



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική εργασία:

Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων για
αυτοματοποίηση κάθετης καλλιέργειας

Παπάς Γεώργιος Εφραίμ - 9124

Στασινός Αλκιβιάδης - 9214

Επιβλέπων Καθηγητής: Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2022

Eυχαριστίες

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Χατζόπουλο Αλκιβιάδη, επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής, για την ευκαιρία που μας έδωσε να την πραγματοποιήσουμε και για τις χρήσιμες συμβουλές και κατευθύνσεις που μας έδωσε καθ'όλη την πορεία ολοκλήρωσής της.

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε όχι μόνο λόγω των τεχνικών γνώσεων που αποκτήσαμε κατα τη διάρκεια των σπουδών μας, αλλά και λόγω της αδιάκοπης στήριξης που μας παρείχαν οι δικοί μας άνθρωποι.

Στο σημείο αυτό, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε βαθύτατα τις οικογένειες μας για τη βοήθεια και τη στήριξη που μας έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια, και φυσικά τους φίλους μας για τις όμορφες στιγμές που μας χάρισαν και μας συνόδευσαν στο ταξίδι των φοιτητικών μας σπουδών.

Σύνοψη

Στη διπλωματική εργασία αυτή προτείνεται ένα σύστημα εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας σε μια εγκατάσταση κάθετης καλλιέργειας. Συγκεκριμένα στα πλαίσια της εργασίας προτείνεται μια δομή συστήματος για την ακριβή λήψη μετρήσεων σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνθήκες της εγκατάστασης. Παράλληλα το προτεινόμενο σύστημα επιτρέπει την τηλεμετρία, αλλά και τον αυτόματο ή και τον χειροκίνητο έλεγχο των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών στην εγκατάσταση της κάθετης καλλιέργειας. Η παρούσα εργασία λοιπόν εστιάζει στην ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, που θα διαχειρίζεται τα συστήματα της εγκατάστασης της κάθετης καλλιέργειας, ενώ θα επιτρέπει και την απομακρυσμένη αλληλεπίδραση με τον χρήστη του συστήματος.

Abstract

Wireless sensor network for vertical farming installation automation

This diploma thesis project proposes a system that will enable the application of precision agriculture in a vertical farming installation. Specifically, during this project, an end-to-end system will be proposed, that will allow precise reception of environmental measurements of this vertical farming installation. Also, the proposed system will allow the remote access to those measurements, as well as the automated or manual control of the environment control systems of this installation. This project will focus on developing a wireless sensor network, which will manage the vertical farming environment control systems and will allow the remote access and control of the installation, by the end user.

Keywords: *Wireless sensor network, IoT, NB-IoT, CoAP protocol, Bluetooth Low Energy, Web server, Automation, Smart agriculture.*

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Σύνοψη	ii
Abstract	iii
Λίστα Εικόνων	vii
Λίστα Πινάκων	ix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή προβλήματος	1
1.2 Κάθετη καλλιέργεια	2
1.2.1 Γενική περιγραφή της κάθετης καλλιέργειας	2
1.2.2 Αυτοματοποίηση στην κάθετη καλλιέργεια	3
1.3 Στόχοι της εργασίας	3
1.4 Διάρθρωση της εργασίας	4
2 Θεωρητικό υπόβαθρο και ανάλυση εννοιών	5
2.1 Πρωτόκολλα επικοινωνίας	5
2.1.1 Bluetooth Low Energy	5
2.1.1.1 Εισαγωγή και βασικές έννοιες	5
2.1.1.2 Τι είναι το Bluetooth Low Energy	6
2.1.1.3 Bluetooth Low Energy και Bluetooth Classic	6
2.1.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Bluetooth Low Energy	7
2.1.1.5 Αρχιτεκτονική του Bluetooth Low Energy	7
2.1.1.6 Διαδικασία σύνδεσης στο BLE	11
2.1.2 Narrow-Band IoT	14
2.1.2.1 Τι είναι το IoT	14
2.1.2.2 Τι είναι το NB-IoT	14
2.1.2.3 Κατανάλωση ενέργειας στο NB-IoT	15
2.1.3 Πρωτόκολλο CoAP	16
2.1.3.1 Γενικά	16
2.1.3.2 Μοντέλο επικοινωνίας	16
2.1.3.3 Παρακολούθηση πόρων	19

2.2	Περιγραφή υλικού που χρησιμοποιήθηκε	19
2.2.1	Πλακέτες ανάπτυξης του συστήματος	19
2.2.1.1	Πλακέτα ανάπτυξης: NRF52840DK	19
2.2.1.2	Πλακέτα ανάπτυξης: NRF9160DK	20
2.2.2	Αισθητήρια συστήματα	21
2.2.2.1	BME280	21
2.2.2.2	Αισθητήρας υγρασίας χώματος: SEN0193	21
2.2.2.3	Αισθητήρας φωτός BH1750	22
2.2.3	Raspberry Pi	22
2.3	Λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου	22
2.3.1	Τι είναι λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου - RTOS	22
2.3.2	Λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου: Zephyr RTOS	23
2.3.2.1	Διαχείριση διεργασιών και χρονοπρογραμματισμός	23
2.3.3	Βάση δεδομένων	23
2.4	Διαδικασία ανάπτυξης	24
2.4.1	Σύστημα ελέγχου έκδοσης - (Version control system)	24
2.4.2	Πρακτικές DevOps	25
2.5	Λοιποί ορισμοί	27
3	Τεχνική ανάλυση της υλοποίησης της εφαρμογής	28
3.1	Παρουσίαση της αρχιτεκτονικής του συστήματος	28
3.2	Εργαλεία και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν	29
3.2.1	Εργαλείο ανάπτυξης του λογισμικού	30
3.2.2	Εργαλείο για εφαρμογή πρακτικών DevOps	30
3.3	Κόμβοι αισθητήρων	31
3.3.1	Αισθητήρες και συνδεσμολογία	31
3.3.2	Μέθοδος τροφοδοσίας και επιλογή μπαταρίας	34
3.3.3	Bluetooth Server	36
3.3.3.1	Ανάλυση: Device Service	36
3.3.3.2	Ανάλυση: Measurement Service	37
3.3.3.3	Μηχανισμός: Sensor Node FSM	38
3.3.4	Μηχανισμός Watchdog	39
3.3.5	Χρήση των κόμβων αισθητήρων	40
3.3.5.1	BME280 - Temperature Humidity Pressure Sensor	40
3.3.5.2	BH1750 - Ambient Light Sensor	41
3.3.5.3	Soil Moisture Sensor	41
3.3.6	Λειτουργία Device Firmware Update - DFU	42
3.4	Κεντρικός κόμβος	43
3.4.1	Διαχείριση του δικτύου αισθητήρων - nRF52840	43
3.4.1.1	Ανάλυση μηχανισμού: Bluetooth FSM	43
3.4.1.2	Ανάλυση μηχανισμού: Measurements FSM	45
3.4.1.3	Ανάλυση μηχανισμού: Control FSM	47
3.4.1.4	Επικοινωνία nRF52840 - nRF9160	50
3.4.1.5	Μηχανισμός Watchdog	54
3.4.2	Διαχείριση της διεπαφής με το cloud - nRF9160	54
3.4.2.1	Σύνδεση με το δίκτυο NB-IoT	54
3.4.2.2	Ανάλυση μηχανισμού: CoAP FSM	55

