρτημάτων κατά την τοποθέτηση ή εξαγωγή της διάταξης από το έδαφος, χρησιμοποιήθηκαν ειδικά δεματικά συγκράτησης, τα οποία σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν μέσω 3D εκτυπωτή. Τα δεματικά αυτά εφαρμόστηκαν σε κατάλληλες θέσεις ώστε να κρατούν σφιχτά τον κορμό της διάταξης, διατηρώντας παράλληλα την εργονομία και τη δομική ευθυγράμμιση του Stick με τα αισθητήρια.

Η διάταξη είναι σχεδιασμένη ώστε να μπορεί να εισχωρεί στο έδαφος χωρίς να επηρεάζονται οι καλωδιώσεις ή η λειτουργικότητα των αισθητήρων. Το συνολικό βάρος της κατασκευής δεν υπερβαίνει τα 2 kg, γεγονός που την καθιστά ελαφριά και εύκολη στη μεταφορά και εγκατάσταση σε εξωτερικό περιβάλλον.

3 Ενότητα 3 : Μετρήσεις

3.1 Εισαγωγή στην Πειραματική Διαδικασία

Στο πλαίσιο αξιολόγησης της λειτουργικότητας της κατασκευής και των επιμέρους αισθητήρων, πραγματοποιήθηκε πειραματική δοκιμή την 12η Απριλίου 2025 στην περιοχή της Καλαμάτας. Η διάρκεια της διαδικασίας συλλογής δεδομένων ήταν περίπου 18 λεπτά, με στόχο την αποτύπωση της χρονικής μεταβολής των τριών βασικών περιβαλλοντικών παραμέτρων: θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2).



Σχήμα 3.1:Καλαμάτα, μέτρηση σε χουμόχωμα (1η εικόνα).



Σχήμα 3.2: Καλαμάτα, μέτρηση σε χουμόχωμα (2η εικόνα).

Η συσκευή τέθηκε σε λειτουργία με ενεργοποιημένη τη μονάδα Wi-Fi, μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκε η αποστολή των μετρήσεων σε απομακρυσμένο εξυπηρετητή (server). Στην πλευρά του εξυπηρετητή υλοποιήθηκε κατάλληλος μηχανισμός λήψης και αποθήκευσης των τιμών σε πραγματικό χρόνο, κάτι που επέτρεψε τη μετέπειτα εξαγωγή των δεδομένων σε μορφή αρχείων .csv για περαιτέρω ανάλυση. Η συχνότητα δειγματοληψίας, όπως προκύπτει από την ανάλυση των χρονικών σημείων των μετρήσεων, υπολογίζεται σε περίπου 30 μετρήσεις ανά λεπτό. Η σταθερή αυτή συχνότητα επέτρεψε την ομαλή αποτύπωση των μεταβολών των περιβαλλοντικών παραμέτρων και την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

Για την υλοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ της συσκευής και του απομακρυσμένου εξυπηρετητή, χρησιμοποιήθηκε κώδικας εργαστηρίου, ο οποίος είχε αναπτυχθεί ειδικά για την πλατφόρμα ESP32. Ο εν λόγω κώδικας επέτρεπε τη σύνδεση της συσκευής σε δίκτυο Wi-Fi και τη διαρκή αποστολή των μετρήσεων προς τον εξυπηρετητή μέσω πρωτοκόλλου HTTP. Στον εξυπηρετητή, ο οποίος λειτουργούσε ως endpoint, υλοποιήθηκε backend διεπαφή για την παραλαβή και καταγραφή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, επιτεύχθηκε η αυτοματοποιημένη και αξιόπιστη συλλογή περιβαλλοντικών τιμών για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας.

Η καταγραφή των δεδομένων κάλυψε ένα αντιπροσωπευτικό χρονικό παράθυρο, κατά το οποίο οι περιβαλλοντικές συνθήκες παρουσίαζαν φυσιολογικές διακυμάνσεις, επιτρέποντας έτσι την επικύρωση της σταθερότητας, ακρίβειας και αξιοπιστίας της όλης διάταξης σε πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας.

Γενικά οι μετρήσεις λήφθηκαν σε 3 διαφορετικά αρχεία, το καθένα υπεύθυνο για μία περιβαλλοντική παράμετρο (θερμοκρασία, υγρασία και συγκέντρωση CO₂). Ωστόσο οι μετρήσεις αυτές ομαδοποιήθηκαν σε ένα ενιαίο αρχείο .csv, με σκοπό να μπορούμε να τα αναλύσουμε και να τα ερμηνεύσουμε παράλληλα. Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικός

πίνακας με ορισμένες από τις μετρήσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Οι τιμές έχουν χρωματιστεί ανά στήλη ώστε να διακρίνονται ευκρινώς οι επιμέρους παράμετροι, χωρίς να επηρεάζεται η αναγνωσιμότητα των δεδομένων. Τέλος, για λόγους οικονομίας χώρου, παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο δεδομένων· το πλήρες σύνολο αξιοποιείται στις επόμενες ενότητες για περαιτέρω ανάλυση.

Χρονική Στιγμή	Θερμοκρασία (B°C)	Υγρασία (%)	Συγκέντρωση Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂) (ppm)
4/12/2025 14:02	55.6	76.6	25847
4/12/2025 14:02	55.9	76.6	25522
4/12/2025 14:02	56.1	76.6	25472
4/12/2025 14:02	56.5	76.6	25413
4/12/2025 14:02	56.9	76.8	25354
4/12/2025 14:02	57.2	76.9	26145
4/12/2025 14:02	57.4	76.9	27810
4/12/2025 14:02	57.7	76.8	29798
4/12/2025 14:02	58	76.7	32458
4/12/2025 14:02	58.1	76.7	33845
4/12/2025 14:02	58.4	77	37721
4/12/2025 14:02	58.8	76.9	39878
4/12/2025 14:02	59.1	76.9	41633
4/12/2025 14:02	59.2	76.9	42531
4/12/2025 14:02	59.4	76.8	45635
4/12/2025 14:02	59.7	77	47577
4/12/2025 14:02	59.9	77	48928
4/12/2025 14:02	60.1	77	49260
4/12/2025 14:02	60.3	77	50000
4/12/2025 14:02	60.6	76.9	50000
4/12/2025 14:02	60.8	76.8	50000
4/12/2025 14:02	60.9	76.8	50000
4/12/2025 14:02	61.1	76.8	50000
4/12/2025 14:02	61.4	76.6	50000
4/12/2025 14:02	61.6	76.6	50000
4/12/2025 14:02	61.7	76.5	50000

Σχήμα 3.3: Δείγμα Ορισμένων Μετρήσεων.

3.2 Ανάλυση Μετρήσεων Θερμοκρασίας

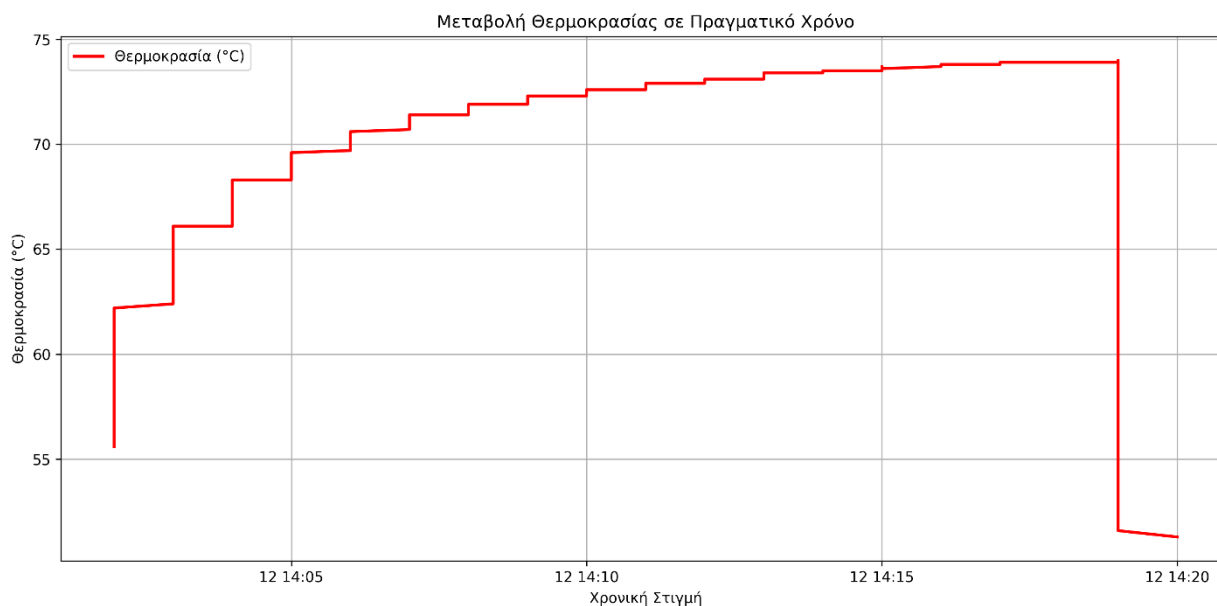
Για την αξιολόγηση των μετρήσεων θερμοκρασίας, αξιοποιήθηκε το σύνολο δεδομένων που ελήφθησαν κατά την πειραματική δοκιμή, όπως καταγράφηκε από τον ενσωματωμένο αισθητήρα. Η συλλογή δεδομένων κάλυψε χρονικό διάστημα περίπου 18 λεπτών, από τις 14:02 έως τις 14:20. Ακόμη, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω Python, αξιοποιώντας τις βιβλιοθήκες pandas και matplotlib, και περιλαμβάνει τόσο τη γραφική απεικόνιση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο όσο και τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της. Παρακάτω ακολουθεί ο κώδικας Python που εκτελέστηκε για την εξαγωγή της γραφικής παράστασης και την ανάλυση των δεδομένων :

```

1. import pandas as pd
2. import matplotlib.pyplot as plt
3.
4. # Φόρτωση αρχείου
5. file_path = 'combined_measurements.xlsx'
6. df = pd.read_excel(file_path)
7.
8. # Μετατροπή της χρονικής στήλης σε datetime
9. df["Χρονική Στιγμή"] = pd.to_datetime(df["Timestamp"])
10.
11. # Υπολογισμός βασικών στατιστικών
12. temperature = df["Temperature"]
13. print("📊 Στατιστικά Θερμοκρασίας:")
14. print(f"Μέση τιμή Θερμοκρασίας: {temperature.mean():.2f} °C")
15. print(f"Ελάχιστη τιμή Θερμοκρασίας: {temperature.min():.2f} °C")
16. print(f"Μέγιστη τιμή Θερμοκρασίας: {temperature.max():.2f} °C")
17. print(f"Τυπική απόκλιση Θερμοκρασίας: {temperature.std():.2f} °C")
18. print(f"Διακύμανση Θερμοκρασίας: {temperature.var():.2f} °C²")
19. print(f"Διάμεσος Θερμοκρασίας: {temperature.median():.2f} °C")
20.
21. # Δημιουργία γραφήματος
22. plt.figure(figsize=(12, 6))
23. plt.plot(df["Χρονική Στιγμή"], temperature, color='red', linewidth=2, label='Θερμοκρασία (°C)')
24. plt.title("Μεταβολή Θερμοκρασίας σε Πραγματικό Χρόνο")
25. plt.xlabel("Χρονική Στιγμή")
26. plt.ylabel("Θερμοκρασία (°C)")
27. plt.grid(True)
28. plt.legend()
29. plt.tight_layout()
30.
31. # Αποθήκευση και εμφάνιση
32. plt.savefig("temperature_plot_high_res.png", dpi=300)
33. plt.show()
34.

