

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη ασύρματου συστήματος μετρήσεων για τον έλεγχο  
θερμοκηπίων



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Καθηγητής Ευτύχιος Κουτρούλης, Σχολή ΗΜΜΥ

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ:

Καθηγητής Σωτήριος Ιωαννίδης, Σχολή ΗΜΜΥ

Καθηγητής Σπυρίδων Παπαευθυμίου, Σχολή ΜΠΔ

Χανιά, 2025



## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία και δοκιμή ενός ασύρματου συστήματος ελέγχου των συνθηκών σε θερμοκήπια, με στόχο τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την αξιόπιστη συλλογή μετρήσεων. Αρχικά, εξετάστηκαν ποικίλοι αισθητήρες για να καλυφθούν όλες οι αναγκαίες παράμετροι, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, τόσο στον αέρα όσο και στο έδαφος, η ατμοσφαιρική πίεση, η φωτεινότητα, η υπεριώδης ακτινοβολία, και η συγκέντρωση TVOCs και CO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια, εξετάστηκαν διάφορες πλατφόρμες μικροελεγκτών με γνώμονα την κατανάλωση ενέργειας, την πολυπλοκότητα και την εμβέλεια επικοινωνίας. Βάσει αυτού, σταδιακά αναπτύχθηκαν διάφορες εκδόσεις κόμβων, με τελική λύση, έναν κόμβο που βασίζεται στον μικροελεγκτή CC1310 της Texas Instruments, ο οποίος προσφέρει αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις, σε συνδυασμό με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η ανάπτυξη διαδοχικών εκδόσεων του κόμβου, οδήγησε στην αναβάθμιση του συστήματος και την ενσωμάτωση τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας. Οι κόμβοι επικοινωνούν σε συχνότητα 868 MHz και στέλνουν τα δεδομένα τους σε έναν κεντρικό σταθμό βάσης, ο οποίος με τη σειρά του τα προωθεί σε ένα Raspberry Pi για την αποθήκευση τους σε μια βάση SQLite και την οπτικοποίηση τους με χρήση της πλατφόρμας Grafana. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, ο χρήστης μπορεί να βλέπει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να τα επεξεργάζεται στο μέλλον για περαιτέρω ανάλυση.

Η πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας δοκιμάστηκε στην πράξη, αποδεικνύοντας ότι οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα τροφοδοτούμενοι από μπαταρία. Παράλληλα, σχεδιάστηκε ειδικό σύστημα για περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται ηλιακό πάνελ. Στη μελέτη συμπεριλήφθηκε και ένας μετεωρολογικός σταθμός που καταγράφει εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου), επιτρέποντας τη σύγκριση μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του «εσωτερικού» μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Επίσης, αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε ένας μαγνητικός αισθητήρας για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης των παραθύρων, προκειμένου να καταστεί δυνατή η

καλύτερη ρύθμιση του εξαερισμού. Τα τελικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία των αισθητήρων και την αντοχή του συστήματος στην καθημερινή λειτουργία. Η σύγκριση με τον εξωτερικό μετεωρολογικό σταθμό ανέδειξε τη σημασία που έχει η παράλληλη καταγραφή των συνθηκών μέσα στο θερμοκήπιο και έξω από αυτό, ώστε να γίνεται καλύτερη διαχείριση των συνθηκών και να προκύπτει ένας πιο αποδοτικός προγραμματισμός σε συστήματα εξαερισμού, θέρμανσης ή άρδευσης. Συνολικά, η εργασία επιβεβαιώνει ότι οι ασύρματες τεχνολογίες χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη στη θερμοκηπιακή παραγωγή, αυξάνοντας τόσο την παραγωγικότητα όσο και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών.

# Abstract

The present thesis focuses on the development and testing of a wireless measurement and control system for greenhouse conditions, aiming for ultra low energy consumption and reliable data collection. Initially, a variety of sensors were evaluated to cover essential parameters, including temperature, humidity (both air and soil), atmospheric pressure, light intensity, UV radiation, TVOCs and CO<sub>2</sub> concentration. Various microcontroller platforms were then examined, prioritizing energy efficiency, complexity, and communication range. The final solution features a centralized node system built on the Texas Instruments CC1310 platform which offers reliable low-power wireless networking over long distances.

Successive iterations of nodes led to various system upgrades and the development of significant energy-saving techniques. By communicating at 868 MHz frequency and transmitting data to a central base station, this approach ensures low energy requirements and ease of installation. Data is then forwarded to a Raspberry Pi for storage in a SQLite database and visualization via Grafana, enabling real-time data access and potential for further analysis.

Practical tests demonstrated the system's ability to operate for significant periods of time on battery power. A solar panel-based energy system was also designed for enhanced autonomy. The study also incorporates a weather station which records external conditions (temperature, humidity, rainfall, wind speed and direction) enabling the comparison of external environmental variables with the greenhouse's internal microclimate. Additionally, a magnetic sensor was developed and tested to detect window actuator positions, allowing for accurate ventilation control.

The final results confirmed the reliability of the sensors and the durability of the system in daily operation. Comparisons with the external weather station highlighted the importance of simultaneous external and internal data collection to optimize conditions and improve scheduling for ventilation, heating, and irrigation systems.

Overall, this work confirms that low-cost, low-power wireless technologies can significantly enhance greenhouse production, boosting crop productivity, as well as sustainability.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Λουκάκη για την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η εμπειρία και οι γνώσεις του υπήρξαν καθοριστικές για την εξέλιξη της έρευνάς μου. Επιπλέον, ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Σπύρο Παπαευθυμίου, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα της διπλωματικής μου, καθώς και τον Καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη για την ευρύτερη εποπτεία και υποστήριξή του.

Στη συνέχεια, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και, κυρίως, τους γονείς μου, Παύλο και Ηρώ, καθώς και την αδελφή μου, Άρτεμις, για την αγάπη, την υποστήριξη και τη θετική ενέργεια που μου πρόσφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συμπαράστασή τους στάθηκε πολύτιμη για να παραμείνω προσηλωμένος στους στόχους μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου για τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε στα Χανιά. Η στήριξή τους, ιδίως κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής, ήταν ανεκτίμητη και μου έδινε κουράγιο να προχωρήσω. Ιδιαίτερη μνεία αξίζει και στον Αντιναύαρχο (ε.α.) ΠΝ κ. Κωνσταντίνο Μανιουδάκη, για τις αξέχαστες ιστιοπλοϊκές αναμνήσεις και τις σημαντικές συμβουλές ζωής που μου πρόσφερε.

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Ευχαριστίες .....</b>	<b>7</b>
<b>Περιεχόμενα.....</b>	<b>8</b>
<b>Κατάλογος εικόνων .....</b>	<b>10</b>
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή .....</b>	<b>12</b>
1.1 Πλεονεκτήματα της καλλιέργειας σε θερμοκήπιο .....	12
1.2 Θερμοκηπιακή καλλιέργεια στα Χανιά .....	13
1.3 Περιβαλλοντικές μεταβλητές και επίδραση στην παραγωγή .....	14
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων και Μικροελεγκτών .....</b>	<b>17</b>
2.1 Περιβαλλοντικοί Αισθητήρες .....	17
2.1.1 Maxim DS18B20 .....	17
2.1.2 DFRobot SEN0193 .....	18
2.1.3 Bosch - BME280.....	19
2.1.4 AMS CCS811 .....	20
2.1.5 Silicon Labs SI1145 .....	20
2.1.6 Texas Instruments HDC3022 .....	21
2.1.7 ScioSense ENS 160 .....	22
2.1.8 AMS AS7331 .....	23
2.1.9 AMS TSL25911 .....	24
2.2 Μικροελεγκτές .....	25
2.2.1 Arduino MEGA .....	25
2.2.2 Arduino Pro Mini .....	26
2.2.3 ESP-01 (Espressif ESP8266).....	27
2.2.4 NodeMCU (ESP8266 Development Board) .....	28



2.2.5 Texas Instruments CC1310.....	29
2.2.6 Raspberry Pi 4.....	30
<b>Κεφάλαιο 3º: Ανάπτυξη Συστήματος Συλλογής Δεδομένων.....</b>	<b>32</b>
3.1 Node V1.0 (Arduino Mega) .....	32
3.2 Node V1.1 (Arduino Pro Mini) .....	35
3.3 Node V2.0 (Node MCU).....	39
3.4 Node V3.0 ( CC1310).....	41
3.5 Final Version Node V3.1.....	47
<b>3.5.1 Soil Sensor Board .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5.2 Air Quality Board .....</b>	<b>52</b>
<b>3.5.3 Light Sensors Board.....</b>	<b>54</b>
<b>Κεφάλαιο 4º : Συγκέντρωση, Αποθήκευση και Αναπαράσταση Περιβαλλοντικών Δεδομένων .....</b>	<b>57</b>
4.1 Συγκέντρωση των δεδομένων από τον κεντρικό κόμβο .....	59
4.2 Αποθήκευση των δεδομένων στη βάση δεδομένων.....	62
4.3 Αναπαράσταση των περιβαλλοντικών δεδομένων .....	63
<b>Κεφάλαιο 5º : Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Αυτόνομου Μετεωρολογικού Σταθμού ...</b>	<b>65</b>
<b>Κεφάλαιο 6º: Σχεδιασμός και ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα προσδιορισμού θέσης παραθύρου .....</b>	<b>76</b>
<b>Κεφάλαιο 7º: Παρουσίαση Μετρήσεων και Αποτελεσμάτων .....</b>	<b>79</b>
<b>Κεφάλαιο 7º: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές.....</b>	<b>88</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>91</b>

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Φωτογραφία του θερμοκηπίου πάνω στο οποίο βασίστηκε η εργασία. ....	16
Εικόνα 2. Ο Αισθητήρας DS18B20.....	18
Εικόνα 3.Ο Αισθητήρας SEN0193. ....	19
Εικόνα 4. Ο Αισθητήρας BME280. ....	19
Εικόνα 5. Ο Αισθητήρας CCS811. ....	20
Εικόνα 6. Ο Αισθητήρας SI1145. ....	21
Εικόνα 7. Ο Αισθητήρας HDC3022.....	22
Εικόνα 8. Ο Αισθητήρας ENS160.....	23
Εικόνα 9. Ο Αισθητήρας AS7331. ....	23
Εικόνα 10. Ο Αισθητήρας TSL25911. ....	24
Εικόνα 11. Ο Μικροελεγκτής Arduino MEGA. ....	26
Εικόνα 12. Ο Μικροελεγκτής Arduino Pro Mini. ....	27
Εικόνα 13. Ο Μικροελεγκτής ESP-01. ....	28
Εικόνα 14. Ο Μικροελεγκτής NodeMCU. ....	29
Εικόνα 15. Ο Μικροελεγκτής CC1310.....	30
Εικόνα 16. Ο μικρουπολογιστής Raspberry Pi 4.....	31
Εικόνα 17. Η μορφοποίηση των δεδομένων προς αποστολή.....	33
Εικόνα 18. Η τοπολογία του δικτύου. ....	33
Εικόνα 19. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου. ....	34
Εικόνα 20. Η πρώτη έκδοση του κόμβου. ....	35
Εικόνα 21. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου. ....	37
Εικόνα 22. Η δεύτερη έκδοση του κόμβου. ....	38
Εικόνα 23. Η νέα τοπολογία του δικτύου. ....	39
Εικόνα 24. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου. ....	40
Εικόνα 25. Η τρίτη έκδοση του κόμβου. ....	41
Εικόνα 26. Η νέα τοπολογία του δικτύου. ....	43
Εικόνα 27. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου. ....	44
Εικόνα 28. Η τέταρτη έκδοση του κόμβου. ....	45
Εικόνα 29. Σχηματικό διάγραμμα του Shield. ....	46
Εικόνα 30. Η πλακέτα PCB που σχεδιάστηκε. ....	46
Εικόνα 31. Η τελική τοπολογία του δικτύου. ....	47
Εικόνα 32. Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος μέτρησης υγρασίας εδάφους.....	49
Εικόνα 33. Η λειτουργία του λογισμικού για τον Soil Sensor.....	49
Εικόνα 34. Σχηματικό διάγραμμα του Soil Sensor Board. ....	50
Εικόνα 35. Τριδιάστατη απεικόνιση του Soil Sensor Board.....	51
Εικόνα 36. Τριδιάστατη απεικόνιση του Air Quality Board. ....	52
Εικόνα 37. Σχηματικό διάγραμμα του Air Quality Board. ....	53
Εικόνα 38. Τριδιάστατη απεικόνιση της άνω όψης του Air Quality Board. ....	54
Εικόνα 39. Σχηματικό διάγραμμα του Light Sensors Board.....	55

Εικόνα 40. Τριδιάστατη απεικόνιση της άνω όψης του Light Sensors Board. ....	56
Εικόνα 41. Τριδιάστατη απεικόνιση του Light Sensors Board. ....	56
Εικόνα 42. Η τοπολογία του κεντρικού κόμβου. ....	57
Εικόνα 43. Ο κεντρικός κόμβος. ....	58
Εικόνα 44. Το πακέτο των δεδομένων του κόμβου. ....	59
Εικόνα 45. Η διαδικασία αποστολής των μετρήσεων. ....	60
Εικόνα 46. Η λειτουργία του λογισμικού του κεντρικού κόμβου. ....	61
Εικόνα 47. Η αποθήκευση των μετρήσεων του κόμβου στη βάση δεδομένων. ....	62
Εικόνα 48. Μορφοποίηση των δεδομένων και αποθήκευση στον κατάλληλο πίνακα. ...	63
Εικόνα 49. Ο πίνακας ελέγχου. ....	64
Εικόνα 50. Weather Link Board. ....	66
Εικόνα 51. Η πρώτη έκδοση του μετεωρολογικού σταθμού. ....	67
Εικόνα 52. Ο προσαρμογέας για τους αισθητήρες του μετεωρολογικού σταθμού. ....	68
Εικόνα 53. Αντιστοίχιση των διευθύνσεων του ανέμου στις αναλογικές μετρήσεις. ....	69
Εικόνα 54. Η λειτουργία του λογισμικού του μετεωρολογικού σταθμού. ....	70
Εικόνα 55. Σύνδεση των αισθητήρων του μετεωρολογικού σταθμού με το CC1310. ...	71
Εικόνα 56. Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος φόρτισης της μπαταρίας. ....	73
Εικόνα 57. Τριδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας του μετεωρολογικού σταθμού. ....	74
Εικόνα 58. Τριδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας του μετεωρολογικού σταθμού. ....	74
Εικόνα 59. Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας του μετεωρολογικού σταθμού. ....	75
Εικόνα 60. Παράδειγμα γραμμικού μηχανισμού. ....	76
Εικόνα 61. Διαφορά μαγνητικού πεδίου αξονικού και διαμετρικού μαγνητισμού. ....	77
Εικόνα 62. Η βάση του αισθητήρα (αριστερά) και του μαγνήτη (δεξιά). ....	77
Εικόνα 63. Ο αισθητήρας τοποθετημένος στο μοτέρ. ....	78
Εικόνα 64. Η ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου nA. ....	80
Εικόνα 65. Η δοκιμή για την ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου. ....	81
Εικόνα 66. Οι Μετρήσεις δυο κόμβων στην διάρκεια μια μέρας. ....	82
Εικόνα 67. Οι μετρήσεις του κεντρικού κόμβου στην διάρκεια μιας μέρας. ....	84
Εικόνα 68. Συγκριτικές μετρήσεις στο εσωτερικό και το εξωτερικό του θερμοκηπίου. ....	86

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

Η εφαρμογή των θερμοκηπίων στην αγροτική παραγωγή έχει εδραιωθεί ως μία από τις πλέον αποδοτικές και καινοτόμες πρακτικές, προσφέροντας τη δυνατότητα για συστηματική και ποιοτική καλλιέργεια φυτών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Με τον τρόπο αυτό, οι παραγωγοί απεξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ακραίες ή απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες και καταφέρνουν να διασφαλίσουν σταθερή προσφορά προϊόντων, υποστηρίζοντας έτσι τη βιωσιμότητα και την οικονομική ανάπτυξη του αγροτικού τομέα. Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται αφενός τα πλεονεκτήματα της καλλιέργειας σε θερμοκήπιο, αφετέρου η σημαντική θέση που κατέχει ο Νομός Χανίων στον συγκεκριμένο τομέα, και τέλος οι περιβαλλοντικές παράμετροι που επηρεάζουν αποφασιστικά την απόδοση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών.

## 1.1 Πλεονεκτήματα της καλλιέργειας σε θερμοκήπιο

Η καλλιέργεια σε θερμοκήπιο χαρακτηρίζεται από την ικανότητα ελέγχου πολλών κρίσιμων παραγόντων του περιβάλλοντος, καθιστώντας την ιδιαίτερα ελκυστική για τους παραγωγούς που επιζητούν σταθερή και υψηλής ποιότητας παραγωγή. Πρώτο και κυριότερο πλεονέκτημα είναι η επέκταση της καλλιεργητικής περιόδου σε όλη τη διάρκεια του έτους. Σε αντίθεση με τις υπαίθριες καλλιέργειες, που βασίζονται αποκλειστικά στους ρυθμούς της φύσης και υφίστανται μεγάλες διακυμάνσεις από τις καιρικές συνθήκες, ένα θερμοκήπιο με κατάλληλη θέρμανση και ψύξη μπορεί να διατηρήσει σχεδόν σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, επιτρέποντας την παραγωγή κηπευτικών και άλλων ειδών ακόμα και στους πιο ψυχρούς μήνες. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι αγρότες επωφελούνται από τη συνεχή διάθεση προϊόντων στην αγορά, βελτιώνοντας το ετήσιο εισόδημά τους και μειώνοντας τους κινδύνους που συνδέονται με την εποχικότητα.

Παράλληλα, οι ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού, αερισμού και άρδευσης βελτιστοποιούν την ανάπτυξη των φυτών, οδηγώντας σε υψηλότερη στρεμματική

απόδοση και ομοιομορφία στα προϊόντα. Η κλειστή δομή του θερμοκηπίου δημιουργεί ένα προστατευμένο περιβάλλον, στο οποίο η πιθανότητα εισόδου εντόμων και παθογόνων μικροοργανισμών είναι μικρότερη σε σχέση με την ύπαιθρο. Κατά συνέπεια, μειώνεται η ανάγκη συχνής χρήσης φυτοφαρμάκων, γεγονός που βοηθά στην παραγωγή πιο ασφαλών τροφίμων και στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα εγκατάστασης συστημάτων υδροπονίας, στάγδην άρδευσης και αυτοματοποιημένων δοσομετρικών συστημάτων σε ένα θερμοκήπιο διευκολύνει την αποτελεσματική διαχείριση των φυσικών πόρων, όπως το νερό και τα λιπάσματα.<sup>[1], [3]</sup>

Το βασικό μειονέκτημα εντοπίζεται στο αρχικό κόστος των υποδομών, το οποίο περιλαμβάνει τον μεταλλικό ή πλαστικό σκελετό, τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, και τον εξοπλισμό παρακολούθησης και ελέγχου. Ωστόσο, χάρη στην αυξημένη παραγωγικότητα και την σταθερή απόδοση, οι περισσότερες επενδύσεις θερμοκηπίων οδηγούν σε ταχεία απόσβεση, ειδικά όταν υπάρχει κατάλληλη τεχνογνωσία και υποστήριξη από δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς. Τέλος, τα θερμοκήπια αποτελούν ιδανικό πεδίο εφαρμογής νέων τεχνολογιών (όπως οι αισθητήρες IoT και τα ρομποτικά συστήματα συλλογής) ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την καινοτομία στον πρωτογενή τομέα.

## 1.2 Θερμοκηπιακή καλλιέργεια στα Χανιά

Ο Νομός Χανίων, και η Κρήτη γενικότερα, φημίζονται για τη μακρά παράδοση στην καλλιέργεια κηπευτικών, τόσο υπαίθριων όσο και υπό κάλυψη. Σημαντικό ρόλο σε αυτήν την επιτυχία διαδραματίζει το ήπιο μεσογειακό κλίμα με τη μεγάλη ηλιοφάνεια, που ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις σε θέρμανση κατά τους χειμερινούς μήνες. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία, η συνολική έκταση θερμοκηπίων στην Κρήτη κατατάσσεται στις υψηλότερες της Ελλάδας, με τις καλλιέργειες να επικεντρώνονται κυρίως σε τομάτες, αγγούρια, πιπεριές και κολοκύθια, προϊόντα τα οποία εμφανίζουν υψηλή ζήτηση τόσο στην εσωτερική αγορά, όσο και στις διεθνείς εξαγωγές.

Το γεωγραφικό ανάγλυφο και η ποικιλία των μικροκλιμάτων της δυτικής Κρήτης επιτρέπουν στους παραγωγούς να εκμεταλλεύονται διαφορετικές περιοχές για την ανάπτυξη θερμοκηπίων, μειώνοντας σημαντικά τους κινδύνους από ακραία καιρικά φαινόμενα ή από παράσιτα. Επιπλέον, το εύφορο έδαφος και η ιστορική εξειδίκευση των κατοίκων στη θερμοκηπιακή καλλιέργεια έχουν οδηγήσει στην ύπαρξη ενός καλού δικτύου συνεργατικών δομών και συνεταιρισμών, οι οποίοι παρέχουν τεχνική καθοδήγηση, προώθηση στην αγορά και υποστήριξη για την υιοθέτηση σύγχρονων τεχνολογιών. Με τον τρόπο αυτό, η περιοχή των Χανίων καταφέρνει να συνδυάσει τη διαχρονική αγροτική παράδοση με τα πλεονεκτήματα της καινοτομίας, γεγονός που την καθιστά πόλο έλξης επενδύσεων και αντικείμενο ερευνητικών δράσεων. <sup>[2], [4]</sup>

Η τουριστική κίνηση στα Χανιά, η οποία παραμένει έντονη για μεγάλο μέρος του έτους, δημιουργεί ένα ευνοϊκό περιβάλλον ζήτησης για φρέσκα τοπικά προϊόντα. Συνεπώς, τα θερμοκήπια διαδραματίζουν διττό ρόλο: ικανοποιούν αφενός την αυξημένη ζήτηση των ξενοδοχείων και των επισκεπτών για ποιοτικά, νωπά κηπευτικά, ενώ αφετέρου στηρίζουν την απασχόληση και το εισόδημα των ντόπιων αγροτών, συμβάλλοντας αποφασιστικά στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου σε πολλές αγροτικές περιοχές του Νομού.

### 1.3 Περιβαλλοντικές μεταβλητές και επίδραση στην παραγωγή

Το υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης που χαρακτηρίζει τα σύγχρονα θερμοκήπια δημιουργεί την ανάγκη για συνεχή καταγραφή και ανάλυση βασικών περιβαλλοντικών παραμέτρων, ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία και η υψηλή ποιότητα παραγωγής. Οι παράμετροι που είναι επιθυμητό να καταγράφονται είναι:

- Θερμοκρασία και υγρασία του εδάφους

Αυτές οι δύο παράμετροι αποτελούν τη βάση της σωστής ριζοβολίας και βλάστησης. Εάν η θερμοκρασία στο έδαφος είναι χαμηλή, οι σπόροι δυσκολεύονται να βλαστήσουν, επιβραδύνοντας την ανάπτυξη του φυτού. Από την άλλη, η υπερβολική θερμοκρασία προκαλεί θερμικό στρες. Παρομοίως, η έλλειψη υγρασίας δυσχεραίνει την πρόσληψη νερού από το ριζικό σύστημα, ενώ η υπερβολική

υγρασία οδηγεί σε ασφυκτικές συνθήκες και ανάπτυξη παθογόνων μικροοργανισμών. <sup>[5], [6], [7]</sup>

- Θερμοκρασία και υγρασία του αέρα

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου επηρεάζουν άμεσα τη διαπνοή, τη φωτοσύνθεση και τη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων στα φυτά. Παράλληλα, ρυθμίζουν τη δυναμική των ασθενειών. Υψηλή σχετική υγρασία για μεγάλα χρονικά διαστήματα ευνοεί μυκητολογικές λοιμώξεις, ενώ πολύ ξηρό περιβάλλον εντείνει την απώλεια νερού από τα φύλλα, στρεσάροντας τα φυτά. <sup>[8], [9]</sup>

- Ατμοσφαιρική πίεση

Παρότι δεν παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα εντός του θερμοκηπίου, παρέχει ενδείξεις σχετικά με ενδεχόμενες αλλαγές στον καιρό. Ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή υγρασία, οι απότομες μεταβολές πίεσης μπορεί να επιδεινώσουν τη συσσώρευση υδρατμών και να εντείνουν το φαινόμενο της συμπύκνωσης στα φύλλα. <sup>[8]</sup>

- Πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>)

Οι TVOCs, αν και περιορισμένες στις περισσότερες καλλιέργειες, μπορούν να δώσουν ενδείξεις για χημικούς ρύπους ή ζύμωση οργανικών ουσιών. Το CO<sub>2</sub>, από την άλλη, είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση. Η εμπλουτισμένη ατμόσφαιρα σε CO<sub>2</sub> μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών, αρκεί να διατηρείται σε επίπεδα που δεν θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. <sup>[10], [11]</sup>

- Φωτισμός και υπεριώδης ακτινοβολία (UV)

Η ένταση του φωτός (ambient light) καθορίζει τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών, ενώ η υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσει τη δομή και τη σύσταση των φυτικών ιστών, άλλοτε προς όφελος της ανθεκτικότητάς τους και άλλοτε προκαλώντας βλάβες όταν η έκθεση είναι υπερβολική. Στη σύγχρονη γεωργία

εφαρμόζονται ειδικά υλικά κάλυψης που φιλτράρουν μέρος της UV ακτινοβολίας, ενισχύοντας την προστασία των καλλιεργειών. <sup>[12], [13]</sup>

Η δυνατότητα παρακολούθησης των παραπάνω παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, μέσω ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων προσφέρει πολλαπλά οφέλη: μειώνονται οι απώλειες από ασθένειες, βελτιώνεται η εκμετάλλευση του νερού και των λιπασμάτων, και διευκολύνεται η προσαρμογή των καλλιεργητικών πρακτικών βάσει των ακριβών συνθηκών που επικρατούν. Αυτό το σύστημα παρακολούθησης, που αποτελεί τον κορμό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, λειτουργεί ως εργαλείο λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας την απομακρυσμένη ρύθμιση των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, αερισμού και άρδευσης ενός θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, διασφαλίζεται τόσο η βελτιστοποίηση της παραγωγής, όσο και η αειφορία της γεωργικής δραστηριότητας, προσφέροντας μεγαλύτερη ανταγωνιστικότητα στους παραγωγούς.



*Εικόνα 1. Φωτογραφία του θερμοκηπίου πάνω στο οποίο βασίστηκε η εργασία.*



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αισθητήρων και Μικροελεγκτών

### 2.1 Περιβαλλοντικοί Αισθητήρες

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικοί αισθητήρες που επιλέχθηκαν για την ανάπτυξη του ασύρματου συστήματος μετρήσεων στο θερμοκήπιο. Η διαδικασία επιλογής βασίστηκε στην ανάγκη αξιόπιστης και ακριβούς μέτρησης κρίσιμων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ποιότητα του αέρα, η ένταση φωτός και η υγρασία του εδάφους. Παράλληλα, λήφθηκαν υπόψη η ενεργειακή απόδοση όντας κρίσιμη για ασύρματα συστήματα με τροφοδοσία από μπαταρία, η ευκολία ενσωμάτωσης με δημοφιλείς μικροελεγκτές και η δυνατότητα πολυπαραμετρικών μετρήσεων από ένα μόνο εξάρτημα, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και τον χώρο που απαιτείται. Ακόμα ήταν σημαντική η αξιοπιστία, η αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα (για αισθητήρες εδάφους) και η ανθεκτικότητα στο απαιτητικό περιβάλλον ενός θερμοκηπίου. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούν το θεμέλιο για την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου και αποδοτικού συστήματος ελέγχου των συνθηκών, συμβάλλοντας στην αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση της παραγωγής.

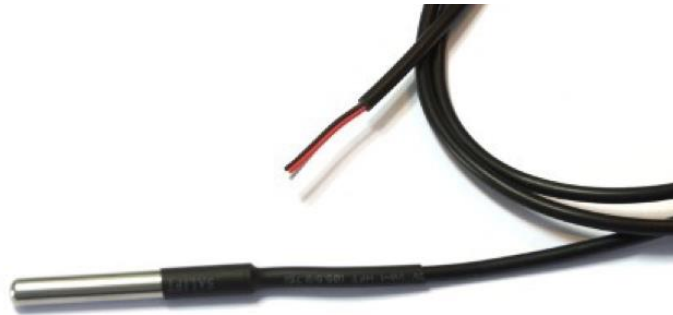
#### 2.1.1 Maxim DS18B20

Ο DS18B20 (Εικόνα 2) είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ευρέως διαδεδομένος, αξιόπιστος και εύκολος στον προγραμματισμό, με ενσωματωμένο μοναδικό σειριακό κωδικό για σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων στην ίδια γραμμή. Σε σχέση με άλλους αισθητήρες θερμοκρασίας της αγοράς, προσφέρει απλή ενσύρματη σύνδεση με λιγότερα καλώδια (χάρη στο 1-Wire πρωτόκολλο), ευκολία ενσωμάτωσης σε ασύρματες πλατφόρμες και σταθερή ακρίβεια. <sup>[14]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενη παράμετρος:** Θερμοκρασία

- **Εύρος μέτρησης:** -55°C έως +125°C
- **Ακρίβεια:**  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  στο εύρος -10°C έως +85°C
- **Τάση λειτουργίας:** 3.0 V έως 5.5 V
- **Διεπαφή:** 1-Wire (ψηφιακή)
- **Ρυθμισιμότητα ανάλυσης:** από 9 έως 12 bits (0.5°C έως 0.0625°C ανά βήμα)
- **Κατανάλωση ρεύματος:** Πολύ χαμηλή (standby current ~750 nA).



*Εικόνα 2. Ο Αισθητήρας DS18B20.*

### 2.1.2 DFRobot SEN0193

Σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες υγρασίας εδάφους, ο SEN0193 (Εικόνα 3) παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της μεγάλης διάρκειας ζωής και της σταθερότητας, καθώς δεν διαβρώνεται εύκολα. Αυτό τον καθιστά καταλληλότερο για συστήματα θερμοκηπίου όπου απαιτείται μακροχρόνια και αξιόπιστη μέτρηση της υγρασίας του υποστρώματος. <sup>[15]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενη παράμετρος:** Υγρασία εδάφους (χωρητική μέτρηση)
- **Εύρος μέτρησης:** 0% έως 100% σχετικής υγρασίας στο έδαφος
- **Τάση λειτουργίας:** 3.3 V έως 5 V
- **Διεπαφή:** Αναλογική έξοδος τάσης
- **Ιδιαιτερότητα:** Χωρητική μέτρηση χωρίς άμεση έκθεση ηλεκτροδίων, αυξημένη αντοχή στη διάβρωση σε σχέση με τους κλασικούς αγωγίμους αισθητήρες εδάφους.