3.4.2.3 Μηχανισμός Resource Observe	57
3.5 Cloud servers - Διεπαφή με τον χρήστη	58
3.5.1 CoAP server	58
3.5.2 Web server	59
3.5.3 Βάση δεδομένων	63
4 Μετρήσεις και αποτελέσματα	65
4.1 Αποτελέσματα λειτουργίας του συστήματος	65
4.2 Ενεργειακή κατανάλωση κόμβου αισθητήρων	67
4.2.1 Μέθοδολογία και συνθήκες μετρήσεων	67
4.2.2 Συνολική μέση κατανάλωση κόμβων	68
4.2.3 Απόδειξη λειτουργίας - Παράθυρο αποσφαλμάτωσης	70
4.2.3.1 Κόμβος αισθητήρων	70
4.2.3.2 Κεντρικός κόμβος - nRF52840	72
4.2.3.3 Κεντρικός κόμβος - nRF9160	74
5 Μελλοντική εργασία	75
Βιβλιογραφία	77
A' Εγχειρίδιο χρήσης εφαρμογής	82
A'.1 Αρχική ρύθμιση	82
A'.2 Επανατοποθέτηση αισθητήρων	85
A'.3 Firmware update - Περιγραφή διαδικασίας	86
A'.4 Σύνδεση κεντρικού κόμβου	87

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Αρχιτεκτονικό σχήμα του Bluetooth Low Energy Πηγή: [1].	7
2.2	Κανάλια επικοινωνίας BLE: [2].	8
2.3	Αρχιτεκτονική GATT: [3].	10
2.4	Παράδειγμα Attribute Table [4].	12
2.5	NRF52840DK πλακέτα [5].	19
2.6	NRF9160DK πλακέτα [5].	20
2.7	Συγκεντρωτικό σύστημα ελέγχου έκδοσης [6].	25
2.8	Διανεμημένο σύστημα ελέγχου έκδοσης [6].	25
2.9	Κύκλος DevOps [7].	26
3.1	Αναπαράσταση συστήματος	28
3.2	Αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.	32
3.3	Αισθητήρας υγρασίας εδάφους.	32
3.4	Αισθητήρας έντασης φωτός.	33
3.5	Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας εδάφους.	33
3.6	Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (BME280).	33
3.7	Συνδεσμολογία αισθητήρα έντασης φωτός.	34
3.8	Δυνατές Επιλογές Τροφοδοσίας.	35
3.9	Μπαταρία που επιλέχθηκε SAFT-LS14500[8].	35
3.10	Διάγραμμα σχέσης τάσης εξόδου - ρεύματος εκφόρτισης[8].	36
3.11	Μηχανή Πεπερασμένων Στοιχείων των sensor nodes.	39
3.12	Μηχανή Πεπερασμένων Στοιχείων για τον αισθητήρα BME280. [9]	40
3.13	Μηχανή Πεπερασμένων Στοιχείων για τον αισθητήρα BH1750. [10]	42
3.14	Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τη σύνδεση Bluetooth	44
3.15	Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τη λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων	46
3.16	Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τη διαχείριση των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών της καλλιέργειας	48
3.17	Μηχανισμός για την αποστολή δεδομένων στον CoAP server (Στο Cloud)	55
3.18	Ροή πληροφορίας από το δίκτυο αισθητήρων προς τον χρήστη (χίτρινο χρώμα) και από τον χρήστη στο δίκτυο αισθητήρων (μωβ χρώμα)	58
3.19	Γραφική διεπαφή για ρύθμιση ορίων συνθηκών αυτόματου ελέγχου	61
3.20	Γραφική διεπαφή για χειροκίνητο έλεγχο συστημάτων προσαρμογής περιβαλλοντικών συνθηκών	61
3.21	Ιστοσελίδα μέσω της οποίας γίνεται η αλληλεπίδραση με το σήστημα	62
4.1	Εγκατάσταση κάθετης καλλιέργειας λαχανικών	65
4.2	Διάγραμμα μετρήσεων σχετικής περιβαλλοντικής υγρασίας	66

4.3 Διάγραμμα μετρήσεων περιβαλλοντικής θερμοκρασίας (σε βαθμούς κελσίου)	66
4.4 Διάγραμμα μετρήσεων έκθεσης φωτός (σε PPFD)	67
4.5 Διάγραμμα μετρήσεων υγρασίας χώματος	67
4.6 Εργαλείο Power Profiler.	68
4.7 Συνολική μέση κατανάλωση	69
4.8 Μέση κατανάλωση κατά το advertising.	70
4.9 Αρχική ρύθμιση του κόμβου αισθητήρων.	71
4.10 Εκκίνηση ρυθμισμένου κόμβου αισθητήρων.	71
4.11 Εκκίνηση υποσυστήματος nRF52840 του κεντρικού κόμβου.	72
4.12 Εκκίνηση υποσυστήματος nRF9160 του κεντρικού κόμβου.	74
 A'.1 Εφαρμογή nRF Connect για εύκολη ρύθμιση από τον χρήστη.	82
A'.2 Αναζήτηση διαθέσιμων BLE συσκευών με την εφαρμογή nRF Connect.	83
A'.3 BLE Configuration Service.	84
A'.4 Αποστολή τιμής για τη γραμμή καλλιέργειας στην οποία ανήκει ο κόμβος.	84
A'.5 Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας εδάφους.	85
A'.6 Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (BME280).	85
 A'.7 Συνδεσμολογία αισθητήρα έντασης φωτός.	86
A'.8 Αναζήτηση διαθέσιμων BLE συσκευών με την εφαρμογή nRF Connect.	86
A'.9 Επιλογή Device Firmware Update.	87
A'.10 Επιλογή Device Firmware Update.	87

Κατάλογος πινάκων

3.1	Device service: technical information	37
3.2	Measurement service: technical information	38
3.3	Row information message	51
3.4	Ready to send info to cloud message	51
3.5	GPIO control message	52
3.6	User row control settings	52
3.7	Automatic control threshold values	53
3.8	Response message for every received message	53
3.9	Message containing row measurements that is sent to CoAP server	57
3.10	Database table to store measurements	63
3.11	Database table for user thresholds configuration requests	63
3.12	Database table for storing request for manual control of environment control systems	64

Στις οικογένειές μας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο αισθητό ότι οι παγκόσμιες απαιτήσεις για αγαθά αυξάνονται. Οι ανάγκες σίτισης του συνεχώς αυξανόμενου πληθυσμού γίνονται όλο και περισσότερες, ενώ παρατηρείται και μια άνευ προηγουμένου κατανάλωση φυσικών πόρων του πλανήτη. Η γεωργία είναι ο τομέας που ανέκαθεν φρόντιζε για την παραγωγή τροφίμων και αγαθών για την κάλυψη των αναγκών σίτισης του πληθυσμού. Αυτή τη στιγμή η γεωργία είναι ένας τομέας που πλήττεται, αφενός από τη μείωση των καλλιεργίσιμων εκτάσεων και αφετέρου από τη μείωση στη διαθεσιμότητα καθαρού νερού. Ο τομέας λοιπόν της γεωργίας χρειάζεται να εφαρμόσει νέες τακτικές που θα στοχεύουν στην αύξηση της αποδοτικότητας. Η κάθετη καλλιέργεια είναι μια μορφή καλλιέργειας που, σε συνδυασμό με την τεχνολογία, μπορεί να αποτελέσει λύση στο πρόβλημα των αυξημένων απαιτήσεων του παγκόσμιου πληθυσμού, αλλά και στις δυσμενείς συνθήκες καλλιέργειας που έχουν προκληθεί. Η χρήση της τεχνολογίας στην κάθετη καλλιέργεια μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση πόρων και στην αύξηση της παραγωγής, αφού μέσω της αυτοματοποίησης μπορεί να επιτευχθεί ακριβής έλεγχος στη χρήση πόρων για την καλλιέργεια, αλλά και στην παραγωγή ευνοϊκών συνθηκών προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η παραγωγικότητα.