```

Η γραμματοσειρά του σχήματος επιλέχθηκε ώστε να προσφέρει ευκρίνεια ακόμη και σε εκτυπωμένο ή μεγενθυμένο περιβάλλον, ενώ η αποθήκευση σε ανάλυση 300 DPI εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα απεικόνισης. Η χρονική στήλη μετατράπηκε σε τύπο datetime, ώστε να διατηρηθεί ακρίβεια στην απεικόνιση των μεταβολών στον πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας:

Πίνακας 3.1: Στατιστικά πειραματικής διαδικασίας μέτρησης θερμοκρασίας.

Στατιστικά Πειραματικής Διαδικασίας Μέτρησης Θερμοκρασίας	Τιμές
Μέση Τιμή Θερμοκρασίας	70.50 °C
Ελάχιστη Τιμή Θερμοκρασίας	51.30 °C
Μέγιστη Τιμή Θερμοκρασίας	74.00 °C
Τυπική Απόκλιση Θερμοκρασίας	4.56 °C
Διακύμανση Θερμοκρασίας	20.78 °C
Διάμεσος Θερμοκρασίας	72.40 °C

 Στατιστικά Θερμοκρασίας:
Μέση τιμή Θερμοκρασίας: 70.50 °C
Ελάχιστη τιμή Θερμοκρασίας: 51.30 °C
Μέγιστη τιμή Θερμοκρασίας: 74.00 °C
Τυπική απόκλιση Θερμοκρασίας: 4.56 °C
Διακύμανση Θερμοκρασίας: 20.78 °C²
Διάμεσος Θερμοκρασίας: 72.40 °C

Σχήμα 3.5: Παράδειγμα εκτέλεσης κώδικα για τον υπολογισμό των στατιστικών στις μετρήσεις θερμοκρασίας.

Η σταθερή και ομαλά αυξανόμενη θερμοκρασία που καταγράφηκε σε πραγματικό χρόνο, υποδεικνύει τη σταθερή λειτουργία του συστήματος και ενισχύει την εμπιστοσύνη στην ακρίβεια του αισθητήρα υπό πραγματικές συνθήκες.

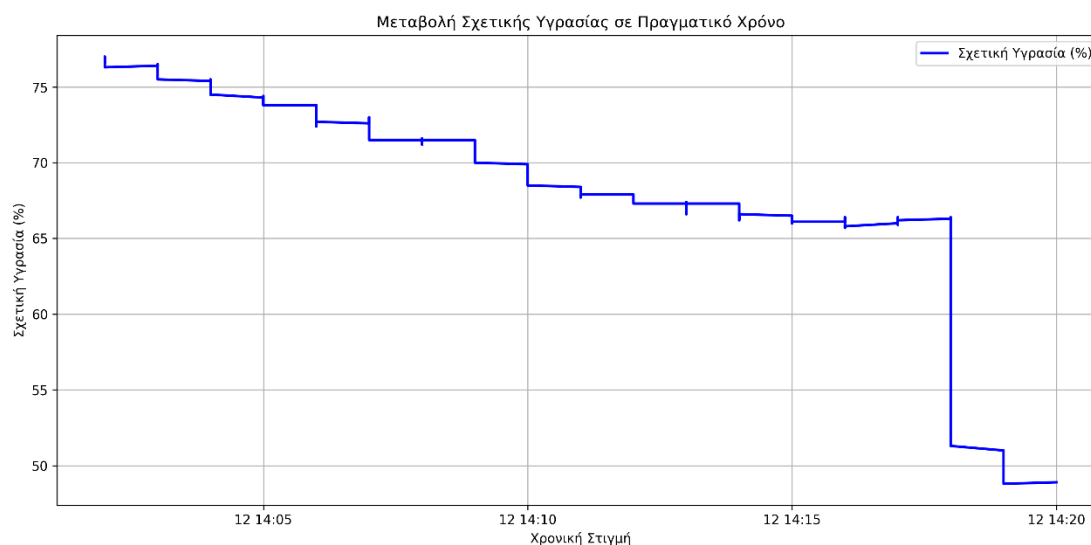
3.3 Ανάλυση Μετρήσεων Υγρασίας

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, αξιοποιήθηκαν οι καταγραφές του αντίστοιχου αισθητήρα που ενσωματώνεται στη συσκευή. Τα δεδομένα καλύπτουν χρονική περίοδο περίπου 18 λεπτών (14:02 – 14:20), επαρκή για την αποτύπωση της δυναμικής του παραμέτρου σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python και των βιβλιοθηκών pandas και matplotlib, παρέχοντας τόσο γραφική απεικόνιση όσο και στατιστική ανάλυση των μετρήσεων. Στη συνέχεια παρατίθεται ο σχετικός κώδικας Python που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και την παραγωγή των αποτελεσμάτων:

```
1. import pandas as pd
2. import matplotlib.pyplot as plt
3.
4. # Φόρτωση αρχείου
5. file_path = 'combined_measurements.xlsx'
6. df = pd.read_excel(file_path)
7.
8. # Μετατροπή της χρονικής στήλης σε datetime
9. df["Χρονική Στιγμή"] = pd.to_datetime(df["Timestamp"])
10.
11. # Υπολογισμός βασικών στατιστικών
12. humidity = df["Humidity"]
13. print("📊 Στατιστικά Σχετικής Υγρασίας:")
14. print(f"Μέση τιμή: {humidity.mean():.2f} %")
15. print(f"Ελάχιστη τιμή: {humidity.min():.2f} %")
16. print(f"Μέγιστη τιμή: {humidity.max():.2f} %")
17. print(f"Τυπική απόκλιση: {humidity.std():.2f} %")
18. print(f"Διακύμανση: {humidity.var():.2f} %²")
19. print(f"Διάμεσος: {humidity.median():.2f} %")
20.
21. # Δημιουργία γραφήματος
22. plt.figure(figsize=(12, 6))
23. plt.plot(df["Χρονική Στιγμή"], humidity, color='blue', linewidth=2, label='Σχετική Υγρασία (%)')
24. plt.title("Μεταβολή Σχετικής Υγρασίας σε Πραγματικό Χρόνο")
25. plt.xlabel("Χρονική Στιγμή")
26. plt.ylabel("Σχετική Υγρασία (%)")
27. plt.grid(True)
28. plt.legend()
29. plt.tight_layout()
30.
31. # Αποθήκευση και εμφάνιση
32. plt.savefig("humidity_plot_high_res.png", dpi=300)
33. plt.show()
34.
```

Η επιλογή της γραμματοσειράς και των διαστάσεων του διαγράμματος έγινε με στόχο την εξασφάλιση ευκρίνειας κατά την οπτική παρουσίαση των δεδομένων, ακόμη και σε περιβάλλον εκτύπωσης ή μεγέθυνσης. Η αποθήκευση του γραφήματος σε ανάλυση 300 DPI

επιτρέπει την αποτύπωση υψηλής ποιότητας, διατηρώντας τη λεπτομέρεια της μεταβολής. Η στήλη της χρονικής στιγμής μετατράπηκε σε μορφή τύπου datetime, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια στην απεικόνιση της σχετικής υγρασίας σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 3.6: Γραφική παράσταση σχετικής υγρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας:

Πίνακας 3.2: Στατιστικά πειραματικής διαδικασίας μέτρησης σχετικής υγρασίας.

Στατιστικά Πειραματικής Διαδικασίας Μέτρησης Σχετικής Υγρασίας	Τιμές
Μέση Τιμή Σχετικής Υγρασίας	68.82%
Ελάχιστη Τιμή Σχετικής Υγρασίας	48.80%
Μέγιστη Τιμή Σχετικής Υγρασίας	77.00 %
Τυπική Απόκλιση Σχετικής Υγρασίας	6.11%
Διακύμανση Σχετικής Υγρασίας	37.35% ²
Διάμεσος Σχετικής Υγρασίας	68.50%

 Στατιστικά Σχετικής Υγρασίας:
Μέση τιμή: 68.82 %
Ελάχιστη τιμή: 48.80 %
Μέγιστη τιμή: 77.00 %
Τυπική απόκλιση: 6.11 %
Διακύμανση: 37.35 %²
Διάμεσος: 68.50 %

Σχήμα 3.7: Παράδειγμα εκτέλεσης κώδικα για τον υπολογισμό των στατιστικών στις μετρήσεις σχετικής υγρασίας.

Η σταδιακή μείωση της σχετικής υγρασίας σε πραγματικό χρόνο αντανακλά την ομαλή εξέλιξη των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά την πειραματική δοκιμή και καταδεικνύει τη συνεπή και ακριβή λειτουργία του αισθητήρα υπό ρεαλιστικές συνθήκες.

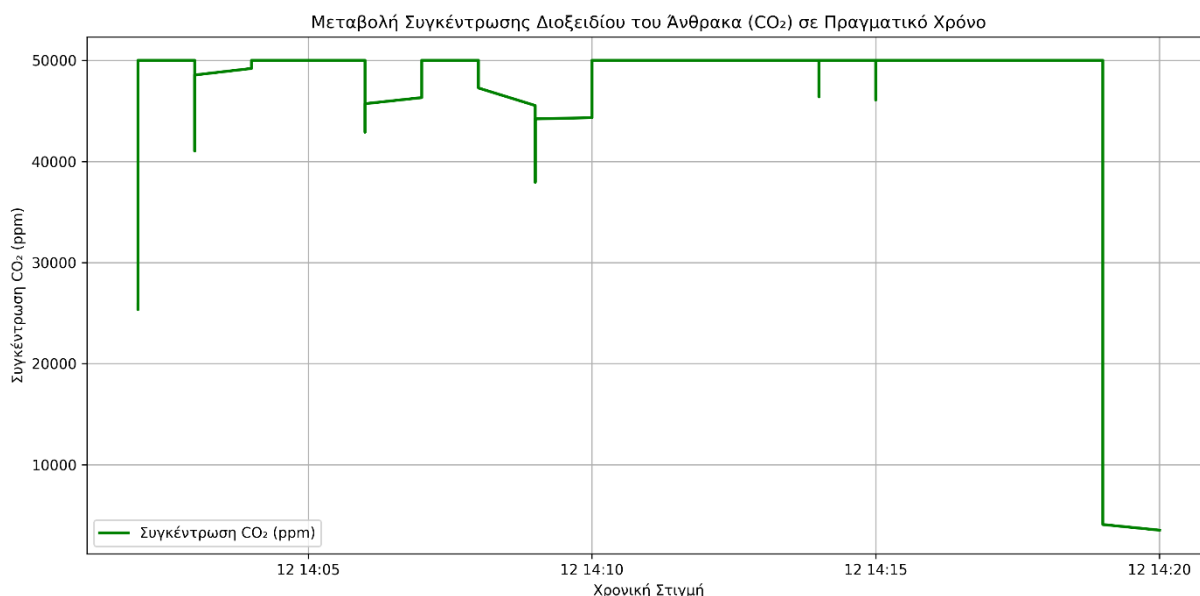
3.4 Ανάλυση Μετρήσεων Συγκέντρωσης Διοξειδίου του Άνθρακα