Εικόνα 3. Ο Αισθητήρας SEN0193.

### 2.1.3 Bosch - BME280

Ο BME280 (Εικόνα 4) είναι ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος αισθητήρας πολλαπλών παραμέτρων με αξιόπιστη απόδοση. Σε σύγκριση με ξεχωριστούς αισθητήρες, προσφέρει ολοκληρωμένη λύση μειώνοντας το μέγεθος του κόμβου και την πολυπλοκότητα καλωδίωσης, ενώ διατηρεί υψηλή ακρίβεια και χαμηλή κατανάλωση ρεύματος, κρίσιμα χαρακτηριστικά για ασύρματες εφαρμογές σε θερμοκήπια. <sup>[16]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι:** Θερμοκρασία, Υγρασία, Βαρομετρική πίεση
- **Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας:** -40°C έως +85°C (ακρίβεια  $\pm 1^\circ\text{C}$  τυπικά)
- **Εύρος μέτρησης υγρασίας:** 0% έως 100% RH (ακρίβεια  $\pm 3\%$  RH)
- **Εύρος μέτρησης πίεσης:** 300 έως 1100 hPa (ακρίβεια  $\pm 1$  hPa περίπου)
- **Τάση λειτουργίας:** 1.71 V έως 3.6 V
- **Διεπαφές:** I2C, SPI
- **Κατανάλωση ρεύματος:** Εξαιρετικά χαμηλή, κατάλληλη για φορητές/ασύρματες εφαρμογές (π.χ. μόλις 0.1-0.3  $\mu\text{A}$  σε sleep mode).



Εικόνα 4. Ο Αισθητήρας BME280.

### 2.1.4 AMS CCS811

Ο CCS811 είναι ένας αισθητήρας που επιτρέπει την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε ένα θερμοκήπιο. Αν και δεν παρέχει άμεση μέτρηση CO<sub>2</sub> αλλά εκτίμηση, εξακολουθεί να είναι οικονομικά αποδοτικός και εύκολος στην ενσωμάτωση, ειδικά σε σχέση με άλλους αισθητήρες αερίων που απαιτούν πιο σύνθετα συστήματα βαθμονόμησης. Είναι ιδανικός όταν απαιτείται απλή παρακολούθηση ποιότητας αέρα με ελάχιστη κατανάλωση.<sup>[17]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι:** Πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs), εκτιμώμενη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> (eCO<sub>2</sub>)
- **Εύρος μέτρησης eCO<sub>2</sub>:** 400 έως 8192 ppm
- **Εύρος μέτρησης TVOCs:** 0 έως 1187 ppb
- **Τάση λειτουργίας:** 1.8 V έως 3.6 V
- **Διεπαφή:** I2C
- **Κατανάλωση ρεύματος:** Πολύ χαμηλή, τυπικά <1mA σε λειτουργία μέτρησης.



Εικόνα 5. Ο Αισθητήρας CCS811.

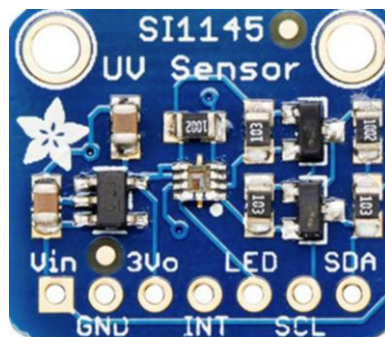
### 2.1.5 Silicon Labs SI1145

Για τον έλεγχο ενός θερμοκηπίου, η παρακολούθηση της UV ακτινοβολίας και της έντασης του φωτός βοηθά στην αξιολόγηση των συνθηκών ανάπτυξης. Ο SI1145 (Εικόνα 6) συνδυάζει πολλαπλές λειτουργίες σε ένα τσιπ, μειώνοντας την

πολυπλοκότητα σε σχέση με τη χρήση χωριστών αισθητήρων. Η εύκολη ενσωμάτωση και η χαμηλή κατανάλωση τον καθιστούν ελκυστική επιλογή.<sup>[18]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι:** Υπεριώδης ακτινοβολία (UV index), Ορατό και Υπέρυθρο φως
- **Εύρος μέτρησης UV Index:** 0 έως 11+ (ανάλογα με την ένταση της UV)
- **Τάση λειτουργίας:** 1.7 V έως 3.6 V
- **Διεπαφή:** I2C
- **Κατανάλωση ρεύματος:** Πολύ χαμηλή, κατάλληλη για φορητές εφαρμογές.



Εικόνα 6. Ο Αισθητήρας SI1145.

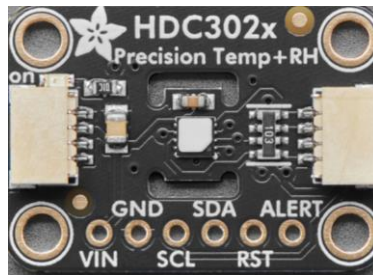
### 2.1.6 Texas Instruments HDC3022

Ο HDC3022 (Εικόνα 7) προσφέρει υψηλή ακρίβεια, ιδίως στην υγρασία, και πολύ χαμηλή κατανάλωση. Σε σχέση με άλλους αισθητήρες θερμοκρασίας/υγρασίας, διακρίνεται για την ακρίβειά του και τη σταθερή απόδοσή του. Επίσης, η Texas Instruments προσφέρει προαιρετικές προστατευτικές μεμβράνες (PTFE filters) και καλύμματα, τα οποία, όταν συνδυάζονται με τους αισθητήρες HDC302x, μπορούν να επιτύχουν βαθμό προστασίας IP67. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλος για θερμοκήπια όπου οι μικρές αλλαγές στα επίπεδα υγρασίας επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη των καλλιεργειών, αλλά είναι και επαρκώς προστατευμένος για τις συνθήκες χρήσης του.<sup>[19]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι:** Θερμοκρασία, Σχετική υγρασία
- **Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας:** -40°C έως +125°C (ακρίβεια  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ )

- **Εύρος μέτρησης υγρασίας:** 0% έως 100% RH (ακρίβεια  $\pm 1.5\%$  RH)
- **Τάση λειτουργίας:** 1.62 V έως 5.5 V
- **Διεπαφή:** I2C
- **Κατανάλωση ρεύματος:** Εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση, ιδανική για ασύρματες εφαρμογές.



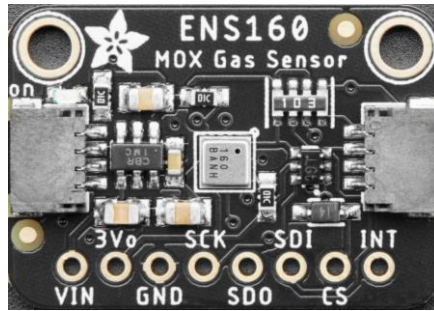
Εικόνα 7. Ο Αισθητήρας HDC3022.

### 2.1.7 ScioSense ENS 160

Σε σχέση με απλούστερους αισθητήρες όπως ο CCS811, ο ENS160 (Εικόνα 8) παρέχει πιο ολοκληρωμένη εικόνα της ποιότητας του αέρα, μετρώντας και άλλους ρύπους. Αν και είναι πιο πολύπλοκος και πιο ακριβός, μπορεί να προσφέρει πιο λεπτομερή δεδομένα για εξειδικευμένες εφαρμογές θερμοκηπίου όπου ο έλεγχος αερίων ρύπων είναι καθοριστικός.<sup>[20]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι:** Ποιότητα αέρα εσωτερικού χώρου, TVOCs, eCO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> (σε επίπεδο ενδείξεων ποιότητας)
- **Τάση λειτουργίας:** 1.8 V έως 3.6 V
- **Διεπαφή:** I2C
- **Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά:** Εξελιγμένος αλγόριθμος για εκτίμηση ποιότητας αέρα, δυναμική αντιστάθμιση θερμοκρασίας και υγρασίας.



Εικόνα 8. Ο Αισθητήρας ENS160.

### 2.1.8 AMS AS7331

Ο AS7331 (Εικόνα 9) προσφέρει ανάλυση φωτός σε πολλαπλά κανάλια, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση και βελτιστοποίηση ειδικά σε θερμοκηπιακές συνθήκες όπου απαιτείται έλεγχος συγκεκριμένων μηκών κύματος (π.χ. υπεριώδες φάσμα για τη φωτοσύνθεση). Είναι ακριβότερος από απλούς αισθητήρες φωτός, όπως ο SI1145, αλλά ιδανικός για φασματικές μετρήσεις, όπως στην περίπτωση μας στο φάσμα UV. <sup>[21]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι:** Ένταση φωτός σε διαφορετικές φασματικές περιοχές (UV–Vis–IR)
- **Τύπος αισθητήρα:** Πολυκαναλικός φασματικός (έως 11 ζώνες, ~350–1000 nm)
- **ADC:** Ενσωματωμένος 16-/18-bit με υψηλή ακρίβεια
- **Τάση λειτουργίας:** 2.7 V έως 3.6 V
- **Διεπαφή:** I2C
- **Κατανάλωση ρεύματος:** Πολύ χαμηλή, ιδανικός για φορητές εφαρμογές.



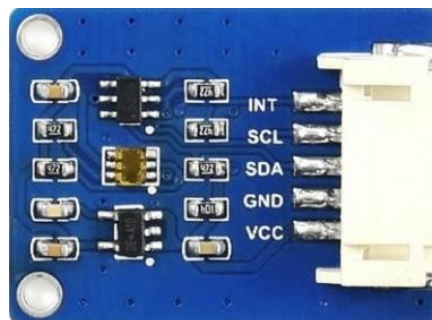
Εικόνα 9. Ο Αισθητήρας AS7331.

### 2.1.9 AMS TSL25911

Ο TSL25911 (Εικόνα 10) μετρά με υψηλή ακρίβεια και μεγάλο εύρος έντασης φωτός, κάνοντας τον ιδανικό για αυτόματο έλεγχο φωτισμού σε θερμοκήπια. Η ευκολία ενσωμάτωσης (I2C) και ο διαχωρισμός της υπέρυθρης συνιστώσας τον καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμο για αξιόπιστη και ακριβή παρακολούθηση συνθηκών φωτισμού.<sup>[22]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Μετρούμενες παράμετροι :** Φωτεινότητα (lux), διαχωρισμός ορατής και IR ακτινοβολίας
- **Δυναμικό εύρος:** Έως 600M:1
- **ADC:** Ενσωματωμένος 16-bit
- **Διεπαφή :** I2C
- **Τάση λειτουργίας:** 2.7V έως 3.6 V
- **Κατανάλωση:** Πολύ χαμηλή, ιδανικός για ασύρματες εφαρμογές.



Εικόνα 10. Ο Αισθητήρας TSL25911.



## 2.2 Μικροελεγκτές

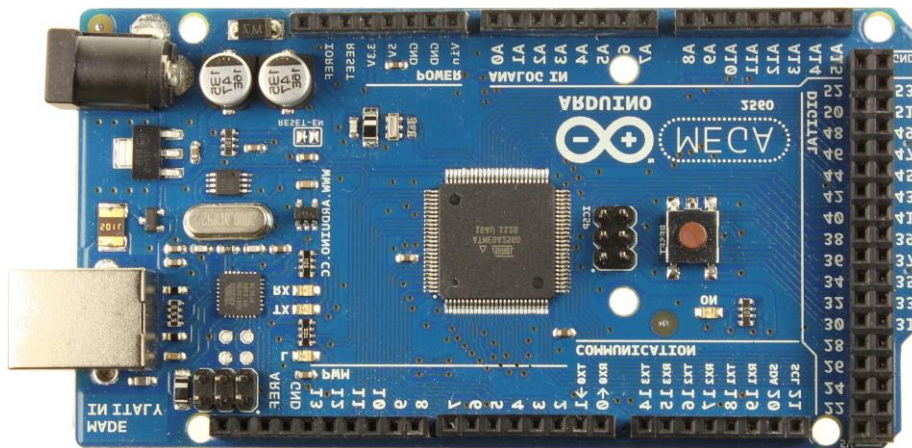
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κύριοι μικροελεγκτές που εξετάστηκαν για τη δημιουργία των επιμέρους κόμβων του ασύρματου συστήματος στο θερμοκήπιο. Η ορθή επιλογή μικροελεγκτή είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς επηρεάζει την απόδοση, την αυτονομία (διάρκεια μπαταρίας ή λειτουργία με ηλιακή ενέργεια), την ευκολία διασύνδεσης με αισθητήρες και επικοινωνιακά πρωτόκολλα, καθώς και τη μελλοντική επεκτασιμότητα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και η καταλληλότητα κάθε μικροελεγκτή για χρήση σε ασύρματα συστήματα θερμοκηπίων.

### 2.2.1 Arduino MEGA

Το Arduino MEGA (Εικόνα 11) προσφέρει μεγάλη ευελιξία σε εφαρμογές όπου απαιτείται ταυτόχρονη μέτρηση από πολλούς αισθητήρες, σύνδεση πολλών επικοινωνιακών μονάδων ή χειρισμός σύνθετων αλγορίθμων. Η μεγάλη μνήμη (Flash, SRAM) και ο αυξημένος αριθμός εισόδων/εξόδων επιτρέπουν την ανάπτυξη εκτεταμένων λειτουργιών, όπως αποθήκευση δεδομένων, τοπική επεξεργασία και πολυκαναλική ανάγνωση περιβαλλοντικών παραμέτρων. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για χρήση ως κεντρικός κόμβος διαχείρισης δεδομένων στο θερμοκήπιο, όπου δεν υπάρχει έντονος περιορισμός στην παροχή ισχύος (π.χ. χρήση μόνιμης τροφοδοσίας) και απαιτείται έλεγχος και συντονισμός πολλών υποσυστημάτων.<sup>[23]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Επεξεργαστής:** ATmega2560 (8-bit AVR)
- **Ταχύτητα ρολογιού:** 16 MHz
- **Μνήμη Flash / RAM / EEPROM:** 256 KB Flash, 8 KB SRAM, 4 KB EEPROM
- **Τάση λειτουργίας:** 5 V (λογικές στάθμες), τροφοδοσία 7-12 V μέσω VIN
- **Ψηφιακές Είσοδοι/Εξοδοι:** 54 (15 PWM)
- **Αναλογικές είσοδοι:** 16 κανάλια ADC (10-bit)
- **Διασυνδέσεις:** UART, I2C, SPI, USB
- **Κατανάλωση ρεύματος:** 50-70 mA στα 5 V σε ενεργή λειτουργία, <10 mA σε sleep mode



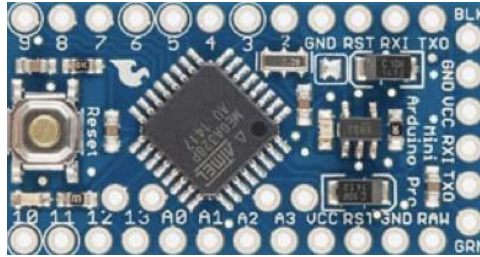
Εικόνα 11. Ο Μικροελεγκτής Arduino MEGA.

### 2.2.2 Arduino Pro Mini

Το Arduino Pro Mini (Εικόνα 12) είναι ιδανικό για διακριτούς, ασύρματους κόμβους μέτρησης μέσα στο θερμοκήπιο, που λειτουργούν με χαμηλή ισχύ. Χάρη στις μικρές του διαστάσεις και τη δυνατότητα λειτουργίας σε 3.3 V με χαμηλή κατανάλωση, μπορεί να τροφοδοτηθεί από μπαταρία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Είναι κατάλληλο για απομακρυσμένα σημεία μέσα στο θερμοκήπιο, όπου η τοποθέτηση καλωδίων είναι δύσκολη, και για εφαρμογές που χρειάζονται μεν βασική επεξεργαστική ισχύ, αλλά θέτουν ως προτεραιότητα την αυτονομία σε ενέργεια και την ευκολία ενσωμάτωσης σε μικρούς χώρους. Σε συνδυασμό με χαμηλής κατανάλωσης ασύρματες μονάδες, μπορεί να αποτελέσει έναν αξιόπιστο ασύρματο κόμβο συλλογής δεδομένων με ελάχιστο ενεργειακό αποτύπωμα. <sup>[24]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Επεξεργαστής:** ATmega328P (8-bit AVR)
- **Ταχύτητα ρολογιού:** 16 MHz (έκδοση 5 V) ή 8 MHz (έκδοση 3.3 V)
- **Μνήμη Flash / RAM / EEPROM:** 32 KB Flash, 2 KB SRAM, 1 KB EEPROM
- **Τάση λειτουργίας:** 3.3 V ή 5 V ανάλογα με την έκδοση
- **Ψηφιακές Είσοδοι/Εξοδοι:** 14 (6 PWM)
- **Αναλογικές είσοδοι:** 8 κανάλια ADC (10-bit)
- **Διασυνδέσεις:** UART, I2C, SPI (χωρίς ενσωματωμένο USB - απαιτείται εξωτερικός USB-serial adapter)
- **Κατανάλωση ρεύματος:** 10-20 mA σε ενεργή λειτουργία, <1mA σε deep sleep.



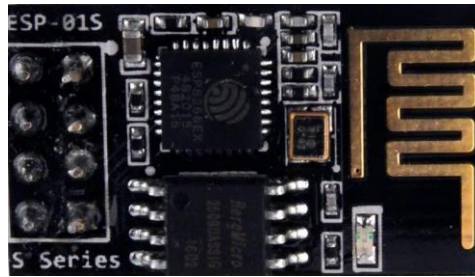
Εικόνα 12. Ο Μικροελεγκτής Arduino Pro Mini.

### 2.2.3 ESP-01 (Espressif ESP8266)

Το ESP-01 (Εικόνα 13) χάρη στο ενσωματωμένο σύστημα Wi-Fi, επιτρέπει γρήγορη και οικονομική σύνδεση στο τοπικό δίκτυο ή στο Διαδίκτυο, χωρίς επιπρόσθετα εξαρτήματα. Είναι κατάλληλο για απλές εφαρμογές όπου ο κόμβος περιορίζεται σε μερικές μετρήσεις και απαιτεί μόνο βασική συνδεσιμότητα Wi-Fi για αποστολή δεδομένων σε κεντρικό server ή cloud. Το μικρό φυσικό του αποτύπωμα το καθιστά χρήσιμο σε μικρούς χώρους, αλλά ο πολύ περιορισμένος αριθμός εισόδων/εξόδων και η σχετικά υψηλότερη κατανάλωση ρεύματος κατά την εκπομπή Wi-Fi το καθιστούν λιγότερο ευέλικτο για πολυπαραμετρικές μετρήσεις ή για ενεργειακά περιορισμένα συστήματα. Ενδείκνυται κυρίως για κόμβους που βρίσκονται κοντά σε πηγή τροφοδοσίας ή εσωτερικό δίκτυο Wi-Fi, όπου η γρήγορη και απευθείας μεταφορά δεδομένων αποτελεί προτεραιότητα. <sup>[25]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Επεξεργαστής:** ESP8266 (32-bit Tensilica L106)
- **Ταχύτητα ρολογιού:** Έως 80 MHz
- **Μνήμη Flash / RAM:** Ποικίλει ανά μοντέλο (τυπικά 512 KB έως 1 MB Flash), ~50 KB RAM διαθέσιμα
- **Τάση λειτουργίας:** 3.3 V
- **Ψηφιακές E/E:** 2-4 GPIO (πολύ περιορισμένες)
- **Ενσωματωμένο Wi-Fi:** 802.11 b/g/n
- **Κατανάλωση ρεύματος:** 50-70 mA σε ενεργή λειτουργία, έως 170 mA κατά την εκπομπή Wi-Fi, 10-20  $\mu$ A σε deep sleep.



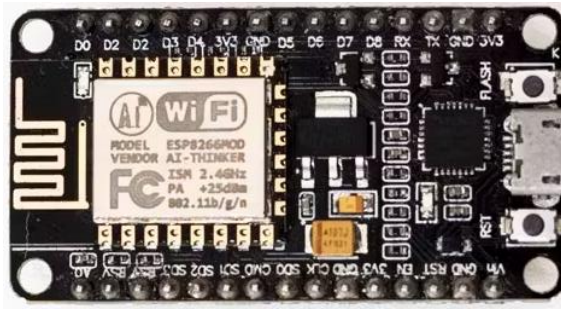
Εικόνα 13. Ο Μικροελεγκτής ESP-01.

#### 2.2.4 NodeMCU (ESP8266 Development Board)

Το NodeMCU (Εικόνα 14) αποτελεί μια ολοκληρωμένη και φιλική προς τον χρήστη πλατφόρμα ανάπτυξης με βάση το ESP8266, διαθέτοντας περισσότερα GPIO και ενσωματωμένο USB-serial converter για εύκολο προγραμματισμό. Είναι κατάλληλο για πρωτότυπα στο θερμοκήπιο, όπου ο ερευνητής θέλει να δοκιμάσει γρήγορα ιδέες, να ενσωματώσει συνδεσιμότητα Wi-Fi και να αξιοποιήσει τη μεγάλη κοινότητα υποστήριξης και βιβλιοθηκών. Παράλληλα, η ευκολία προγραμματισμού διευκολύνει τη γρήγορη ανάπτυξη και τροποποίηση κώδικα, ενώ η δυνατότητα deep-sleep μειώνει αισθητά την κατανάλωση σε συστήματα που δεν μετρούν συνεχώς. Είναι κατάλληλο όταν η απλότητα χρήσης και η γρήγορη πρόσβαση σε Wi-Fi υπερέχουν της ανάγκης για εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ή επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας.<sup>[26]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Επεξεργαστής:** ESP8266 (32-bit Tensilica L106)
- **Ταχύτητα ρολογιού:** Έως 80 MHz
- **Μνήμη Flash / RAM:** 4 MB Flash, ~50 KB RAM διαθέσιμα για χρήση
- **Τάση λειτουργίας:** 3.3 V (με ενσωματωμένο ρυθμιστή από USB 5 V)
- **Ψηφιακές E/E:** Περισσότερες διαθέσιμες GPIO σε σύγκριση με ESP-01 (περί τα 9-11 χρησιμοποιήσιμα)
- **Ενσωματωμένο Wi-Fi:** 802.11 b/g/n
- **Διασυνδέσεις:** UART, I2C, SPI, USB-Serial
- **Κατανάλωση ρεύματος:** 70-80 mA σε ενεργή λειτουργία, έως 300 mA peak κατά την εκπομπή Wi-Fi, 20-200  $\mu$ A σε deep sleep.



Εικόνα 14. Ο Μικροελεγκτής NodeMCU.

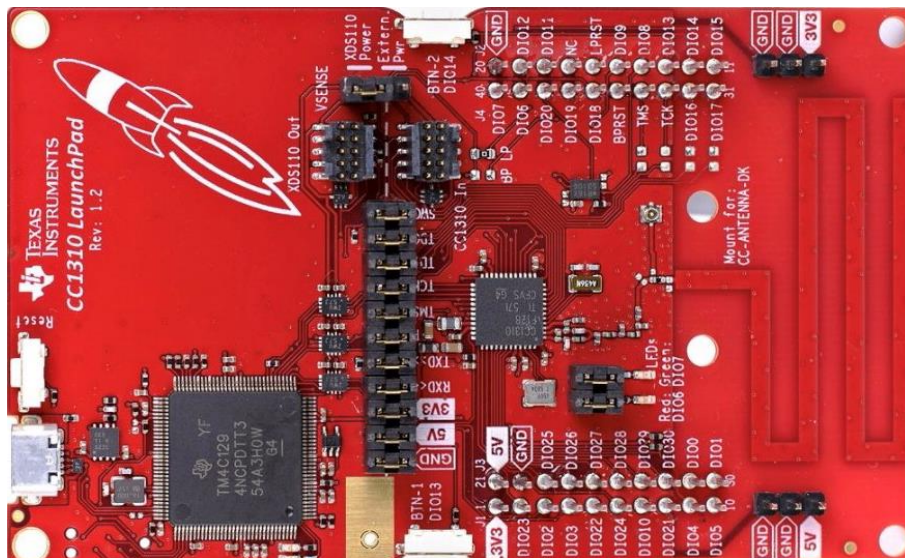
## 2.2.5 Texas Instruments CC1310

Το CC1310 (Εικόνα 15) ξεχωρίζει για την εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος και την ασύρματη επικοινωνία σε συχνότητες sub-GHz, που προσφέρουν αυξημένη εμβέλεια και σταθερότητα σήματος σε περιβάλλοντα με εμπόδια όπως τα θερμοκήπια (μεγάλα φυλλώματα, υγρασία, μεταλλικές κατασκευές). Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία εκτεταμένων ασύρματων δικτύων πολλών κόμβων, χωρίς συχνές αλλαγές μπαταριών ή απώλεια σήματος, σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με το Wi-Fi. Είναι ιδανικός για εφαρμογές IoT όπου η αξιοπιστία και η αντοχή σε δύσκολες συνθήκες έχουν προτεραιότητα, ενώ η απλότητα πρωτοκόλλων χαμηλής ισχύος (ιδιότητα πρωτόκολλα sub-GHz) μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλέστερη, μακροχρόνια λειτουργία. Η δυνατότητα εύκολης σύνδεσης με ποικιλία αισθητήρων και η υποστήριξη από εργαλεία ανάπτυξης της Texas Instruments ενισχύουν περαιτέρω την αξιοπιστία και την ευελιξία του. <sup>[27]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Επεξεργαστής:** ARM Cortex-M3 32-bit
- **Ταχύτητα ρολογιού:** Έως 48 MHz
- **Τάση λειτουργίας:** 1.8 V έως 3.8 V
- **Μνήμη Flash / RAM:** Έως 128 KB Flash, 20 KB RAM
- **Τάση λειτουργίας:** 1.8 V έως 3.8 V
- **Διασυνδέσεις:** I2C, SPI, UART, ADC
- **Ενσωματωμένο RF Transceiver:** sub-GHz (π.χ. 868/915 MHz) για επικοινωνία μακράς εμβέλειας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- **Κατανάλωση ρεύματος:** 1-5 mA σε ενεργή λειτουργία, 10-15 mA για μετάδοση σε ισχύ ~10 dBm, <100 nA σε deep sleep.





Εικόνα 15. Ο Μικροελεγκτής CC1310.

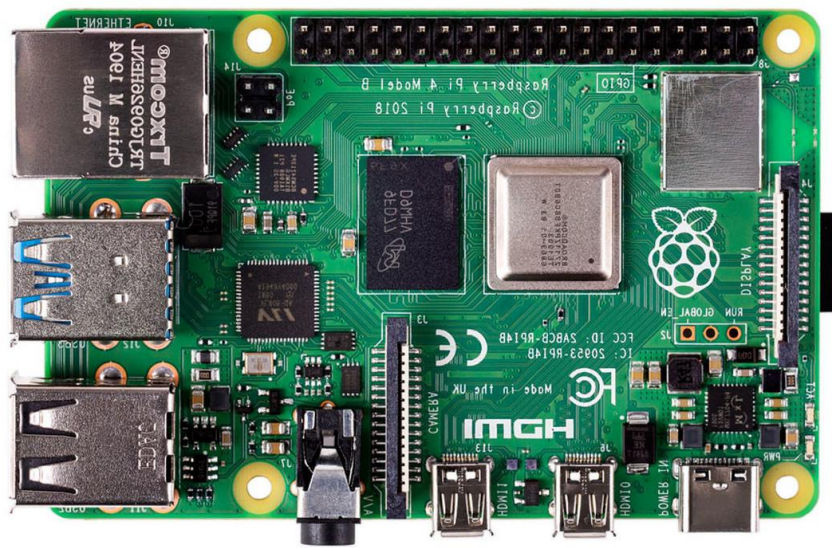
## 2.2.6 Raspberry Pi 4

Το Raspberry Pi 4 (Εικόνα 16) είναι σημαντικά πιο ισχυρό από έναν τυπικό μικροελεγκτή. Μπορεί να εκτελέσει προηγμένους αλγόριθμους επεξεργασίας δεδομένων, να τρέξει βάση δεδομένων, web server, cloud agent ή σύνθετους ελεγκτικούς αλγόριθμους σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας το ιδανικό για μια κεντρική μονάδα διαχείρισης στο θερμοκήπιο. Επιτρέπει γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών χάρη στο ολοκληρωμένο Linux οικοσύστημα, μεγάλη κοινότητα χρηστών και πληθώρα βιβλιοθηκών. Επιπλέον, το Raspberry Pi 4 απαιτεί σταθερή τροφοδοσία (5 V, 3 A μέσω USB-C) και δεν είναι τόσο ανθεκτικό σε συνθήκες χαμηλής ισχύος. Αποτελεί καλύτερη επιλογή ως κεντρικός «κόμβος βάσης» (gateway) που λαμβάνει δεδομένα από ασύρματους κόμβους μετρήσεων χαμηλής ισχύος, επεξεργάζεται τα στοιχεία, αποθηκεύει ιστορικά δεδομένα και παρέχει διεπαφές στο χρήστη (π.χ. μέσω web dashboard).<sup>[28]</sup>

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του είναι:

- **Επεξεργαστής:** Broadcom BCM2711, Quad-core ARM Cortex-A72 στα 1.5 GHz
- **Μνήμη (RAM):** 4 GB LPDDR4
- **Αποθηκευτικός Χώρος:** microSD κάρτα ως βασική αποθήκευση λειτουργικού συστήματος και δεδομένων

- **Διασυνδέσεις:** 2x USB 3.0, 2x USB 2.0, 2x micro HDMI, Ethernet Gigabit, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0, 40-pin GPIO, CSI/DSI interface, I2C, SPI, UART
- **Λειτουργικό Σύστημα:** Πλήρης έκδοση Linux (Raspberry Pi OS ή άλλα), υποστήριξη πολλαπλών εργαλείων και γλωσσών προγραμματισμού
- **Κατανάλωση ρεύματος:**
  - Idle (χωρίς φορτίο): Περίπου 2.5-3.5 W
  - Υπό φορτίο CPU/GPU: 5-7 W, ή και παραπάνω ανάλογα με τις περιφερειακές συσκευές.



*Εικόνα 16. Ο μικροπολογιστής Raspberry Pi 4.*

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Συστήματος Συλλογής Δεδομένων

### 3.1 Node V1.0 (Arduino Mega)

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης της πρώτης έκδοσης του κόμβου (Node V1.0), η οποία αποτέλεσε το αρχικό στάδιο υλοποίησης και δοκιμών του ασύρματου συστήματος μετρήσεων στο θερμοκήπιο.

Κατά το πρώτο στάδιο ανάπτυξης του κόμβου, πραγματοποιήθηκε διεξοδική έρευνα για την επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις της εφαρμογής για αξιόπιστες και ενεργειακά αποδοτικές μετρήσεις. Οι αισθητήρες που τελικά επιλέχθηκαν ήταν οι εξής:

- DS18B20 για τη θερμοκρασία εδάφους,
- SEN0193 για την υγρασία του εδάφους,
- BME280 για θερμοκρασία, υγρασία και βαρομετρική πίεση,
- CCS811 για πτητικές οργανικές ενώσεις (TVOCs) και εκτιμώμενο CO<sub>2</sub>,
- SI1145 για ένταση φωτός και δείκτη UV.