1.2 Κάθετη καλλιέργεια

1.2.1 Γενική περιγραφή της κάθετης καλλιέργειας

Κάθετη καλλιέργεια είναι ένας τύπος καλλιέργειας, που πραγματοποιείται σε κατακόρυφη πολυεπίπεδη διάταξη, συχνά σε εσωτερικό ελεγχόμενο περιβάλλον. Η κάθετη καλλιέργεια προσφέρει τη δυνατότητα καλλιέργειας με ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού, νερού και θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος, κάτι που με τη σειρά του επιτρέπει την ανεξαρτητοποίηση από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες και συνθήκες φωτισμού. Αυτή η ανεξαρτητοποίηση, επιτρέπει αντίστοιχα την καλλιέργεια διαφόρων ειδών φυτών, ανεξάρτητα από την εποχή ή τις ειδικές συνθήκες που μπορεί να προσφέρει (ή όχι) ένας τόπος. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορεί να πραγματοποιηθεί η κάθετη καλλιέργεια. Η λίστα των τεχνικών περιλαμβάνει:

- **Υδροπονία:** Κατά την υδροπονία, οι ρίζες του φυτού βυθίζονται σε ειδικό, ρυθμιζόμενο θρεπτικό διάλυμα. Οι ρίζες του φυτού στην περίπτωση της υδροπονίας υποστηρίζονται από κάποιο χημικά αδρανές μέσο.
- **Ακουαπονική - Ενυδρειοπονία:** Τύπος υδροπονικής καλλιέργειας, που βασίζεται στη συνήπαρξη φυτού με ψάρια, ώστε να υπάρξει αξιοποίηση των θρεπτικών αποβλήτων των ψαριών, για την ανάπτυξη των φυτών.
- **Αεροπονική:** Τύπος υδροπονίας, όπου οι ρίζες των φυτών φεκάζονται με θρεπτικά διαλύματα.

Η κάθετη καλλιέργεια, έχει να προσφέρει πλεονεκτήματα τόσο σε οικονομικό, όσο και σε επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος. Λόγω της φύσης αυτού του τύπου καλλιέργειας, δεν χρησιμοποιούνται λιπάσματα, ζιζανιοκτόνα και φυτοφάρμακα, αφού δεν υπάρχει ανάγκη για έδαφος, όπως στην κλασική καλλιέργεια, παρά μόνο νερού και θρεπτικών συστατικών. Παράλληλα, λόγω της προσαρμοστικότητας που προσφέρει η κάθετη καλλιέργεια στην καλλιέργεια φυτών και λαχανικών, μειώνεται η ανάγκη για μεταφορά των προϊόντων στις διάφορες τοποθεσίες, αφού η τοποθεσία και ο χώρος δεν είναι πλέον περιοριστικός παράγοντας. Έτσι λοιπόν είναι δυνατή η παραγωγή υγιεινών λαχανικών, που δεν έχουν έρθει σε επαφή με επικίνδυνα χημικά, κάτι που μειώνει το κόστος παραγωγής και δεν επιβαρύνει το περιβάλλον και την υγεία των καταναλωτών, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων (που χρειάζονται για τη μεταφορά των προϊόντων), που προσφέρει αντίστοιχα θετικά.[11][12][13][14][15][16]

1.2.2 Αυτοματοποίηση στην κάθετη καλλιέργεια

Η κάθετη καλλιέργεια, είναι ουσιαστικά μια ελεγχόμενη καλλιέργεια. Μερικοί από τους παράγοντες που ελέγχονται στην κάθετη καλλιέργεια είναι[16][17][18][19]:

- **Φως:** Η φωτοσύνθεση των φυτών πραγματοποιείται όταν το φυτό δέχεται φωτεινή ακτινοβολία με μήκη κύματος στο εύρος των 610 - 720nm (μπλε φως) και στο εύρος των 400 - 520nm (κόκκινο φως). Έχει βρεθεί ότι η βέλτιστη αναλογία κόκκινου και μπλε φωτός, σχετικά με την αποδοτικότητα της φωτοσύνθεσης, είναι 23% μπλε φως και 77% κόκκινο φως. Για να μετρηθούν οι συνθήκες φωτισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας φωτός, όπως μια φωτοαντίσταση, μια φωτοδίοδος ή ένα φωτοτρανζίστορ.
- **Νερό:** Η ποσότητα του νερού που δίνεται στο φυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του. Στην κάθετη καλλιέργεια είναι δυνατή η εξοικονόμηση νερού σε ποσοστό ακόμα και 70%. Με τη χρήση της τεχνολογίας μπορεί να επιτευχθεί ακριβής έλεγχος στη λειτουργία του ποτιστικού συστήματος και να δωθεί η δυνατότητα στον άνθρωπο να το ελέγξει απομακρισμένα. Η αυτοματοποίηση στο ποτιστικό σύστημα υποβοηθάται από αισθητήρες υγρασίας χώματος, κάτι που επιτρέπει τη μείωση του ανθρώπινου σφάλματος αλλά και του φόρτου εργασίας για τη διαχείρηση της εγκατάστασης της καλλιέργειας.
- **Θερμοκρασία - Υγρασία περιβάλλοντος:** Ο έλεγχος της θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας περιβάλλοντος, σε συνδιασμό με κάποιο σύστημα κυκλοφορίας αέρα.

1.3 Στόχοι της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προτείνει και να παρουσιάσει μια αρχιτεκτονική ενός συστήματος που θα επιτρέπει τη διαχείριση και τον έλεγχο μιας εγκατάστασης κάθετης καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό θα είναι ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων όπου οι κόμβοι αισθητήρων θα πρέπει να έχουν μεγάλη ενεργειακή αυτονομία, ενώ θα πρέπει να υποστηρίζει και δυνατότητες διεπαφής και αλληλεπίδρασης με τον χρήστη. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, οι κόμβοι αισθητήρων του δικτύου παρουσιάζουν αρκετά έτη αυτονομίας ενσωματώνοντας μια μικρού μεγέθους μπαταρία. Παράλληλα, μέσα στους στόχους της εργασίας είναι η δημιουργία μιας απλής και εύχρηστης διεπαφής με τον χρήστη του συστήματος, προκειμένου αυτός να λαμβάνει εύκολα τις απαραίτητες πληροφορίες για την εγκατάσταση καλλιέργειάς του, αλλά και να έχει τον πλήρη έλεγχο των συστημάτων της εγκατάστασής του.

1.4 Διάρθρωση της εργασίας

- Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στο πρόβλημα γύρω από το οποίο αναπτύσσεται η διπλωματική.
- Στο κεφάλαιο 2 παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών που συνδυάστηκαν προκειμένου να πραγματοποιηθεί η υλοποίηση του συστήματος που προτείνεται στην παρούσα εργασία.
- Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η ανάλυση της αρχιτεκτονικής του συστήματος και εξηγούνται οι διάφοροι μηχανισμοί που υλοποιήθηκαν ώστε να δωθεί η απαραίτητη λειτουργικότητα στο σύστημα.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λειτουργίας συστήματος και δίνονται στοιχεία σχετικά με τη λειτουργικότητα του.
- Στο κεφάλαιο 5 αναφέρονται πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις ως προς την εξέλιξη του προτεινόμενου συστήματος.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο και ανάλυση εννοιών

2.1 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

2.1.1 Bluetooth Low Energy

2.1.1.1 Εισαγωγή και βασικές έννοιες

To Bluetooth είναι ένα ασύρματο πρωτόλλο επικοινωνίας που εφευρέθηκε από τη σουηδική εταιρεία τηλεπικοινωνιών Ericsson το 1994. Τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1998, ιδρύθηκε η οργάνωση Bluetooth Special Interest Group (SIG). Η Bluetooth SIG συγχρότηθηκε από την Ericsson, την IBM, Intel τη Nokia και τη Toshiba, και έτσι το όνομα Bluetooth υιοθετήθηκε επίσημα. Ένα χρόνο αργότερα κυκλοφόρησε το πρώτο πρότυπο Bluetooth 1.0. Η SIG είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό του τρόπου λειτουργίας των συσκευών Bluetooth, διασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των κατασκευαστών και την προσθήκη βελτιώσεων στο πρότυπο για την παρακολούθηση των τελευταίων τεχνολογικών εξελίξεων και αναγκών. Τα τελευταία 20 χρόνια και ξεκινώντας από το Bluetooth 1.0 έχουν γίνει πάνω από έντεκα τροποποιήσεις του προτύπου με την τελευταία έκδοση να είναι το Bluetooth 5.2 [20] τον Ιούλιο του 2021. Από τις πιο σημαντικές προσθήκες στο πρότυπο, είναι η εισαγωγή του Bluetooth Low Energy (BLE) στην έκδοση 4.0. Έτσι στο εξής προκύπτει ο διαχωρισμός των πρωτοκόλλων Bluetooth σε Bluetooth Classic και Bluetooth Low Energy (BLE).