Η ανάλυση των μετρήσεων της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα πραγματοποιήθηκε με χρήση των δεδομένων που καταγράφηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, με στόχο την αξιολόγηση της απόκρισης του αισθητήρα CO₂ σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Τα δεδομένα ανακτήθηκαν από τον εξυπηρετητή όπου αποθηκεύονταν μέσω Wi-Fi και αφορούν το ίδιο χρονικό παράθυρο (~20 λεπτά). Η απεικόνιση και η στατιστική επεξεργασία υλοποιήθηκαν μέσω Python, εξασφαλίζοντας ποιοτική απεικόνιση της μεταβολής και ακριβή αποτίμηση των μετρήσεων. Παρακάτω παρατίθεται ο χρησιμοποιηθείς κώδικας, συνοδευόμενος από το αντίστοιχο γράφημα και τα αριθμητικά αποτελέσματα.

```
1. import pandas as pd
2. import matplotlib.pyplot as plt
3.
4. # Φόρτωση αρχείου
5. file_path = 'combined_measurements.xlsx'
6. df = pd.read_excel(file_path)
7.
8. # Μετατροπή της χρονικής στήλης σε datetime
9. df["Χρονική Στιγμή"] = pd.to_datetime(df["Timestamp"])
10.
11. # Υπολογισμός βασικών στατιστικών για CO2
12. co2 = df["CO2 Concentration"]
13. print("📊 Στατιστικά Συγκέντρωσης CO2:")
14. print(f"Μέση τιμή CO2: {co2.mean():.2f} ppm")
15. print(f"Ελάχιστη τιμή CO2: {co2.min():.2f} ppm")
16. print(f"Μέγιστη τιμή CO2: {co2.max():.2f} ppm")
17. print(f"Τυπική απόκλιση CO2: {co2.std():.2f} ppm")
18. print(f"Διακύμανση CO2: {co2.var():.2f} ppm2")
19. print(f"Διάμεσος CO2: {co2.median():.2f} ppm")
20.
21. # Δημιουργία γραφήματος
22. plt.figure(figsize=(12, 6))
23. plt.plot(df["Χρονική Στιγμή"], co2, color='green', linewidth=2, label='Συγκέντρωση CO2 (ppm)')
24. plt.title("Μεταβολή Συγκέντρωσης Διοξειδίου του Άνθρακα (CO2) σε Πραγματικό Χρόνο")
25. plt.xlabel("Χρονική Στιγμή")
26. plt.ylabel("Συγκέντρωση CO2 (ppm)")
27. plt.grid(True)
28. plt.legend()
29. plt.tight_layout()
30.
31. # Αποθήκευση και εμφάνιση
32. plt.savefig("co2_plot_high_res.png", dpi=300)
33. plt.show()
34.
```

Η επιλογή της γραμματοσειράς και των διαστάσεων του διαγράμματος έγινε με σκοπό την επίτευξη υψηλής ευκρίνειας κατά την απεικόνιση των δεδομένων συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), τόσο σε ψηφιακό όσο και σε έντυπο ή μεγεθυμένο περιβάλλον. Η αποθήκευση του γραφήματος σε ανάλυση 300 DPI διασφαλίζει την απεικόνιση λεπτομερειών, επιτρέποντας την ακριβή αποτύπωση της τάσης των μετρήσεων.

Η στήλη της χρονικής στιγμής μετατράπηκε σε μορφή τύπου datetime, εξασφαλίζοντας χρονική ακρίβεια στην αναπαράσταση των μεταβολών της συγκέντρωσης CO₂ σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 3.8: Γραφική παράσταση συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με το χρόνο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας:

Πίνακας 3.3: Στατιστικά πειραματικής διαδικασίας μέτρησης συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα.

Στατιστικά Πειραματικής Διαδικασίας Μέτρησης Συγκέντρωσης CO ₂	Τιμές
Μέση Τιμή Συγκέντρωσης CO ₂	46858.73 ppm
Ελάχιστη Τιμή Συγκέντρωσης CO ₂	3521.00 ppm
Μέγιστη Τιμή Συγκέντρωσης CO ₂	50000.00 ppm
Τυπική Απόκλιση Συγκέντρωσης CO ₂	7846.53 ppm
Διακύμανση Συγκέντρωσης CO ₂	61568078.92 ppm ²
Διάμεσος Συγκέντρωσης CO ₂	50000.00 ppm

 Στατιστικά Συγκέντρωσης CO₂:
 Μέση τιμή CO₂: 46858.73 ppm
 Ελάχιστη τιμή CO₂: 3521.00 ppm
 Μέγιστη τιμή CO₂: 50000.00 ppm
 Τυπική απόκλιση CO₂: 7846.53 ppm
 Διακύμανση CO₂: 61568078.92 ppm²
 Διάμεσος CO₂: 50000.00 ppm

Σχήμα 3.9: Παράδειγμα εκτέλεσης κώδικα για τον υπολογισμό των στατιστικών στις μετρήσεις συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα.

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης CO₂ παρουσίασαν μικρές διακυμάνσεις με τάση κορεσμού κοντά στο ανώτατο όριο μέτρησης του αισθητήρα, αποτυπώνοντας την περιβαλλοντική δυναμική κατά την πειραματική δοκιμή.

3.5 Σχολιασμός και Συμπεράσματα Μετρήσεων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας απέδειξαν την ορθή λειτουργία της διάταξης και την αξιοπιστία των ενσωματωμένων αισθητήρων σε ρεαλιστικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η συνεχής καταγραφή των μεταβλητών (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, συγκέντρωση CO₂) επέτρεψε την παρακολούθηση της μικροκλιματικής εξέλιξης εντός του Stick, αποτυπώνοντας με σαφήνεια τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η ανάλυση των δεδομένων αναδεικνύει την ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται στις μεταβολές του περιβάλλοντος, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά, την υγρασιακή ισορροπία και τις διακυμάνσεις της συγκέντρωσης CO₂, με τρόπο που υποστηρίζει τη μελλοντική χρήση του σε εφαρμογές αγρομετεωρολογικής παρακολούθησης ή αυτόνομων συστημάτων ελέγχου.

Οι μετρήσεις θερμοκρασίας παρουσίασαν σταδιακή και συνεχή αύξηση κατά τη διάρκεια του πειραματικού διαστήματος, ξεκινώντας από 55.6 °C και φτάνοντας τους 51.3 °C εντός περίπου 20 λεπτών. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε ήταν 74.0 °C, ενώ η ελάχιστη 51.3 °C, με μέση θερμοκρασία 70.5 °C, στοιχεία που επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία του αισθητήρα και τη σταθερότητα του περιβάλλοντος μέτρησης. Παράλληλα, η ανοδική αυτή τάση αποδίδεται είτε στην επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος λόγω ώρας (μεσημβρινές ώρες), είτε στην τοπική θερμογένεση οργανικών υλικών εντός του υποστρώματος (π.χ. χούμος). Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι ενδείξεις του αισθητήρα θερμοκρασίας ήταν σε εξαιρετική συμφωνία με τις τιμές που καταγράφηκαν από εξωτερικό θερμόμετρο εδάφους, επιβεβαιώνοντας τη θερμική ευαισθησία, την ακρίβεια και τη συνολική σταθερότητα της συσκευής. Τέλος, προς το τέλος της μέτρησης παρατηρείται αιφνίδια πτώση της καταγραφόμενης θερμοκρασίας, η οποία δεν ερμηνεύεται άμεσα από τα υπόλοιπα δεδομένα. Μία πιθανή εξήγηση είναι η σταδιακή μετατόπιση του αισθητήρα προς ανώτερα στρώματα του υποστρώματος του χουμοχώματος, που είναι ψυχρότερα, είτε λόγω εξωτερικών χειρισμών είτε λόγω διαφορών στην πυκνότητα του υλικού. Εναλλακτικά, δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο στιγμιαίας αστοχίας ή προσωρινής αποσταθεροποίησης της λειτουργίας του αισθητήρα, φαινόμενο που θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω σε επόμενους πειραματικούς κύκλους.

Οι μετρήσεις σχετικής υγρασίας κατά την πειραματική δοκιμή κατέδειξαν μία σταδιακά φθίνουσα τάση, με τις τιμές να κυμαίνονται από 76,6 % έως και 48,8 % μέσα σε χρονικό διάστημα περίπου 18 λεπτών. Η μείωση αυτή είναι απόλυτα συμβατή με την παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς η σχετική υγρασία επηρεάζεται αντίστροφα από τη θερμοκρασία όταν παραμένει σταθερό το απόλυτο ποσοστό υδρατμών. Η συμπεριφορά αυτή είναι πλήρως εναρμονισμένη με τη φυσική διεργασία της εξάτμισης και μεταβολής της σχετικής υγρασίας λόγω θερμικής φόρτισης, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη στην ακρίβεια των μετρήσεων. Επιπροσθέτως, ο αισθητήρας σχετικής υγρασίας ανταποκρίθηκε με συνέπεια στη μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών, χωρίς ενδείξεις αστάθειας ή απωλειών σήματος. Εξάλλου, οι μετρήσεις εξελίσσονταν με συνεχή μεταβλητότητα, χωρίς απότομες μεταπτώσεις ή αδικαιολόγητα άλματα, γεγονός που αποδεικνύει την ομαλή και ρεαλιστική λειτουργία του αισθητήρα. Τέλος, η ακρίβεια των δεδομένων, σε συνδυασμό με την καθαρή αντίστροφη συσχέτιση με τη θερμοκρασία, επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της πλατφόρμας παρακολούθησης μικροκλίματος για χρήση σε εδαφικές εφαρμογές, όπως η γεωργία ακριβείας ή η έρευνα.

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανέδειξαν υψηλά επίπεδα CO₂, με τιμές που σταθεροποιήθηκαν κοντά στο άνω όριο μέτρησης του αισθητήρα (50.000 ppm). Η περιοδική διακύμανση που παρατηρήθηκε υποδεικνύει μερική μεταβλητότητα της συγκέντρωσης CO₂ στον χώρο δοκιμής, ωστόσο η επαναλαμβανόμενη τιμή-οροφή των 50.000 ppm αποτελεί σαφή ένδειξη κορεσμού του αισθητήρα, δηλαδή το μέσο έφτασε το μέγιστο όριο ανίχνευσης και αδυνατεί να καταγράψει υψηλότερες συγκεντρώσεις. Η παρατήρηση αυτή είναι απολύτως λογική και αναμενόμενη, δεδομένου ότι το πείραμα έλαβε χώρα σε υπόστρωμα χουμοχώματος, πλούσιο σε οργανική ύλη, το οποίο είναι γνωστό για την έντονη εκπομπή CO₂ λόγω μικροβιακής αποσύνθεσης και αναερόβιας δραστηριότητας. Η καταγραφή τέτοιων συγκεντρώσεων υποδεικνύει ότι ο αισθητήρας λειτουργεί με συνέπεια έως το επιτρεπτό εύρος λειτουργίας του, αλλά και ότι σε συνθήκες έντονης παραγωγής CO₂ απαιτείται σαφώς αισθητήρας με μεγαλύτερο εύρος ανίχνευσης. Στο πλαίσιο των μελλοντικών βελτιώσεων του συστήματος, έχει ήδη εντοπιστεί και προγραμματίζεται η αντικατάσταση του υπάρχοντος αισθητήρα CO₂ με άλλον αυξημένης ικανότητας, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη παρακολούθηση ακόμη και σε περιβάλλοντα με αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα. Η παρατήρηση αυτή τεκμηριώνει τη σημασία της προσαρμογής του εύρους των αισθητήρων στις απαιτήσεις του εκάστοτε περιβάλλοντος μέτρησης.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανέδειξαν την σωστή και συνεπή λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος αισθητήρων στο περιβάλλον της πειραματικής δοκιμής. Η θερμοκρασία παρουσίασε ομαλή και σταθερή ανοδική τάση, επιβεβαιώνοντας την καλή θερμική ευαισθησία και την αξιοπιστία του αισθητήρα, όπως και τη συνέπεια ως προς τις αναμενόμενες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Έπειτα, η σχετική υγρασία εμφάνισε αντιστρόφως ανάλογη πορεία, με σταδιακή πτώση, σε άμεση συνάρτηση με την άνοδο της θερμοκρασίας, κάτι που είναι απολύτως αναμενόμενο βάσει της φυσικής συμπεριφοράς του υδρατμού στον αέρα. Τέλος, οι μετρήσεις CO₂ αποκάλυψαν εξαιρετικά υψηλές συγκεντρώσεις, που ξεπερνούσαν το ανώτατο όριο μέτρησης του αισθητήρα (50.000 ppm), γεγονός που υποδεικνύει έντονη βιολογική δραστηριότητα στο υπόστρωμα και ταυτόχρονα τεκμηριώνει την ανάγκη για αναβάθμιση του αισθητήρα CO₂ σε μελλοντική έκδοση του συστήματος. Συνολικά, το σύστημα κατέγραψε ρεαλιστικά, εύλογα και χρήσιμα δεδομένα, επιτρέποντας τεκμηριωμένη αξιολόγηση τόσο των περιβαλλοντικών μεταβολών όσο και της απόκρισης και ακρίβειας των ενσωματωμένων αισθητήρων.