Αυτές οι επιλογές κάλυπταν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, κρίσιμων για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση του περιβάλλοντος εντός ενός θερμοκηπίου.

Ως μικροελεγκτής για την πρώτη αυτή έκδοση επιλέχθηκε το Arduino MEGA, καθώς διαθέτει επαρκείς εισόδους/εξόδους, πλούσιο αποθηκευτικό χώρο σε Flash μνήμη και ικανοποιητικές επικοινωνιακές θύρες (UART, I2C) για την εύκολη σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων και επικοινωνιακών μονάδων. Αρχικά, κάθε αισθητήρας συνδέθηκε ξεχωριστά στο Arduino MEGA και προγραμματίστηκε κατάλληλα, ώστε να πραγματοποιεί μετρήσεις και να εκτυπώνει τις τιμές που λαμβάνονται στην σειριακή κονσόλα του υπολογιστή (Serial Monitor). Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώθηκε τόσο η σωστή λειτουργία όσο και η αξιοπιστία των μετρήσεων κάθε αισθητήρα.

Αφού διασφαλίστηκε η ομαλή λειτουργία όλων των αισθητήρων, οι μετρήσεις ομαδοποιήθηκαν σε ένα ενιαίο «πακέτο» δεδομένων. Το πακέτο αυτό περιλάμβανε ένα

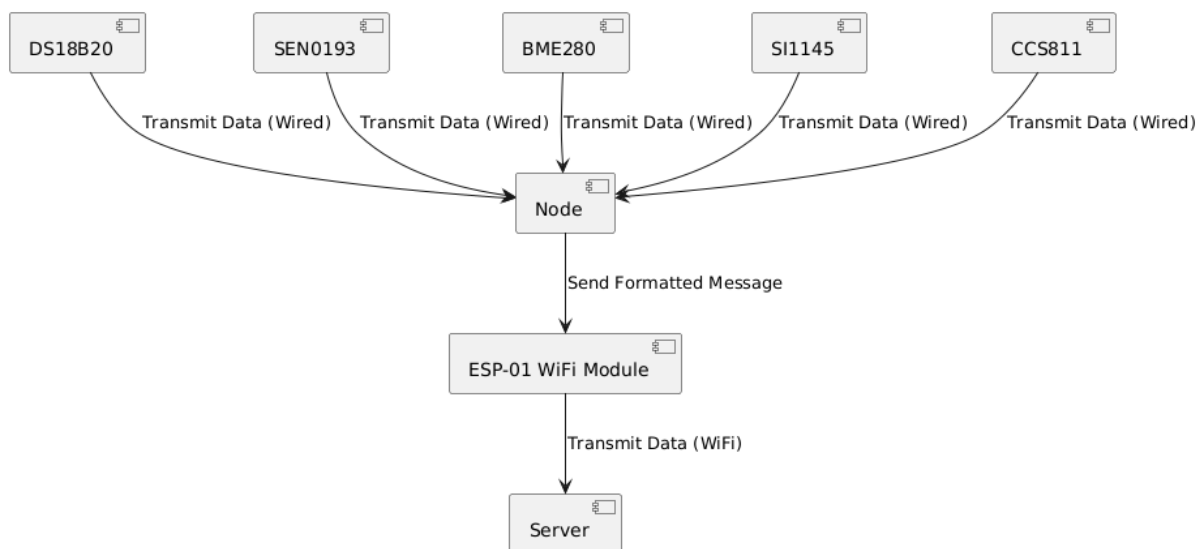


μοναδικό αναγνωριστικό κόμβου (Node ID) για να είναι δυνατή η ταυτοποίηση της προέλευσης των μετρήσεων, καθώς και τις τιμές όλων των παραμέτρων που μόλις είχαν ληφθεί (Εικόνα 17). Με αυτόν τον τρόπο, ο κόμβος μπορούσε να στέλνει ένα ενιαίο και εύχρηστο σύνολο δεδομένων, διευκολύνοντας την περαιτέρω επεξεργασία και αποθήκευση τους.

**NodeID|SoilTemp|SoilHum|AirTemp|AirHum|AirPress|TVOC|CO2|AmbLight|UVlight**

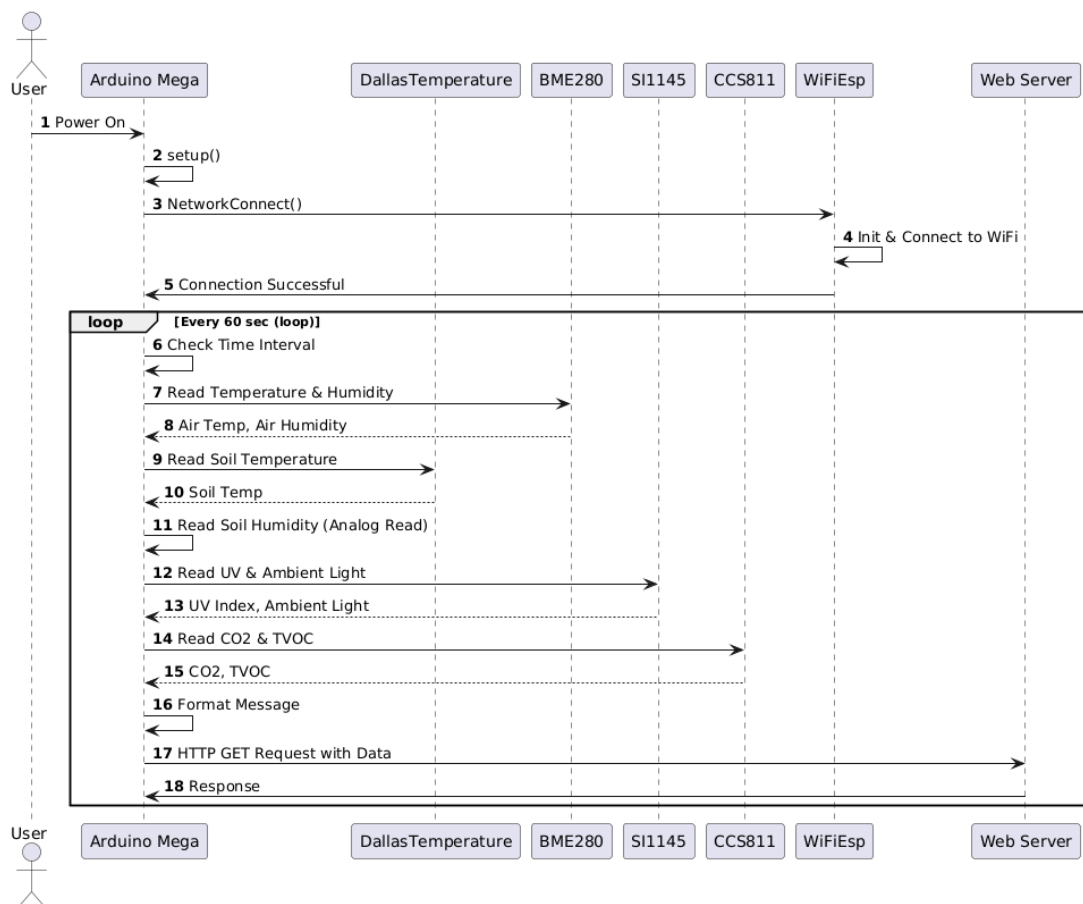
*Εικόνα 17. Η μορφοποίηση των δεδομένων προς αποστολή.*

Για την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων προς έναν απομακρυσμένο διακομιστή (server), στον οποίο θα γινόταν η αποθήκευση και περαιτέρω ανάλυση, συνδέθηκε ένα ESP-01 module στο Arduino MEGA. Το ESP-01, βασισμένο στο ESP8266 SoC, προσέφερε δυνατότητα Wi-Fi επικοινωνίας. Μέσω της σειριακής θύρας (Serial2) του Arduino MEGA, το πακέτο με τις μετρήσεις αποστέλλόταν στο ESP-01, το οποίο στη συνέχεια συνδεόταν στο Διαδίκτυο και προωθούσε τα δεδομένα στον κεντρικό server. Με αυτόν τον τρόπο, οι μετρήσεις ήταν άμεσα διαθέσιμες για περαιτέρω επεξεργασία, οπτικοποίηση και αρχειοθέτηση, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η τοπολογία του δικτύου.

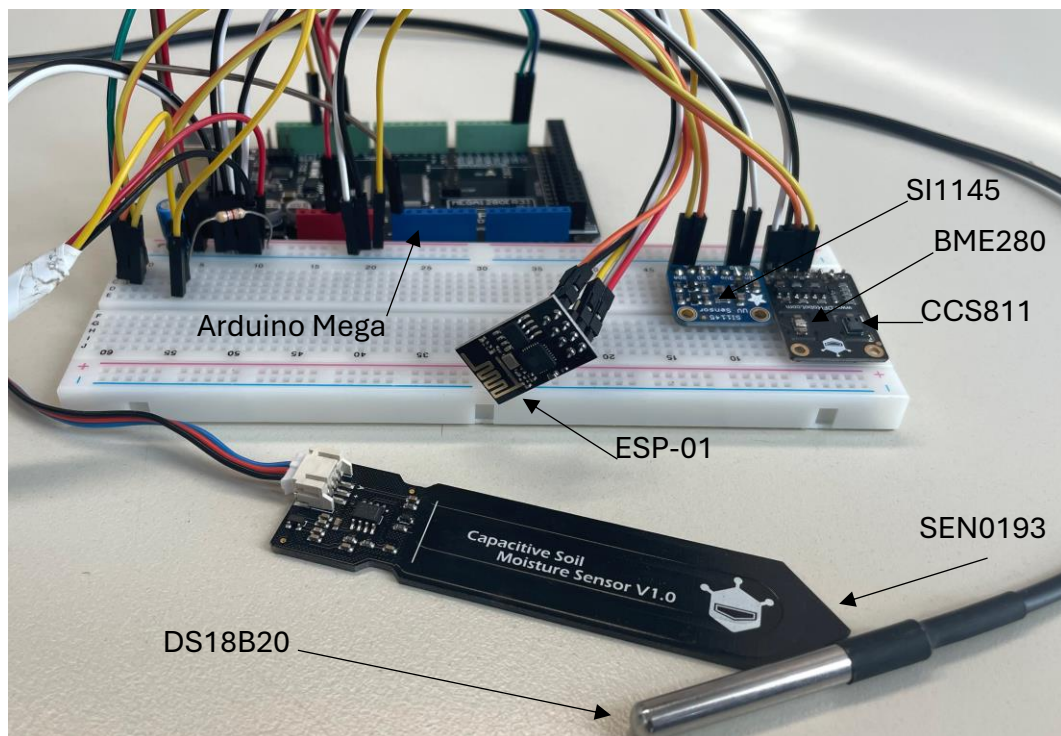


*Εικόνα 18. Η τοπολογία του δικτύου.*

Στο αρχικό αυτό στάδιο, ο κόμβος ρύθμιζε τον χρόνο λήψης μετρήσεων σε ένα λεπτό, επιτρέποντας τη συνεχή ενημέρωση των δεδομένων. Η συγκεκριμένη συχνότητα λήψης ήταν επαρκής για την αρχική δοκιμή της λειτουργικότητας του συστήματος. Η έκδοση Node V1.0 (Εικόνα 20) επέτρεψε την αρχική αξιολόγηση της σωστής ενσωμάτωσης των αισθητήρων, τη δοκιμή της επικοινωνίας με τον server μέσω Wi-Fi, καθώς και τη συνολική επάρκεια του Arduino MEGA ως κεντρικού ελεγκτή. Στην Εικόνα 19 φαίνεται μια απεικόνιση της λειτουργίας του λογισμικού αυτής της έκδοσης του κόμβου. Τα συμπεράσματα από αυτό το στάδιο έθεσαν τις βάσεις για τις επόμενες βελτιώσεις τόσο στον σχεδιασμό του υλικού όσο και στην ενεργειακή απόδοση και τη συνολική λειτουργικότητα του συστήματος.



Εικόνα 19. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου.



Εικόνα 20. Η πρώτη έκδοση του κόμβου.

### 3.2 Node V1.1 (Arduino Pro Mini)

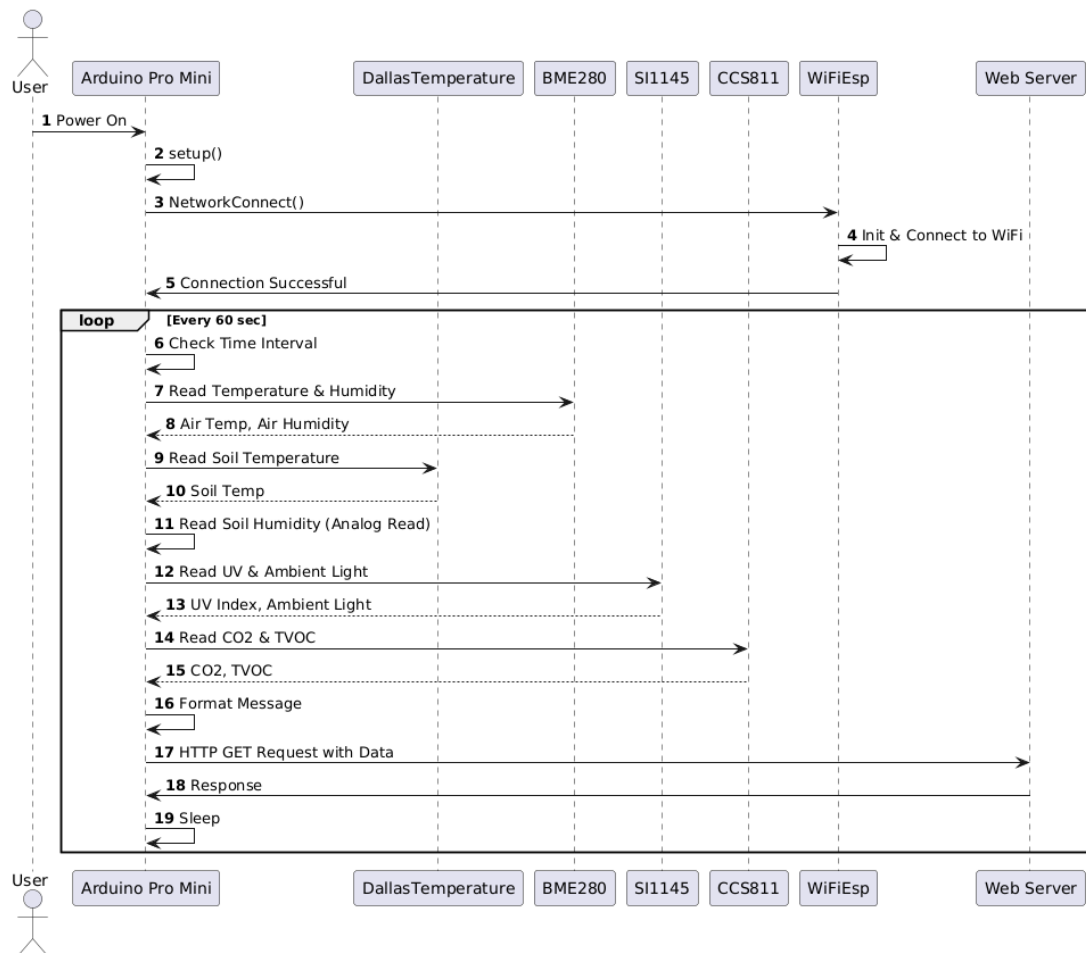
Μετά την επιτυχημένη δημιουργία του Node V1.0, το οποίο βασιζόταν στο Arduino MEGA και διαπιστώθηκε ότι λειτουργούσε ορθά ως προς τη συλλογή και την ασύρματη αποστολή δεδομένων, προέκυψε η ανάγκη για έναν κόμβο με μικρότερες διαστάσεις και σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ρεύματος. Για τον σκοπό αυτό, στο στάδιο αυτό αναπτύχθηκε η δεύτερη έκδοση του κόμβου, αξιοποιώντας το Arduino Pro Mini στην έκδοση 3.3 V / 16 MHz.

Η μετάβαση από το Arduino MEGA στο Arduino Pro Mini εξυπηρετούσε κυρίως την υλοποίηση ενός κόμβου που θα μπορούσε να λειτουργεί για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα με τροφοδοσία από μπαταρία. Το μικρό φυσικό μέγεθος του Pro Mini καθιστούσε ευκολότερη την ενσωμάτωσή του σε ένα μικρό κουτί για χρήση εντός του θερμοκηπίου, ενώ η δυνατότητα λειτουργίας στα 3.3 V διασφάλιζε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Οι ίδιοι αισθητήρες που είχαν χρησιμοποιηθεί στην πρώτη έκδοση (DS18B20, SEN0193, BME280, CCS811 και SI1145) ενσωματώθηκαν εκ νέου στη νέα έκδοση του κόμβου, επιτρέποντας τη συλλογή μετρήσεων από πληθώρα περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η λειτουργία τους στην τάση των 3.3 V ήταν εφικτή, καθώς όλοι οι αισθητήρες υποστήριζαν αυτό το εύρος λειτουργίας. Η μείωση στον αριθμό των διαθέσιμων εισόδων/εξόδων, σε σχέση με το Arduino MEGA, δεν επηρέασε αρνητικά την ανάπτυξη, αφού οι αισθητήρες επικοινωνούσαν μέσω των πρωτοκόλλων, I2C, το 1-Wire ή μέσω αναλογικών εισόδων, με αποτέλεσμα να καλυφθούν οι ανάγκες χωρίς να απαιτούνται επιπλέον ακροδέκτες. Σε αυτήν την έκδοση η τοπολογία του δικτύου παρέμεινε ίδια με την προηγούμενη, καθώς άλλαξε μόνο ο μικροελεγκτής.

Καθώς ο βασικός στόχος ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας, αφιερώθηκε χρόνος στη βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων τροφοδοσίας και των λειτουργιών sleep του ATmega328P, του μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται στο Arduino Pro Mini. Οι αισθητήρες και το κύκλωμα συνήθως παρέμεναν σε κατάσταση αναμονής, από την οποία «ξυπνούσαν» περιοδικά για να πραγματοποιήσουν μετρήσεις και στη συνέχεια να αποστείλουν τα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, η συνολική κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε αισθητά, επιτρέποντας την πολυήμερη αυτονομία του κόμβου όταν τροφοδοτείται από μπαταρία.

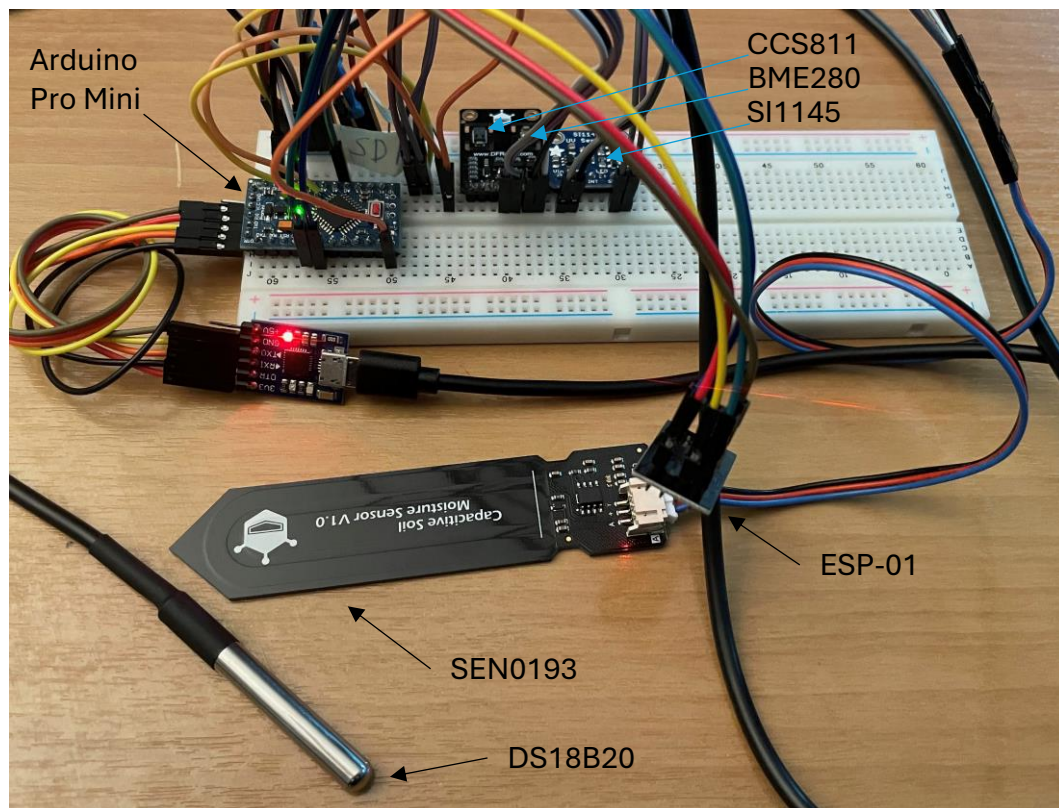
Η διαδικασία ασύρματης επικοινωνίας διατηρήθηκε όμοια με εκείνη του Node V1.0, καθώς το πακέτο δεδομένων που δημιουργούσε το Pro Mini (περιέχοντας το Node ID και τις μετρήσεις από τους αισθητήρες) προωθούνταν σε ένα ESP-01 module. Η σύνδεση του ESP-01 μέσω της σειριακής διεπαφής διευκολύνθηκε από την κοινή λειτουργία στα 3.3 V, ενώ οι ρυθμίσεις του Wi-Fi παρέμειναν σταθερές. Τα δεδομένα, επομένως, έφταναν στον ίδιο απομακρυσμένο server, επιτρέποντας την αποθήκευση και την επεξεργασία τους με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Στην Εικόνα 21 φαίνεται μια απεικόνιση της λειτουργίας του λογισμικού αυτής της έκδοσης του κόμβου.



Εικόνα 21. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου.

Η ολοκλήρωση του Node V1.1 (Εικόνα 22), επιβεβαίωσε ότι το Arduino Pro Mini, μπορούσε να στηρίξει τις απαιτήσεις του ασύρματου συστήματος μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων στο θερμοκήπιο. Τα πλεονεκτήματα της χαμηλής κατανάλωσης και των μικρών διαστάσεων έδωσαν τη δυνατότητα ευκολότερης εγκατάστασης και μεγαλύτερης αυτονομίας λειτουργίας, καθιστώντας το Node V1.1 μια πιο αποδοτική λύση για τους επί μέρους κόμβους του δικτύου. Παρότι η νέα υλοποίηση δεν διέθετε τις πολυάριθμες εισόδους/εξόδους και τη μνήμη του Arduino MEGA, κάλυψε αποτελεσματικά τις ανάγκες διασύνδεσης των κρίσιμων αισθητήρων, χωρίς να επηρεάζει αρνητικά τις μετρήσεις ή την αξιοπιστία των δεδομένων. Παρά τη σαφώς μειωμένη κατανάλωση και τις πιο ευέλικτες διαστάσεις του κόμβου, η συγκεκριμένη υλοποίηση εξακολουθεί να εμφανίζει ορισμένους περιορισμούς, κυρίως λόγω της διατήρησης του επιπρόσθετου module WiFi. Ωστόσο, τα συμπεράσματα που

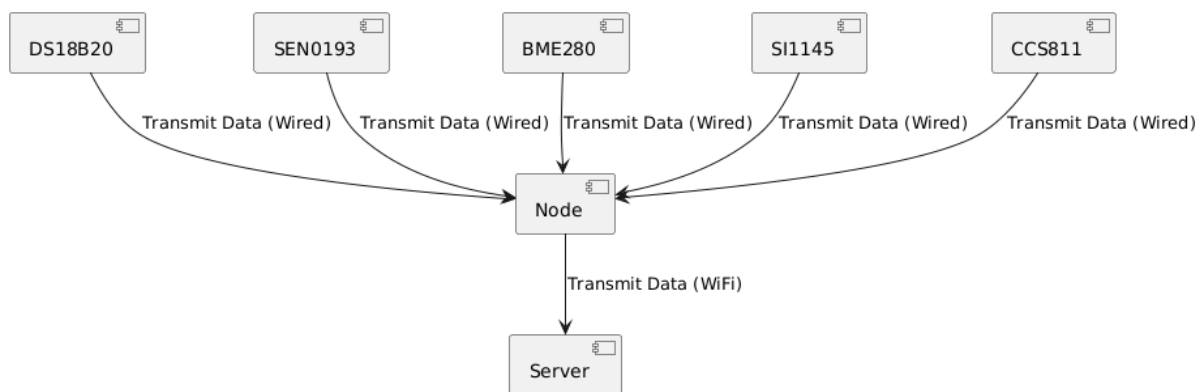
προέκυψαν κατέδειξαν ότι η μετάβαση σε μια πιο οικονομική από πλευράς ενέργειας πλατφόρμα όπως το Arduino Pro Mini μπορεί να αποτελέσει μια ιδιαίτερα αποδοτική και ευέλικτη προσέγγιση για αυτόνομους κόμβους αισθητήρων σε εφαρμογές θερμοκηπίου.



Εικόνα 22. Η δεύτερη έκδοση του κόμβου.

### 3.3 Node V2.0 (Node MCU)

Η ανάγκη περαιτέρω μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας οδήγησε στη δημιουργία μιας νέας έκδοσης του κόμβου, η οποία βασίστηκε στο NodeMCU. Παρόλο που η χρήση του Arduino Pro Mini είχε ήδη βελτιώσει σε σημαντικό βαθμό την αυτονομία, κρίθηκε αναγκαία η αναζήτηση μιας πλατφόρμας με ενοποιημένη ασύρματη συνδεσιμότητα και προηγμένες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Το NodeMCU, χάρη στο ενσωματωμένο ESP8266, συνδυάζει την ενσωματωμένη διεπαφή Wi-Fi με τη δυνατότητα deep sleep, επιτρέποντας τη δραστική μείωση του χρόνου που το κύκλωμα παραμένει σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η νέα τοπολογία του δικτύου.

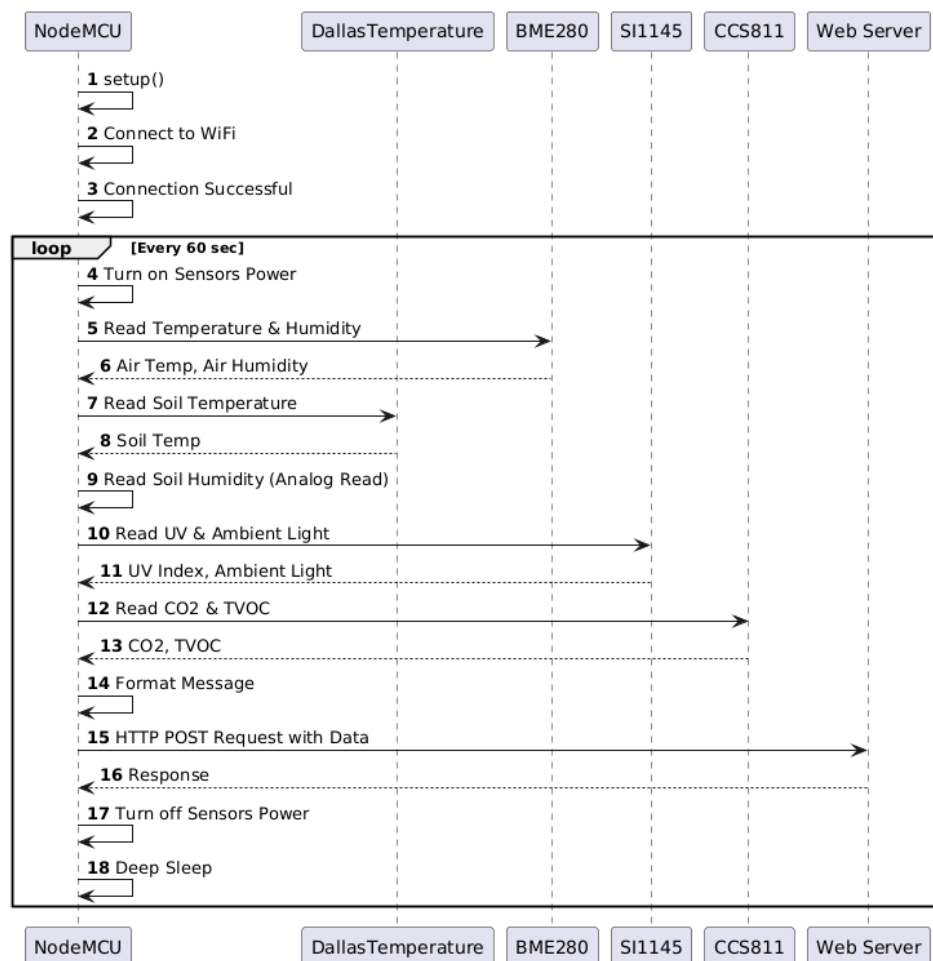


*Εικόνα 23. Η νέα τοπολογία του δικτύου.*

Όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις, οι βασικοί αισθητήρες συνδέθηκαν για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας (περιβάλλοντος και εδάφους), της ποιότητας του αέρα και του φωτισμού. Ωστόσο, αυτή τη φορά προστέθηκε ένα MOSFET transistor, προκειμένου οι αισθητήρες να διαθέτουν ανεξάρτητο κύκλωμα τροφοδοσίας. Με τον τρόπο αυτό, λίγο πριν ο NodeMCU εισέλθει σε κατάσταση deep sleep, απενεργοποιείται πλήρως η παροχή ρεύματος προς τους αισθητήρες, μηδενίζοντας ουσιαστικά τη δική τους κατανάλωση κατά τη διάρκεια της αδράνειας. Εφόσον η μέτρηση πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα, το σύστημα βρίσκεται σε χαμηλή κατανάλωση ισχύος για το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, γεγονός που εξασφαλίζει τη λειτουργία με μπαταρία για μεγάλο χρονικό διάστημα.