2.1.1.2 Τι είναι το Bluetooth Low Energy

To Bluetooth Low Energy (BLE) είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης διασύνδεσης συσκευών με έμφαση στη χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το BLE απευθύνεται σε εφαρμογές χαμηλών ενέργειακών απαιτήσεων που μπορεί να λειτουργούν με μπαταρίες για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα, ακόμη και χρόνια. Το BLE δεν αποτελεί αναβάθμιση του Bluetooth Classic, αλλά είναι μια νέα τεχνολογία και επικεντρώνεται κυρίως στις εφαρμογές IoT, οι οποίες εξ ορισμού έχουν την ανάγκη ανταλλαγής δεδομένων με άλλες συνδεδεμένες συσκευές, ενώ πρέπει ταυτόχρονα να διατηρούν υψηλό χρόνο ζωής και αυτονομίας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ του Bluetooth Classic και του Bluetooth Low Energy όσον αφορά τις τεχνικές προδιαγραφές και την υλοποίηση.

2.1.1.3 Bluetooth Low Energy και Bluetooth Classic

Συγκεκριμένα, το Bluetooth Classic

- Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές με μεγαλύτερες απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων όπως η μετάδοση ήχου ή η μεταφορά αρχειών.
- Δέν είναι βελτιστοποιημένο ως προς την κατανάλωση ενέργειας, παρόλα αυτά πετυχαίνει μεγαλύτερη μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης φτάνοντας τα 3 Mbps, σε σχέση με τα 2 Mbps του BLE.
- Λειτουργεί σε 79 συχνοτικά κανάλια ενώ η διαδικάσια της "αναγνώρισης" (discovery) άλλων συσκευών λαμβάνει χώρα σε 32 διαφορετικά κανάλια.

Αντίθετα το Bluetooth Low Energy

- Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου σκοπός είναι συνήθως η μετάδοση της μέτρησης κάποιου αισθητήρα ή ο έλεγχος κάποιου συστήματος, με τη πλειονότητα των περιπτώσεων να στοχεύουν σε εξαιρετικά χαμηλές καταναλώσεις ενέργειας.
- Είναι εξαιρετικά βελτιστοποιημένο για την κατανάλωση της μικρότερης δυνατής ισχύος κατά τη λειτουργία του.
- Λειτουργεί σε 40 συχνοτικά κανάλια ενώ η διαδικάσια του advertising άλλων συσκευών λαμβάνει χώρα σε μόνο 3 διαφορετικά κανάλια. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία του discovery και επομένως η δημιουργία της σύνδεσης μεταξύ δύο συσκευών είναι πραγματικά ταχύτερη σε σχέση με το κλασσικό πρωτόκολλο Bluetooth. Οι διαδικασίες του advertising και discovery επεξηγούνται σε μεγαλύτερο βάθος μετέπειτα.

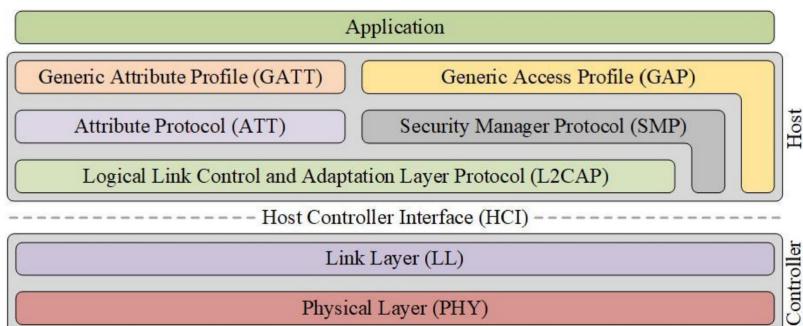
2.1.1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Bluetooth Low Energy

Τα βασικά χαρακτηριστικά που κάνουν το Bluetooth Low Energy να ξεχωρίζει και να γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλές είναι πρωτίστως η μικροσκοπική κατανάλωση ισχύος που προσφέρει σε σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα. Επιπλέον, πολύ σημαντικό είναι πως η πρόσβαση στα έγγραφα του επίσημου προτύπου Bluetooth Low Energy είναι δωρεάν και προσβάσιμη από τον καθένα. Τέλος, το κόστος των Bluetooth modules είναι αρκετά προσιτό ενώ παράλληλα κάθε σύγχρονο κινητό τηλέφωνο διαθέτει λειτουργία επικοινωνίας με BLE.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και στοιχεία του Bluetooth Low Energy που ίσως δε το καθιστούν ιδανικό για κάποιες εφαρμογές.

Αρχικά, το Bluetooth Low Energy είναι σχεδιασμένο για επικοινωνία μικρής εμβέλειας. Λειτουργεί στα 2.4 GHz, γεγονός που κάνει την επικοινωνία να επηρεάζεται αισθητά από εμπόδια στο χώρο. Επιπλέον ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων μέχρι και το πρότυπο Bluetooth 4.2 ήταν περιορισμένος στο 1 Mbps, ενώ αξιοποιώντας πιο πρόσφατα πρότυπα μπορεί να φτάσει θεωρητικά ως και 2 Mbps.

2.1.1.5 Αρχιτεκτονική του Bluetooth Low Energy



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονικό σχήμα του Bluetooth Low Energy Πηγή: [1].

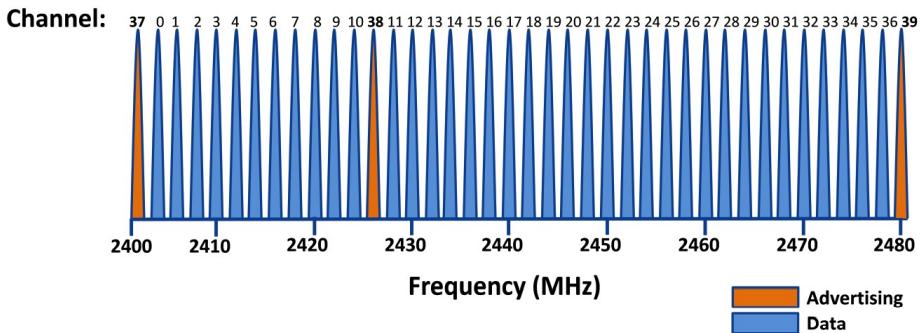
Physical Layer - PHY

To Bluetooth Low Energy είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί στην Industrial, Scientific and Medical ζώνη συχνοτήτων, δηλαδή στα 2.4 - 2.5 GHz όπου λειτουργούν και τα Bluetooth Classic και WiFi. Πιο συγκεκριμένα, η συχνοτική ζώνη λειτουργίας του BLE είναι από 2.4000 GHz εως και 2.4835 GHz και χωρίζεται σε 40 συχνοτικά κανάλια. Τα κανάλια αυτά έχουν συχνότητες $2402 + k * 2$ MHz, όπου $k = 0, 1, 2, \dots, 39$.

Για την αποφυγή παρεμβολών με άλλα πρωτόκολλα επικοινωνίας που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων (2.4 GHz), το Bluetooth υιοθετεί την τεχνική του Adaptive Frequency

Hopping, σύμφωνα με την οποία το κανάλι επικοινωνίας που χρησιμοποιείται επιλέγεται κάθε φορά ψευδοτυχαία.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2, από τα 40 διαθέσιμα συχνοτικά κανάλια του Bluetooth, 37 από αυτά χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων, ενώ τα κανάλια 37, 38 και 39 χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία του advertising.