4 Ενότητα 4 : Μελλοντικές Βελτιώσεις

4.1 Εισαγωγή στις μελλοντικές βελτιώσεις

Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου τεχνολογικού συστήματος, όπως το Stick μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων για εφαρμογή στην κομποστοποίηση, αποτελεί μια διαδικασία που επιδέχεται συνεχή βελτίωση. Καθώς το πεδίο της ευφυούς γεωργίας εξελίσσεται και οι απαιτήσεις για ακρίβεια, αξιοπιστία και εργονομία αυξάνονται, είναι κρίσιμο να επανεκτιμάται τόσο η ηλεκτρονική όσο και η μηχανολογική υλοποίηση μιας τέτοιας διάταξης. Οι βελτιώσεις αυτές στοχεύουν όχι μόνο στην τεχνική απόδοση αλλά και στην ευκολία χρήσης, την ανθεκτικότητα και την ενεργειακή αυτονομία του συστήματος.

Συγκεκριμένα, προτείνονται αναβαθμίσεις στους αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και CO₂, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας και του χρόνου απόκρισης, αλλά και την καλύτερη προσαρμογή σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Παράλληλα, εξετάζεται η αντικατάσταση του πλαστικού περιβλήματος με ανοξείδωτο υλικό, ώστε να αυξηθεί η μηχανική αντοχή και η ανθεκτικότητα του Stick σε παρατεταμένη χρήση και υγρασία. Επιπλέον, προτείνεται η ενσωμάτωση θύρας φόρτισης (όπως USB-C), ώστε να ενισχυθεί η εργονομία και η ενεργειακή διαχείριση, επιτρέποντας την επαναφόρτιση χωρίς να απαιτείται αποσυναρμολόγηση ή αφαίρεση μπαταριών. Οι παραπάνω παρεμβάσεις αναμένεται να προσδώσουν στο Stick υψηλότερη αξιοπιστία, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και αυξημένη λειτουργικότητα σε πραγματικές συνθήκες χρήσης.

4.2 Προβληματισμοί και λόγοι αντικατάστασης

4.2.1 Αντικατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας

Κατά την αρχική κατασκευή της διάταξης, χρησιμοποιήθηκαν ανεξάρτητοι αισθητήρες για τη μέτρηση θερμοκρασίας (DS18B20) και υγρασίας (SEN0308), οι οποίοι παρότι λειτούργησαν ικανοποιητικά σε βασικό επίπεδο, παρουσίασαν ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα όσον αφορά τη χρήση τους σε πεδία υψηλής υγρασίας, μεταβαλλόμενων θερμοκρασιών και απαιτήσεων χωρικής κατανομής μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι λόγοι που οδηγούν στην απόφαση αντικατάστασης των αισθητήρων αυτών συνοψίζονται ως εξής:

1. Απουσία ενιαίας μέτρησης: Η ύπαρξη δύο ξεχωριστών αισθητήρων για θερμοκρασία και υγρασία αύξανε την πολυπλοκότητα καλωδιώσεων, το κόστος της κατασκευής και τη δυσκολία βαθμονόμησης. Επιπλέον, οι μετρήσεις προέρχονταν από διαφορετικά σημεία, κάτι που ενδέχεται να δημιουργεί διαφορές στα δεδομένα, ειδικά σε ένα περιβάλλον όπως το χουμόχωμα, όπου οι παράμετροι μεταβάλλονται έντονα ακόμα και σε μικρές αποστάσεις.
2. Περιορισμένη αντοχή σε υγρασία: Τόσο ο DS18B20 όσο και ο SEN0308 δεν είναι πλήρως στεγανοποιημένοι για παρατεταμένη χρήση μέσα σε κορεσμένο από υγρασία περιβάλλον όπως το χουμόχωμα. Η συνεχής έκθεση σε υγρασία, σε συνδυασμό με τις

μεταβολές θερμοκρασίας, μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια μετρήσεων ή και φθορά των αισθητηρίων με την πάροδο του χρόνου.

3. Ανάγκη για πολυεπίπεδη μέτρηση: Η δυνατότητα μέτρησης των μεταβλητών σε διαφορετικά βάθη του χουμοχώματος (π.χ. επιφανειακά και βαθύτερα) είναι κρίσιμη για την αποτίμηση της μικροβιακής δραστηριότητας, της θερμικής κατανομής και της αποδοτικότητας της κομποστοποίησης. Η αρχική διάταξη δεν υποστήριζε κάτι τέτοιο λειτουργικά ή χωρικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προτείνεται η αντικατάσταση των αρχικών αισθητήρων με δύο αδιάβροχους αισθητήρες SHT31, οι οποίοι μπορούν να μετρούν ταυτόχρονα θερμοκρασία και υγρασία, με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία. Οι νέοι αισθητήρες διαθέτουν ψηφιακή έξοδο, είναι εργοστασιακά βαθμονομημένοι και πλήρως σφραγισμένοι, καθιστώντας τους κατάλληλους για μακροχρόνια χρήση σε υγρό και δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον όπως αυτό του χουμοχώματος.

Συνολικά, η μετάβαση σε διπλούς αισθητήρες SHT31 ενισχύει σημαντικά την ποιότητα δεδομένων, την αξιοπιστία της διάταξης και την προσαρμοστικότητά της σε επαγγελματικές ή αγροτικές συνθήκες πεδίου.

4.2.2 Αντικατάσταση αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Ο αρχικός αισθητήρας CO₂ που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη υλοποίηση της διάταξης παρουσίασε περιορισμούς οι οποίοι έγιναν εμφανείς κατά τη φάση των μετρήσεων του πεδίου. Ο σημαντικότερος εξ αυτών ήταν η ύπαρξη άνω φράγματος στη μέτρηση της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα, με όριο περίπου 50.000 ppm. Αν και αυτό το επίπεδο θεωρείται υψηλό σε πολλές εφαρμογές εσωτερικού χώρου, στην κομποστοποίηση η συγκέντρωση CO₂ μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, ιδιαίτερα κατά τις θερμόφιλες φάσεις, όπου η μικροβιακή δραστηριότητα κορυφώνεται και η αερόβια αναπνοή παράγει μεγάλες ποσότητες αερίων.

Ο κορεσμός του αισθητήρα σε τέτοια επίπεδα συνεπάγεται την απώλεια ακρίβειας, περιορισμένη αξιοπιστία στα δεδομένα και αδυναμία παρακολούθησης κρίσιμων φάσεων της διαδικασίας κομποστοποίησης. Επιπλέον, σε περιπτώσεις όπου το επίπεδο CO₂ υπερβαίνει το φάσμα λειτουργίας του αισθητήρα, οι μετρήσεις είτε μηδενίζονται είτε «παγώνουν», οδηγώντας σε λάθος ερμηνείες.

Για την επίλυση αυτών των ζητημάτων προτείνεται η αντικατάσταση του υπάρχοντος αισθητήρα με τον IR11BR, έναν NDIR (Non-Dispersive Infrared) αισθητήρα CO₂ υψηλής ακρίβειας, ο οποίος υποστηρίζει εύρος μέτρησης έως και 1.000.000 ppm (100%). Το διευρυμένο φάσμα τιμών του IR11BR καλύπτει με άνεση ακόμα και τις πλέον ακραίες περιπτώσεις συγκέντρωσης CO₂ που συναντώνται στο εσωτερικό του χουμοχώματος κατά τη διαδικασία κομποστοποίησης.

Επιπλέον, η εργονομία της διάταξης επιτρέπει τη συνέχιση της χρήσης του αισθητήρα σε προστατευμένο εσωτερικό θάλαμο της ράβδου, μέσω των μικρών θυρίδων εισόδου αέρα, χωρίς άμεση επαφή με το χουμοχώμα. Η ευαισθησία του IR11BR σε ρεύματα αέρα και ατμούς είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τον προηγούμενο αισθητήρα, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια σε συνθήκες μεταβαλλόμενης υγρασίας και θερμοκρασίας.

Ακόμη, η υιοθέτηση αυτού του αισθητήρα, σε συνδυασμό με τη χρήση κατάλληλης θήκης/καναλιού αέρα μέσα στη ράβδο, καθιστά εφικτή την αδιάκοπη και έγκυρη

παρακολούθηση της συγκέντρωσης CO₂ καθ' όλη τη διάρκεια της κομποστοποίησης, ακόμη και σε θερμοκρασιακές ή χημικές συνθήκες που παλαιότερα οδηγούσαν σε αισθητηριακή αστοχία.

Συνοψίζοντας, η αντικατάσταση του αισθητήρα CO₂ με τον IR11BR καλύπτει πλήρως την απαίτηση για ευρύτερη κλίμακα μέτρησης, μεγαλύτερη ακρίβεια και ανθεκτικότητα σε αντίξοες συνθήκες, ενισχύοντας σημαντικά τη συνολική αξιοπιστία της διάταξης και καθιστώντας την κατάλληλη για επαγγελματική εφαρμογή σε συνθήκες εντατικής γεωργικής αξιοποίησης.

4.2.3 Αντικατάσταση υλικού κατασκευής : από πλαστικό σε ανοξείδωτο χάλυβα

Στην αρχική κατασκευή του Stick, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό περίβλημα τόσο για τη ράβδο εισαγωγής στο έδαφος όσο και για το εξωτερικό περίβλημα (enclosure) του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Αν και η επιλογή αυτή είχε ως πλεονεκτήματα το χαμηλό κόστος και το μικρό βάρος, ανέδειξε μερικά σημαντικά μειονεκτήματα σε συνθήκες πεδίου.

Πιο συγκεκριμένα, το πλαστικό υλικό:

- Δεν παρέχει υψηλή μηχανική αντοχή σε διαρκή πίεση ή κάμψη, ειδικά κατά την είσοδο του Stick σε σκληρό έδαφος.
- Είναι ευάλωτο σε μακροχρόνια φθορά εξαιτίας της έκθεσης σε υγρασία, ακτινοβολία UV και ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Μπορεί να υποστεί παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής υγρασίας όπως είναι το χουμόχωμα σε φάση κομποστοποίησης.

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω, προτείνεται η αντικατάσταση του πλαστικού με ανοξείδωτο χάλυβα (stainless steel), όπως αναλύεται στην ενότητα 4.3.3.

4.2.4 Προσθήκη θύρας USB για άμεση φόρτιση της διάταξης

Στην παρούσα κατασκευή, η διαδικασία φόρτισης της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας του Stick απαιτεί την αποσυναρμολόγηση του περιβλήματος, την αφαίρεση της μπαταρίας και τη σύνδεσή της σε εξωτερικό κύκλωμα φόρτισης, το οποίο φέρει ξεχωριστό μικροελεγκτή και απαιτεί παροχή μέσω μπρίζας ή παρομοίου μέσου. Αυτή η διαδικασία, παρότι λειτουργική, παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς από άποψη εργονομίας, ασφάλειας και ευχρηστίας:

- Αυξάνει τον χρόνο και την πολυπλοκότητα της συντήρησης.
- Δημιουργεί κίνδυνο για ζημιές σε ευαίσθητα μέρη της διάταξης λόγω επαναλαμβανόμενου ανοίγματος του enclosure.
- Απαιτεί πρόσβαση σε επιπλέον εξοπλισμό (εξωτερικός φορτιστής με controller), κάτι που δεν είναι πάντα πρακτικό σε αγροτικές ή υπαίθριες εφαρμογές.