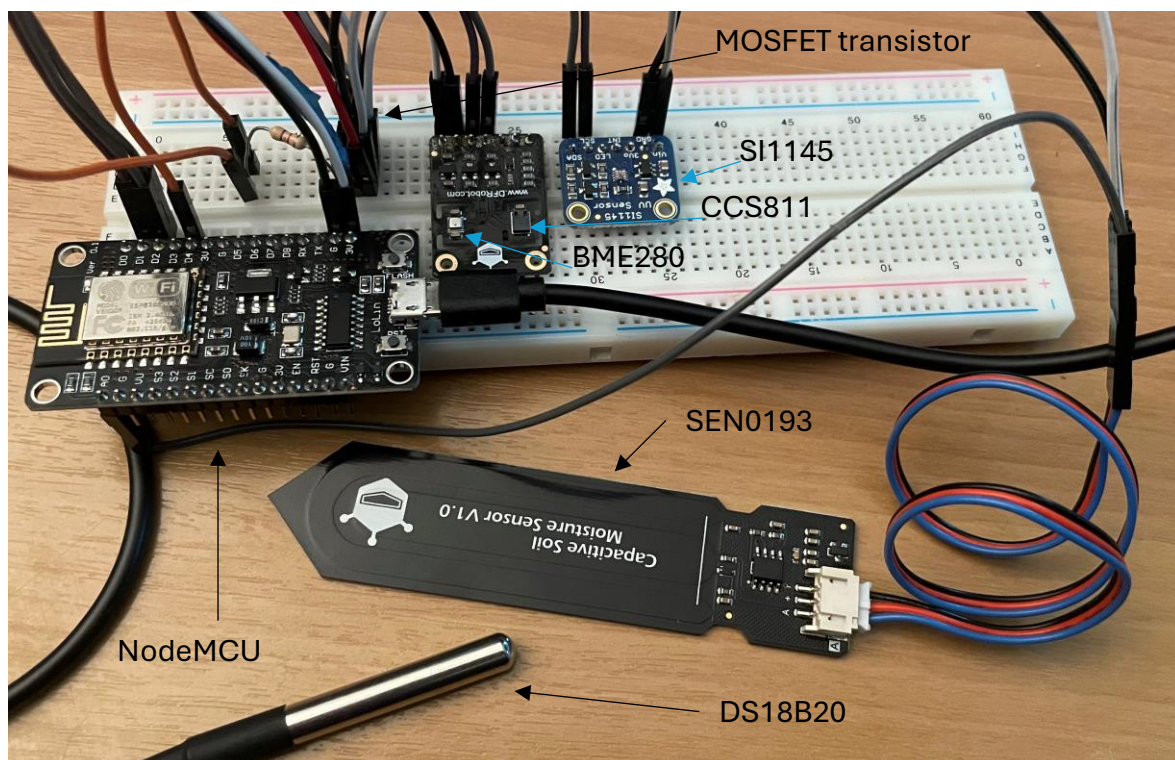
Η διαδικασία ανάπτυξης περιλάμβανε τον προσδιορισμό των κατάλληλων ακροδεκτών του NodeMCU για τον έλεγχο του MOSFET, ώστε να απενεργοποιείται ομαλά το κύκλωμα των αισθητήρων, καθώς και τη ρύθμιση του deep sleep μέσα από την κεντρική ρουτίνα του προγράμματος. Αμέσως μετά την αποστολή των μετρήσεων στο διαδίκτυο, το NodeMCU διέκοπτε την τροφοδοσία των αισθητήρων και περνούσε σε βαθύ ύπνο, μειώνοντας δραματικά την κατανάλωση ισχύος έως ότου συμπληρωνόταν το επόμενο χρονικό διάστημα αφύπνισης. Στην Εικόνα 24 φαίνεται μια απεικόνιση της λειτουργίας του λογισμικού αυτής της έκδοσης του κόμβου. Η συγκεκριμένη υλοποίηση αξιοποίησε το γεγονός ότι το NodeMCU διαθέτει ενσωματωμένο ρυθμιστή τάσης και έτσι κατέστη δυνατή η τροφοδοσία ολόκληρου του κυκλώματος από τρεις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τύπου AA, καθεμία χωρητικότητας 2300 mAh. Συνολικά, οι μπαταρίες παρέχουν τάση περίπου 3.6 V ( $3 \times 1.2$  V) και, σε συνδυασμό με τον ρυθμιστή τάσης, εξασφαλίζεται σταθερή παροχή 3.3 V στον μικροελεγκτή και τους αισθητήρες.



Εικόνα 24. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου.



Το Node V2.0 (Εικόνα 25), απέδειξε στην πράξη ότι ένας ενιαίος κόμβος με Wi-Fi και αυξημένες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας είναι εφικτός, χωρίς να θυσιάζεται η αξιοπιστία ή η πληρότητα των μετρήσεων. Η εισαγωγή του ανεξάρτητου κυκλώματος τροφοδοσίας για τους αισθητήρες αποτέλεσε καθοριστική βελτίωση, καθώς εξάλειψε τη σημαντική κατανάλωση ενέργειας στην κατάσταση αδράνειας. Έτσι στο σενάριο, όπου ο κόμβος συλλέγει και αποστέλλει δεδομένα, κάθε 60 δευτερόλεπτα η αυτονομία του συστήματος έφτασε τις 14 μέρες.



Εικόνα 25. Η τρίτη έκδοση του κόμβου.

### 3.4 Node V3.0 ( CC1310)

Η επόμενη έκδοση του κόμβου επιλέχθηκε να βασιστεί στο CC1310 της Texas Instruments, καθώς το NodeMCU αποδείχθηκε ότι δεν πληρούσε τις αυξημένες απαιτήσεις της εφαρμογής για μακροχρόνια και ενεργειακά αποδοτική λειτουργία με τροφοδοσία από μπαταρίες. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η συνεχής ανάγκη επανασύνδεσης στο Wi-Fi μετά από κάθε αφύπνιση από την κατάσταση deep sleep επέφερε σημαντική καθυστέρηση και, ταυτόχρονα, κατανάλωνε μεγάλο ποσοστό της

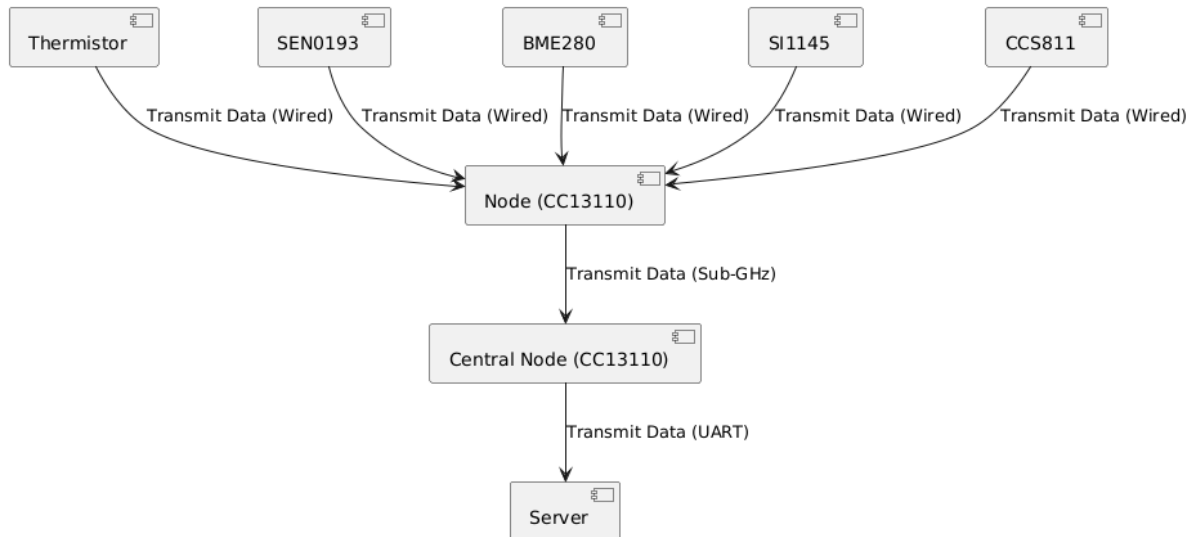
διαθέσιμης ενέργειας. Επιπλέον, η μεταφορά δεδομένων μέσω Wi-Fi απαιτούσε υψηλή κατανάλωση ρεύματος, ιδίως τη στιγμή της εκπομπής, γεγονός που μείωνε δραματικά το χρόνο αυτονομίας.

Το CC1310 αποτελεί μία πλατφόρμα ειδικά σχεδιασμένη για ασύρματες εφαρμογές χαμηλής ισχύος και μακράς εμβέλειας (sub-GHz). Σε αντίθεση με τα συστήματα Wi-Fi, τα οποία προορίζονται κυρίως για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης σε μικρότερη απόσταση, οι λύσεις sub-GHz δίνουν έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην αξιοπιστία της επικοινωνίας σε απομακρυσμένους κόμβους. Μέσω της χρήσης του CC1310, το ζήτημα της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης που παρατηρήθηκε στις προηγούμενες εκδόσεις αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά, επιτρέποντας στους κόμβους να λειτουργούν για πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, γεγονός που εναρμονίζεται πλήρως με τις απαιτήσεις για ενεργειακή αυτονομία στο θερμοκήπιο.

Η μετάβαση στο CC1310 προϋποθέτει κάποιες διαφοροποιήσεις στον τρόπο προγραμματισμού και στην ενσωμάτωση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, ωστόσο υπερτερεί με τη δυνατότητα βαθύως ύπνου σε επίπεδα κατανάλωσης ρεύματος χαμηλότερα από  $\mu A$ , καθώς και με ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση κατά τη μετάδοση. Έτσι, ο κόμβος μπορεί να παραμένει σε αδράνεια για το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου λειτουργίας, ενεργοποιούμενος μόνο για να πραγματοποιήσει μετρήσεις και να στείλει τα δεδομένα με ελάχιστο ενεργειακό κόστος. Παράλληλα, η επικοινωνία sub-GHz επιτρέπει διατήρηση αξιόπιστης σύνδεσης ακόμα και σε περιβάλλοντα με μεγάλα εμπόδια, όπως είναι οι μεταλλικές δομές και τα πυκνά φυλλώματα στο εσωτερικό ενός θερμοκηπίου.

Για την νέα αυτή έκδοση ήταν απαραίτητες κάποιες αλλαγές στην αρχιτεκτονική του συστήματος. Πλέον οι κόμβοι επικοινωνούν με έναν κεντρικό κόμβο χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο ραδιοφωνικό τους κύκλωμα, χωρίς να απαιτείται σύνδεση Wi-Fi. Ο κεντρικός κόμβος, αναλαμβάνει να συλλέγει ασύρματα τα δεδομένα από τους επιμέρους κόμβους. Μόλις λάβει τις μετρήσεις, τις προωθεί στον απομακρυσμένο server μέσω της σειριακής του θύρας (UART). Με τον τρόπο αυτό, οι επιμέρους κόμβοι μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά χαμηλή ισχύ, μπαίνοντας σε βαθύ ύπνο για το

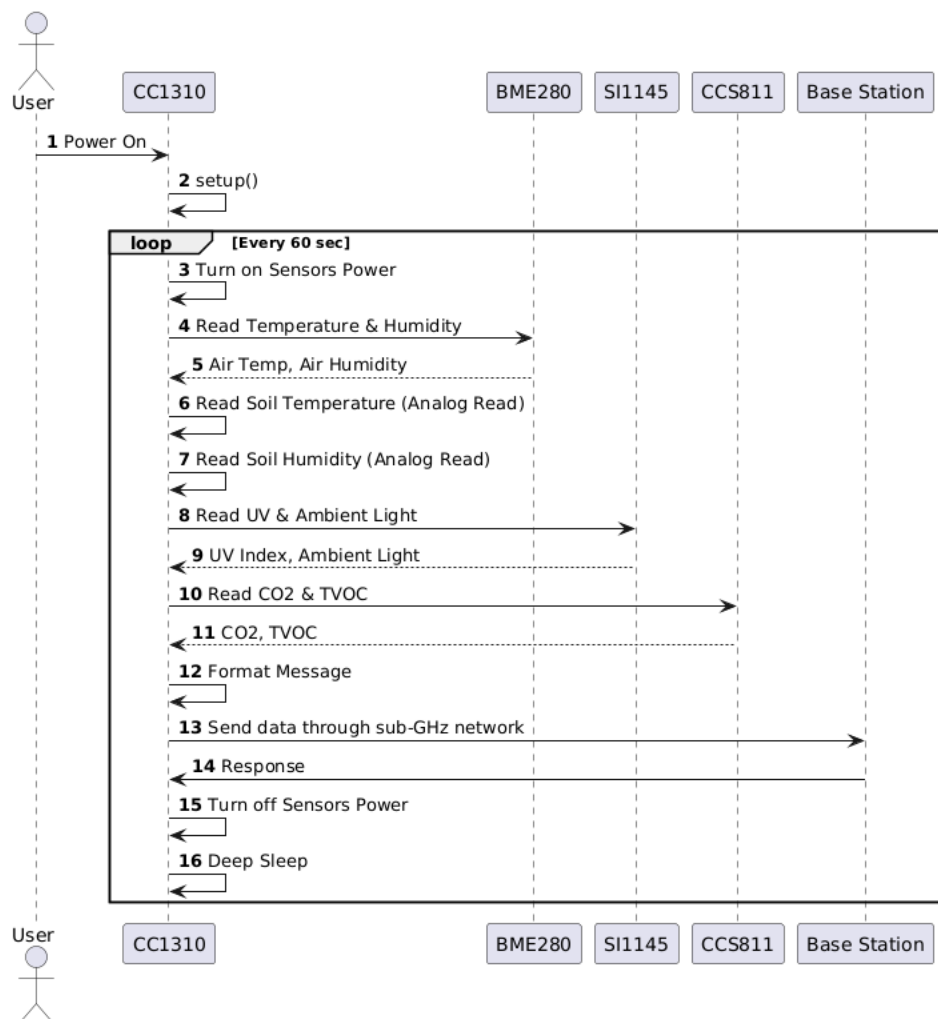
μεγαλύτερο διάστημα και ενεργοποιούμενοι μόνο για τη σύντομη διαδικασία μέτρησης και αποστολής των δεδομένων στον κεντρικό κόμβο. Στην Εικόνα 26 παρουσιάζεται η νέα τοπολογία του δικτύου.



*Εικόνα 26. Η νέα τοπολογία του δικτύου.*

Μία ακόμη ουσιαστική αλλαγή που προέκυψε με τη μετάβαση στο CC1310 ήταν η ανάγκη προγραμματισμού του σε γλώσσα C, ενώ οι προηγούμενες εκδόσεις των κόμβων βασίζονταν σε κώδικα γραμμένο σε C++. Η αλλαγή αυτή επέβαλε την σύνταξη νέων βιβλιοθηκών για την επικοινωνία με τους αισθητήρες βασισμένες στις υπάρχουσες βιβλιοθήκες, προκειμένου να είναι συμβατές με τον νέο μικροελεγκτή. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένας logic analyzer για να επιβεβαιωθεί η σωστή επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου I2C, ελέγχοντας αναλυτικά τα σήματα στη γραμμή δεδομένων και ρολογιού. Παρά τις προσπάθειες προσαρμογής των βιβλιοθηκών, η επικοινωνία με τον αισθητήρα DS18B20, που στηριζόταν στο πρωτόκολλο 1-Wire, δεν κατέστη δυνατή. Δεδομένου ότι το CC1310 διαθέτει επαρκή αριθμό αναλογικών εισόδων, κρίθηκε σκόπιμο να αντικατασταθεί ο DS18B20 με ένα NTC Thermistor, το οποίο επιτρέπει τη μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω μιας αναλογικής διάταξης. Αυτή η αλλαγή διασφάλισε την αξιόπιστη λήψη δεδομένων, προσαρμοσμένη πλέον στις απαιτήσεις και τις

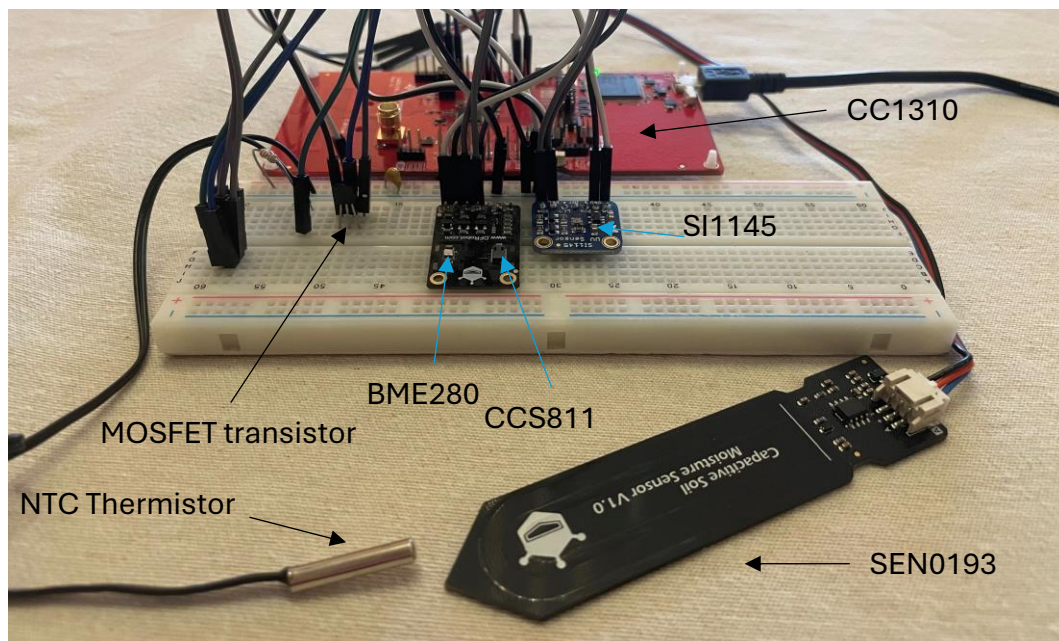
δυνατότητες του νέου μικροελεγκτή. Στην Εικόνα 27 φαίνεται μια απεικόνιση της λειτουργίας του λογισμικού αυτής της έκδοσης του κόμβου.



Εικόνα 27. Η λειτουργία του λογισμικού του κόμβου.

Η έκδοση Node V3.0 (Εικόνα 28), σηματοδοτεί έτσι ένα καθοριστικό βήμα προς την επίτευξη υψηλής αυτονομίας και παράλληλα εγγυημένης επικοινωνίας, θέτοντας τις βάσεις για ένα πλήρως λειτουργικό σύστημα ασύρματης παρακολούθησης και ελέγχου των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο θερμοκήπιο. Τα συμπεράσματα που συγκεντρώθηκαν από την ανάπτυξη των προηγούμενων κόμβων συνέβαλαν στη διαμόρφωση της τελικής αυτής επιλογής, που ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στις ανάγκες της συγκεκριμένης εφαρμογής. Έτσι η κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση λειτουργίας μειώθηκε περίπου στο 1/6 σε σχέση με την

προηγούμενη έκδοση ενώ κατά τη διάρκεια του ύπνου η κατανάλωση έφτασε στο 1/10. Ακόμα ο χρόνος που απαιτείται για την συλλογή των δεδομένων και την αποστολή των μετρήσεων έπεσε στο 1/3. Με βάση τα παραπάνω η αυτονομία του κόμβου παίρνοντας μετρήσεις κάθε λεπτό υπολογίστηκε από 14 μέρες σε 5,5 μήνες, ενώ αν οι μετρήσεις παίρνονται κάθε 5 λεπτά η αυτονομία ξεπερνάει τα 2 χρόνια με την ίδια μπαταρία.



*Εικόνα 28. Η τέταρτη έκδοση του κόμβου.*

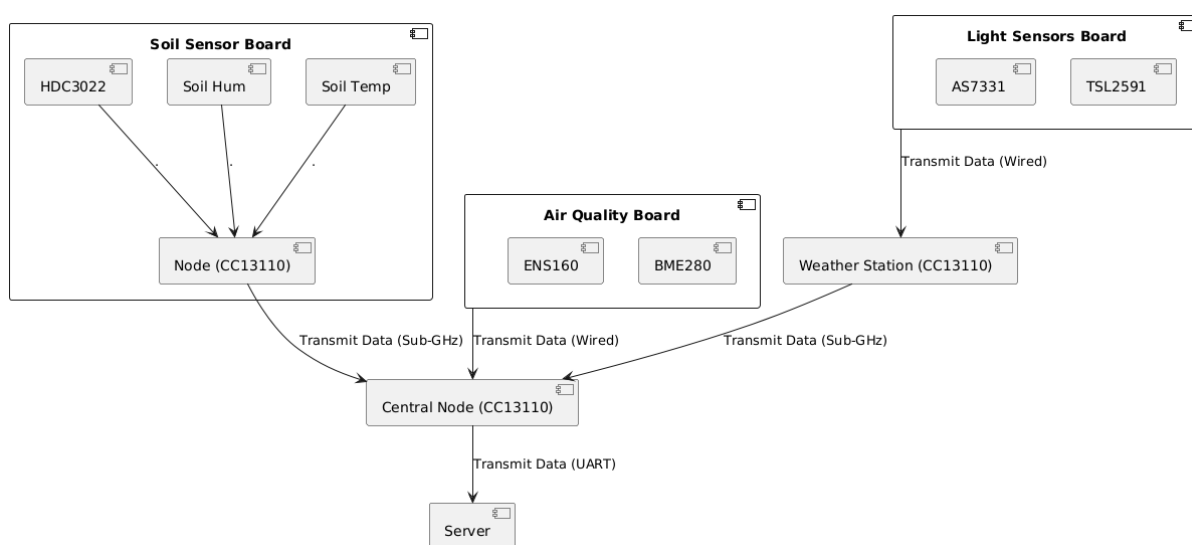
Στο επόμενο στάδιο, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών στο breadboard και την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του κυκλώματος, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ειδικό Shield (Εικόνα 30) για το CC1310 Launchpad. Η κατασκευή αυτή περιλαμβάνει όλους τους ψηφιακούς αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, μαζί με τα απαραίτητα περιφερειακά στοιχεία, όπως πυκνωτές και αντιστάσεις pull-up ή pull-down, ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων. Παράλληλα, στο Shield ενσωματώθηκε ο απαιτούμενος διαιρέτης τάσης για τον αναλογικό αισθητήρα θερμοκρασίας εδάφους, καθώς και το κύκλωμα μεταβαλλόμενης χωρητικότητας του αναλογικού αισθητήρα υγρασίας. Η διαχείριση της τροφοδοσίας υλοποιήθηκε με μια ξεχωριστή υποδοχή για την μπαταρία, ενώ προστέθηκε κύκλωμα προστασίας, ώστε να αποτρέπονται τυχόν ζημιές σε περίπτωση εσφαλμένης ή αντίστροφης σύνδεσής της. Με τον τρόπο αυτό, το δοκιμαστικό σύστημα έγινε πλέον φορητό και ανθεκτικό,

46



### 3.5 Final Version Node V3.1

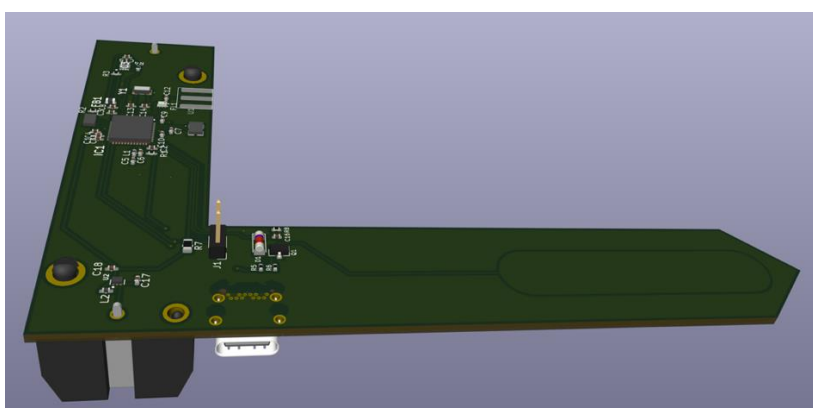
Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο στάδιο εγκαταστάθηκε και δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου, προσφέροντας πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα και τις ενεργειακές απαιτήσεις κάθε αισθητήρα. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι δεν ήταν αναγκαίο να υπάρχει σε κάθε κόμβο ξεχωριστός αισθητήρας φωτός, καθώς ένας μόνο αισθητήρας μπορούσε να δώσει αντιπροσωπευτική εικόνα για το σύνολο του θερμοκηπίου. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι ο αισθητήρας ποιότητας αέρα CCS811 (TVOCs, eCO<sub>2</sub> κλπ.) απαιτούσε συνεχή τροφοδοσία, διότι μετά από κάθε διακοπή χρειαζόταν σχεδόν μισό λεπτό επαναφοράς για να αρχίσει να λαμβάνει αξιόπιστες μετρήσεις, γεγονός που αύξανε την κατανάλωση και μείωνε σημαντικά την αυτονομία του συστήματος. Με βάση τις παραπάνω διαπιστώσεις, η αρχιτεκτονική του κόμβου αναθεωρήθηκε εκ νέου, οδηγώντας στη δημιουργία τριών ξεχωριστών κυκλωμάτων. Στην Εικόνα 31 παρουσιάζεται η τελική τοπολογία του δικτύου. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά καθενός από αυτά τα τρία κυκλώματα, εξηγώντας τον ρόλο τους στη συλλογή μετρήσεων και τον τρόπο με τον οποίο συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης, διατηρώντας παράλληλα την αξιοπιστία και την πληρότητα των δεδομένων.



Εικόνα 31. Η τελική τοπολογία του δικτύου.

### 3.5.1 Soil Sensor Board

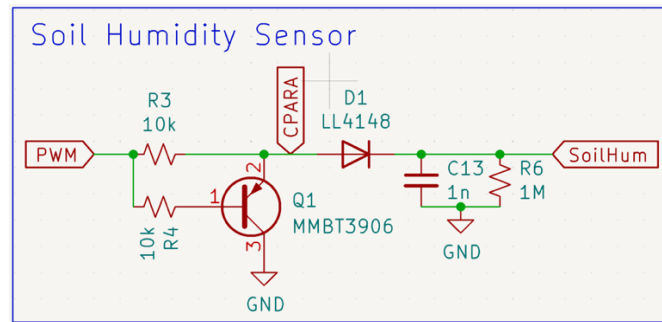
Για την τελική μορφή του κόμβου δημιουργήθηκε μία ενιαία πλακέτα που φέρει τον επεξεργαστή CC1310 μαζί με όλα τα απαραίτητα περιφερειακά και αισθητήρες (Εικόνα 31). Η πλακέτα σχεδιάστηκε ώστε ένα τμήμα της να μπορεί να τοποθετείται απευθείας στο έδαφος, επιτρέποντας έτσι την πραγματοποίηση μετρήσεων υγρασίας και θερμοκρασίας του εδάφους, ενώ το υπόλοιπο τμήμα παραμένει έξω από το έδαφος και φιλοξενεί τον μικροελεγκτή, την μπαταρία και τα υπόλοιπα περιφερειακά εξαρτήματα.



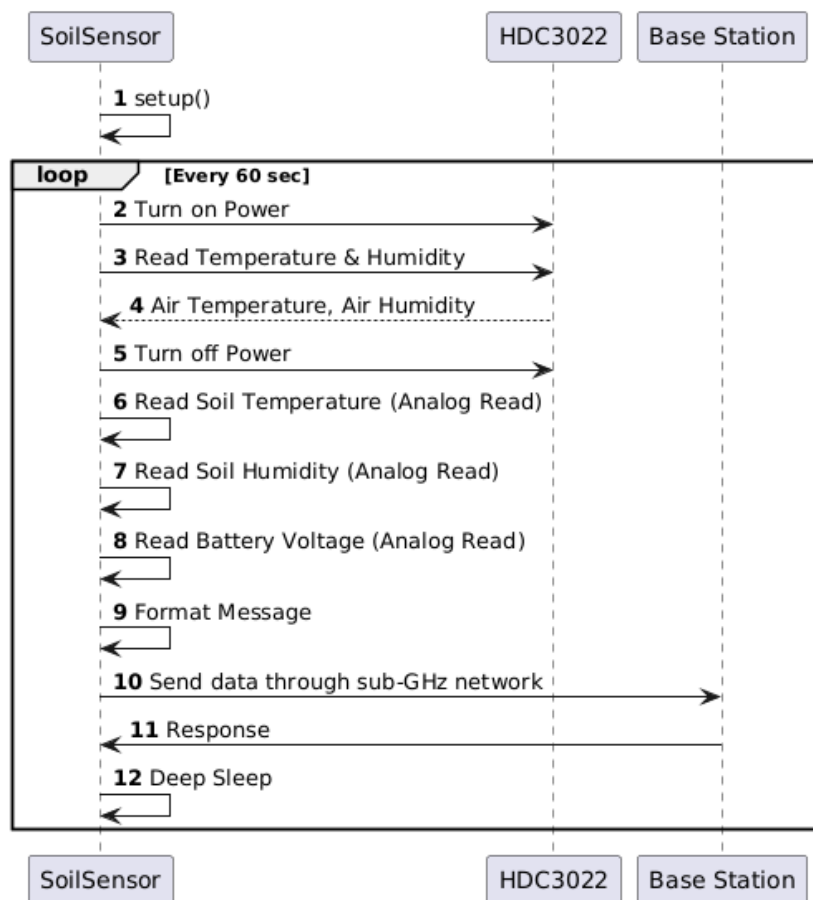
*Εικόνα 31. Τριδιάστατη απεικόνιση του Soil Sensor Board.*

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα, επιλέχθηκε ο αισθητήρας HDC3022, ο οποίος μπορεί να επιτύχει προστασία επιπέδου IP67 με τη χρήση εξειδικευμένης μεμβράνης, αποτελώντας μια πιο ανθεκτική λύση σε αντίξοες συνθήκες σε σχέση με τον BME280. Η τοποθέτησή του τόσο κοντά στο έδαφος κατέστησε απαραίτητη αυτήν τη θωράκιση, προκειμένου να περιοριστούν προβλήματα που συνδέονται με την αυξημένη υγρασία και τη σκόνη του θερμοκηπίου. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του εδάφους, διατηρήθηκε το NTC thermistor, ενώ για τη μέτρηση της υγρασίας του εδάφους ο προηγούμενος αισθητήρας SEN0193 αντικαταστάθηκε από ένα κύκλωμα που βασίζεται σε παλμούς PWM (Εικόνα 32). Πιο συγκεκριμένα, ένα PNP τρανζίστορ ελέγχεται από τον παλμό του CC1310, φορτίζοντας έναν πυκνωτή μέσω διόδου, ο οποίος αποφορτίζεται σταδιακά μέσω του εδάφους και μίας αντίστασης, δημιουργώντας έτσι ένα αναλογικό σήμα που αντικατοπτρίζει το επίπεδο υγρασίας του εδάφους. Η χρήση PWM βοηθά στη μείωση της διάβρωσης των ακροδεκτών, καθώς αποφεύγεται η συνεχής διέλευση ρεύματος και οι επιπτώσεις της ηλεκτρόλυσης.





Εικόνα 32. Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος μέτρησης υγρασίας εδάφους.