Σχήμα 2.2: Κανάλια επικοινωνίας BLE: [2].

Τέλος το physical layer του BLE είναι και αυτό που θέτει τα όρια της ισχύος εκπομπής που ορίζεται από 0.01 mW (-20dBm) έως και 10mW (10dBm).

Link Layer - LL

To Link Layer είναι το επίπεδο που αλληλεπιδρά απευθείας με το physical layer. Αποτελείται συνήθως και από hardware και από software. Εξυπηρετεί κυρίως στη διαχείριση της κατάστασης της οποίας βρίσκεται το physical layer του BLE, όπως επίσης και στη διαχείριση των απαραίτητων χρονισμών του BLE. Για παράδειγμα, στο BLE υπάρχει αναγκαστικός χρόνος αναμονής για την αποστολή κάθε πακέτου 150 μs, ο οποίος διαχειρίζεται από το Link Layer. Αυτός ο χρόνος αναμονής εξυπηρετεί στην αποφυγή υπερθέρμανσης της Bluetooth κεραίας, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μικρές κεραίες για προιόντα μικρού μεγέθους (compact).

Host Controller Interface Layer - HCI

Tα layers του Bluetooth όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 διαχωρίζονται σε δύο group, σε αυτό του Controller και σε αυτό του Host . To HCI είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας ορισμένο από το πρότυπο του Bluetooth, ώστε το host layer να επικοινωνεί με τον Controller. Πολλές φορές τα δύο επίπεδα του Host και του Controller διαχωρίζονται είτε σε διαφορετικούς πυρήνες είτε ακόμη και σε τελείως διαφορετικό hardware.

Logical Link Control and Adaptation Protocol - L2CAP

To πρωτόκολλο Logical Link Control and Adaption διαχειρίζεται τα δεδομένα τα οποία καταφθάνουν από τα πιο κάτω στρώματα της αρχικτεκτονικής του BLE και πραγματοποιεί την κατάλληλη διαμόρφωση των δεδομένων αυτών σε BLE πακέτα, κατα τις απαιτήσεις των

πιό πάνω layers προς τα οποία και τα προωθεί. Το πρωτόκολλο αυτό είναι υπεύθυνο και για την αντίστροφη ροή των δεδομένων.

Security Management Protocol - SMP

Το SMP επίπεδο προσδιορίζει τα πρωτόκολλα και τους αλγορίθμους εκείνους που χρησιμοποιούνται για την κρυπτοχράφηση και αποκρυπτογράφηση των πακέτων.

Attribute Protocol - ATT

Το Attribute Protocol ορίζει τη βασική client-server αρχιτεκτινική του Bluetooth Low Energy, όπου ο client είναι αυτός που ζητά δεδομένα από τον server, ο οποίος με τη σειρά του απαντά και στέλνει τα δεδομένα στους clients. Μια συσκευή μπορεί να είναι είτε client ή server είτε και τα δύο. Το Attribute protocol οργανώνει τα δεδομένα στα λεγόμενα attributes. Τα attributes αποτελούνται από:

- Ένα handle το οποίο όπως θα εξηγηθεί και αργότερα είναι ένας γρήγορος και εύκολος τρόπος να προσπελάσουμε το attribute.
- Ένα Universally Unique Identifier (UUID), το οποίο είναι ένας εγγυημένα μοναδικός αριθμός και χρησιμοποιείται ως ταυτότητα των Attributes.
- Τα κατάλληλα permissions για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να προσπελαστεί το attribute.
- Τέλος υπάρχει και το πεδίο της τιμής (value) του attribute.

Generic Attribute Profile - GATT

Το GATT ενθηλακώνει και εμπεριέχει τις βασικές αρχές του ATT. Ο βασικός του ρόλος είναι ο καθορισμός του τρόπου επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων των συνδεδεμένων συσκευών. Όπως και το ATT, το GATT ορίζει δύο ρόλους, αυτόν του client και αυτόν του server.

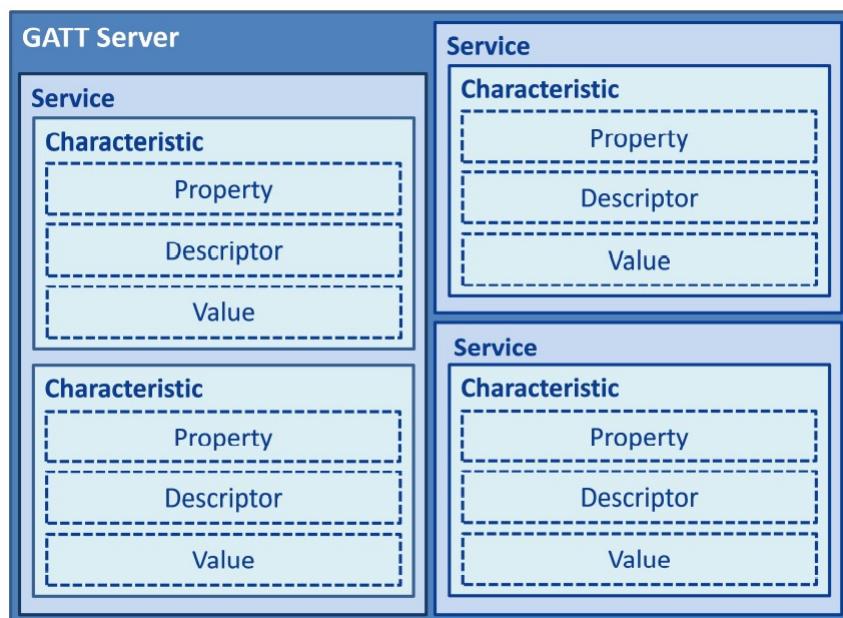
Μερικά από τα πιο σημαντικά κομμάτια του Bluetooth Low Energy τα οποία ορίζονται από το GATT είναι, τα Services, τα Characteristics και τα Profiles. Κατα τη δημιουργία της σύνδεσης δύο συσκευών BLE, ο server διαθέτει τα services και τα characteristics του στον client. Από τη μεριά του, ο client χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα services και τα χαρακτηριστικά (characteristics) για να αντλήσει τα δεδομένα που θέλει ή να ελέγξει τον server με όποιο τρόπο χρειάζεται και επιτρέπεται από τα διαθέσιμα services.

Με τον όρο Service εννοείται η συγκέντρωση των απαιτούμενων attributes από τη πλευρά του server τα οποία μπορούν να εξυπηρετήσουν μια συγκεκριμένη λειτουργικότητα. Τα attributes αυτά μπορεί να είναι χαρακτηριστικά. Στη πραγματικότητα, τα ίδια τα services αποτελούν και αυτά attributes, όπως ορίστηκαν προηγουμένως. Η Bluetooth SIG έχει

Θεσπίσει μερικά πρότυπα services όπως τα Heart Rate Service. Τα services που υπάρχουν προδιαγεγραμμένα από τη Bluetooth SIG έχουν ένα αναγνωριστικό της τάξης των 16 Bit. Η πραγματική δύναμη του Bluetooth ωστόσο έγκειται στο ότι είναι δυνατό να αναπτυχθούν και νέα services με οποιαδήποτε χαρακτηριστικά εμείς επιθυμούμε. Τα services που δεν είναι προδιαγεγραμμένα από τη SIG έχουν 128 Bit αναγνωριστικό (UUID).

Αντίστοιχα με τον όρο χαρακτηριστικό (Characteristic) εννούμε ένα attribute που εμφανίζεται πάντα ως μέρος ενός service και αναπαριστά την πραγματική τιμή που μας ενδιαφέρει. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι θέλουμε ο server μας να προσφέρει τη πληροφορία για το ποσοστό της μπαταρίας που του έχει απομείνει τότε θα πρέπει να διαθέτει ένα χαρακτηριστικό που περιέχει αυτή τη πληροφορία το οποίο θα υπάγεται σε κάποιο service που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο client (π.χ. Battery Service). Τα χαρακτηριστικά, όπως άλλωστε κάθε attribute έχουν και αυτά έναν μοναδικό αναγνωριστικό 128 Bit κωδικό (UUID).