Για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων, προτείνεται η προσθήκη μίας ενσωματωμένης θύρας USB, ιδανικά τύπου USB-C, στην εξωτερική επιφάνεια του enclosure, όπως αναλύεται στην παράγραφο 4.3.4.

4.3 Χαρακτηριστικά των νέων βελτιώσεων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά οι τεχνικές βελτιώσεις που προτείνονται για τη νέα έκδοση της διάταξης μέτρησης Stick. Οι αλλαγές αυτές δεν περιορίζονται μόνο στην αντικατάσταση αισθητήρων, αλλά περιλαμβάνουν και ουσιαστικές παρεμβάσεις στον μηχανικό σχεδιασμό και τη διαχείριση ενέργειας. Για κάθε υποσύστημα που αναβαθμίζεται (αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, αισθητήρας CO₂, υλικό κατασκευής και σύστημα φόρτισης) παρατίθενται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των νέων επιλογών, καθώς και η αναμενόμενη βελτίωση στη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία του τελικού συστήματος.

Οι επιλογές βασίστηκαν σε συνδυασμό θεωρητικής έρευνας και εμπειρικής αξιολόγησης της πρώτης έκδοσης της διάταξης, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που παρατηρήθηκαν κατά τη χρήση της σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Η αναλυτική παρουσίαση που ακολουθεί υποστηρίζει την επιλογή κάθε νέου εξαρτήματος ή τροποποίησης, εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα που προσφέρει ως προς:

- Την ακρίβεια και σταθερότητα των μετρήσεων,
- Την ανθεκτικότητα στο χρόνο και τις εξωτερικές συνθήκες,
- Την εργονομία και τη συνολική ευχρηστία της κατασκευής.

4.3.1 Αντικατάσταση αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας με SHT31

Όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 4.2.1, η αρχική επιλογή ξεχωριστών αισθητήρων θερμοκρασίας (DS18B20) και υγρασίας (SEN0308) παρουσίασε περιορισμούς αξιοπιστίας και ανθεκτικότητας σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Ως λύση σε αυτά τα προβλήματα, προτείνεται η αντικατάστασή τους με δύο αισθητήρες τύπου SHT31, οι οποίοι ενσωματώνουν και τις δύο μετρήσεις σε ένα αδιάβροχο, υψηλής ακρίβειας υποσύστημα.



Σχήμα 4.1: Αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας SHT31 [111]

Τα τυπικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα SHT31 είναι :

Πίνακας 4.1: Πίνακας χαρακτηριστικών του SHT31. [112]

Παράμετρος	Τιμή
Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας	-40°C έως +125°C
Ακρίβεια θερμοκρασίας	±0.2°C
Εύρος μέτρησης σχετικής υγρασίας	0% έως 100% RH
Ακρίβεια υγρασίας	±2% RH
Πρωτόκολλο επικοινωνίας	I ² C
Τάση λειτουργίας	3.3V ή 5V
Ρεύμα λειτουργίας	< 1.5 mA
Χρόνος Απόκρισης	< 8 δευτερόλεπτα
Μήκος καλωδίου	1 m
Ανθεκτικότητα	Πλήρως αδιάβροχος (encapsulated)
Κατανάλωση ισχύος	Πολύ χαμηλή – κατάλληλη για low-power συστήματα
Περιβάλλον λειτουργίας	Ανθεκτικό σε υγρασία και σκόνη – κατάλληλο για εξωτερική τοποθέτηση

Για τη βέλτιστη αποτύπωση του μικροκλίματος στο εσωτερικό του χουμοχώματος, οι δύο αισθητήρες SHT31 τοποθετούνται σε διαφορετικά ύψη κατά μήκος της ράβδου, στα ίδια σημεία που είχαν εγκατασταθεί οι αρχικοί αισθητήρες. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την καταγραφή της κατακόρυφης θερμοϋγρομετρικής κατανομής, στοιχείο κρίσιμο για την παρακολούθηση της μικροβιακής δραστηριότητας και της εξέλιξης της κομποστοποίησης. Επιπλέον, η χρήση δύο ανεξάρτητων μονάδων μέτρησης ενισχύει την αξιοπιστία, επιτρέποντας διασταύρωση και επαλήθευση των μετρήσεων από διαφορετικά σημεία βάθους.

Οι αισθητήρες SHT31 είναι αισθητήρες αέρα, γεγονός που σημαίνει ότι μετρούν τις περιβαλλοντικές παραμέτρους (θερμοκρασία και σχετική υγρασία) αποκλειστικά μέσω της

αέριας φάσης. Για τον σκοπό αυτό, οι δύο αισθητήρες SHT31, καθώς και ο νέος αισθητήρας CO₂, τοποθετούνται εσωτερικά στο Stick, εντός προστατευμένου χώρου, όπου επικοινωνούν με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω μικρών πλευρικών οπών, διαμέτρου 1,5 mm, που διαμορφώνονται στο σώμα της διάταξης. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει την αξιόπιστη κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό, χωρίς έκθεση των αισθητηρίων σε εξωτερικούς ρύπους.

Για την αποτροπή εισροής υγρών, λάσπης ή σωματιδίων, οι οπές καλύπτονται εσωτερικά με μικροπλέγμα σίτας (mesh filter), το οποίο επιτρέπει τη διέλευση αέρα, αλλά λειτουργεί ως φράγμα έναντι υγρών και στερεών. Με αυτόν τον τρόπο, όχι μόνο διασφαλίζεται η ορθή λειτουργία των αισθητήρων αέρα, αλλά επιτυγχάνεται και η μηχανική και περιβαλλοντική προστασία των ίδιων των αισθητηρίων μονάδων, οι οποίες παραμένουν απομονωμένες από υγρασία και πιθανή φυσική φθορά. Συνολικά, η αρχιτεκτονική αυτή ενισχύει σημαντικά τη μακροχρόνια αξιοπιστία και σταθερότητα της διάταξης σε εφαρμογές πεδίου.

4.3.2 Αντικατάσταση Αισθητήρα CO₂ με IR11BR

Ο αρχικός αισθητήρας μέτρησης διοξειδίου του άνθρακα που ενσωματώθηκε στη διάταξη Stick παρείχε ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλές και μεσαίες συγκεντρώσεις, όμως εμφάνισε έναν σημαντικό περιορισμό: άνω φράγμα στα 50.000 ppm (5% CO₂). Κατά τη χρήση σε εφαρμογές κομποστοποίησης, η συγκέντρωση CO₂ μπορεί να υπερβεί αυτό το όριο, ειδικά κατά τις θερμοφίλες φάσεις, όπου η μικροβιακή δραστηριότητα είναι ιδιαίτερα έντονη.

Η ύπαρξη ανώτατου ορίου δημιουργεί το φαινόμενο κορεσμού, δηλαδή οι πραγματικές τιμές να μην αποτυπώνονται με ακρίβεια, με αποτέλεσμα τα δεδομένα να καθίστανται αμφίβολης αξιοπιστίας. Το πρόβλημα αυτό εντείνεται από το γεγονός ότι η διάταξη λειτουργεί μέσα σε σχετικά κλειστό περιβάλλον (χουμόχωμα), όπου η συγκέντρωση CO₂ συσσωρεύεται και δεν διαχέεται εύκολα.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, προτείνεται η αντικατάσταση του αρχικού αισθητήρα με τον IR11BR, έναν αισθητήρα CO₂ βασισμένο στην τεχνολογία NDIR (Non-Dispersive Infrared). Ο IR11BR έχει τη δυνατότητα μέτρησης συγκεντρώσεων έως και 1.000.000 ppm (100%), καλύπτοντας με ασφάλεια ακόμη και τις πιο απαιτητικές φάσεις της κομποστοποίησης.



Σχήμα 4.2: Αισθητήρας CO₂ IR11BR [113]

Ο IR11BR είναι αισθητήρας υπέρυθρων μη-διασποράς (NDIR), που βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα μόρια του CO₂ σε συγκεκριμένο μήκος κύματος (~4.26 μm). Το σήμα απορρόφησης μετατρέπεται σε αναλογική έξοδο, η οποία μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία από κατάλληλο μικροελεγκτή. Επιπροσθέτως, ο συγκεκριμένος αισθητήρας παρέχει γρήγορη απόκριση, χαμηλό χρόνο σταθεροποίησης, και μπορεί να λειτουργεί σε απαιτητικά περιβάλλοντα όπου η συγκέντρωση του CO₂ ενδέχεται να μεταβάλλεται σημαντικά.

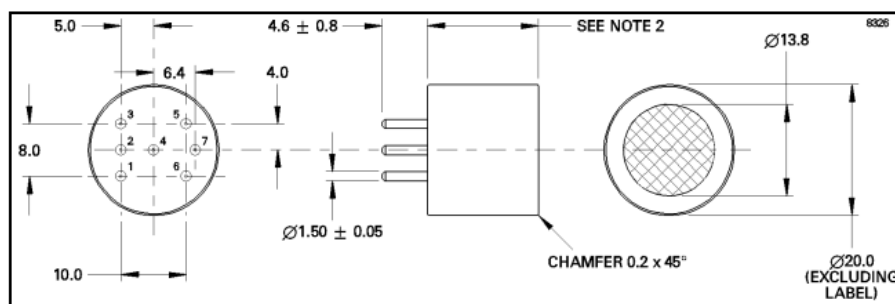
Τα τυπικά χαρακτηριστικά του IR11BR είναι :

Πίνακας 4.2: Πίνακας χαρακτηριστικών IR11BR. [114]

Παράμετρος	Τιμή
Τύπος αισθητήρα	Υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR)
Ανιχνευόμενο αέριο	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)
Εύρος μέτρησης	0% έως 100% (0–1.000.000 ppm)
Τάση τροφοδοσίας	3V έως 5V
Ισχύς κατανάλωσης	180 mW (στα 5V)
Θερμοκρασία λειτουργίας	–20°C έως +55°C
Μέγιστος χρόνος απόκρισης	20 δευτερόλεπτα
Τάση πηγής τροφοδοσίας υπέρυθρων	+5V, 60 mA (τετραγωνικός παλμός 4 kHz, 50% duty cycle)

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του IR11BR είναι οι συμπαγείς διαστάσεις του, και συγκεκριμένα το μικρό μήκος του σώματος, που επιτρέπει τη χρήση λεπτότερου σωλήνα εισαγωγής (μικρότερης διαμέτρου). Η κατασκευαστική αυτή λεπτομέρεια διευκολύνει σημαντικά την εισχώρηση του Stick στο χουμόχωμα και σε άλλα παρόμοια υποστρώματα, χωρίς να απαιτείται υπερβολική δύναμη ή να προκαλείται καταστροφή του περιβάλλοντος μέσου. Με αυτόν τον τρόπο, βελτιώνεται η ευκολία εγκατάστασης στο πεδίο, καθώς και η δομική ακεραιότητα του αισθητηρίου χώρου, διατηρώντας ταυτόχρονα την ακρίβεια της μέτρησης. Οι διαστάσεις του παραπάνω αισθητηρίου φαίνονται στο στιγμιότυπο οθόνης που ακολουθεί :

7-Pin Devices (See Configuration Table)



Σχήμα 4.3: Διαστάσεις IR11BR [115]

Ο αισθητήρας IR11BR προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Ευρύτερη κλίμακα μέτρησης, κατάλληλη για αναλυτικές μετρήσεις σε εφαρμογές κομποστοποίησης.
- Βελτιωμένη σταθερότητα σε συνθήκες υγρασίας.
- Χαμηλότερη ευαισθησία σε παρεμβολές από άλλα αέρια, λόγω του επιλεγμένου φάσματος απορρόφησης υπερύθρων.