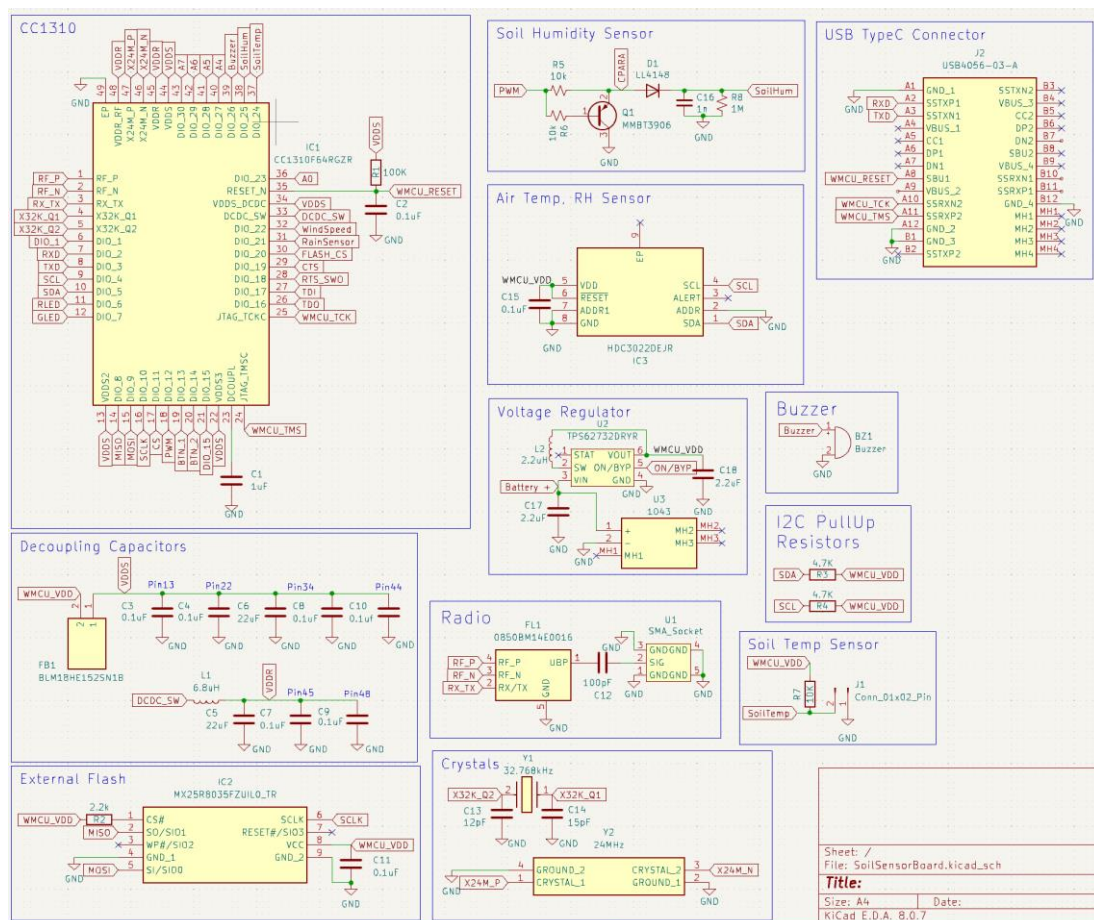


Εικόνα 33. Η λειτουργία του λογισμικού για τον Soil Sensor.

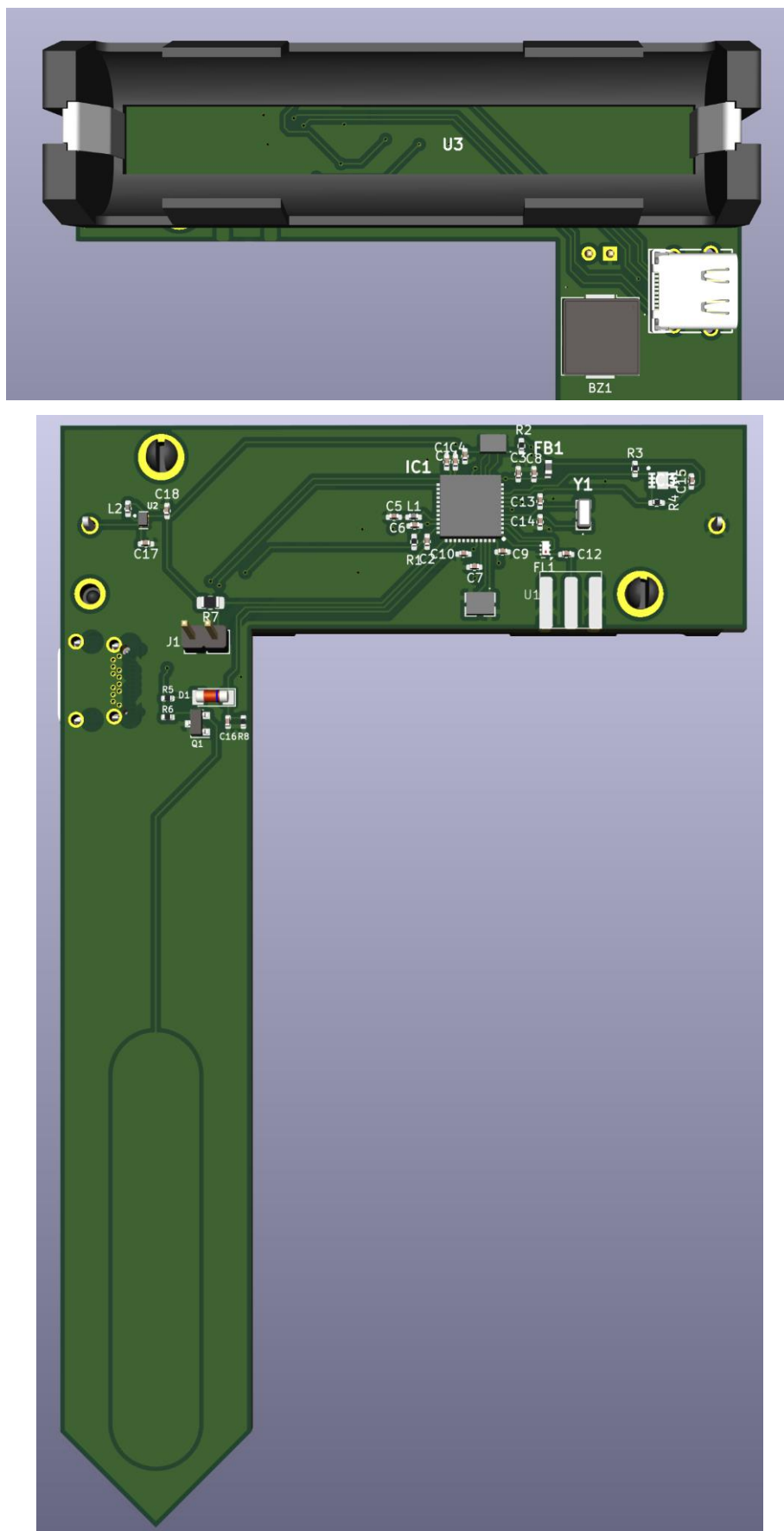
Η τροφοδοσία του κυκλώματος βασίζεται σε μια μπαταρία τύπου 18650, της οποίας η τάση ρυθμίζεται μέσω του μετατροπέα TPS62732. Ο συγκεκριμένος step-down converter έχει βελτιστοποιηθεί ειδικά για τη σειρά CC13xx/CC26xx της TI και παρέχει λειτουργία bypass όταν η τάση της μπαταρίας πλησιάζει την επιθυμητή τάση εξόδου, ώστε να μην πραγματοποιείται αχρείαστη μετατροπή με απώλειες. Επιπλέον, ενσωματώνει λειτουργία Power Save (PFM), επιτρέποντας την ελαχιστοποίηση της

κατανάλωσης σε συνθήκες μικρού φορτίου, στοιχείο κρίσιμο σε εφαρμογές IoT όπου η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να διατηρείται σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα. Ο χαμηλός θόρυβος του μετατροπέα συνεισφέρει και στη βελτίωση των ραδιοσυχνοτήτων, καθώς διατηρεί αυξημένη ευαισθησία στον δέκτη του CC1310, ενώ το πολύ μικρό ρεύμα ηρεμίας του διατηρεί την αυτονομία της μπαταρίας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Στο Soil Sensor Board προστέθηκε επίσης μία θύρα USB Type C για τον προγραμματισμό και τον εντοπισμό λαθών (debugging). Παράλληλα, τοποθετήθηκε ένα buzzer για την ηχητική ειδοποίηση και τον εύκολο εντοπισμό της πλακέτας μέσα στο θερμοκήπιο, σε περίπτωση που χρειαστεί επιτόπιος έλεγχος, πιθανή αλλαγή μπαταρίας, ή κάποια αναβάθμιση του υλικού. Στην Εικόνα 34 φαίνεται μια απεικόνιση του σχηματικού διαγράμματος του Shield. Με αυτήν τη διαμόρφωση, το Soil Sensor Board αποκτά υψηλή αντοχή στις ιδιαιτερότητες του θερμοκηπίου, παρέχοντας ταυτόχρονα ευελιξία, εύκολη αναβάθμιση και επαρκή αυτονομία, που καλύπτει τις απαιτήσεις μακροχρόνιας και αξιόπιστης λειτουργίας.



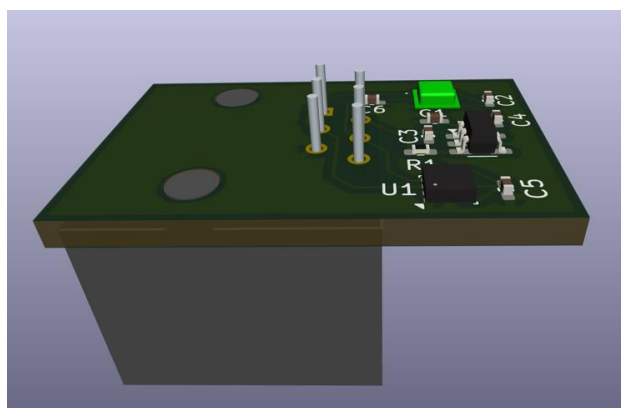
Εικόνα 34. Σχηματικό διάγραμμα του Soil Sensor Board.



Εικόνα 35. Τριδιάστατη απεικόνιση του Soil Sensor Board.

### 3.5.2 Air Quality Board

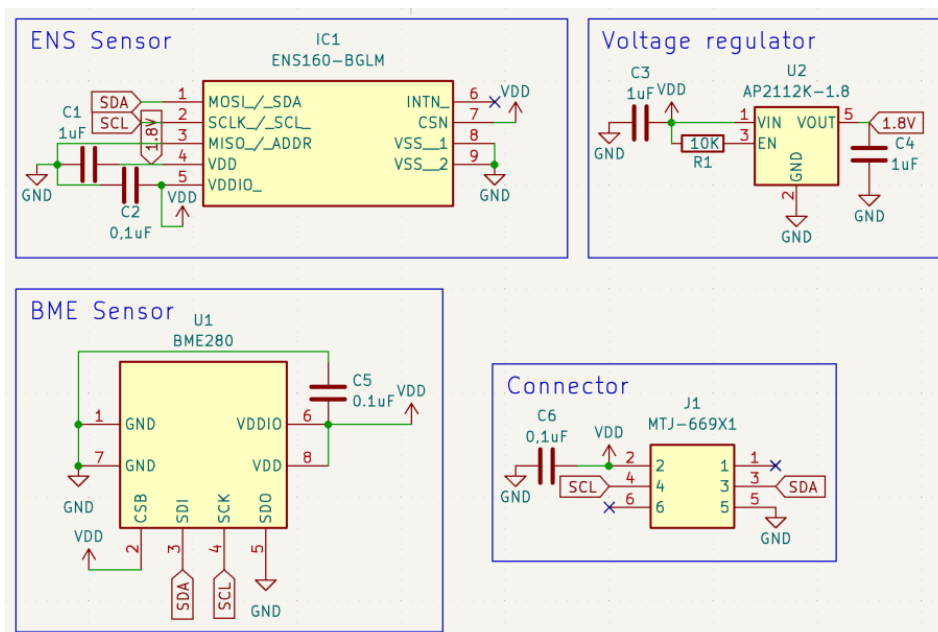
Ένα από τα πλέον εμφανή μειονεκτήματα της προηγούμενης υλοποίησης ήταν η ανάγκη του αισθητήρα ποιότητας αέρα CCS811 για συνεχή τροφοδοσία. Μετά από κάθε διακοπή του ρεύματος, ο αισθητήρας χρειαζόταν σχεδόν μισό λεπτό προσαρμογής, προκειμένου να επανέλθει στις θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος και να αρχίσει να παρέχει αξιόπιστες μετρήσεις. Η απαίτηση αυτή δημιουργούσε σημαντικό πρόβλημα στη συνολική εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς εξανάγκαζε το κύκλωμα να παραμένει ενεργοποιημένο για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, μειώνοντας αισθητά την αυτονομία του συστήματος.



Εικόνα 36. Τριδιάστατη απεικόνιση του Air Quality Board.

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος σχεδιάστηκε μια ξεχωριστή πλακέτα (Εικόνα 36) που θα μπορούσε να φιλοξενήσει τον αισθητήρα ποιότητας αέρα και να τοποθετηθεί σε σημείο με συνεχή τροφοδοσία. Με τον τρόπο αυτό, η ανάγκη για λειτουργία χαμηλής ισχύος εξέλειπε, επιτρέποντας στον αισθητήρα να παραμένει συνεχώς ενεργός, χωρίς τις δυσμενείς συνέπειες της επαναβαθμονόμησης. Καθώς επανεξετάστηκαν τα διαθέσιμα μοντέλα, ο CCS811 αντικαταστάθηκε τελικώς από τον ENS160, ο οποίος θεωρείται μια εξελιγμένη λύση, με μειωμένη απόκλιση μετρήσεων στον χρόνο και πιο αξιόπιστους αλγόριθμους διόρθωσης για απότομες αλλαγές στο περιβάλλον. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί λιγότερο ευαίσθητος σε ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους ή ανεπιθύμητες διακυμάνσεις τάσης, γεγονός που αναβαθμίζει τη σταθερότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων στη διάρκεια της λειτουργίας του.

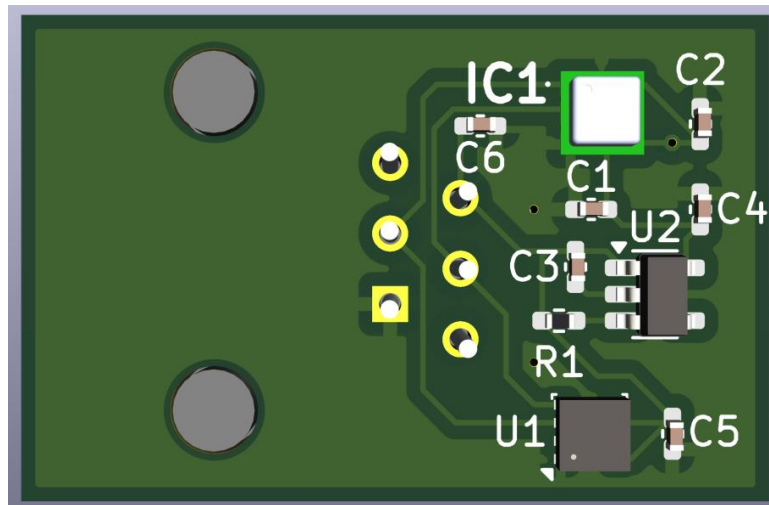
Για την τροφοδοσία του ENS160 αξιοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ρύθμισης τάσης (AP2127), δεδομένου ότι ο νέος αισθητήρας απαιτεί τάση λειτουργίας στα 1.8 V. Η παροχή αυτή διατίθεται σταθερή, επιτρέποντας στο ENS160 να λειτουργεί αδιάκοπα και να παράγει αξιόπιστες εκτιμήσεις για την ποιότητα του αέρα χωρίς τον περιορισμό του ενεργειακού κόστους που χαρακτήριζε τις άλλες πλατφόρμες. Επιπλέον, στην ίδια πλακέτα προστέθηκε και ένας αισθητήρας BME280, ο οποίος τροφοδοτεί το ENS160 με ακριβή δεδομένα θερμοκρασίας και υγρασίας, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την ταχύτητα προσαρμογής των μετρήσεων ποιότητας αέρα. Στην Εικόνα 37 φαίνεται μια απεικόνιση του σχηματικού διαγράμματος του Air Quality Board.



Εικόνα 37. Σχηματικό διάγραμμα του Air Quality Board.

Η συνδεσιμότητα της πλακέτας με τον κεντρικό κόμβο υλοποιήθηκε μέσω ενσύρματης διεπαφής, απαλλάσσοντας την παρούσα σχεδίαση από τους περιορισμούς κατανάλωσης που επιβάλλουν οι ασύρματες επικοινωνίες. Κατά συνέπεια, το Air Quality Board μπορεί να παραμένει συνεχώς τροφοδοτημένο και εντός βέλτιστου λειτουργικού εύρους, δίχως να επηρεάζεται η ενεργειακή αυτονομία των υπόλοιπων κόμβων που πετυχαίνουν πολύ χαμηλή κατανάλωση. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της ανάγκης για χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση στους

απομακρυσμένους κόμβους του θερμοκηπίου και της απαίτησης για υψηλής ποιότητας μετρήσεις του αέρα σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 38. Τριδιάστατη απεικόνιση της άνω όψης του Air Quality Board.

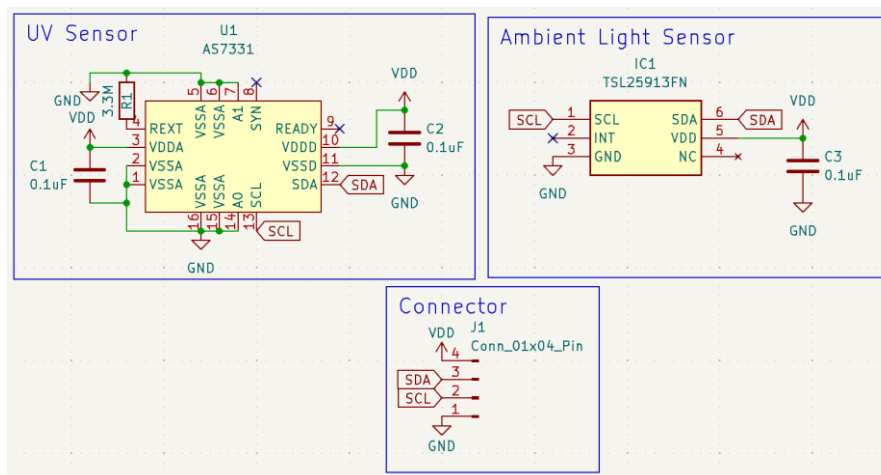
### 3.5.3 Light Sensors Board

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη έκδοση, διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις φωτεινότητας και UV παρέμεναν ουσιαστικά ίδιες σε όλα τα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων μέσα στο θερμοκήπιο, καθιστώντας περιττή την παρουσία τους σε κάθε κόμβο. Για να επιτευχθεί περαιτέρω απλοποίηση και μείωση του κόστους, ο αισθητήρας SI1145 αφαιρέθηκε από τους επιμέρους κόμβους και αντικαταστάθηκε από μια ανεξάρτητη πλακέτα, η οποία προορίζεται να λειτουργεί ως τμήμα ενός μετεωρολογικού σταθμού εκτός του θερμοκηπίου.

Στη νέα αυτή πλακέτα (Εικόνες 40,41) τοποθετήθηκαν οι αισθητήρες TSL2591 και AS7331, αντί για τον SI1145. Ο TSL2591 επιλέχθηκε για την μέτρηση της έντασης του φωτός, χάρη στην υψηλή ανάλυση 16-bit που διαθέτει, καθώς και στο ιδιαίτερα εκτεταμένο δυναμικό εύρος μέτρησης (dynamic range). Έτσι μπορεί να ανιχνεύσει τιμές από πολύ χαμηλά επίπεδα φωτισμού (κάτω του 1 lux) έως και δεκάδες χιλιάδες lux, επιτρέποντας ικανοποιητική ακρίβεια τόσο σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού όσο και υπό έντονο ηλιακό φως. Επιπλέον, ο TSL2591 μετρά ξεχωριστά το ορατό φάσμα και την

υπέρυθρη ακτινοβολία (IR), οδηγώντας σε πιο ακριβή υπολογισμό της φωτεινότητας σε lux και βελτιωμένη αντιστάθμιση της συμβολής του IR φωτός, κάτι κρίσιμο σε θερμοκήπια με ποικίλες πηγές φωτός.

Παράλληλα, ο AS7331 επιλέχθηκε για τη μέτρηση της UV ακτινοβολίας, καθώς αποτελεί έναν φασματικό αισθητήρα που μπορεί να διαχωρίσει τμήματα του φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών UVA/UVB. Σε αντίθεση με τον SI1145, που εκτιμούσε έμμεσα την ένταση της UV μέσα από αλγορίθμους βασισμένους στο κανάλι IR, ο AS7331 προσφέρει σαφώς πιο «καθαρές» και αξιόπιστες ενδείξεις. Επιπλέον, έχει καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο και μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολές θερμοκρασίας ή υγρασίας, εξασφαλίζοντας ότι οι μετρήσεις UV θα παραμείνουν σταθερές ακόμη και στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ενός θερμοκηπίου. Στην Εικόνα 39 φαίνεται μια απεικόνιση του σχηματικού διαγράμματος του Light Sensors Board.

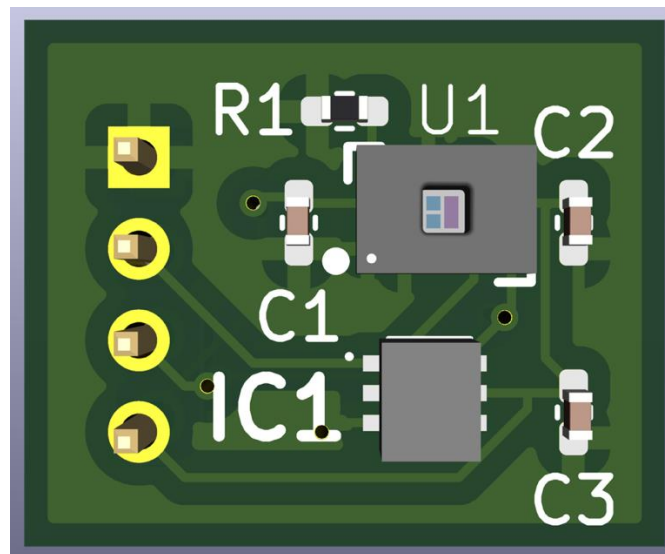


Εικόνα 39. Σχηματικό διάγραμμα του Light Sensors Board.

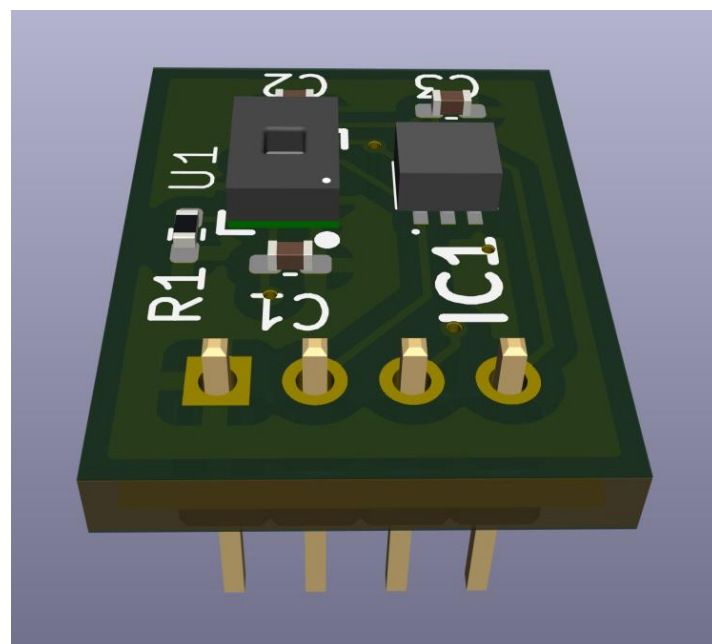
Η νέα πλακέτα περιλαμβάνει αποκλειστικά τους δύο αισθητήρες μαζί με τα περιφερειακά που χρειάζονται για τη λειτουργία τους, όπως πυκνωτές και απαραίτητες αντιστάσεις, χωρίς να επιβαρύνεται με πρόσθετα στοιχεία. Πρόκειται να εγκατασταθεί εκτός του θερμοκηπίου ως τμήμα ενός ολοκληρωμένου μετεωρολογικού σταθμού, συλλέγοντας με συνέπεια και ακρίβεια δεδομένα φωτεινότητας και UV, δίχως να επηρεάζεται από τις απαιτήσεις μειωμένης κατανάλωσης των υπόλοιπων κόμβων εντός του θερμοκηπίου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται τόσο η πληρότητα των



μετρήσεων όσο και η απλότητα στη συντήρηση και την αναβάθμιση του συνολικού συστήματος.



Εικόνα 40. Τριδιάστατη απεικόνιση της άνω όψης του *Light Sensors Board*.



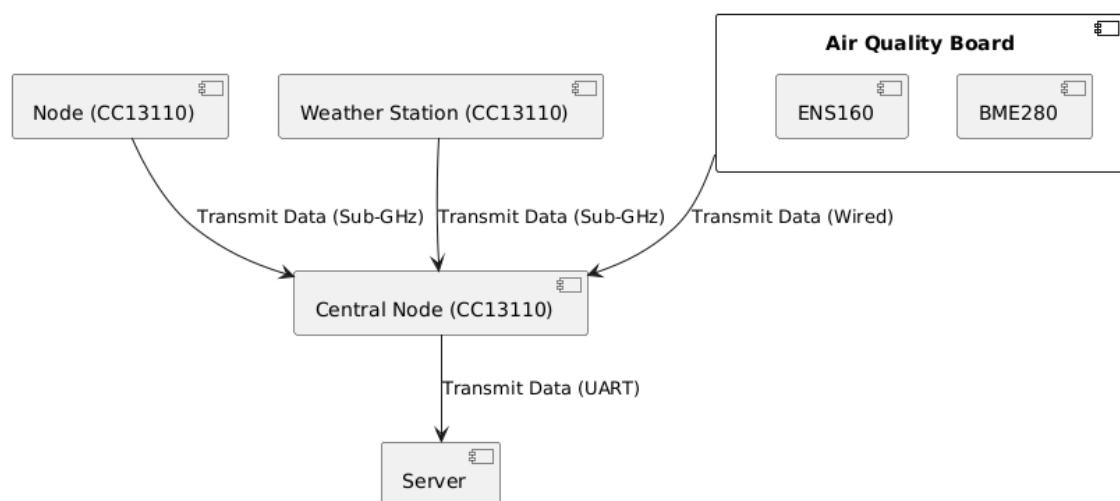
Εικόνα 41. Τριδιάστατη απεικόνιση του *Light Sensors Board*.



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Συγκέντρωση, Αποθήκευση και Αναπαράσταση Περιβαλλοντικών Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής των μετρήσεων από τους επιμέρους κόμβους του ασύρματου δικτύου, η αποθήκευσή τους σε βάση δεδομένων και η οπτικοποίηση τους μέσω διαδικτυακής εφαρμογής, ώστε να επιτυγχάνεται η συνεπής και εύκολη παρακολούθηση των συνθηκών του θερμοκηπίου. Η σχεδίαση επικεντρώνεται τόσο στο υλικό μέρος (hardware) που απαιτείται για τη διασύνδεση των κόμβων, όσο και στο λογισμικό που υλοποιεί τη διαχείριση και την προβολή των δεδομένων.

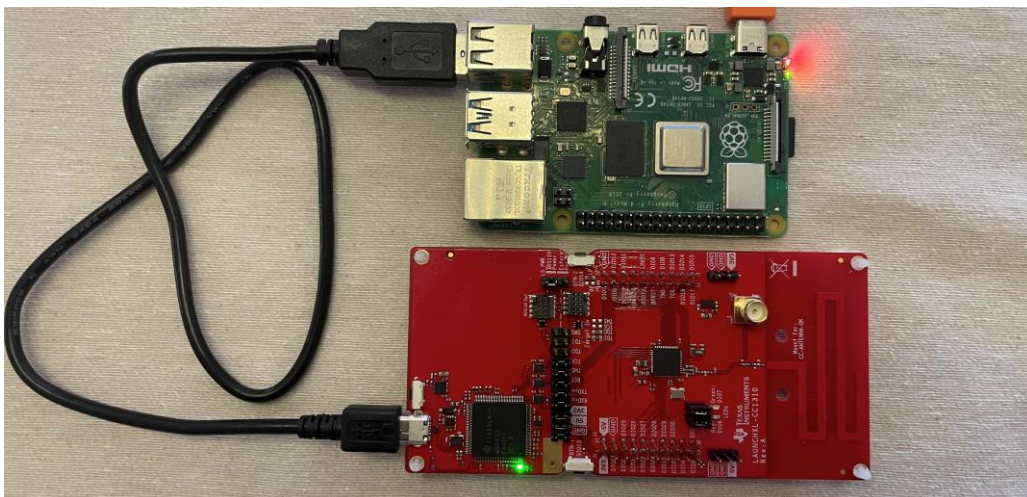
Ο κεντρικός κόμβος (Εικόνα 43) του δικτύου βασίζεται σε ένα CC1310 Launchpad, το οποίο χρησιμοποιεί τη δυνατότητα sub-GHz επικοινωνίας για να λαμβάνει τα πακέτα δεδομένων από τους επιμέρους κόμβους. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου στέλνουν περιοδικά τις μετρήσεις τους (θερμοκρασία, υγρασία, αέρα και εδάφους) μέσω του ενσωματωμένου ραδιοφώνου, ενώ το CC1310 Launchpad, λειτουργώντας ως «συλλέκτης» (coordinator), συγκεντρώνει αυτά τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, η μονάδα αυτή προωθεί τις πληροφορίες, μέσω της σειριακής θύρας (UART), σε ένα Raspberry Pi, το οποίο βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία και έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται η τοπολογία του κεντρικού κόμβου.



Εικόνα 42. Η τοπολογία του κεντρικού κόμβου.

Το Raspberry Pi φιλοξενεί μια βάση δεδομένων SQLite, όπου αποθηκεύονται όλες οι ληφθείσες μετρήσεις, μαζί με επιπλέον μεταδεδομένα (χρόνος λήψης, προέλευση κόμβου κλπ.). Η απόφαση χρήσης του SQLite υπαγορεύθηκε από την απλότητα ενσωμάτωσης και τη χαμηλή κατανάλωση πόρων, δεδομένου ότι το Raspberry Pi λειτουργεί ως μικρός server, ενώ παράλληλα προσφέρει επαρκή απόδοση και αξιοπιστία για την κλίμακα δεδομένων που απαιτούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Επιπλέον, το Raspberry Pi τρέχει έναν web server, ο οποίος αναλαμβάνει να ανακτά τα δεδομένα από τη βάση και να τα προβάλλει γραφικά μέσα από δυναμικές σελίδες. Ο χρήστης, συνδεδεμένος απομακρυσμένα από οποιαδήποτε συσκευή με πρόσβαση στο διαδίκτυο, μπορεί να διαπιστώσει σε πραγματικό χρόνο ποιες είναι οι τρέχουσες συνθήκες του θερμοκηπίου, βλέποντας π.χ. τις ενδείξεις θερμοκρασίας και υγρασίας. Παράλληλα, έχει τη δυνατότητα να ανατρέξει σε ιστορικά στοιχεία, επιλέγοντας συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και αναλύοντας τη μεταβολή των παραμέτρων στο πέρασμα του χρόνου. Με αυτόν τον τρόπο, προσφέρεται ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στο θερμοκήπιο, επιτρέποντας εγκαίρως την εξαγωγή συμπερασμάτων και τη λήψη αποφάσεων για τη βελτίωση της παραγωγής.