Τέλος τα Profiles είναι ένας πολύ πιο γενικός ορισμός από ότι τα services και αντιπροσωπεύουν την αναμενόμενη συμπεριφορά και τρόπο επικοινωνίας του client με τον server, δηλαδή τη συμπεριφορά της σύνδεσης ή και την ασφάλεια.



Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονική GATT: [3].

Στο BLE υπάρχουν έξι διαφορετικού τύπου διεργασίες που εφαρμόζονται στα χαρακτηριστικά (Characteristics).

- **Commands** τα οποία αποστέλλονται από τον client προς τον server. Ένα παράδειγμα τέτοιας εντολής είναι το Write Command για κάποιο χαρακτηριστικό, η οποία δεν απαιτεί κάποια απάντηση από τον server.

- **Requests** τα οποία αποστέλλονται από τον client προς τον server και απαιτούν κάποιου είδους response από τον server. Παράδειγμα είναι τα Read/Write requests.
- **Responses** τα οποία αποστέλλονται από τον server προς τον client.
- **Notifications** τα οποία στέλνονται από τον server προς τον client ώστε να τον ενημερώσει πως η τιμή κάποιου χαρακτηριστικού έχει αλλάξει, στέλνοντάς του τη νέα τιμή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως για να μπορεί ο server να αποστέλλει notifications για κάποιο χαρακτηριστικό πρέπει ο client από τη μεριά του να ενεργοποιήσει τα notifications για αυτό το χαρακτηριστικό. Επιπλέον, ο client δε χρειάζεται να δώσει κάποιο response στον server για την αναγνώριση του notification.
- **Indications** τα οποία είναι σχεδόν ίδια με το μηχανισμό των Notifications, όμως απαιτείται επιβεβαίωση από τον client πως έλαβε το indication από τον server.
- **Confirmations** που στέλνονται από τον client προς τον server για την επιβεβαίωση λήψης του indication.

Με αυτούς τους τρόπους μπορούν και προσπελάζονται επίσης τα χαρακτηριστικά. Σημειώνεται πως για κάθε χαρακτηριστικό που επιθυμούμε να υποστηρίζει notifications ή indications, ορίζεται και ένα επιπλέον attribute, αυτό του CCCD (Client Characteristic Configuration Descriptor). Ανάλογα την τιμή που γράφεται σε αυτόν από τον client επιτρέπεται και η αντίστοιχη λειτουργία.

Για τη καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών και των services είναι χρήσιμο να παρατηρήσουμε το σχήμα 2.4. Σε αυτή απεικονίζεται η δομή του attribute table ενός BLE server ο οποίος περιέχει το Heart Rate Service με δύο χαρακτηριστικά. Σε αυτή παρατηρείται αρχικά το Service Declaration που δηλώνει την ύπαρξη του service, το uuid του καθώς και τα permissions του attribute αυτού. Στη συνέχεια, για κάθε χαρακτηριστικό, προηγείται και ένα characteristic declaration. Αυτό ορίζει τα properties του χαρακτηριστικού που ακολουθεί (π.χ. notify) το uuid του και το handle του. Έστερα ακολουθεί το Characteristic value declaration για τον ορισμό της πραγματικής τιμής του χαρακτηριστικού.

Άξιο προσοχής είναι πως για το πρώτο χαρακτηριστικό υπάρχει ένα επιπλέον attribute, αυτό του Client Characteristic Configuration Descriptor. Αυτό συμβαίνει διότι για το χαρακτηριστικό αυτό υπάρχει το property του notification. Το ίδιο δε συμβαίνει για το δεύτερο χαρακτηριστικό.

2.1.1.6 Διαδικασία σύνδεσης στο BLE

Στο BLE, πριν πραγματοποιηθεί η σύνδεση δύο συσκευών, ορίζονται οι ρόλοι του **Peripheral** και του **Central**. Peripheral είναι η συσκευή που ζεκινά το advertising και

Heart Rate Profile	Handle	Type of attribute (UUID)	Attribute permission	Attribute value
Service Declaration	0x000E	Service declaration Standard UUIDservice 0x2800	Read Only, No Authentication, No Authorization	Heart Rate Service 0x180D
Characteristic Declaration	0x000F	Characteristic declaration Standard UUIDcharacteristic 0x2803	Read Only, No Authentication, No Authorization	Properties (Notify) Value Handle (0x0010) UUID for Heart Rate Measurement characteristic (0x2A37)
Characteristic Value Declaration	0x0010	Heart Rate Measurement Characteristic UUID found in the Characteristic declaration value 0x2A37	Higher layer profile or implementation specific.	Beats Per Minute E.g "167"
Descriptor Declaration	0x0011	Client Characteristic Configuration Descriptor (CCCD) Standard UUIDservice 0x2800	Readable with no authentication or authorization. Writable with authentication and authorization defined by a higher layer specification or is implementation specific.	Notification enabled 0x000X
Characteristic Declaration	0x0012	Characteristic declaration Standard UUIDcharacteristic 0x2803	Read Only, No Authentication, No Authorization.	Properties (READ), Value Handle (0x0011), UUID for Body Sensor Location (0x2A38)
Characteristic Value Declaration	0x0013	Body Sensor Location UUID found in the Characteristic declaration value 0x2A38	Higher layer profile or implementation specific	Sensor Location (8-bit integer) E.g. 3 equals "Finger"

Σχήμα 2.4: Παράδειγμα Attribute Table [4].

αντίστοιχα Central ορίζεται η συσκευή που ζεκινά το scanning και ψάχνει ώστε να συνδεθεί σε κάποιον peripheral.

Για τη σύνδεση δύο συσκευών μέσω Bluetooth Low Energy ακολουθείται η εξής διαδικασία,

- Αρχικά ο peripheral ζεκινά τη διαδικασία του advertising. Υπάρχουν διάφοροι τύποι advertising. Ωστόσο για τους σκοπούς της διπλωματικής δε χρησιμοποιήθηκαν και για αυτό δεν αναλύονται διεξοδικά.
- Από τη πλευρά του ο Central απαιτείται να έχει εκκινήσει τη διαδικασία του scanning ώστε να μπορέσει να ανιχνεύσει τον peripheral.
- Σε περίπτωση που τα κανάλια στα οποία ο peripheral κάνει το advertising και ο central σκανάρει συμπίπτουν, τότε ο δεύτερος δύναται να ανιχνεύσει τον πρώτο και να λάβει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε να ζεκινήσει τη σύνδεση.

- Μετά την ανίχνευση, ο Central στέλνει ένα ειδικά διαμορφωμένο πακέτο ως αίτημα για σύνδεση (Connection request).
- Ο peripheral κάθε φορά που κάνει advertise σε κάποιο κανάλι περιμένει κάποιο χρόνο σε περίπτωση που λάβει κάποιο connection request. Όταν το λάβει επιτυχώς ξεκινά η διαδικασία της σύνδεσης. Ο Central ύστερα ξεκινά τη διαδικασία του discovery ώστε να ανιχνεύσει τα διαθέσιμα services και characteristics.