Η τοποθέτηση του IR11BR εντός προστατευμένου θαλάμου στη ράβδο (με είσοδο αέρα αλλά χωρίς άμεση επαφή με το χουμόχωμα) επιτρέπει την ακριβή μέτρηση των αερίων, χωρίς να θυσιάζεται η ανθεκτικότητα του αισθητήρα ή η στεγανότητα της διάταξης. Παράλληλα, η χρήση εσωτερικού φίλτρου ή ενσωματωμένου καναλιού αέρα μπορεί να ενισχύσει την ποιότητα των μετρήσεων σε περιβάλλον υψηλής σκόνης ή υγρασίας.

Συνολικά, η ενσωμάτωση του IR11BR προσδίδει σημαντική αξιοπιστία και ευελιξία στη μέτρηση CO₂, διασφαλίζοντας ότι το Stick θα μπορεί να λειτουργεί σε όλο το φάσμα συγκεντρώσεων που παρατηρούνται στην πράξη, χωρίς να κορεστεί ή να αποτύχει στη συλλογή κρίσιμων δεδομένων.

4.3.3 Αντικατάσταση υλικού κατασκευής με ανοξείδωτο χάλυβα

Στην αρχική κατασκευή του Stick, ο κύριος κορμός και το εξωτερικό περίβλημα είχαν υλοποιηθεί από πλαστικό υλικό, κυρίως για λόγους χαμηλού κόστους και ευκολίας επεξεργασίας. Ωστόσο, η χρήση της διάταξης σε εξωτερικό περιβάλλον και σε απαιτητικές γεωργικές συνθήκες ανέδειξε βασικούς περιορισμούς της συγκεκριμένης επιλογής. Η μακροχρόνια έκθεση σε υγρασία, μηχανικές καταπονήσεις, θερμικά σοκ και ηλιοφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε:

- Φθορά ή παραμόρφωση του πλαστικού σώματος,
- Απώλεια στεγανότητας στο enclosure,
- Ρωγμές ή αδυναμία επανειλημμένων εισαγωγών στο έδαφος χωρίς φθορά.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, προτείνεται η αντικατάσταση του πλαστικού σώματος με ανοξείδωτο χάλυβα, τόσο για το κεντρικό Stick όσο και για το περίβλημα των ηλεκτρονικών. Η χρήση ανοξείδωτου χάλυβα προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Υψηλή μηχανική αντοχή σε κρούσεις, λυγισμούς και φθορές,
- Ανθεκτικότητα στη διάβρωση, ακόμη και σε εδάφη με αυξημένη υγρασία ή οργανικά κατάλοιπα,
- Διατήρηση στεγανότητας σε βάθος χρόνου και μετά από πολλαπλές επανατοποθετήσεις,
- Μηχανική σταθερότητα, που επιτρέπει την αξιόπιστη στήριξη εσωτερικών υποσυστημάτων (αισθητήρες, καλωδιώσεις κ.λπ.).

Παρά την αυξημένη πυκνότητα του υλικού, η επιλογή κατάλληλου κράματος και λεπτού πάχους σωλήνα εξασφαλίζει ότι η συνολική κατασκευή παραμένει ελαφριά, διατηρώντας την εργονομία και την ευχρηστία της συσκευής.

Ακόμη, η χρήση ανοξείδωτου μετάλλου για την εξωτερική θήκη των ηλεκτρονικών ενισχύει επίσης τη θωράκιση από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, βελτιώνοντας την ποιότητα των μετρήσεων και την ασφάλεια λειτουργίας.

Συνολικά, η υιοθέτηση ανοξείδωτου χάλυβα αποτελεί ποιοτική και δομική αναβάθμιση της συσκευής, εξασφαλίζοντας τη λειτουργικότητά της σε δύσκολα πεδία και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, χωρίς συντήρηση ή αντικατάσταση.

4.3.4 Ενσωμάτωση Θύρας USB για απλοποιημένη φόρτιση

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.4, η αρχική διαδικασία φόρτισης απαιτούσε αποσυναρμολόγηση του περιβλήματος και σύνδεση της μπαταρίας σε εξωτερικό φορτιστή, γεγονός που δυσχέραινε την εργονομία, τη συντήρηση και την ανθεκτικότητα της συσκευής σε συνθήκες πεδίου. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προτείνεται η τοποθέτηση θύρας USB-C στο εξωτερικό περίβλημα, επιτρέποντας απευθείας φόρτιση της ενσωματωμένης μπαταρίας χωρίς μηχανική παρέμβαση.

Η θύρα συνδέεται σε κλασικό κύκλωμα φόρτισης μπαταριών Li-ion / Li-Po (π.χ. ελεγκτής TP4056 ή ισοδύναμος) με καμπύλη CC/CV και ενσωματωμένες προστασίες υπερφόρτισης, βαθιάς εκφόρτισης και βραχυκυκλώματος. Με τον τρόπο αυτόν η μπαταρία φορτίζεται με ασφάλεια, χωρίς ανάγκη πρόσθετου εξοπλισμού ή τεχνικής επέμβασης από τον χρήστη.

Η θύρα τοποθετείται στο άνω τμήμα του enclosure, προστατευμένη από σκόνη και υγρασία. Χρησιμοποιείται στεγανό καπάκι με ελαστικό παρέμβυσμα (O-ring) ώστε να διατηρείται βαθμός προστασίας IP65 ή υψηλότερος, ενώ ενδεικτικά LED («charging» / «fully charged») διευκολύνουν την οπτική παρακολούθηση της διαδικασίας. Επιπλέον, προβλέπεται διακόπτης τριών θέσεων (OFF / CHARGE / RUN):

- Θέση 0 (OFF) – όλο το σύστημα απενεργοποιημένο.
- Θέση 1 (CHARGE) – απομονώνονται ESP32 και αισθητήρες· παραμένει ενεργό μόνο το κύκλωμα φόρτισης, ώστε η μπαταρία να φορτίζεται με ασφάλεια μέσω USB-C χωρίς άνοιγμα του περιβλήματος.
- Θέση 2 (RUN) – το κύκλωμα φόρτισης αποκόπτεται και τροφοδοτείται ο ESP32 με τους αισθητήρες αποκλειστικά από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία.

Η αρχιτεκτονική αυτή ενισχύει τη διαχείριση ενέργειας, αυξάνει την ασφάλεια και παρέχει επιχειρησιακή ευελιξία, ειδικά σε μακροχρόνιες υπαίθριες εφαρμογές όπου η συντήρηση πρέπει να ελαχιστοποιείται. Επιπλέον, η USB-C διασφαλίζει διαλειτουργικότητα με κοινές πηγές ισχύος (USB φορτιστές, power banks, φορητούς υπολογιστές) και μπορεί στο μέλλον να υποστηρίξει USB-passthrough για ταυτόχρονη φόρτιση και τροφοδοσία κατά τη λειτουργία, όταν απαιτείται αυξημένη ενεργειακή ζήτηση (π.χ. χρήση Wi-Fi).

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση USB-C και ο τριθέσιος διακόπτης αυξάνουν σημαντικά τη λειτουργικότητα, την ασφάλεια και την αυτονομία της διάταξης, καθιστώντας την κατάλληλη για μακροχρόνια αξιόπιστη χρήση σε αγροτικά ή ερευνητικά περιβάλλοντα πεδίου.

4.4 Συγκριτική Αξιολόγηση Αρχικού και Αναβαθμισμένου Σχεδιασμού

Μετά την αναλυτική παρουσίαση των περιορισμών της αρχικής κατασκευής (ενότητα 4.2) και των προτεινόμενων τεχνολογικών βελτιώσεων (ενότητα 4.3), κρίνεται σκόπιμη μία συγκριτική αποτίμηση των δύο εκδόσεων της διάταξης. Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τις βασικές διαφοροποιήσεις, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λειτουργικότητας:

Πίνακας 4.3: Συγκριτικός πίνακας αρχικού και αναβαθμισμένου Stick.

Παράμετρος	Αρχικός Σχεδιασμός	Αναβαθμισμένος Σχεδιασμός	Σχόλιο Βελτίωσης
Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας	DS18B20 (T), SEN0308 (RH), ανεξάρτητοι	2× SHT31 (T+RH), αδιάβροχοι, συνδυασμένοι	Ενοποιημένη μέτρηση, μεγαλύτερη ακρίβεια, τοποθέτηση σε διαφορετικά ύψη
Αισθητήρας CO ₂	SEN0220, όριο ~50.000 ppm	IR11BR, έως 1.000.000 ppm (100%)	Αντιμετώπιση κορεσμού, αξιόπιστη λειτουργία σε θερμοφίλες φάσεις
Υλικό περιβλήματος και stick	Πλαστικό (ABS/PLA)	Ανοξείδωτος χάλυβας	Αυξημένη μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα σε διάβρωση, IP προστασία
Μέθοδος φόρτισης	Εξωτερικός φορτιστής, απαιτεί αποσυναρμολόγηση	Θύρα USB-C με κύκλωμα φόρτισης	Plug-and-charge, εργονομία, δυνατότητα χρήσης ηλιακής πηγής
Κατανάλωση ενέργειας (ESP32)	Υψηλή κατά τη χρήση Wi-Fi, χωρίς πρόβλεψη	Συμβατότητα με ενσωματωμένη φόρτιση	Ενεργειακή ευελιξία και υποστήριξη συνεχούς λειτουργίας
Εργονομία και συντηρησιμότητα	Περιορισμένη, απαιτεί τεχνική παρέμβαση	Ενισχυμένη, χωρίς άνοιγμα ή αποσύνδεση εξαρτημάτων	Μείωση κινδύνων, ευχρηστία σε πεδία

Η σύγκριση καταδεικνύει ότι η αναβαθμισμένη έκδοση της διάταξης επιτυγχάνει σημαντικές βελτιώσεις σε όλους τους κρίσιμους τομείς, όπως ακρίβεια μετρήσεων, μηχανική αντοχή, ενεργειακή απόδοση και εργονομία. Επιπλέον, οι επιλογές σχεδιασμού έχουν λάβει υπόψη τις συνθήκες πεδίου, καθιστώντας τη νέα έκδοση περισσότερο αξιόπιστη, αυτόνομη και εύχρηστη για μακροχρόνια παρακολούθηση της κομποστοποίησης σε πραγματικές γεωργικές εφαρμογές.

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μελέτη, κατασκευή και τεχνική βελτιστοποίηση μιας ενσύρματης, αισθητηριακής διάταξης μέτρησης παραμέτρων κομποστοποίησης τύπου “Stick”. Η διάταξη σχεδιάστηκε για να λειτουργεί σε αγροτικά ή πειραματικά περιβάλλοντα, καταγράφοντας βασικές φυσικοχημικές μεταβλητές, όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία και συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, σε πραγματικές συνθήκες εντός χουμοχώματος.

Η αρχική έκδοση της διάταξης απέδειξε την κατασκευαστική αρτιότητα της προσέγγισης, ωστόσο κατά τη φάση δοκιμών πεδίου αναδείχθηκαν περιορισμοί που σχετίζονταν με:

- την ανθεκτικότητα των αισθητήρων σε υγρασία και θερμική καταπόνηση,
- τον κορεσμό του αισθητήρα CO₂ σε υψηλές συγκεντρώσεις,
- τη μη εργονομική διαδικασία φόρτισης,
- και τη φθορά του πλαστικού σώματος μετά από επαναλαμβανόμενη χρήση.