*Εικόνα 43. Ο κεντρικός κόμβος.*

## 4.1 Συγκέντρωση των δεδομένων από τον κεντρικό κόμβο

Σε κάθε κύκλο λειτουργίας του, ο κόμβος ξυπνάει από την κατάσταση βαθύ ύπνου (deep sleep) και ενεργοποιεί τους αισθητήρες που φιλοξενεί. Αμέσως μετά, συλλέγει τα δεδομένα από αυτούς, τα αποθηκεύει σε προσωρινές μεταβλητές και απενεργοποιεί τους αισθητήρες, ώστε να μειώσει την κατανάλωση ρεύματος. Στη συνέχεια, συντάσσει και αποστέλλει ένα πακέτο δεδομένων ασύρματα προς τον κεντρικό κόμβο του συστήματος. Μετά την ολοκλήρωση της αποστολής, ο κόμβος επιστρέφει σε κατάσταση ύπνου, μέχρι να φτάσει η επόμενη στιγμή δειγματοληψίας.

Για την αποστολή των δεδομένων ορίζεται η παρακάτω δομή (struct) (Εικόνα 44), η οποία περιγράφει τις μετρούμενες παραμέτρους:

```
52 ▼ typedef struct __attribute__((packed, aligned(1))) {  
53     uint8_t node_id;  
54     uint16_t soil_temperature;  
55     uint16_t soil_humidity;  
56     int32_t air_temperature;  
57     int32_t air_humidity;  
58     uint16_t battery_Voltage;  
59 } SensorData_t;
```

Εικόνα 44. Το πακέτο των δεδομένων του κόμβου.

Το πεδίο *node\_id* αντιστοιχεί σε έναν μοναδικό αριθμό που αντιστοιχίζεται στον κόμβο κατά τον προγραμματισμό του, διασφαλίζοντας την ταυτοποίηση της προέλευσης των δεδομένων. Τα *soil\_temperature*, *soil\_humidity* και *battery\_Voltage* υλοποιούνται ως *uint16\_t*, δεδομένου ότι προκύπτουν από μετρήσεις μετατρεπόμενες μέσω 12-bit ADC, ενώ οι παράμετροι *air\_temperature* και *air\_humidity* αποθηκεύονται σε *int32\_t* ώστε να μπορούν να χειριστούν αριθμούς κινητής υποδιαστολής.

Η δήλωση *\_\_attribute\_\_((packed, aligned(1)))* καθιστά τη δομή «συμπυκνωμένη» δίχως κενά μεταξύ των πεδίων, πράγμα που εξυπηρετεί την άμεση αποστολή της σε επίπεδο byte (byte-level) μέσω ασύρματης μετάδοσης και την ελαχιστοποίηση του μεγέθους για την μέγιστη εξοικονόμηση bandwidth κατά την μετάδοση.

Όσον αφορά στη διαδικασία αποστολής (Εικόνα 45), γίνεται αρχικά μία προσπάθεια εκπομπής του μηνύματος. Εάν αυτή η προσπάθεια ολοκληρωθεί με επιτυχία, ο κόμβος επιστρέφει σε κατάσταση ύπνου για εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αντίθετη περίπτωση, επιχειρείται δεύτερη και τρίτη εκπομπή. Αν ούτε αυτές οι μεταδόσεις δεν επιτύχουν, ο κόμβος ενεργοποιεί έναν αλγόριθμο τυχαίας καθυστέρησης, παραμένοντας σε αδράνεια για χρόνο από 0 έως 3 δευτερόλεπτα, πριν προχωρήσει σε τρίτη απόπειρα. Το σκεπτικό πίσω από τη στρατηγική αυτή είναι να αποφεύγονται πιθανές συγκρούσεις στη συχνότητα μετάδοσης, σε περιπτώσεις όπου πολλοί κόμβοι προσπαθούν να επικοινωνήσουν ταυτόχρονα με τον κεντρικό κόμβο. Μέσα από αυτά τα βήματα, διασφαλίζεται η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα του δικτύου, ακόμη και σε συνθήκες αυξημένου φόρτου.

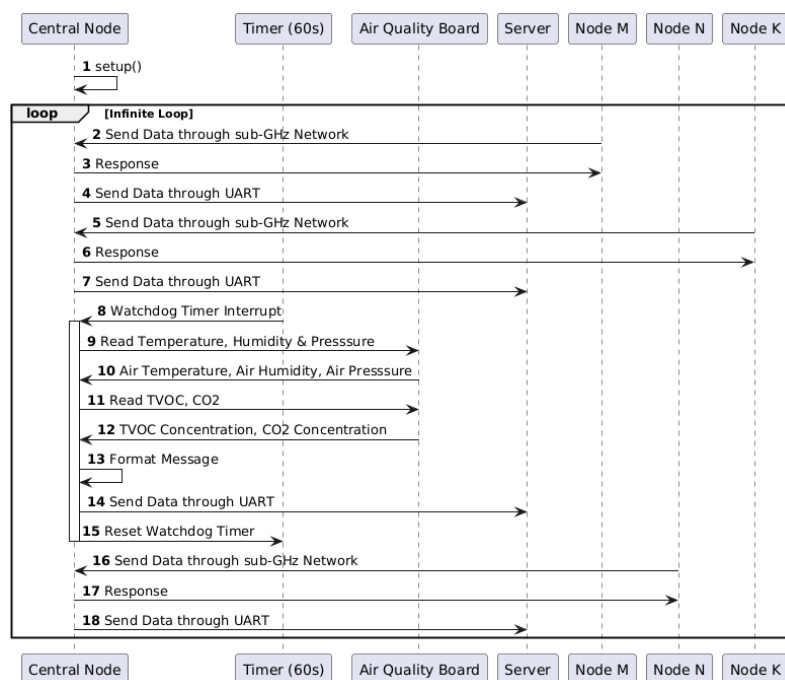
```
288     memcpy(txPacket.payload, &sensorData, sizeof(SensorData_t));
289     txPacket.len = sizeof(SensorData_t);
290
291     for (int attempt = 1; attempt < 4; ++attempt)
292     {
293         uint32_t absTime;
294         /* Set Tx absolute time to current time + 1s */
295         EasyLink_getAbsTime(&absTime);
296         txPacket->absTime = absTime + EasyLink_ms_To_RadioTime(1000);
297
298         EasyLink_Status result = EasyLink_transmit(txPacket);
299
300         if (result == EasyLink_Status_Success)
301         {
302             /* Toggle LED1 to indicate TX success */
303             PIN_setOutputValue(pinHandle, Board_PIN_LED1, !PIN_getOutputValue(Board_PIN_LED1));
304         }
305         else
306         {
307             /* Toggle LED1 and LED2 to indicate error */
308             PIN_setOutputValue(pinHandle, Board_PIN_LED1, !PIN_getOutputValue(Board_PIN_LED1));
309             PIN_setOutputValue(pinHandle, Board_PIN_LED2, !PIN_getOutputValue(Board_PIN_LED2));
310
311             if (attempt == 3)
312             {
313                 srand((unsigned int)time(NULL)); //random delay
314                 int randomDelay = rand() % 3000; // delay should be in range 0 - 3000 ms
315                 usleep(randomDelay * 1000);      // delay in ms
316             }
317         }
318     }
319     sleep(60000);
```

Εικόνα 45. Η διαδικασία αποστολής των μετρήσεων.

Ο κεντρικός κόμβος λειτουργεί ουσιαστικά ως «συλλέκτης» των ασύρματων μηνυμάτων που προέρχονται από τους κόμβους αισθητήρων του δικτύου. Στη βασική ρουτίνα του, βρίσκεται σε συνεχή ακρόαση του ραδιοφώνου sub-GHz, έτοιμος να δεχτεί πακέτα δεδομένων. Μόλις εντοπίσει ένα πακέτο, το λαμβάνει και το εκτυπώνει στη σειριακή του θύρα (UART), απ' όπου και προωθείται στο Raspberry Pi για καταγραφή.

Πέρα από τη διαρκή παρακολούθηση των πακέτων, ο κεντρικός κόμβος αξιοποιεί έναν ενσωματωμένο RTC Timer (Real-Time Clock), ο οποίος έχει ρυθμιστεί να πυροδοτεί μία διακοπή (interrupt) κάθε 60 δευτερόλεπτα. Σε αυτό το σημείο, εκτελείται μια ξεχωριστή συνάρτηση που αλληλεπιδρά με το Air Quality Board, συλλέγοντας τις παραμέτρους θερμοκρασίας, υγρασίας, βαρομετρικής πίεσης και ποιότητας αέρα (TVOC, CO<sub>2</sub>). Αυτές οι τιμές διαβάζονται μέσω της διεπαφής I2C και, αφού συγκεντρωθούν, αποστέλλονται επίσης στο UART του κεντρικού κόμβου.

Η λειτουργία του RTC Timer βασίζεται σε έναν εξωτερικό κρύσταλλο (32.768 kHz) που επιτρέπει στον μικροελεγκτή να κρατά με ακρίβεια τον χρόνο. Σε τακτά χρονικά διαστήματα -στην προκειμένη περίπτωση κάθε 60 δευτερόλεπτα- το ρολόι δημιουργεί μια διακοπή (interrupt), οδηγώντας στην εκτέλεση μιας προγραμματισμένης συνάρτησης. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει την περιοδική συλλογή πρόσθετων μετρήσεων, χωρίς να απαιτείται συνεχής λειτουργία του κώδικα που αλληλεπιδρά με το Air Quality Board. Με τον τρόπο αυτό, η κύρια ρουτίνα μπορεί να παραμένει προσανατολισμένη στην λήψη και επεξεργασία ασύρματων μηνυμάτων, ενώ οι «τοπικές» μετρήσεις του κεντρικού κόμβου συλλέγονται σε διαστήματα που καθορίζονται από το RTC, διατηρώντας τον κώδικα απλό και ευέλικτο. Στην Εικόνα 46 φαίνεται μια απεικόνιση της λειτουργίας του λογισμικού αυτής της έκδοσης του κόμβου.



Εικόνα 46. Η λειτουργία του λογισμικού του κεντρικού κόμβου.

## 4.2 Αποθήκευση των δεδομένων στη βάση δεδομένων

Για την αποθήκευση των μετρήσεων που καταφθάνουν στον κεντρικό κόμβο, αξιοποιείται ένα περιβάλλον Docker που εκτελείται στο Raspberry Pi. Στο περιβάλλον αυτό, υπάρχουν δύο Containers, εκ των οποίων το ένα φιλοξενεί μία εφαρμογή γραμμένη σε Python. Η εφαρμογή αυτή λαμβάνει τα δεδομένα από τον κεντρικό κόμβο μέσω της σειριακής θύρας (UART) και τα αποθηκεύει σε μια βάση δεδομένων SQLite. Η βάση δεδομένων χωρίζεται σε τρεις πίνακες:

- Στον πίνακα **Soil\_Sensor\_Data** αποθηκεύονται οι μετρήσεις που προέρχονται από τους επί μέρους κόμβους του δικτύου (αισθητήρες εδάφους).
- Στον πίνακα **Environmental\_Data** αποθηκεύονται οι τιμές που συλλέγονται από το Air Quality Board μέσω του κεντρικού κόμβου.
- Στον πίνακα **Weather\_Station\_Data** καταχωρίζονται οι πληροφορίες που αποστέλλει ο μετεωρολογικός σταθμός.

```
60 # Insert data into Soil_Sensor_Data table
61 def insert_soil_sensor_data(node_id, soil_temp, soil_hum, air_temp, air_hum, battery_volt, timestamp):
62     conn = sqlite3.connect('GreenHouse_data.db')
63     c = conn.cursor()
64     c.execute('''
65         INSERT INTO Soil_Sensor_Data (Node_ID, Soil_Temperature, Soil_Humidity, Air_Temperature, Air_Humidity, Battery_Voltage, Timestamp)
66         VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?, ?)
67     ''', (node_id, soil_temp, soil_hum, air_temp, air_hum, battery_volt, timestamp))
68     conn.commit()
69     conn.close()
```

*Εικόνα 47. Η αποθήκευση των μετρήσεων του κόμβου στη βάση δεδομένων.*

Τα δεδομένα φτάνουν στη σειριακή θύρα του Raspberry Pi σε μορφή αριθμών, διαχωρισμένων με κενά διαστήματα (space-separated). Η Python εφαρμογή (Εικόνα 48) διαβάζει τα σειριακά δεδομένα, αποσπά τα δεδομένα χωρίζοντας τα στα σημεία των κενών, και κατόπιν αναθέτει τις τιμές σε μεταβλητές. Για τον χαρακτηρισμό της προέλευσης κάθε μέτρησης, χρησιμοποιείται το Node\_ID. Η τιμή 0 δεσμεύεται για τον κεντρικό κόμβο, ενώ η τιμή 255 για τον μετεωρολογικό σταθμό. Όλα τα ενδιάμεσα Node\_ID αφορούν τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Παράλληλα, ο αριθμός των πεδίων που περιέχει το εισερχόμενο μήνυμα ελέγχεται, ώστε να προσδιοριστεί ο πίνακας στον οποίο θα αποθηκευτούν οι μετρήσεις. Εάν το εισερχόμενο μήνυμα δεν συνάδει με το αναμενόμενο πλήθος τιμών, τα δεδομένα απορρίπτονται ως εσφαλμένα.



Όπως έχει ήδη επισημανθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, όλες οι τιμές που μεταφέρονται στο ασύρματο κανάλι είναι τύπου `int` ή `uint`, ώστε να μειώνεται το μέγεθος των μηνυμάτων και ο χρόνος δέσμευσης του μέσου μετάδοσης. Η εφαρμογή σε Python εκτελεί την τελική μετατροπή (casting) των δεδομένων στους σωστούς τύπους για την αποθήκευση στα αντίστοιχα κελιά της SQLite βάσης, διασφαλίζοντας έτσι τη συμβατότητα των πεδίων με τους τύπους των πινάκων. Με αυτήν τη διαδικασία επιτυγχάνεται μια αποτελεσματική και αξιόπιστη αποθήκευση των μετρήσεων, η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επεξεργασία και την οπτικοποίηση τους στα επόμενα στάδια.

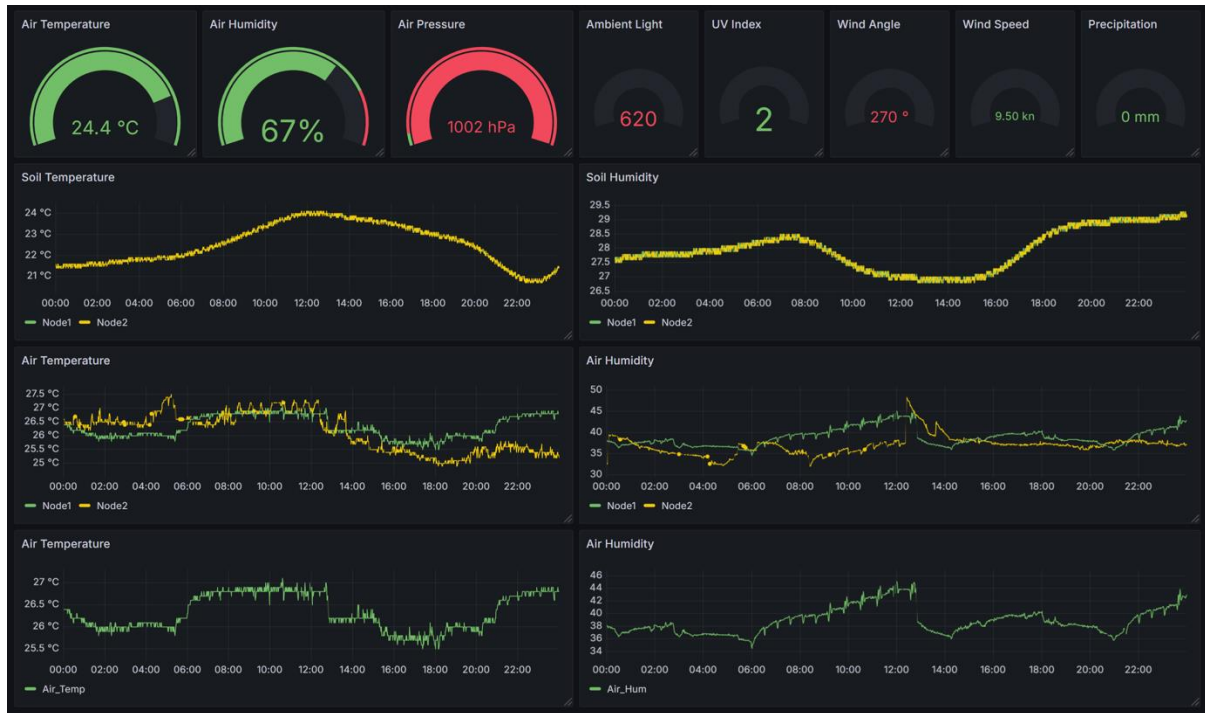
```
98 while True:
99     try:
100         line = ser.readline().decode().strip() # Read and decode the UART input
101     if line:
102         # Parse the space-delimited fields
103         fields = line.split()
104         timestamp = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')
105     try:
106         node_id = int(fields[0]) # First field is Node_ID
107         if node_id == 0 and len(fields) == 6: # Environmental Data
108             air_temp = float(int(fields[1]) / 100.0)
109             air_hum = float(int(fields[2]) / 100.0)
110             air_pressure = float(int(fields[3]) / 100.0)
111             tvoc = int(fields[4])
112             co2 = int(fields[5])
113             insert_environmental_data(node_id, air_temp, air_hum, air_pressure, tvoc, co2, timestamp)
114         elif node_id == 255 and len(fields) == 10: # Weather Station Data
115             air_temp = float(int(fields[1]) / 100.0)
116             air_hum = float(int(fields[2]) / 100.0)
117             air_pressure = int(fields[3])
118             ambient_light = int(fields[4])
119             uv_index = int(fields[5])
120             avg_wind_dir = fields[6]
121             avg_wind_speed = float(int(fields[7]) / 100.0)
122             max_wind_speed = float(int(fields[8]) / 100.0)
123             precipitation = float(int(fields[9]) / 100.0)
124             insert_weather_station_data(node_id, air_temp, air_hum, air_pressure, ambient_light, uv_index, avg_wind_dir, avg_wind_speed, max_wind_speed, precipitation, timestamp)
125         elif 0 < node_id < 255 and len(fields) == 6: # Soil Sensor Data
126             soil_temp = float(int(fields[1]) / 100.0)
127             soil_hum = float(int(fields[2]) / 100.0)
128             air_temp = float(int(fields[3]) / 100.0)
129             air_hum = float(int(fields[4]) / 100.0)
130             battery_volt = float(int(fields[5]) / 100.0)
131             insert_soil_sensor_data(node_id, soil_temp, soil_hum, air_temp, air_hum, battery_volt, timestamp)
132     except ValueError:
133         print(f"Invalid data format or Node_ID: {line}")
134     except KeyboardInterrupt:
135         print(f"Skipping invalid data: {line}")
136     except serial.SerialException as e:
137         print(f"Error reading serial data: {e}")
138     except sqlite3.DatabaseError as e:
139         print(f"Database error: {e}")
140     sleep(1) # Delay to prevent overloading CPU in case of continuous errors
```

Εικόνα 48. Μορφοποίηση των δεδομένων και αποθήκευση στον κατάλληλο πίνακα.

### 4.3 Αναπαράσταση των περιβαλλοντικών δεδομένων

Στο δεύτερο Container του Docker τρέχει μια εφαρμογή *Grafana*, η οποία αναλαμβάνει την οπτικοποίηση των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων του θερμοκηπίου. Το Grafana αποτελεί ένα από τα πλέον δημοφιλή εργαλεία ανοιχτού κώδικα για τη γραφική απεικόνιση και την παρακολούθηση δεδομένων. Ο χρήστης διαμορφώνει συγκεκριμένα queries για να ανακτήσει τα δεδομένα που επιθυμεί (στην προκειμένη περίπτωση από τη βάση SQLite). Τα αποτελέσματα των queries τροφοδοτούν δυναμικά τα διάφορα panels στο dashboard, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, την προσαρμογή χρονικών διαστημάτων και τη

σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κόμβων ή μεταβλητών. Η δυνατότητα σύνδεσης με πολλαπλές πηγές δεδομένων καθιστά το Grafana ιδανικό για εφαρμογές IoT, όπως η παρούσα, όπου η συστηματική παρακολούθηση και η ανάλυση των περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι καθοριστικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση του θερμοκηπίου. [29]



Εικόνα 49. Ο πίνακας ελέγχου.

Στην δική μας περίπτωση, έχει δημιουργηθεί ένας πίνακας ελέγχου (dashboard) (Εικόνα 49) που προσφέρει μια σφαιρική απεικόνιση στις συνθήκες που επικρατούν εντός και εκτός του θερμοκηπίου. Στο επάνω μέρος της σελίδας προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο οι τρέχουσες τιμές από τον μετεωρολογικό σταθμό (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, ένταση φωτός, δείκτης υπέρυθρης ακτινοβολίας, κατεύθυνση και ένταση αέρα και βροχόπτωση), ενώ αμέσως πιο κάτω εμφανίζονται σε ξεχωριστά γραφήματα οι διάφορες περιβαλλοντικές μεταβλητές από τους κόμβους του συστήματος. Πιο κάτω βρίσκονται τα δεδομένα από τον κεντρικό κόμβο του συστήματος (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση αέρα, συγκέντρωση TVOC και CO<sub>2</sub>). Τα δεδομένα από κάθε κόμβο απεικονίζονται με διαφορετικό χρώμα σε κάθε γράφημα, επιτρέποντας την ευδιάκριτη σύγκριση των μετρήσεων. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στο ιστορικό δεδομένων και να διακρίνει ευκολότερα τις μεταβολές που συνέβησαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Αυτόνομου Μετεωρολογικού Σταθμού

Η αποτελεσματική διαχείριση ενός θερμοκηπίου προϋποθέτει όχι μόνο τη συνεχή παρακολούθηση των συνθηκών στο εσωτερικό του, αλλά και την κατανόηση και πρόβλεψη των εξωτερικών καιρικών παραμέτρων που επηρεάζουν το μικροκλίμα του. Ένας αυτόνομος μετεωρολογικός σταθμός, εγκατεστημένος σε κατάλληλο σημείο εκτός του θερμοκηπίου, επιτρέπει τη μέτρηση και καταγραφή κρίσιμων δεδομένων όπως η εξωτερική θερμοκρασία, η υγρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ένταση και κατεύθυνση του ανέμου, ακόμα και η ηλιακή ακτινοβολία και η βροχόπτωση. Με αυτές τις πληροφορίες στη διάθεσή τους, οι καλλιεργητές μπορούν να προβλέπουν καλύτερα πώς θα εξελιχθούν οι συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, να λαμβάνουν έγκαιρα μέτρα προσαρμογής (π.χ. άνοιγμα εξαερισμών, ρύθμιση θέρμανσης) και να βελτιστοποιούν το πότισμα, τη λίπανση και άλλους παράγοντες που σχετίζονται με τη συνολική απόδοση της καλλιέργειας.

Τα δεδομένα που παρέχει ο μετεωρολογικός σταθμός λειτουργούν επιπλέον ως «σημείο αναφοράς» για τη σύγκριση μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, βοηθώντας στη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποδοτικότητα των συστημάτων ελέγχου κλίματος, αλλά και στην εκτίμηση των απωλειών ή της ενεργειακής κατανάλωσης. Η δυνατότητα συλλογής αυτών των πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και η περαιτέρω ενσωμάτωσή τους στο κεντρικό σύστημα παρακολούθησης επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των εξωτερικών επιδράσεων, συμβάλλοντας σε μια πιο «έξυπνη» και ευέλικτη στρατηγική διαχείρισης του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια θα αναλυθεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τέτοιου αυτόνομου μετεωρολογικού σταθμού, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο εντάσσεται στο συνολικό σύστημα συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων.

Η πρώτη έκδοση του μετεωρολογικού σταθμού βασίζεται σε ένα έτοιμο κιτ της DFRobot, σχεδιασμένο να καταγράφει μια σειρά από περιβαλλοντικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της ταχύτητας και της

κατεύθυνσης του ανέμου, των βροχοπτώσεων, καθώς και της βαρομετρικής πίεσης. Το kit περιλαμβάνει τους εξής αισθητήρες:

- **Ανεμόμετρο:** για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου.
- **Ανεμοδείκτης:** για την καταγραφή της διεύθυνσης του ανέμου.
- **Βροχόμετρο:** για την μέτρηση της ποσότητας των βροχοπτώσεων.
- **DH11:** για την μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας.
- **BMP180:** για την μέτρηση της βαρομετρικής πίεσης.

Όλοι οι παραπάνω αισθητήρες συνδέονται σε μια ειδική πλακέτα του kit (*Weather Link bh4tdv*). Ο ρόλος αυτής της πλακέτας (Εικόνα 50) είναι να λαμβάνει τις ενδείξεις από τους αισθητήρες και να τις μεταδίδει σειριακά σε ένα Arduino, απλοποιώντας έτσι την ενσύρματη σύνδεση και τη διαδικασία ανάγνωσης των δεδομένων. Στην παρούσα υλοποίηση, το Arduino Mega συνδέεται με το Weather Link μέσω τεσσάρων καλωδίων (VCC, GND, RX, TX), δημιουργώντας μια απλή σειριακή επικοινωνία.<sup>[30]</sup>



*Εικόνα 50. Weather Link Board.*

Μόλις το Weather Link στείλει τα δεδομένα προς το Arduino, αυτά αποθηκεύονται σε έναν ενδιάμεσο buffer. Η κύρια ρουτίνα του Arduino διαβάζει αυτά τα δεδομένα, αναλαμβάνοντας τις απαραίτητες μετατροπές και την αποθήκευσή τους σε μεταβλητές. Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα αποτελέσματα εκτυπώνονται στο Serial Monitor για διαγνωστικούς λόγους, ενώ η ασύρματη προώθησή τους προς έναν κεντρικό server επιτυγχάνεται μέσω ενός ESP-01 module, ακολουθώντας την ίδια φιλοσοφία μετάδοσης που εφαρμόστηκε και στην αντίστοιχη έκδοση κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο,

το σύστημα εξασφαλίζει την αξιόπιστη συλλογή δεδομένων από τον μετεωρολογικό σταθμό, τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν με τα υπόλοιπα δεδομένα του θερμοκηπίου για μια ολοκληρωμένη εποπτεία των περιβαλλοντικών συνθηκών. Στην Εικόνα 51 φαίνεται μια απεικόνιση της πρώτης έκδοσης του μετεωρολογικού σταθμού.



*Εικόνα 51. Η πρώτη έκδοση του μετεωρολογικού σταθμού.*

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από την πρώτη έκδοση, η δεύτερη έκδοση του μετεωρολογικού σταθμού εστιάζει στην απλούστευση της εγκατάστασης και τη μείωση του όγκου του συστήματος. Αντί για το Arduino Mega σε συνδυασμό με το ESP-01, επιλέχθηκε η ενσωμάτωση του CC1310, με αυτόν τον τρόπο, η αποστολή των δεδομένων στον σταθμό βάσης γίνεται πλέον μέσω του sub-GHz δικτύου, διατηρώντας τα πλεονεκτήματα της μεγάλης εμβέλειας και της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας.

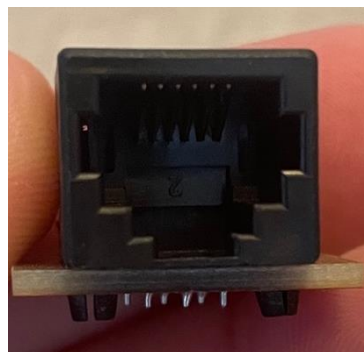
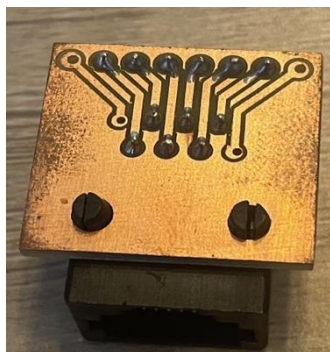
Παράλληλα, αντικαταστάθηκε το προηγούμενο κιτ αισθητήρων με ένα άλλο μετεωρολογικό σετ, το οποίο δεν χρειάζεται ενδιάμεση πλακέτα. Όλοι οι αισθητήρες συνδέονται απευθείας στον CC1310, απλοποιώντας αισθητά τόσο τη συνδεσμολογία όσο και τη διαδικασία ανάγνωσης. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την έκδοση είναι οι εξής:

- Ανεμόμετρο (Anemometer)

- Ανεμοδείκτης (Wind Vane)
- Βροχομετρικός αισθητήρας (Rain Gauge)
- Αισθητήρας Θερμοκρασίας, Υγρασίας και Πίεσης (BME280)
- Αισθητήρας έντασης φωτός και δείκτη UV (Light Sensors Board)

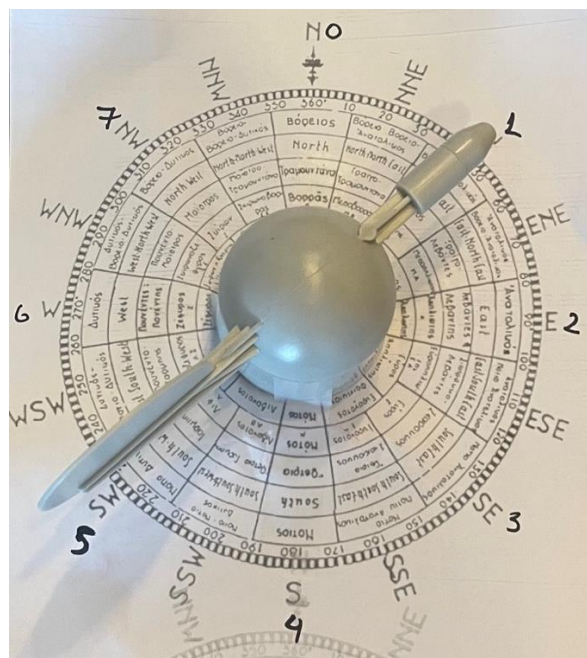
Όλες οι μετρήσεις συγκεντρώνονται στον CC1310, ο οποίος με τη σειρά του αναλαμβάνει να στείλει τα δεδομένα στον κεντρικό κόμβο του συστήματος (σταθμό βάσης) μέσω του ενσωματωμένου ραδιοφώνου sub-GHz. Ο κεντρικός κόμβος τα προωθεί, όπως και τα υπόλοιπα δεδομένα του δικτύου, σε έναν server για αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό, η δεύτερη έκδοση του μετεωρολογικού σταθμού απαλλάχτηκε από την ανάγκη χρήσης πρόσθετων modules για την ασύρματη επικοινωνία, αποκτώντας συγχρόνως πιο απλό και συμπαγές υλικό, κατάλληλο για αυτόνομες εφαρμογές στο πεδίο.