Μετά τη δημιουργία της σύνδεσης μεταξύ peripheral και central, αυτοί αναφέρονται ως slave και master αντίστοιχα. Ο master είναι αυτός που διαχειρίζεται τη σύνδεση και ελέγχει παραμέτρους αυτής, όπως τα Connection Intervals και το χρονισμό των διάφορων Connection Events.[\[1\]](#) [\[3\]](#) [\[21\]](#) [\[22\]](#) [\[23\]](#) [\[2\]](#)

Συγκεκριμένα, μια BLE σύνδεση χαρακτηρίζεται από τις εξής παραμέτρους:

- **Connection Event** Σε μια σύνδεση BLE δύο συσκευές συνεχίζουν να ανταλλάζουν πακέτα, ακόμα και αν δεν έχουν πραγματικά δεδομένα να ανταλλάξουν. Αυτό συμβαίνει ώστε η σύνδεση να παραμείνει ενεργή και είναι βασική απαίτηση του BLE. Η περιοδική ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο συσκευών ορίζεται ως **Connection Event**.
- **Connection Interval** είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών Connection Events. Το χρονικό διάστημα αυτό τίθεται υπό "διαπραγμάτευση" μεταξύ των δύο συνδεδεμένων συσκευών. Ένα μεγάλο Connection Interval συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος μειώνοντας ωστόσο την ταχύτητα της σύνδεσης, ενώ πιο μικρά (γρήγορα) Connection Intervals λειτουργούν αντίστροφα. Στο BLE τα Connection Intervals κυμαίνονται από 7.5 ms εώς και 4 δευτερόλεπτα.
- **Slave Latency** Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ακόμα και αν δύο συσκευές δεν επιθυμούν να ανταλλάξουν δεδομένα, για να παραμείνει η σύνδεση ενεργή, θα πρέπει οι συνδεδεμένες συσκευές να ανταλλάσουν πακέτα σε κάθε Connection Event. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει αρκετά τη διάρκεια ζωής των συσκευών καθώς συνήθως, τουλάχιστον μία από αυτές λειτουργεί με μπαταρία. Για το λόγο αυτόν εισήχθη η παράμετρος του **slave latency**. Η τιμή της παραμέτρου αυτής ορίζει τα συνεχόμενα connection events για τα οποία ο peripheral σε μια BLE σύνδεση μπορεί να "αγνοεί" τον central διατηρώντας τη σύνδεση ενεργή. Για παράδειγμα μια τιμή slave latency 6 σημαίνει πως ο peripheral μπορεί να αγνοήσει τον central για 6 συνεχόμενα connection events.
- **Supervision Timeout** ορίζεται ως ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να μεσολαβήσει μεταξύ την ανταλλαγή πακέτων μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών, χωρίς να προκύψει αποσύνδεση.

2.1.2 Narrow-Band IoT

2.1.2.1 Τι είναι το IoT

Δίκτυο των πραγμάτων (Internet of things) είναι ένας τύπος δικτύου που αποτελείται από διάφορες διασυνδεδεμένες συσκευές που ενσωματώνουν λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων.

2.1.2.2 Τι είναι το NB-IoT

Ο οργανισμός 3GPP παρουσίασε κατά τη 13η έκδοση του, την τεχνολογία NB-IoT, μια τεχνολογία σχεδιασμένη με στόχο την χρήση της σε επικοινωνίες τύπου Μηχανή-με-Μηχανή (M2M - Machine to machine). Ο στόχος του NB-IoT είναι να επιτρέψει στις συσκευές να μοιράζονται πληροφορίες με χαμηλές απαιτήσεις σε δεδομένα (όπως μετρήσεις από αισθητήρες) με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Ο σχεδιασμός του NB-IoT είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να αξιοποιήσει την υπάρχουσα LTE υποδομή, ενώ παρουσιάζει συμβατότητα με τα δίκτυα 5ης γενιάς. Αυτή η προδιαγραφή επιτρέπει στην τεχνολογία NB-IoT να επεκταθεί γρήγορα, αξιοποιώντας τις υπάρχουσες υποδομές τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Το εύρος ζώνης της τεχνολογίας αυτής είναι στα 180kHz και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί είναι περίπου τα 260kbps.

Το NB-IoT από τη μία παρέχει υποστήριξη και του UDP και του TCP πρωτοκόλλου, όμως λόγω των υψηλών τιμών στις καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση δεδομένων, η χρήση του TCP πρωτοκόλλου είναι αναξιόπιστη, άφα προτιμάται η χρήση του UDP πρωτοκόλλου. Σε γενικές γραμμές, κατά τη χρήση του NB-IoT, αξιοποιώντας το πρωτόκολλο TCP, η απώλεια πακέτων κινείται στο 90%, ενώ στην περίπτωση του UDP, το αντίστοιχο ποσοστό βρίσκεται στο 3%. Αυτά τα ποσοστά είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να ληφθούν υπόψιν κατά την επιλογή του πρωτοκόλλου που θα υλοποιηθεί για τη μετάδοση πληροφορίας. Μερικά γνωστά πρωτόκολλα που αξιοποιούνται για τέτοια χρήση είναι το MQTT, το CoAP και το LwM2M.

- **MQTT:** Πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στο Δίκτυο των Πραγμάτων (IoT), όταν η υποκείμενη συσκευή έχει περιορισμένους πόρους. Βασίζεται στη λογική του publisher - subscriber. Η λογική του Publisher - Subscriber μοντέλου στην επικοινωνία, βασίζεται στο ότι ο Publisher δημοσιεύει/εκπέμπει μια πληροφορία και ο Subscriber τη λαμβάνει. Τα κάθε ένα από τα 2 αυτά μέλη της επικοινωνίας δε χρειάζεται να γνωρίζει την ύπαρξη του άλλου και δεν υπάρχει κάποια μεταξύ τους εξάρτηση κατά τη λειτουργία τους. Το MQTT πρωτόκολλο αξιοποιεί το TCP πρωτόκολλο επικοινωνίας, που είναι ευαίσθητο στην ύπαρξη καθυστερήσεων κατά τη μετάδοση δεδομένων.

- **CoAP:** Πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο IoT με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και δεδομένων κατά την επικοινωνία. Το CoAP, βασιζόμενο στην αρχιτεκτονική REST, υποστηρίζει τις μεθόδους GET, POST, PUT και DELETE. Το μοντέλο που ακολουθείται στην περίπτωση του CoAP είναι αυτό του request/response αλλά και του publish/subscribe στην περίπτωση της παρατήρησης πόρων (resource observation).
- **LwM2M:** Το LwM2M, είναι επίσης ένα διαδεδομένο πρωτόκολλο στον κόσμο του IoT, που βασίζεται στο πρωτόκολλο CoAP. Στην περίπτωση του LwM2M ορίζεται μια αρχιτεκτονική διακομιστή-πελάτη (client-server) και βασίζεται επίσης στο UDP.

To NB-IoT μπορεί να λειτουργήσει με τους εξής τρόπους:

- **Αυτόνομη λειτουργία (stand-alone mode):** Χρήση ανεξάρτητης ζώνης συχνοτήτων που δεν επικαλύπτεται με ζώνη συχνοτήτων της τεχνολογίας LTE.
- **Λειτουργία ζώνης φρουράς (guard-band mode):** Χρήση της guard-band ζώνης του LTE.
- **Λειτουργία εντός ζώνης (in-band mode):** Χρήση ζώνης συχνοτήτων LTE, που διαφορετικά θα χρησιμοποιούνται για τις ευρυζωνικές κινητές επικοινωνίες.

2.1.2.3 Κατανάλωση ενέργειας στο NB-IoT

Ο έλεγχος ραδιοφωνικών πόρων (RRC) συμβαίνει με δύο τρόπους:

- **RRC Connected:** Κατάσταση που βρίσκεται η συσκευή που συνδέεται για πρώτη φορά στο NB-IoT δίκτυο.
- **RRC Idle:** Κατάσταση που βρίσκεται η συσκευή όταν η σύνδεσή της με το δίκτυο NB-IoT απελευθερώνεται. Η σύνδεση απελευθερώνεται όταν δεν υπάρχει κάποια μετάδοση πληροφορίας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ η συσκευή αποθηκεύει τις πληροφορίες που χρειάζεται, ώστε κατά την επανασύνδεση με το δίκτυο, να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας.