Η τεχνική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε οδήγησε στη διατύπωση ενός νέου, αναβαθμισμένου σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός αυτός περιλαμβάνει την αντικατάσταση των ανεξάρτητων αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας με δύο αδιάβροχους αισθητήρες SHT31, ικανούς να προσφέρουν συνδυασμένη μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία σε διαφορετικά βάθη. Ο αισθητήρας CO₂ προτείνεται να αντικατασταθεί με τον υπέρυθρο αισθητήρα IR11BR, επιλύοντας το πρόβλημα του κορεσμού και διευρύνοντας το μετρούμενο φάσμα έως και 100% συγκέντρωση. Η αλλαγή του υλικού κατασκευής από πλαστικό σε ανοξείδωτο χάλυβα θα ενισχύει τη μηχανική σταθερότητα και την ανθεκτικότητα της διάταξης σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση θύρας USB-C θα επιτρέψει την εργονομική και άμεση φόρτιση της μπαταρίας, καθιστώντας τη συσκευή περισσότερο φιλική για καθημερινή χρήση στο πεδίο.

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή δεν περιορίστηκε στη δημιουργία μιας λειτουργικής συσκευής, αλλά ανέπτυξε ένα πλήρες τεχνικό πλαίσιο σχεδιαστικής εξέλιξης, που αξιοποιεί πρακτικά δεδομένα πεδίου για τη βελτίωση της τεχνολογικής αξιοπιστίας. Η τελική μορφή της διάταξης καθιστά το Stick ικανό να λειτουργήσει ως ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη μακροχρόνια παρακολούθηση διεργασιών κομποστοποίησης, ενσωματώνοντας στοιχεία ευφυούς γεωργίας και αυτόνομων αισθητηριακών συστημάτων.

Μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη miniaturization της διάταξης, την ενσωμάτωση ηλιακής τροφοδοσίας, τη χρήση πρωτοκόλλων χαμηλής κατανάλωσης (LoRa, ZigBee) και την αποστολή δεδομένων σε απομακρυσμένες πλατφόρμες cloud μέσω IoT υποδομών.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Gomstyn και A. Jonker, «What is smart farming?», IBM, 10 Decmber 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/smart-farming>.
- [2] J. A. Brenes και G. Marin-Ravantos, «Scalable Technological Architecture Empowers Small-Scale Smart Farming Solutions,» Communication of the ACM, 17 July 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cacm.acm.org/latin-america-regional-special-section/scalable-technological-architecture-empowers-small-scale-smart-farming-solutions/>.
- [3] S. Miller, «A brief history of Farming in Orwell,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.orwellparishcouncil.co.uk/history/early-history-landscape/early-history/a-brief-history-of-farming-in-orwell/>.
- [4] BharatAgritech, «The Future of Precision Farming: The Role of AI and Data Analytics,» Agri Tech, 28 September 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://bharatagritech.org/how-ai-and-data-analytics-are-shaping-the-future-of-precision-agriculture/>.
- [5] «Smart Farming A Brief History,» Valtra, 19 October 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.valtra.com/blog/technology/smart-farming-a-brief-history.html>.
- [6] S. T. Group, «Precision Farming Market Driving Agricultural Efficiency with Smart Technologies,» openPR, 12 February 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.openpr.com/news/3766884/precision-farming-market-driving-agricultural-efficiency-with>.
- [7] T. A. Jeppesen, «The Danish FDI regulation at a glance,» EY, 15 June 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ey.com/en_dk/insights/law/the-danish-fdi-regulation-at-a-glance.
- [8] K. Ersek, «Humus: Why Is Humus Important? How Do You Increase Soil Humus Content?,» HOLGANIX, 9 March 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.holganix.com/blog/humus-why-is-humus-important-how-do-you-increase-soil-humus-content>.
- [9] O. Cor, «The role of microorganisms in the creation of humus,» k.center, 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://kcenter.lallemandplantcare.com/en/canada/know-your-basics/microorganisms-role-in-humus/>.
- [10] S. Hamelman, «How Do I Compost Duck Waste?,» The Happy Chicken Coop, 15 August 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thehappychickencoop.com/how-do-i-compost-duck-waste/>.
- [11] «Approaches to Composting,» EPA-United States Environmental Protection Agency, 17 January 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.epa.gov/sustainable-management-food/approaches-composting>.
- [12] T. T. K. Ho, «Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity,» December 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016422000330>.
- [13] «Carbon Dioxide,» NASA, March 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>.
- [14] D. E. Comings, «Global Warming is Real,» 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thecomingsfoundation.org/styled-10/page10.html>.

- [15] «Composition of the atmosphere,» madur, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.madur.com/pdf/tools/en/Composition_of_the_atmosphere_en.pdf.
- [16] «Carbon Dioxide Levels Chart,» CO2METER, 3 February 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.co2meter.com/blogs/news/carbon-dioxide-indoor-levels-chart?srsId=AfmBOorzVLaoOKKRpr_eAfBG7diz6D8W97NBNLw6gvJujg5YrxrcEMLI.
- [17] Veerle, «Air quality CO2 PPM's,» 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://veerle.duoh.com/sidenotes/air-quality-co2-ppms>.
- [18] K. B. Hille, «NASA Study: Rising Carbon Dioxide Levels Will Help and Hurt Crops,» NASA, 3 May 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nasa.gov/technology/nasa-study-rising-carbon-dioxide-levels-will-help-and-hurt-crops/>.
- [19] A. Sneed, «Ask the Experts: Does Rising CO2 Benefit Plants?,» SCI AM, 23 January 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/ask-the-experts-does-rising-co2-benefit-plants1/>.
- [20] K. J. Walters και R. G. Lopez, «Controlled environment agriculture carbon dioxide injection,» Produce Grower, 25 March 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.producegrower.com/article/controlled-environment-agriculture-cea-carbon-dioxide-injection/>.
- [21] «Sensor,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor>.
- [22] «Design of Smart Medical Mirror using Raspberry Pi,» *Journal of Physics: Conference Series*, p. 15, 2023.
- [23] V. Thonti, «Different Types of Sensors and their Working,» Circuit Digest, 9 April 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://circuitdigest.com/tutorial/different-types-of-sensors-and-their-working>.
- [24] WatElectronics, «What is Potentiometer : Working & Its Applications,» WatElectronics, 5 April 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.watelectronics.com/potentiometer/>.
- [25] «General Properties and Characteristics of Sensors,» MPS, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/sensors/intro-to-sensors/general-properties-characteristics?srsId=AfmBOoqvG72zNhnfXUD7R_2kqpHg5jT_WDJTgAzxlqWHqKH4MEpo-CT.
- [26] Κ. Τσίκνας, «Χαρακτηριστικά Αισθητήρων,» Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Φυσικής ΠΠΣ Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε Αυτοματοποίηση Αισθητήρων Συστημάτων, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eclass2.emt.duth.gr/modules/document/file.php/ED153/2.%20%CE%94%CE%99%CE%91%CE%9B%CE%95%CE%9E%CE%95%CE%99%CE%A3%20%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%9F%CE%A3/%CE%98%CE%95%CE%A9%CE%A1%CE%97%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%9F%20%CE%9C%CE%95%CE%A1%CE>.
- [27] «A guide to temperature sensor design,» element14, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://sg.element14.com/a-guide-to-temperature-sensor-design>.
- [28] «Temperature Sensors : Types, How it works, & Applications,» Encardio Rite, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.encardio.com/blog/temperature-sensor-probe-types-how-it-works-applications>.

- [29] O. College, «Resistance and Resistivity,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/20-3-resistance-and-resistivity/>.
- [30] TE Connectivity, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.te.com/en/products/sensors/temperature-sensors/resources/understanding-rtds.html>.
- [31] TEMPCO, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.tempco.com/Tempco/Resources/Engineering-Data/RTD-Technical-Data.htm>.
- [32] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pyrosales.com.au/blog/rtds/rtd-fundamentals/>.
- [33] «RTDs - the key to accurate industrial temperature measurements,» PR Electronics, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.prelectronics.com/the-fundamentals-of-rtd-temperature-sensors/>.
- [34] «Thermistos Basics,» Wavelength Elcetronics, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.teamwavelength.com/thermistor-basics/>.
- [35] «Chapter 3 - Resistor Types,» EE Power, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/>.
- [36] «NTC Thermistors Steinhart and Hart Equation,» AMETHERM, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>.
- [37] «Radiofrequency Power Measurement,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://svelto.faculty.polimi.it/didattica/materiale_didattico/materiale%20didattico_MRF/MRF_Power_measurements.pdf.
- [38] «Working principle of thermocouples,» DWYEROMEGA, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/how-thermocouples-work?srsltid=AfmBOorxgAOnbyGhsSQRpnXUjOpbaeaKDsplo50CpwIYo_O_sHbi x4lj.
- [39] D. S. Arar, «Thermocouple Principles—the Seebeck Effect and Seebeck Coefficient,» ALL ABOUT CIRCUITS, 10 July 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/thermocouple-principles-seebeck-effect-seebeck-voltage-seebeck-coefficients/>.
- [40] «Thermocouple Types,» Control and Instrumentation, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.controlandinstrumentation.com/resources/thermocouple-types.html>.
- [41] «How Do Infrared Thermometers Work?,» DWYEROMEGA, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/infrared-thermometer-how-work>.
- [42] J. Jaehyuk, A. Sujin, K. Taewan και J. Wukchul, «Transient Thermal Characteristics of a Heated Infrared Temperature Sensor for Noncontact Medical Thermometry,» *International Journal of Thermophysics* (2022), 14 February 2022.
- [43] R. NAVE, «Relative Humidity,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html>.
- [44] «What is a Humidity Sensor? How They Work, Types, and Applications,» aim dynamics, 2 July 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://aimdynamics.com/humidity-sensor>.

- [45] «Humidity Academy Theory 6 – The Capacitive Sensor,» PST, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.processsensing.com/en-us/blog/capacitive-sensor-technology.htm>.
- [46] K. Nabil, M. R. και I. A., «A Survey on Battery-Less RFID-Based Wireless Sensors,» 1 July 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Survey-on-Battery-Less-RFID-Based-Wireless-Khalid-Mirzavand/dcb951f8b46814577f08d18f59e6057f1eb23b2c>.
- [47] S. O. Stop, «Humidity Sensors: Essential Tools for Monitoring and Control,» Sensor One Stop, 17 July 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://sensor1stop.com/knowledge/humidity-sensors/>.
- [48] C. Geeks, «DHT11 & DHT22 Humidity and Temperature Sensor with Arduino,» Circuit Geeks, 17 March 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.circuitgeeks.com/arduino-dht11-and-dht22-sensor-tutorial/>.
- [49] AKB, «What is Gas Sensors: Working, Types and Applications,» Campus Component, 11 November 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.campuscomponent.com/blogs/post/what-is-gas-sensors-working-types-and-applications?srsId=AfmBOorsG-OemoWnbUb8r85LLXhXFSqQP14MvyndWfRgpIEoefJjWG1>.
- [50] Renkeer, «Gas Sensors Types, Working Principles And Application,» Renke, 18 April 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.renkeer.com/gas-sensors-types-working-principles/>.
- [51] F. Nawazi, «MQ7 Carbon Monoxide (CO) Gas Sensor Module,» Circuits DIY, 18 October 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.circuits-diy.com/mq7-carbon-monoxide-co-gas-sensor-module/>.
- [52] M. A. Basyooni, «Fundamentals and Classification of CO2 Sensors,» σε *Handbook of Nanosensors*, Switzerland, Springer, 2024, p. 36.
- [53] «What is an Electrochemical Cell?,» BYJU's, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://byjus.com/chemistry/electrochemical-cell/>.
- [54] «Does Counter Electrode (CE) matter?,» Metrohm, 16 August 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.metrohm.com/en/discover/blog/20-21/does-counter-electrode--ce--size-matter-.html>.
- [55] «Aranet4 Home Air Quality Monitor,» Aranet4, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://device.report/manual/9161398>.
- [56] S. Ye, «How Gas Analyzer Work ?,» ESE GAS, 9 January 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://esegas.com/how-gas-analyzer-work/>.
- [57] G. Barouch και M. Clairotte, «Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy for Measurements of Vehicle Exhaust Emissions: A Review,» MDPI, 12 August 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7416?type=check_update&version=1.
- [58] I. Farkis, «Soil Sensors: Definition, Types, and Benefits,» Thomas, 3 December 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thomasnet.com/insights/soil-sensors/>.
- [59] «Wireless Leaf & Soil Moisture/Temperature Station - SKU 6345,» Davis, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.davisinstruments.com/products/wireless-leaf-soil-moisture-temperature-station>.
- [60] A. Sensors, «INDOOR FARMING | TEMPERATURE AND HUMIDITY SENSORS IN AGRICULTURE,» Amphenol Advanced Sensors, 15 May 2024.