Το κιτ των αισθητήρων του μετεωρολογικού σταθμού διαθέτει δύο βύσματα RJ11: ένα για το βροχόμετρο και ένα για το ανεμόμετρο και τον ανεμοδείκτη. Προκειμένου να διασυνδεθούν τα όργανα αυτά με τον μικροελεγκτή CC1310, δημιουργήθηκε ένας ειδικός προσαρμογέας (adaptor) (Εικόνα 52). Ο προσαρμογέας αυτός ανακατευθύνει τα απαραίτητα σήματα (τροφοδοσίας, παλμών και αναλογικών τιμών) από τις γραμμές του RJ11 στις αντίστοιχες εισόδους του CC1310, διευκολύνοντας έτσι τη διαδικασία σύνδεσης. Ο προσαρμογέας φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



*Εικόνα 52. Ο προσαρμογέας για τους αισθητήρες του μετεωρολογικού σταθμού.*

Μετά την ολοκλήρωση της σύνδεσης, ακολούθησε η φάση προγραμματισμού των οργάνων και του μικροελεγκτή. Ξεκινώντας από τον ανεμοδείκτη, στο εσωτερικό του οποίου υπάρχουν οκτώ φυσικοί διακόπτες, οι οποίοι κλείνουν όταν ο μαγνήτης που είναι προσαρτημένος στον περιστρεφόμενο άξονα έρθει σε κατάλληλη ευθυγράμμιση. Κάθε διακόπτης συνδέεται με μια ξεχωριστή αντίσταση, έτσι ώστε το κλείσιμό του να δίνει μια μοναδική τιμή αντίστασης στο κύκλωμα. Για να μετρηθεί η διεύθυνση του ανέμου, ο ανεμοδείκτης συνδέθηκε σε σειρά με μία εξωτερική αντίσταση, σχηματίζοντας έναν διαιρέτη τάσης. Η τιμή της τάσης που προκύπτει διαβάζεται από τον CC1310 μέσω μιας αναλογικής εισόδου (Analog Read), επιτρέποντας τον υπολογισμό της μεταβλητής αντίστασης και συνεπώς την ταυτοποίηση της θέσης του δείκτη. Προκειμένου να μεταφραστούν οι τιμές της αναλογικής εισόδου σε πραγματική κατεύθυνση ανέμου (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), τυπώθηκε ένα ανεμολόγιο το οποίο τοποθετήθηκε κάτω από τον ανεμοδείκτη (Εικόνα 53), ενώ καταγράφηκαν οι τιμές του ADC που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις οκτώ διευθύνσεις. Οι τιμές αυτές αποθηκεύτηκαν σε έναν πίνακα και δημιουργήθηκε μια συνάρτηση που, ανάλογα με την τάση που μετριέται, επιστρέφει την διεύθυνση του ανέμου.

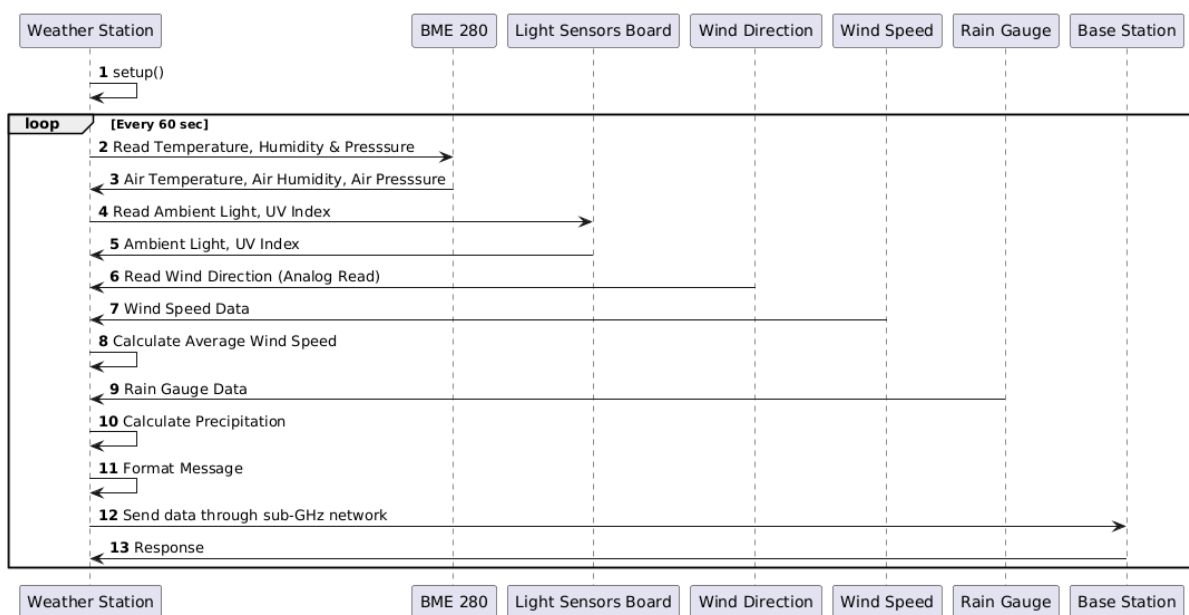


Εικόνα 53. Αντιστοίχιση των διευθύνσεων του ανέμου στις αναλογικές μετρήσεις.

Το ανεμόμετρο βασίζεται σε ένα σύστημα κυπέλλων που περιστρέφονται με την ένταση του ανέμου, ενεργοποιώντας έναν διακόπτη reed switch. Με κάθε πλήρη περιστροφή

του άξονα, δημιουργείται ένας παλμός. Στην πλευρά του μικροελεγκτή υπάρχει μία συνάρτηση η οποία για κάθε παλμό που έρχεται στο συγκεκριμένο ακροδέκτη, δημιουργεί ένα interrupt. Σύμφωνα με τις πληροφορίες του κατασκευαστή, ένας παλμός ανά δευτερόλεπτο αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 2,4 km/h. Έτσι, αν σε έναν συγκεκριμένο χρόνο συγκεντρωθούν N παλμοί, η ταχύτητα ανέμου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το N με τον συγκεκριμένο συντελεστή. <sup>[31]</sup>

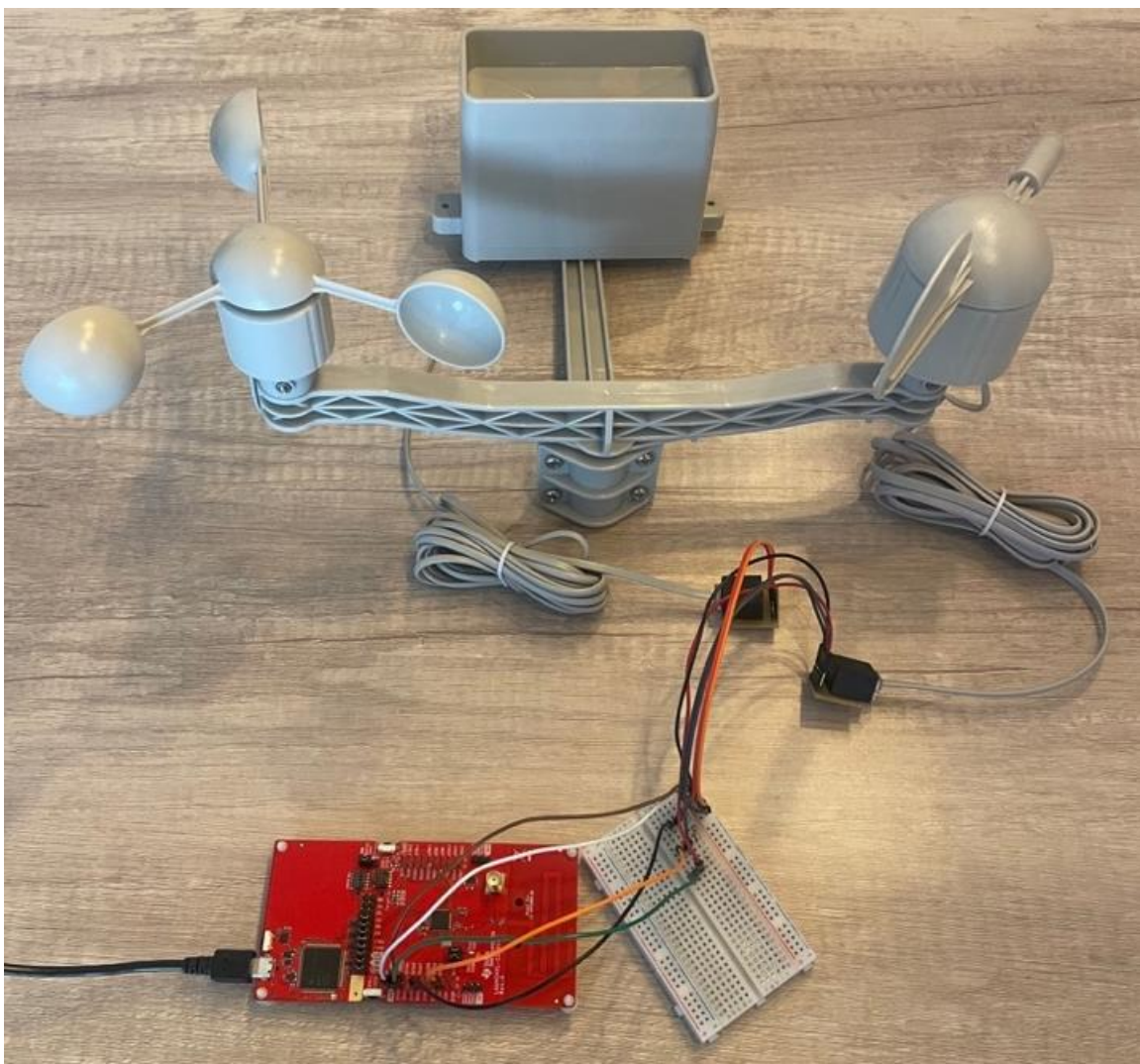
Όσον αφορά το βροχόμετρο, υπάρχει στην κορυφή του οργάνου μια χοάνη που συλλέγει το βρόχινο νερό και το οδηγεί σε έναν εσωτερικό μηχανισμό «ανατρεπόμενου κάδου» (tipping bucket). Όταν ένας από τους δύο μικρούς κουβάδες γεμίσει, ανατρέπεται κάτω από το βάρος του, αδειάζει το νερό και ενεργοποιεί έναν reed switch που παράγει έναν ηλεκτρικό παλμό. Σύμφωνα με τις πληροφορίες του κατασκευαστή, κάθε παλμός αντιστοιχεί σε βροχόπτωση 0,2794 mm. Στην πλευρά του μικροελεγκτή, ο CC1310 δημιουργεί ένα interrupt σε κάθε παλμό και διατηρεί έναν μετρητή των συνολικών ανατροπών μέσα σε ένα χρονικό διάστημα. Ο αριθμός των παλμών πολλαπλασιάζεται στη συνέχεια με τον συγκεκριμένο συντελεστή για την εξαγωγή του συνολικού ύψους βροχόπτωσης σε mm. Στην Εικόνα 54 φαίνεται μια απεικόνιση της λειτουργίας του λογισμικού του μετεωρολογικού σταθμού.



Εικόνα 54. Η λειτουργία του λογισμικού του μετεωρολογικού σταθμού.



Με αυτήν τη διαδικασία, ο προγραμματισμός και η βαθμονόμηση των οργάνων επιτρέπουν στον μετεωρολογικό σταθμό να συλλέγει αξιόπιστα δεδομένα για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, καθώς και για τις βροχοπτώσεις. Τα στοιχεία αυτά, σε συνδυασμό με τα δεδομένα από τον αισθητήρα θερμοκρασίας, υγρασίας και πίεσης, προσφέρουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των εξωτερικών καιρικών συνθηκών, επιτρέποντας την πιο ακριβή εκτίμηση και διαχείριση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο. Στην Εικόνα 55 φαίνεται μια απεικόνιση της δεύτερης έκδοσης του μετεωρολογικού σταθμού.



*Εικόνα 55. Σύνδεση των αισθητήρων του μετεωρολογικού σταθμού με το CC1310.*

Οι μεταβλητές που ελέγχει ο μετεωρολογικός σταθμός χρειάζονται συχνότερη παρακολούθηση από αυτές των άλλων κόμβων του συστήματος. Συγκεκριμένα, το ανεμόμετρο και το βροχόμετρο στέλνουν παλμούς ανάλογα με το πόσο φυσάει ή πόσο

βρέχει αντίστοιχα, αναγκάζοντας τον μικροελεγκτή να παραμένει για μεγαλύτερο διάστημα σε κατάσταση αναμονής και να χρησιμοποιεί τη λειτουργία *deep sleep* πολύ πιο αραιά. Αυτή η συνθήκη οδηγεί σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τους υπόλοιπους κόμβους, καθιστώντας απαραίτητη τη συνεχή τροφοδοσία του σταθμού από ανανεώσιμη πηγή. Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκε ένας ηλιακός συλλέκτης που συνδέεται μέσω USB, παρέχοντας τάση 5 V.

Για τη σωστή διαχείριση της φόρτισης της μπαταρίας από τον ηλιακό συλλέκτη, χρησιμοποιήθηκε το ολοκληρωμένο *bq24210*, ένας ολοκληρωμένος φορτιστής μπαταριών, σχεδιασμένος ειδικά για συστήματα χαμηλής ισχύος. Η επιλογή του *bq24210* βασίστηκε στην ικανότητά του να προσφέρει υψηλή απόδοση φόρτισης ακόμα και με σχετικά μικρή ένταση ρεύματος, η οποία συχνά χαρακτηρίζει τα ηλιακά πάνελ σε μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, ενσωματώνει λειτουργίες προστασίας, όπως έλεγχο θερμοκρασίας της μπαταρίας, προκειμένου να διασφαλίζει ασφαλή και σταθερή φόρτιση σε βάθος χρόνου. Το μικρό φυσικό του αποτύπωμα και η απλότητα ενσωμάτωσής του σε φορητές κατασκευές συμβάλλουν σημαντικά στην ευελιξία του μετεωρολογικού σταθμού, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές IoT με αυξημένες απαιτήσεις αυτονομίας.

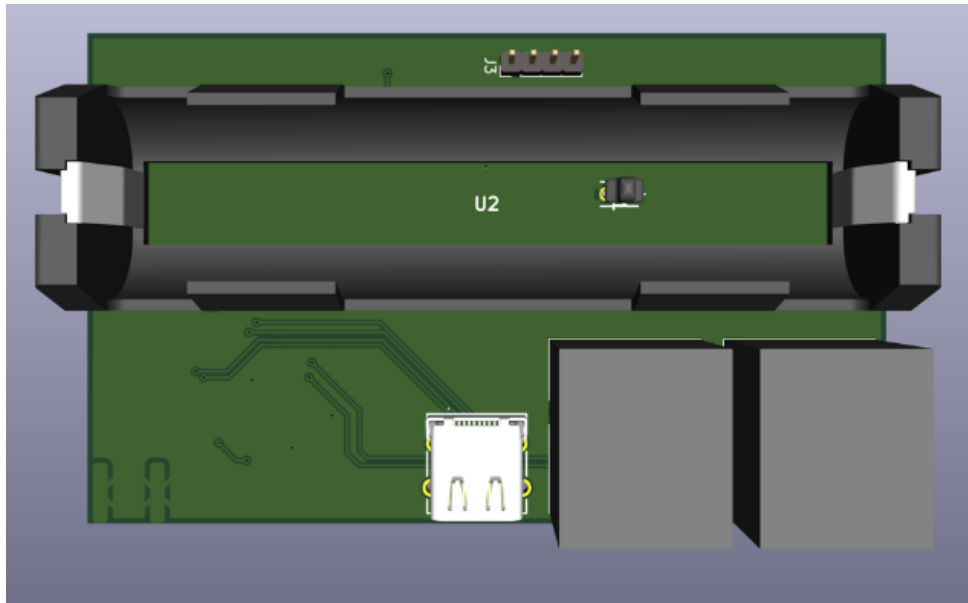
Στην παρακάτω διάταξη (Εικόνα 56) παρουσιάζεται το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας με βάση το *bq24210*. Η δίοδος D3 προστατεύει το ηλιακό πάνελ, εμποδίζοντας το ρεύμα να ρέει προς τα πίσω (από την μπαταρία στο πάνελ) όταν η ηλιακή ένταση είναι ανεπαρκής ή μηδενική. Η αντίσταση R6 έχει οριστεί στα 1 kΩ, καθορίζοντας έτσι το μέγιστο ρεύμα φόρτισης στο 1 A, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του *bq24210*. Η ρύθμιση αυτή εξασφαλίζει ότι, όταν το πάνελ παρέχει επαρκές ρεύμα και τάση, η μπαταρία θα φορτίζεται με σταθερό ρεύμα της τάξης του 1 A, χωρίς να ξεπερνιούνται τα επιτρεπτά όρια ασφαλούς φόρτισης. Η R7 έχει επιλεγεί στα 21,5 kΩ, ώστε σε συνδυασμό με το θερμίστορ 103AT-2 να επιτυγχάνεται δυναμικός έλεγχος της θερμοκρασίας της μπαταρίας. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία της μπαταρίας ανέβει πάνω από τους 45 °C, μειώνεται σταδιακά η τάση και το ρεύμα φόρτισης, προστατεύοντας την μπαταρία από υπερθέρμανση ή φαινόμενα θερμικής διαφυγής. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζονται η μακροζωία της μπαταρίας και η ασφαλής λειτουργία



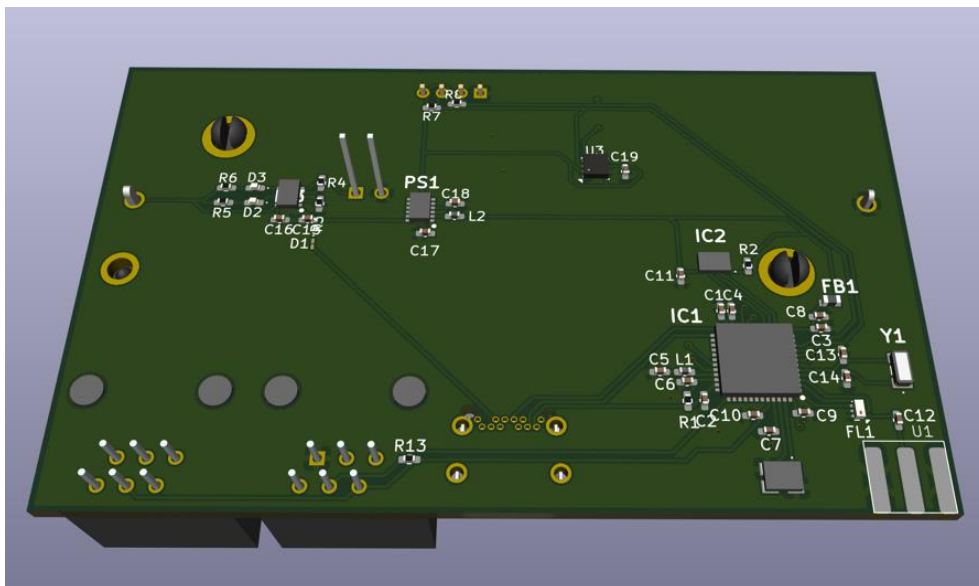
Battery Charger	U1
Solar +	1043



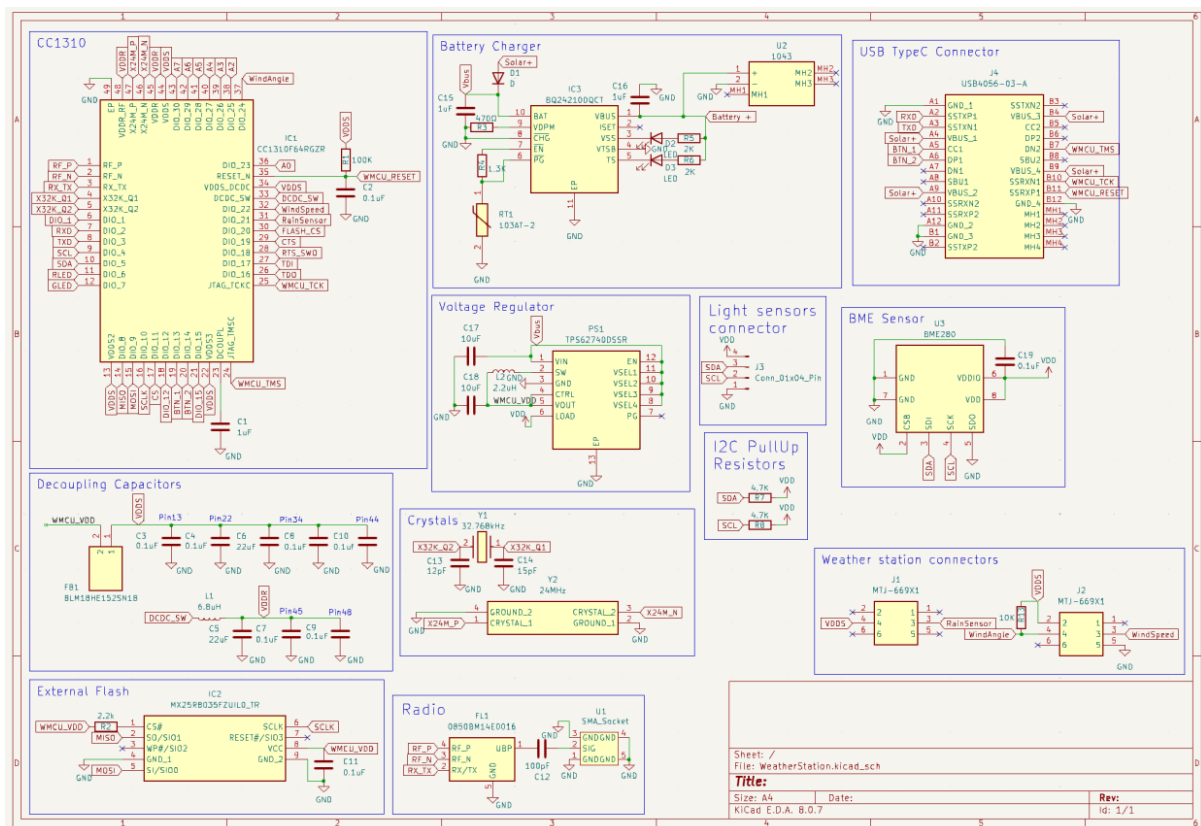
Χάρη στην εξελιγμένη αρχιτεκτονική του, ο ρυθμιστής TPS6274 προσφέρει πολύ χαμηλό ρεύμα ηρεμίας (quiescent current), χαρακτηριστικό που μεγιστοποιεί την αυτονομία του συστήματος. Η ικανότητά του να λειτουργεί αποδοτικά σε ποικίλα φορτία, από μερικά mA έως εκατοντάδες mA, επιτρέπει την κάλυψη των μεταβαλλόμενων απαιτήσεων του CC1310 και των συνδεδεμένων αισθητήρων, οι οποίοι μπορεί να εισέρχονται και να εξέρχονται από καταστάσεις βαθύ ύπνου (deep sleep). Έτσι, εξασφαλίζεται η σταθερή τροφοδοσία όλων των κρίσιμων υποσυστημάτων.



Εικόνα 57. Τριδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας του μετεωρολογικού σταθμού.



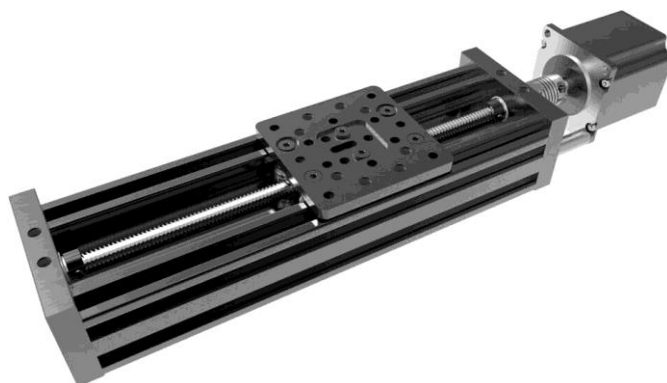
Εικόνα 58. Τριδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας του μετεωρολογικού σταθμού.



Εικόνα 59. Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας του μετεωρολογικού σταθμού.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Σχεδιασμός και ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα προσδιορισμού θέσης παραθύρου

Η ορθή διαχείριση του εξαερισμού σε ένα θερμοκήπιο προϋποθέτει την αυτοματοποιημένη λειτουργία των παραθύρων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας και της υγρασίας εντός του. Στην υπό εξέταση εγκατάσταση, τα παράθυρα κινούνται μέσω ενός γραμμικού μηχανισμού (linear actuator) (Εικόνα 60), όπου ένας ηλεκτρικός κινητήρας περιστρέφει έναν κοχλία (σπειροειδή ράβδο) για το άνοιγμα ή το κλείσιμό τους. Για τον ακριβή έλεγχο της θέσης των παραθύρων και όχι μόνο την ανίχνευση της κατάστασής τους (ανοικτό/κλειστό) απαιτείται ένας αισθητήρας με δυνατότητα να παρέχει πληροφορία γωνιακής θέσης υψηλής ανάλυσης.



*Εικόνα 60. Παράδειγμα γραμμικού μηχανισμού.*

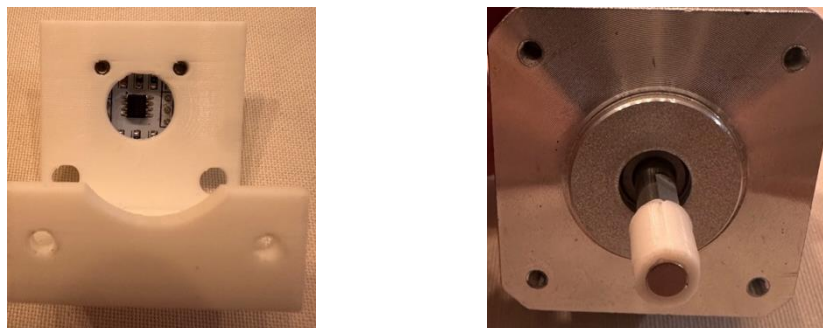
Σε αυτό το πλαίσιο, επιλέχθηκε ο αισθητήρας AS5600 της AMS, ένας μαγνητικός αισθητήρας γωνιακής θέσης (magnetic rotary position sensor) βασισμένος σε τεχνολογία Hall. Ο AS5600 ανιχνεύει την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου από έναν περιστρεφόμενο μαγνήτη και την μεταφράζει σε ψηφιακή τιμή από 0 έως 360 μοίρες, με ανάλυση 12-bit. Η ακρίβεια αυτή αντιστοιχεί σε ακρίβεια της τάξης των 0,087°, προσφέροντας τη δυνατότητα ακριβέστατου υπολογισμού της γωνιακής θέσης του μαγνήτη. Επιπλέον, ο αισθητήρας διαθέτει λειτουργία βαθμονόμησης μηδενικού σημείου (zero-point calibration), ώστε να προσαρμόζεται σε διαφορετικές μηχανικές διατάξεις, ενώ υποστηρίζει και λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, μειώνοντας σημαντικά το ενεργειακό του αποτύπωμα σε αδράνεια.

Για τη λειτουργία του AS5600, απαιτείται η χρήση κυκλικού μαγνήτη διαμετρικού (radial) μαγνητισμού (Εικόνα 61), στον οποίο οι πόλοι βρίσκονται κατά μήκος της διαμέτρου του. Αυτό επιτρέπει στον αισθητήρα να καταγράφει με ακρίβεια τη γωνιακή μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, καθώς ο μαγνήτης περιστρέφεται στον ίδιο άξονα με το μοτέρ. Για βέλτιστη απόδοση, ο μαγνήτης πρέπει να τοποθετηθεί στο κέντρο του άξονα, έτσι ώστε ο AS5600 να απέχει περίπου 1 mm έως 3 mm από την επιφάνεια του μαγνήτη και να είναι πλήρως ευθυγραμμισμένος ως προς τον άξονα περιστροφής.



*Εικόνα 61. Διαφορά μαγνητικού πεδίου αξονικού και διαμετρικού μαγνητισμού.*

Προκειμένου να ενσωματωθεί ο αισθητήρας στο υπάρχον σύστημα, σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν δύο βάσεις (Εικόνα 62): η πρώτη για την τοποθέτηση του μαγνήτη επάνω στον άξονα του κινητήρα και η δεύτερη για τη στήριξη του AS5600 στο σώμα του κινητήρα. Ο αισθητήρας και ο μαγνήτης δοκιμάστηκαν αρχικά σε έναν βηματικό κινητήρα (stepper motor), όπου εξετάστηκε η απόκριση του AS5600 σε ελάχιστες περιστροφές (micro steps) αλλά και σε επαναλαμβανόμενες πλήρεις στροφές, επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του. Με αυτόν τον τρόπο, διαπιστώθηκε ότι το σύστημα μπορεί να παρέχει αξιόπιστη και συνεχή πληροφόρηση για τη γωνιακή θέση του άξονα.



*Εικόνα 62. Η βάση του αισθητήρα (αριστερά) και του μαγνήτη (δεξιά).*

Εφαρμόζοντας την ίδια αρχή στο μηχανισμό των παραθύρων του θερμοκηπίου, ο αισθητήρας AS5600 επιτρέπει τον απομακρυσμένο έλεγχο της θέσης τους με υψηλή ακρίβεια. Το σύστημα εξαλείφει την ανάγκη για απλούς μαγνητικούς διακόπτες (που περιορίζονται σε ενδείξεις τύπου ανοικτό/κλειστό) και προσφέρει απόλυτο έλεγχο της θέσης, συμβάλλοντας έτσι στη βέλτιστη ρύθμιση των συνθηκών αερισμού και τελικά στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του θερμοκηπίου.



*Εικόνα 63. Ο αισθητήρας τοποθετημένος στο μοτέρ.*

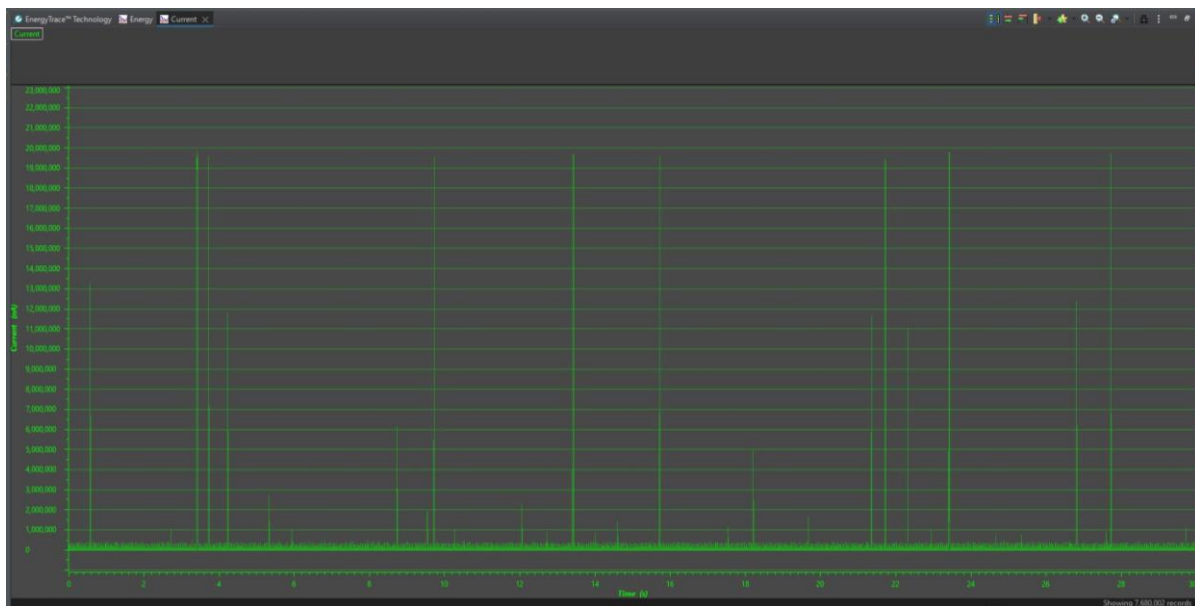
## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Παρουσίαση Μετρήσεων και Αποτελεσμάτων

Το πρώτο πείραμα που εκτελέστηκε αφορά τη μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος της τελικής μορφής του κόμβου. Η ρουτίνα που ακολουθεί ο κόμβος έχει σχεδιαστεί ώστε να ξυπνά κάθε 5 δευτερόλεπτα, να συλλέγει τις απαραίτητες μετρήσεις, να τις αποστέλλει στον κεντρικό κόμβο του συστήματος και, τέλος, να επιστρέφει σε κατάσταση βαθύ ύπνου (deep sleep). Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 64) αποτυπώνεται η κατανάλωση του κόμβου σε όλη τη διάρκεια αυτού του κύκλου. Ο οριζόντιος άξονας (X) απεικονίζει τον χρόνο και ο κατακόρυφος (Y) την κατανάλωση ρεύματος σε nA.

Όπως προκύπτει μέσω του λογισμικού Energy Trace (της Texas Instruments), όταν ο κόμβος βρίσκεται σε κατάσταση deep sleep, η κατανάλωση του συστήματος διατηρείται περίπου στο 0,5 mA. Με το που «ξυπνά» για να πραγματοποιήσει τη δειγματοληψία των αισθητήρων, η κατανάλωση αυξάνεται στιγμιαία στην περιοχή των 11–13,5 mA, καθώς τίθενται σε λειτουργία οι απαραίτητες περιφερειακές μονάδες (αισθητήρες, μικροελεγκτής, διαύλοι επικοινωνίας). Την ώρα της ασύρματης αποστολής των δεδομένων, η αιχμή φτάνει έως τα 20 mA, ωστόσο το διάστημα αυτό διαρκεί ελάχιστα.

Συνολικά, η διατήρηση του κόμβου σε κατάσταση βαθύ ύπνου στο μεγαλύτερο μέρος του κύκλου διασφαλίζει εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Η μέτρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι το σύστημα μπορεί να λειτουργεί για ιδιαίτερα μεγάλα διαστήματα, με τροφοδοσία από μπαταρία. Το γεγονός ότι η μέση κατανάλωση περιορίζεται δραστικά (κυρίως χάρη στα sleep modes και στον σχεδιασμό χαμηλής ισχύος) υποδηλώνει τη δυνατότητα ανάπτυξης πλήρως αυτόνομων κόμβων που απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, ιδανικών για θερμοκηπιακές ή άλλες απομακρυσμένες εγκαταστάσεις.

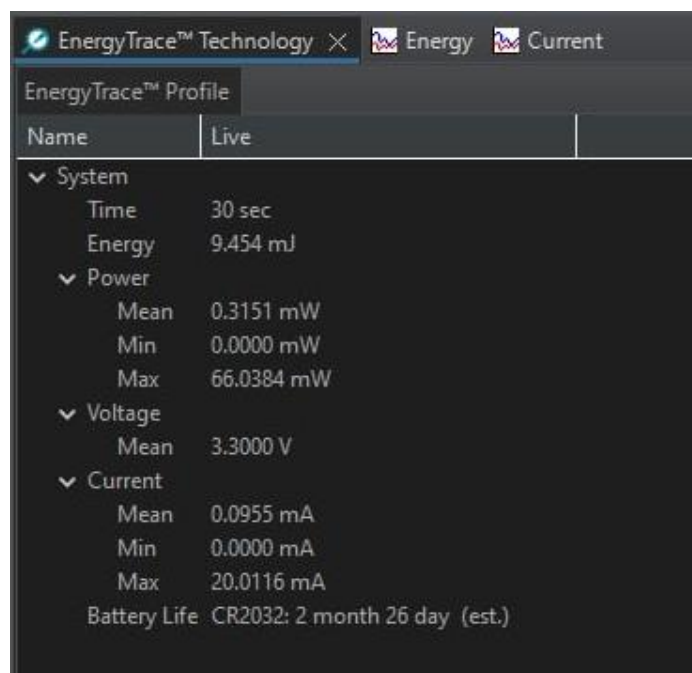




Εικόνα 64. Η ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου nA.

Στο παρακάτω στιγμιότυπο (Εικόνα 65), το οποίο προέρχεται επίσης από το λογισμικό Energy Trace, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της κατανάλωσης του κόμβου. Όπως προκύπτει από τα δεδομένα, η μέση κατανάλωση για τη συγκεκριμένη ρουτίνα αγγίζει μόλις 0,095 mA, γεγονός που, βάσει των υπολογισμών του λογισμικού, μεταφράζεται σε αυτονομία 2 μηνών και 26 ημερών με χρήση μίας μόνο μπαταρίας CR2032.

Η ανάλυση καταδεικνύει ότι η κατανάλωση ρεύματος σε κατάσταση βαθύ ύπνου (deep sleep) παραμένει σχεδόν αμελητέα. Από την άλλη πλευρά, κατά τη λήψη των μετρήσεων, η κατανάλωση αυξάνεται έως και 25 φορές σε σχέση με την ηρεμία, ενώ στην αποστολή δεδομένων καταγράφεται περίπου 40 φορές υψηλότερη κατανάλωση. Παρόλα αυτά, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο κόμβος βρίσκεται σε ενεργή λειτουργία (λήψη-αποστολή) είναι σύντομο και δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέση ενεργειακή κατανάλωση.



Εικόνα 65. Η δοκιμή για την ενεργειακή κατανάλωση του κόμβου.

Επιπλέον, εφόσον μειωθεί η συχνότητα μετρήσεων και αποστολής, για παράδειγμα σε μία φορά ανά λεπτό, εκτιμάται ότι η κατανάλωση μπορεί να περιοριστεί κατά περίπου 1/10 σε σχέση με τη μέτρηση που παρουσιάζεται. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτό να εξασφαλιστεί αυτονομία που υπερβαίνει τα δύο χρόνια χρήσης, πάντα βέβαια με την επιφύλαξη ότι δεν θα μεταβληθούν σημαντικά οι υπόλοιπες συνθήκες λειτουργίας (π.χ. θερμοκρασία, τάση της μπαταρίας).

Μετά την εγκατάσταση του συστήματος στο θερμοκήπιο, ακολούθησε μία δοκιμαστική περίοδος είκοσι ημερών συνεχούς λειτουργίας, κατά την οποία συλλέχθηκαν δεδομένα από δύο διαφορετικούς κόμβους, τον κεντρικό κόμβο, και τον μετεωρολογικό σταθμό. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εξαγωγή της βάσης δεδομένων και ανάλυση των μετρήσεων, προκειμένου να εκτιμηθεί η γενικότερη συμπεριφορά του συστήματος και η αξιοπιστία του.

Στην πρώτη εικόνα (Εικόνα 66) φαίνονται οι τιμές από τους δύο κόμβους κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Η σύγκριση αφορά τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους που λαμβάνονται από τους αναλογικούς αισθητήρες, τοποθετημένους σε βάθος περίπου 4 cm, τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα από τον ψηφιακό αισθητήρα HDC3022, την τάση της μπαταρίας, με στόχο να εκτιμηθεί η απόδοση των κόμβων ως προς την κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 66. Οι Μετρήσεις δυο κόμβων στην διάρκεια μια μέρας.

Τα διαγράμματα φανερώσουν σαφείς ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα, οι οποίες επηρεάζονται από το φυσικό κύκλο θέρμανσης και ψύξης εντός του θερμοκηπίου. Οι μικροκλιματικές διαφορές ανάμεσα στους δύο κόμβους αποδίδονται στην διαφορετική θέση τοποθέτησης τους (π.χ. κοντά σε παράθυρο, κοντά

σε ψηλά φυτά ή σε πιο ανοιχτό χώρο), με αποτέλεσμα να μην ταυτίζονται απολύτως οι τιμές που καταγράφονται.

Η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους εμφανίζουν επίσης χαρακτηριστική ημερήσια μεταβολή. Η θερμοκρασία αυξάνεται κατά τις μεσημεριανές ώρες και μειώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ η υγρασία ακολουθεί το αντίστροφο μοτίβο. Συγχρόνως, παρατηρείται μια χρονική υστέρηση και μειωμένη μεταβλητότητα των τιμών του εδάφους συγκριτικά με του αέρα, λόγω της θερμοχωρητικότητας του εδάφους. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μετρήσεις εδάφους μεταξύ των δύο κόμβων εμφανίζουν μικρότερες διαφορές σε απόλυτες τιμές, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στη σχετικά ομοιογενή σύσταση και θερμική αδράνεια του εδάφους.

Τέλος, η τάση της μπαταρίας κατά τη διάρκεια όλης της περιόδου παρέμεινε πρακτικά σταθερή (πλήρως φορτισμένη, περίπου 3,33 V), επιβεβαιώνοντας αφενός τις προβλέψεις για τη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας του συστήματος και αφετέρου την επάρκεια τροφοδοσίας για πολύ μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (τουλάχιστον δύο χρόνια, σύμφωνα με τις προηγούμενες εκτιμήσεις). Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι το σύστημα όχι μόνο λειτουργεί αξιόπιστα και συλλέγει αξιόπιστα δεδομένα από το θερμοκήπιο, αλλά και παρουσιάζει χαρακτηριστικά εξαιρετικής ενεργειακής αυτονομίας, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για μακροχρόνια χρήση σε απαιτητικά περιβάλλοντα.



*Εικόνα 67. Οι μετρήσεις του κεντρικού κόμβου στην διάρκεια μιας μέρας.*

Στη δεύτερη εικόνα (Εικόνα 67) παρουσιάζονται οι τιμές που συλλέγει ο κεντρικός κόμβος του συστήματος μέσα σε ένα εικοσιτετράωρο. Οι μετρήσεις αφορούν με την σειρά που εμφανίζονται την θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, την ατμοσφαιρική πίεση, την συγκέντρωση TVOC και CO<sub>2</sub>.

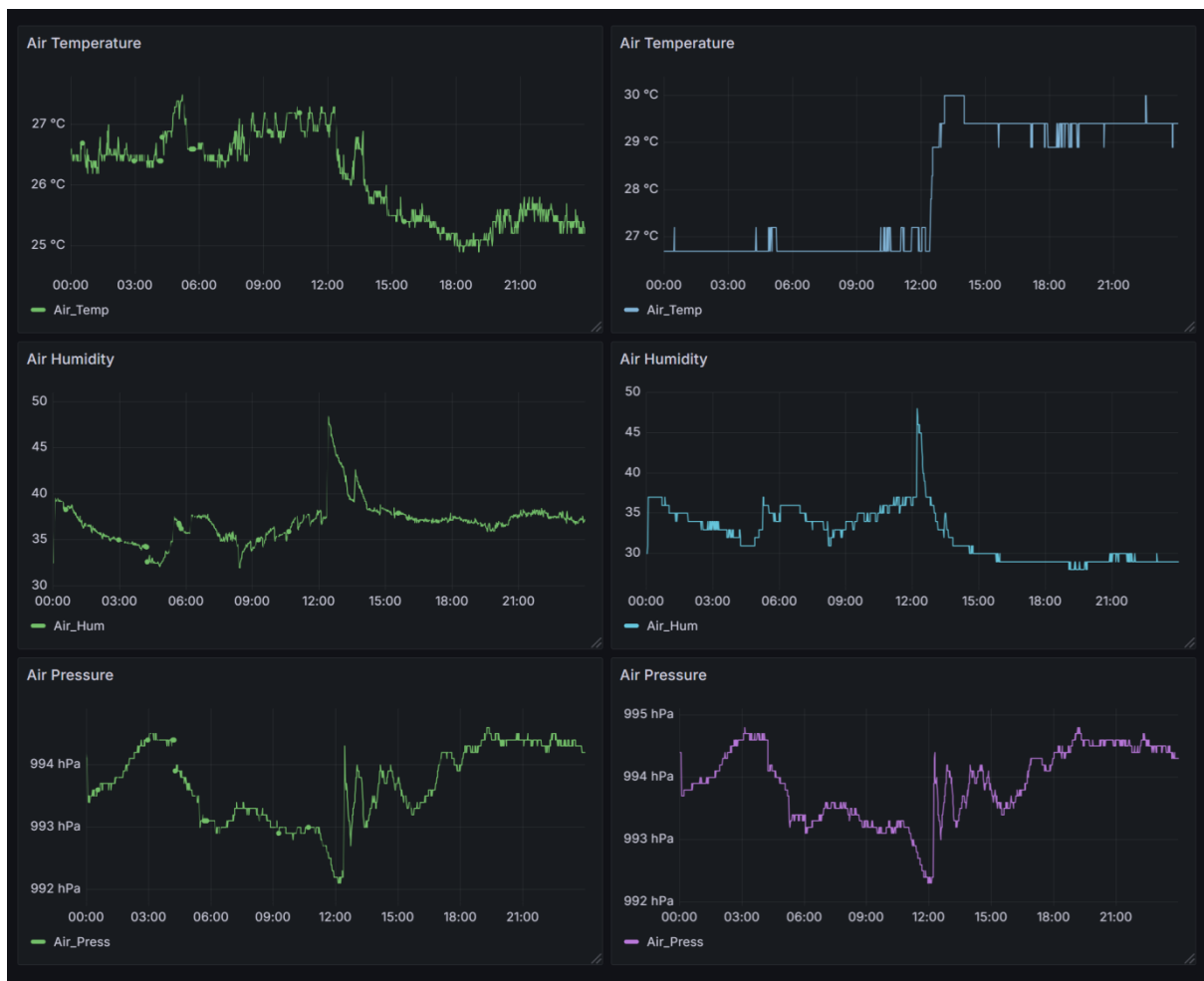
Όπως φαίνεται, η θερμοκρασία ακολουθεί την αναμενόμενη ημερήσια διακύμανση, φθάνοντας σε υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ κατά τις νυχτερινές ώρες πέφτει σε χαμηλότερα επίπεδα. Παρομοίως, η σχετική υγρασία εμφανίζει μια πιο ήπια καμπύλη, αλλά διατηρείται σε σχετικά σταθερά επίπεδα χάρη στους μηχανισμούς αερισμού του θερμοκηπίου. Για την ατμοσφαιρική πίεση, οι μεταβολές της αντανακλούν πραγματικές αλλαγές στις καιρικές

συνθήκες, ενώ παράλληλα υποδηλώνουν τον βαθμό αερισμού του θερμοκηπίου, δεδομένου ότι δεν είναι απολύτως κλειστό.

Η συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC) παρουσιάζει στιγμιαίες απότομες αυξομειώσεις (spikes), οι οποίες πιθανότατα οφείλονται είτε σε στιγμιαία δυσλειτουργία του αισθητήρα είτε σε σύντομη μεταβολή του μικροκλίματος (π.χ. λόγω ανοιχτού παράθυρου ή κίνησης αέρα). Σε μεγαλύτερη κλίμακα, παρατηρείται άνοδος των TVOCs στη διάρκεια της ημέρας, γεγονός που σχετίζεται με την αυξημένη βιολογική δραστηριότητα των φυτών όταν επικρατούν συνθήκες υψηλότερης ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίστοιχη τάση εμφανίζει και η συγκέντρωση CO<sub>2</sub>, η οποία συνήθως αυξάνεται κατά τις περιόδους έντονης φωτοσυνθετικής λειτουργίας. Βραχυχρόνιες ενδείξεις μηδενικών τιμών πιθανόν να οφείλονται σε προσωρινή δυσλειτουργία του αισθητήρα, την οποία το σύστημα ανιχνεύει και αποκαθιστά, όπως αποδεικνύεται από την επιστροφή των μετρήσεων σε φυσιολογικά πλαίσια.

Συνολικά, οι ενδείξεις αυτές αποδεικνύουν ότι το σύστημα καταγράφει με επιτυχία τις διακυμάνσεις των περιβαλλοντικών παραμέτρων στο θερμοκήπιο, αποτυπώνοντας τις συνηθισμένες ημερήσιες μεταβολές λόγω του φυσικού κύκλου της θερμοκρασίας και της βιολογικής δράσης των φυτών. Επιπρόσθετα, αναδεικνύεται και η ικανότητά του να εντοπίζει και να αντιμετωπίζει αυτόματα τυχόν δυσλειτουργίες στους αισθητήρες, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων και τη συνεχή λειτουργία της εφαρμογής.

Στην τελευταία εικόνα (Εικόνα 68) παρουσιάζονται συγκριτικά τα διαγράμματα θερμοκρασίας, υγρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης από δύο διαφορετικές πηγές: τον εσωτερικό σταθμό βάσης που βρίσκεται εντός του θερμοκηπίου στα αριστερά και τον εξωτερικό μετεωρολογικό σταθμό στα δεξιά. Η χρονική περίοδος καταγραφής είναι η ίδια, επιτρέποντας μια άμεση επισκόπηση του μικροκλίματος που επικρατεί στο εσωτερικό, σε σχέση με τις πραγματικές καιρικές συνθήκες έξω από τη δομή.



Εικόνα 68. Συγκριτικές μετρήσεις στο εσωτερικό και το εξωτερικό του θερμοκηπίου.

Όσον αφορά τη θερμοκρασία, στο θερμοκήπιο, παρατηρείται μεν άνοδος κατά τη διάρκεια της ημέρας και ελαφρά πτώση τη νύχτα, ωστόσο η διακύμανση είναι πιο ομαλή, με τις ακραίες τιμές να μετριάζονται από τη φυσική προστασία και τις ρυθμιζόμενες συνθήκες. Αντίθετα, οι ενδείξεις του εξωτερικού σταθμού εμφανίζουν εντονότερες αυξομειώσεις, ιδιαίτερα γύρω στο μεσημέρι (περίπου στις 13:00), όπου ο ήλιος θερμαίνει γρήγορα τον αισθητήρα, καθώς και τις πολύ πρωινές ώρες, όπου η θερμοκρασία μπορεί να πέσει σε χαμηλότερα επίπεδα. Αυτή η διαφορά φανερώνει την ικανότητα του θερμοκηπίου να εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της υπαίθρου, προστατεύοντας τις καλλιέργειες από απότομες μεταβολές.

Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, η σχετική υγρασία διατηρείται σε ένα σχετικά σταθερό εύρος (γύρω στο 30–45%), γεγονός που οφείλεται στους μηχανισμούς ελέγχου αερισμού. Εξωτερικά, οι μετρήσεις διαμορφώνονται πιο απρόβλεπτα, επηρεαζόμενες



από συνθήκες όπως η πρωινή υγρασία, ο άνεμος ή τυχόν τοπικά φαινόμενα (π.χ. βροχόπτωση). Έτσι, παρατηρούνται εντονότερες αιχμές ή απότομες πτώσεις, αντικατοπτρίζοντας τη φυσική εναλλαγή του καιρού.

Και στους δύο σταθμούς καταγράφονται ήπιες ταλαντώσεις στην πίεση, γεγονός που δείχνει ότι οι μεταβολές είναι πραγματικές και συγχρονισμένες. Η μικρή διαφορά (περίπου 1 hPa) οφείλεται κυρίως στη διαφορετική τοποθέτηση και υψομετρική διαφορά ανάμεσα στους δύο αισθητήρες. Η χαρακτηριστική πτώση της πίεσης που παρατηρείται γύρω στο μεσημέρι εμφανίζεται σε αμφότερες τις διαδρομές, επιβεβαιώνοντας ότι πρόκειται για πραγματική μεταβολή των καιρικών συνθηκών και όχι για σφάλμα μέτρησης.

Η συνολική σύγκριση αναδεικνύει τη λειτουργία του θερμοκηπίου ως σύστημα μικροκλίματος, το οποίο ενίοτε εξομαλύνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, διατηρεί τη σχετική υγρασία σε συγκεκριμένα επίπεδα και περιορίζει τον αντίκτυπο των εξωτερικών καιρικών συνθηκών. Από την άλλη, η ύπαρξη ενός εξωτερικού σταθμού είναι εξίσου σημαντική, καθώς παρέχει μία ρεαλιστική εικόνα της ατμόσφαιρας εκτός του θερμοκηπίου. Η γνώση αυτών των διαφορών (σε θερμοκρασία, υγρασία και πίεση) επιτρέπει στον παραγωγό να βελτιστοποιήσει τις πρακτικές αερισμού, θέρμανσης ή ψύξης και άρδευσης, επιτυγχάνοντας την ιδανική ισορροπία μεταξύ κόστους και παραγωγικότητας. Με άλλα λόγια, ο συνδυασμός εσωτερικών και εξωτερικών μετρήσεων παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την αποτελεσματική διαχείριση του περιβάλλοντος, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και την αειφορία της θερμοκηπιακής καλλιέργειας.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Η ανάπτυξη και η υλοποίηση ενός ασύρματου συστήματος μετρήσεων για τον έλεγχο θερμοκηπίων απέδειξαν στην πράξη ότι η ενσωμάτωση σύγχρονων αισθητήρων και τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης μπορεί να προσφέρει αξιοσημείωτα οφέλη στη γεωργική παραγωγή. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης καίριων περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία αέρα και εδάφους, η ατμοσφαιρική πίεση, τα αέρια (TVOCs, CO<sub>2</sub>), η ένταση του φωτός και ο δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας, οι καλλιεργητές έχουν στη διάθεσή τους αναλυτικά δεδομένα που επιτρέπουν τη στοχευμένη βελτιστοποίηση των συνθηκών εντός του θερμοκηπίου.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, επιβεβαιώθηκε η εξαιρετικά μειωμένη κατανάλωση ισχύος των κόμβων, η οποία διευκολύνει την μακροχρόνια αυτόνομη λειτουργία τους, ακόμα και με την τροφοδοσία από μπαταρίες μικρής χωρητικότητας ή ηλιακούς συλλέκτες. Επιπρόσθετα, η σύγκριση εσωτερικού και εξωτερικού μετεωρολογικού σταθμού ανέδειξε τον ρόλο του θερμοκηπίου ως συστήματος μικροκλίματος, με το εσωτερικό του να εξομαλύνει ή να διαφοροποιεί τις εξωτερικές συνθήκες, αποδεικνύοντας έτσι την αναγκαιότητα παράλληλης καταγραφής και των δύο για πληρέστερη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων.

Η λειτουργία του συστήματος, η οποία βασίστηκε σε πλατφόρμες χαμηλής ισχύος (CC1310), έδειξε ότι η τεχνολογία sub-GHz είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε ασύρματες επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων με ελάχιστη κατανάλωση. Παράλληλα, οι δοκιμές επιβεβαίωσαν ότι η ευαισθησία των αισθητήρων σε παροδικές δυσλειτουργίες μπορεί να εντοπίζεται και να αποκαθίσταται αυτόματα, καθιστώντας το δίκτυο ιδιαίτερα ανθεκτικό. Τέλος, η συγκριτική εξέταση διαφορετικών τύπων αισθητήρων (αναλογικών, ψηφιακών) κατέδειξε τα πλεονεκτήματα και τις ιδιαιτερότητες καθεμιάς κατηγορίας, δίνοντας τη δυνατότητα επιλογής των κατάλληλων οργάνων ανάλογα με τις ανάγκες κάθε θερμοκηπίου.

## Μελλοντικές Προοπτικές

- **Επέκταση σε συστήματα ελέγχου**

Ένα προφανές επόμενο βήμα είναι η διεπαφή του συστήματος μέτρησης με μηχανισμούς αυτόματης ρύθμισης (π.χ. αερισμός, σκίαση, θέρμανση ή ψύξη) για τη διατήρηση βέλτιστων περιβαλλοντικών συνθηκών με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Η ενσωμάτωση αλγορίθμων πρόβλεψης θα μπορούσε να επιτρέψει πιο έξυπνη προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, αξιοποιώντας ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα.

- **Δικτύωση και κεντριοποίηση δεδομένων**

Παρότι το σύστημα στηρίχθηκε σε έναν κεντρικό κόμβο συλλογής, η περαιτέρω ανάπτυξη υποδομών cloud θα μπορούσε να επιτρέψει τη λήψη αποφάσεων από οπουδήποτε, αλλά και τη συνεργασία πολλών θερμοκηπίων. Η διασύνδεση των δεδομένων με υπάρχουσες πλατφόρμες αγροτικής πληροφορικής (smart farming) θα ενίσχυε την ολιστική προσέγγιση στη γεωργική παραγωγή.

- **Ανάπτυξη επιπλέον αισθητήρων**

Ενώ μετρήθηκαν βασικές παράμετροι (θερμοκρασία, υγρασία, αέρια, φως κλπ.), θα μπορούσαν να προστεθούν αισθητήρες για θρεπτικά στοιχεία του εδάφους, επιβλαβή αέρια, ή ακόμα και κάμερες φασματικής ανάλυσης για την αξιολόγηση της υγείας των φυτών. Αυτό θα εμπλούτιζε τη γνώση του καλλιεργητή σχετικά με τις συνθήκες ανάπτυξης.

- **Πιλοτικές εφαρμογές σε ποικίλα μικροκλίματα**

Καθώς τα αποτελέσματα αντλήθηκαν συγκεκριμένα σε ένα θερμοκήπιο στα Χανιά, προτείνεται η πιλοτική εφαρμογή του συστήματος σε άλλες γεωγραφικές ζώνες, με διαφορετικά κλίματα και τύπους καλλιεργειών. Οι παρατηρούμενες διαφορές θα ενίσχυαν την αξιοπιστία της λύσης και θα προσέφεραν πολύτιμες πρακτικές προσαρμογές.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει τη βιωσιμότητα και την υψηλή απόδοση ενός ασύρματου συστήματος μετρήσεων χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για τη διαχείριση θερμοκηπίων. Η συλλογή δεδομένων από πολλαπλές περιβαλλοντικές παραμέτρους διευκολύνει τον ακριβή και στοχευμένο έλεγχο των συνθηκών, ενώ η εξαιρετική ενεργειακή αυτονομία επιτρέπει την ανάπτυξη εγκαταστάσεων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Με την περαιτέρω ενοποίηση σε πλατφόρμες έξυπνης γεωργίας και την προσθήκη λειτουργιών αυτομάτου ελέγχου, το σύστημα μπορεί να αποτελέσει ουσιαστικό βήμα προς μια ολοκληρωμένη, αειφόρο και αποδοτική γεωργική παραγωγή.

## Βιβλιογραφία

- [1] ΕΛΣΤΑΤ (2021). *Στατιστικά Στοιχεία Γεωργίας: Θερμοκηπιακές Καλλιέργειες*. Αθήνα: Ελληνική Στατιστική Αρχή.
- [2] ΔΑΟΚ Χανίων (2020). *Ετήσια Έκθεση Αγροτικής Ανάπτυξης για το Νομό Χανίων*. Χανιά: Διεύθυνση Αγροτικής Οικονομίας & Κτηνιατρικής Χανίων.
- [3] Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (2021). *Εθνική Στρατηγική Αγροτικής Ανάπτυξης 2021-2027*. Αθήνα: ΥπΑΑΤ.
- [4] Οργανισμός Γεωργικής Έρευνας και Καινοτομίας Κρήτης (2022). *Καινοτόμες Τεχνολογίες Θερμοκηπίου στην Κρήτη*. [www.agroinnovationcrete.gr](http://www.agroinnovationcrete.gr)
- [5] Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (2015). *Φυσιολογία Φυτών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Πανεπιστημιακές.
- [6] FAO (2019). *Guidelines for Soil Moisture Monitoring: Applications in Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [7] Ho, L. C. (2004). The contribution of plant physiology in greenhouse crop management. *Acta Horticulturae*, 633, 15-24.
- [8] Baille, A. (1999). A simple model for predicting the effect of greenhouse ventilation performance on the greenhouse climate. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(1), 37-46.
- [9] Σπυρίδης, Α., & Νικολάου, Κ. (2020). *Μετεωρολογικές εφαρμογές στη γεωργία*. Αθήνα: Εκδόσεις Γεωπονικού Πανεπιστημίου.
- [10] EPA (2021). *Volatile Organic Compounds (VOCs)*. Washington D.C.: Environmental Protection Agency.
- [11] Merchán, D., Ortega, J. A., Rodríguez, F., & Peña-Fernández, A. (2021). CO<sub>2</sub> Monitoring and Control in Greenhouse Crops: A Review. *Sensors*, 21(23), 7882.
- [12] Στεφανίδης, Ι., Τσάκωνας, Π., & Κουγιουμτζής, Α. (2018). *Τεχνητός φωτισμός θερμοκηπίου: Σύγχρονες τεχνολογίες LED και εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.
- [13] Διονυσίου, Α., & Παπαδόπουλος, Γ. (2017). *Επιδράσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας στην ανάπτυξη των φυτών*. Αθήνα: Γεωπονικές Εκδόσεις.
- [14] [https://gr.mouser.com/datasheet/2/609/maxim\\_integrated\\_products\\_ds18b20-3112397.pdf](https://gr.mouser.com/datasheet/2/609/maxim_integrated_products_ds18b20-3112397.pdf)

- [15] <https://www.digikey.jp/htmldatasheets/production/2071177/0/0/1/sen0193.html>
- [16] <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf?srsltid=AfmBOopSmMm28jSN5DMJr2nAmbJ-Xu2ZoG1qkgyWBR2uEzQAibFuC-Jo>
- [17] <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ccs811-air-quality-sensor.pdf>
- [18] <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si1145-46-47.pdf>
- [19] [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc3022.pdf?ts=1737588890932&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FHDC3022](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc3022.pdf?ts=1737588890932&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FHDC3022)
- [20] <https://www.sciosense.com/wp-content/uploads/2023/12/ENS160-Datasheet.pdf>
- [21] [https://www.mouser.com/catalog/specsheets/amsOsram\\_AS7331\\_DS001047\\_1-00.pdf?srsltid=AfmBOooM\\_jn3AEuWJ05XUEm-93L7D2HE9D30XLXD78ZZM2E3qjVTlnq](https://www.mouser.com/catalog/specsheets/amsOsram_AS7331_DS001047_1-00.pdf?srsltid=AfmBOooM_jn3AEuWJ05XUEm-93L7D2HE9D30XLXD78ZZM2E3qjVTlnq)
- [22] [https://gr.mouser.com/datasheet/2/588/asset\\_pdf\\_25493382-3432823.pdf](https://gr.mouser.com/datasheet/2/588/asset_pdf_25493382-3432823.pdf)
- [23] <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/#tech-specs>
- [24] <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-pro-mini/>
- [25] [https://docs.ai-thinker.com/\\_media/esp8266/docs/esp-01\\_product\\_specification\\_en.pdf](https://docs.ai-thinker.com/_media/esp8266/docs/esp-01_product_specification_en.pdf)
- [26] [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf)
- [27] [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1310.pdf?ts=1737614775456&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.cn%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1310.pdf?ts=1737614775456&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.cn%252F)
- [28] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- [29] <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>
- [30] <https://www.dfrobot.com/blog-465.html>
- [31] [https://www.argentdata.com/files/80422\\_datasheet.pdf](https://www.argentdata.com/files/80422_datasheet.pdf)