- [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://blog.amphenol-sensors.com/industrial-blog/temperature-and-humidity-sensors-in-agriculture>.
- [61] «IoT and BIG DATA in Precision Agriculture-Wireless Sensors,» Plantae, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://plantae.garden/en/iot-y-big-data-en-la-agricultura-de-precision/>.
- [62] «Introduction to Internet of Things (IoT) – Set 1,» GeeksforGeeks, 7 March 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-internet-of-things-iot-set-1/>.
- [63] Rajiv, «**IoT - What it Means & Where It Comes into Play**,» Tabnova, 14 November 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.tabnova.com/blog/iot-what-it-means-and-where-it-comes-into-play>.
- [64] «What is the Internet of Things (IoT)?,» IBM, 12 May 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>.
- [65] S. Burge, «What is IoT & Why IoT is Important,» SJUK, 7 August 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://securityjournaluk.com/why-iot-is-important/#Why_IoT_is_Important.
- [66] «Internet of Things (IoT) Market Size & Trends,» GVR, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/iot-market>.
- [67] E. Altulaihan, A. Almaiah και A. Aljughaiman, «Cybersecurity Threats, Countermeasures and Mitigation Techniques on the IoT: Future Research Directions,» MDPI, 16 October 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/364339281_Cybersecurity_Threats_Countermesasures_and_Mitigation_Techniques_on_the_IoT_Future_Research_Directions.
- [68] «IoT Architecture Explained,» MongoDB, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mongodb.com/resources/basics/cloud-explained/iot-architecture>.
- [69] «Architecture of Internet of Things,» GeeksforGeeks, 21 April 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/architecture-of-internet-of-things-iot/>.
- [70] G. Li, «8 IoT Protocols and Standards Worth Exploring in 2024,» MQ, 20 March 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.emqx.com/en/blog/iot-protocols-mqtt-coap-lwm2m>.
- [71] G. Kunal, «Exploring Secure Communication Protocols for IoT Security,» Softobotics, 25 August 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.softobotics.com/blogs/exploring-secure-communication-protocols-for-iot-security/>.
- [72] P. Shevtsov, «How to connect IoT devices to the world,» 2SMART, 19 July 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://2smart.com/docs-resources/articles/how-to-connect-iot-devices-to-the-world>.
- [73] «What is Bluetooth?,» GeeksforGeeks, 26 November 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/bluetooth/>.
- [74] W. Ancheta, «Communicating with Bluetooth Low Energy Devices in Cordova,» sitepoint, 15 November 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sitepoint.com/communicating-with-bluetooth-low-energy-devices-in-cordova/>.
- [75] «Wi-Fi,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>.
- [76] N. Viera και D. Jacobs, «The 4 different types of wireless networks,» TechTarget, 10 March 2025. [Ηλεκτρονικό]. Available:

<https://www.techtarget.com/searchnetworking/tip/The-4-different-types-of-wireless-networks>.

- [77] «Seamless WiFi Services, Hotspots, & Mesh Systems in Long Island,» Wireman Cableman, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.davewireman.com/wifi-services/>.
- [78] «ZigBee - All you need to know,» WATT24, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.watt24.com/en/guide/everything-you-need-to-know-about-zigbee/>.
- [79] «Zigbee,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>.
- [80] C. Cawley, «What Is Zigbee? Is Matter Better?,» matter alpha, 22 May 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.matteralpha.com/explainer/what-is-zigbee-is-matter-better>.
- [81] «Unlocking IoT Success: Discover the 8 Key Features of LoRa Technology,» jooby, 29 June 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://jooby.eu/blog/unlocking-iot-success-discover-the-8-key-features-of-lora-technology/>.
- [82] «LoRa Network: what is it and what are the applications?,» novida, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.novida.com/blog/lora-network/>.
- [83] «Near-Field Communication,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Near-field_communication.
- [84] «NFC – WHAT IS, WHY IS, AND HOW DOES IT WORK?,» finder, 9 June 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.findernet.com/en/usa/news/nfc-what-is-why-is-and-how-does-it-work/>.
- [85] «Embedded Systems,» HEAVY.AI, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.heavy.ai/technical-glossary/embedded-systems>.
- [86] G. Musial, «Embedded systems – examples of application,» Solw'it, 8 December 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solwit.com/en/blog/embedded-systems-examples-of-application/>.
- [87] H. Ashtari, «What Are Embedded Systems? Meaning, Components, and Applications,» spiceworks, 12 October 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.spiceworks.com/tech/tech-general/articles/what-are-embedded-systems/>.
- [88] «IoT Building Blocks: The Foundation of a Connected World,» embedUR, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.embedur.ai/iot-building-blocks/>.
- [89] Discrete, «Embedded System Design: Real Life Examples, Design Process, Types, Applications, Challenges,» Discrete, 6 April 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://discrete.co.in/blog/what-is-embedded-system-design-types-examples>.
- [90] J. Schneider και I. Smalley, «What is a microprocessor?,» IBM, 10 June 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/microprocessor>.
- [91] «How is a Microprocessor Different From an Integrated Circuit,» Lisleapex, 29 February 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.lisleapex.com/blog-how-is-a-microprocessor-different-from-an-integrated-circuit>.
- [92] J. Schneider και I. Smalley, «What is a microcontroller?,» IBM, 4 June 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/microcontroller>.
- [93] Y. Guven, E. Gosgun, S. Kocaoglu, H. Gezici και E. Yilmazlar, «Understanding the Concept of Microcontroller Based Systems ToChoose The Best Hardware For Applications,» ResearchGate, 6 December 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/322436662_Understanding_the_Concept_o

- f_Microcontroller_Based_Systems_To_Choose_The_Best_Hardware_For_Applicati
ons.
- [94] «Embedded Programming,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://fabacademy.org/2022/labs/vigyanashram/students/vrushabh-zunjurkar/week8.html>.
 - [95] ESPRESSIF, «ESP32 Series Datasheet,» ESPRESSIF, [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
 - [96] «Getting Started with the ESP32 Development Board,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://randomnerdtutorials.com/getting-started-with-esp32/>.
 - [97] «ESP32-S2 PROCESSOR DATASHEET RELEASED, DEVELOPMENT BOARDS UNVEILED,» electronics-lab, 12 September 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.electronics-lab.com/esp32-s2-processor-datasheet-released-development-boards-unveiled/>.
 - [98] «ESP32 Pinout Reference,» Last Minute Engineers, [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://lastminuteengineers.com/esp32-pinout-reference/>.
 - [99] Nick, «The ESP32 Chip explained: Advantages and Applications,» DEEPSEA, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.deepseadev.com/en/blog/esp32-chip-explained-and-advantages/>.
 - [100] DFRobot, «FireBeetle ESP32 IoT Microcontroller with 250+ ESP32 Tutorials (Supports Wi-Fi & Bluetooth),» DFRobot, [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.dfrobot.com/product-1590.html?srltid=AfmBOopyzdPC2pZsiURbydF91Al5RwsaYkiLJ0Xn_T9PiP63Ao3OXTz4.
 - [101] Grobotronics, «FireBeetle ESP32 IoT Microcontroller,» Grobotronics, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://grobotronics.com/firebeetle-esp32-iot-microcontroller.html?sl=en&srltid=AfmBOood9Q-9qIrAvMGDehs5sdlnV1kFy7l9jHXrxQKdw_Js175bEecB.
 - [102] «FireBeetle ESP32 IOT Microcontroller,» SIGMAELECTRONICA, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sigmaelectronica.net/wp-content/uploads/2018/08/arduino-DFR0478.pdf>.
 - [103] «Tips for FireBeetle ESP32 (DFR0478) Circuit Design,» Arduino, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://forum.arduino.cc/uploads/short-url/dKIHDxmkeP3QJUQTWcYXbcAziC.PDF>.
 - [104] Grobotronics, «Waterproof Temperature Sensor - DS18B20,» Grobotronics. [Ηλεκτρονικό].
 - [105] R. Components, «DFRobot Gravity: Analog Waterproof Capacitive Soil Moisture Sensor Sensor Board for Analog Waterproof Soil Moisture,» RS Components, [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://gr.rsdelivers.com/en/product/dfrobot/sen0308/dfrobot-gravity-analog-waterproof-capacitive-soil/2049905?gad_source=1&gad_campaignid=20591810100&gbraid=0AAAAAD0AVchtpSuqm_TnUkVrfjePi87db&gclid=Cj0KCQjwjdTcBhCLARIsAEu8bpKs4a7kFQgx1O55Yh93P1OxQM4rSxwx.
 - [106] DFRobot, «Waterproof Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0308,» DFRobot, [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://wiki.dfrobot.com/Waterproof_Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0308.

- [107] DFROBOT, «Infrared CO2 Sensor 0-50000ppm SKU SEN0220,» DFROBOT, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Infrared_CO2_Sensor_0-50000ppm_SKU__SEN0220.
- [108] Grobotronics, «Gravity UART Infrared CO2 Sensor (0-50000ppm),» Grobotronics, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://grobotronics.com/gravity-uart-infrared-co2-sensor-0-50000ppm.html>.
- [109] Grobotronics, «Polymer Lithium Ion Battery - 3.7v 2500mAh - JST PH,» Grobotronics, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://grobotronics.com/polymer-lithium-ion-battery-3.7v-2500mah-jst-ph.html?srsId=AfmBOoqJQ1tvX-597XhzcFp6zkgSHA68en9AgmDYyocDCNLRws_DUGD2.
- [110] Waveshare, «1.3inch OLED (B),» Waveshare, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.waveshare.com/wiki/1.3inch_OLED_\(B\)](https://www.waveshare.com/wiki/1.3inch_OLED_(B)).
- [111] Grobotronics, «Outdoor Temperature & Humidity Sensor SHT31,» Grobotronics, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://grobotronics.com/outdoor-temperature-and-humidity-sensor-sht31.html?sl=en&srsId=AfmBOorprzUUVw78Et1QqUBSVWABMhCB3lARCqSLp-n8BrhVJbWbynTe>.
- [112] DFRobot, «SHT31 Weather-proof Temperature & Humidity Sensor Wiki - DFRobot,» DFRobot, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://wiki.dfrobot.com/SHT31_Temperature_Humidity_Sensor_Weatherproof_SKU_SEN0385.
- [113] RS, «Amphenol SGX Sensortech IR11BR Sensor, 19mm, 100% volume CO2 Infrared Gas Sensor,» RS, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ex-en.rs-online.com/product/amphenol-sgx-sensortech/ir11br/72213918/>.
- [114] S. Sensortech, «IR1 Single Gas Series Datasheet,» 28 September 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://assets.alliedelec.com/image/upload/v1608116859/Datasheets/507aa3179ed8be83a33a6d78934cc51e.pdf>.
- [115] S. SENSORTECH, «IR1 Single Gas Series Datasheet,» SGX SENSORTECH, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sgxensortech.com/content/uploads/2014/07/DS-0247-IR1-Single-Gas-Series-Datasheet-V2.pdf>.
- [116] R. Mischianti, «ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs,» 21 February 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://mischianti.org/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/>.
- [117] Mindiamart, «WeMos LOLIN32 V1.0.0 Based On ESP32 Rev1 Wifi Bluetooth Board, For Automobile Industry,» Mindiamart, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/wemos-lolin32-v1-0-0-based-on-esp32-rev1-wifi-bluetooth-board-2851882933212.html>.