Όταν η συσκευή μπει στην κατάσταση RRC Idle, δηλαδή όταν η σύνδεση απελευθερωθεί, η συσκευή μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια με τις εξής δύο τεχνικές:

- **Εκτεταμένη ασυνεχής λήψη - eDRX:** Η τεχνική eDRX βασίζεται στην υπάρχουσα DRX τεχνολογία που εφαρμόζεται στα δίκτυα LTE και είναι μια τεχνική κατά την οποία η συσκευή μπαίνει σε λειτουργία χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και

λαμβάνει δεδομένα σε ορισμένα χρονικά διαστήματα. Η eDRX τεχνική μπορεί να είναι ενεργή και στις 2 καταστάσεις του RRC που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

- **Λειτουργία εξοικονόμησης ενέργειας - PSM:** Κατά την κατάσταση PSM, η συσκευή μπαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης, όπου η κατανάλωση, όσον αφορά στη σύνδεση με το NB-IoT δίκτυο, μπορεί να είναι της τάξης των μερικών μΑ. Όσο η συσκευή βρίσκεται στην κατάσταση PSM, δεν υπάρχει τρόπος να βρεθεί στην κατάσταση RRC connected από κάποιον εξωτερικό παράγοντα, άρα η συσκευή, κατά αυτό το διάστημα, δε λαμβάνει δεδομένα. Η ίδια η συσκευή ωστόσο μπορεί να ελέγξει τη λειτουργία PSM και να εξέλθει όποτε χρειάζεται. Οι χρονικές περίοδοι για την ενεργοποίηση του PSM αλλά και για την έξοδο από το PSM, για την περιοδική ενημέρωση του δικτύου για τη διατήρηση της σύνδεσης, είναι ρυθμιζόμενες από τον χρήστη.[24][25][26][27][28][29][30][31][32][33]

2.1.3 Πρωτόκολλο CoAP

2.1.3.1 Γενικά

Το πρωτόκολλο CoAP (Πρωτόκολλο για εφαρμογές με περιορισμούς - Constrained Application Protocol) δημιουργήθηκε από την ομάδα IETF CoRE, με βασικό στόχο τη χρήση του σε εφαρμογές όπου υπάρχουν περιορισμοί, τόσο σε υπολογιστικό επίπεδο, αλλά και στην κατανάλωση δεδομένων. Είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στην αρχιτεκτονική τύπου REST, όπως και το πρωτόκολλο HTTP, αλλά στην περίπτωση του CoAP, υπάρχει η προδιαγραφή για λειτουργίες τύπου αίτημα/απάντηση (request/response).

2.1.3.2 Μοντέλο επικοινωνίας

Στο πρωτόκολλο CoAP η επικοινωνία γίνεται αξιοποιώντας την τεχνολογία UDP. Τα διάφορα μηνύματα που ανταλλάσσονται κατά την επικοινωνία αποτελούνται από μια επικεφαλίδα (header), με μέγεθος 4 bytes, η οποία ακολουθείται, ανάλογα τον τύπο του εκάστοτε μηνύματος, από επιπλέον επιλογές που προσθέτουν λειτουργικότητα στο μήνυμα, καθώς και από κάποια πληροφορία (payload).

Η επικεφαλίδα εμπεριέχει πληροφορίες όπως την έκδοση του CoAP πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται, τον τύπο του μηνύματος, το μέγεθος της τιμής της ένδειξης (token) του μηνύματος, τον κωδικό του μηνύματος και την ταυτότητα του μηνύματος. Ο κωδικός του μηνύματος είναι στη μορφή x.yy και δίνει πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του αιτήματος, όταν πρόκειται για μήνυμα τύπου αιτήματος, ή τον κωδικό απάντησης σε περίπτωση μηνύματος τύπου απάντησης.

Στις επιπλέον επιλογές, που ενσωματώνονται σε ενα μήνυμα στο πρωτόκολλο CoAP, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι επιλογές: Uri-host, Uri-port, Uri-path και Uri-query. Η αξιοποίηση αυτών των επιλογών γίνεται με στόχο τον προσδιορισμό του πόρου (resource) στον οποίο απευθύνεται ένα μήνυμα τύπου αιτήματος. Ένας εξυπηρετητής μπορεί να έχει διάφορους πόρους διαθέσιμους, όπως για παράδειγμα τιμή θερμοκρασίας από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας που είναι εγκατεστημένος στον εξυπηρετητή. Πάνω σε αυτούς τους πόρους μπορούν να γίνουν οι εξής τύποι αιτημάτων:

- **Αίτημα GET:** Ένα αίτημα τύπου GET σε ένα διαθέσιμο πόρο θα επιτρέψει την λήψη της πληροφορίας που διαθέτει ο πόρος.
- **Αίτημα POST:** Το αίτημα τύπου POST, επιτρέπει την ενημέρωση της πληροφορίας που περιέχει ένας πόρος ή τη δημιουργία ενός πόρου. Η επανάληψη ενός ίδιου POST αιτήματος μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία του ίδιου πόρου πολλαπλές φορές.
- **Αίτημα PUT:** Το αίτημα τύπου PUT, επιτρέπει την ενημέρωση της πληροφορίας που περιέχει ένας πόρος ή τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου πόρου.
- **Αίτημα DELETE:** Το αίτημα τύπου DELETE, χρησιμοποιείται για τη διαγραφή ενός διαθέσιμου πόρου.

Στο πρωτόκολλο CoAP υποστηρίζονται 4 τύποι μηνυμάτων και 3 τύποι απαντήσεων:

- **Με επιβεβαίωση (Confirmable):** Όταν για ένα μήνυμα υπάρχει η απαίτηση να επιβεβαιωθεί η λήψη του από τον παραλήπτη, τότε αυτό το μήνυμα προσδιορίζεται ως confirmable. Όταν δεν υπάρχουν απώλειες στην επικοινωνία, μετά την αποστολή ενός confirmable μηνύματος, ακολουθεί αυστηρά ένα μήνυμα τύπου αναγνώρισης (acknowledgement).
- **Χωρίς επιβεβαίωση (Non-confirmable):** Για τους τύπους μηνυμάτων όπου δεν απαιτείται αναγνωριστική απάντηση από την πλευρά του παραλήπτη υπάρχει ο προσδιορισμός Non-confirmable. Όταν ένα μήνυμα οριστεί ως non-confirmable, η απάντηση acknowledgement παραλείπεται.
- **Μήνυμα αναγνώρισης (Acknowledgement - Ack):** Το μήνυμα τύπου ack έχει ως σκοπό την επιβεβαίωση λήψης ενός confirmable μηνύματος. Το μήνυμα ack από μόνο του δε μεταδίδει πληροφορία σχετικά με την επιτυχία ή όχι διεκπεραίωσης του αιτήματος που εμπειρέχονταν, ενδεχομένως, στο confirmable μήνυμα, αλλά υπάρχει η επιλογή για ενσωμάτωση κάποιας απάντησης στο ack. Αυτή η απάντηση ονομάζεται piggybacked απάντηση.

- **Μήνυμα επαναφοράς (Reset):** Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα τύπου confirmable, στην περίπτωση που για τον οποιονδήποτε λόγο δε μπορεί να επεξεργαστεί καθόλου αυτό το μήνυμα, μπορεί να απαντήσει με μήνυμα τύπου reset. Το reset μήνυμα αντικαθιστά λοιπόν ένα ack μήνυμα σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο σφάλμα στην επεξεργασία του confirmable μηνύματος. Μια ενδιαφέρουσα χρήση αυτού του μηνύματος είναι στην περίπτωση που ένας κόμβος θέλει να δει αν ένας άλλος κόμβος δεν έχει χάσει την επικοινωνία του. Τότε ο πρώτος κόμβος μπορεί να στείλει ένα confirmable μήνυμα χωρίς κάποιο περιεχόμενο (empty), και ο απέναντι κόμβος θα απαντήσει με μήνυμα τύπου reset.
- **Ενσωματωμένη απάντηση (Piggybacked response):** Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα ack μήνυμα μπορεί να εμπεριέχει επιπλέον πληροφορία ως απάντηση σε ένα confirmable μήνυμα. Αυτή η προσθήκη στο μήνυμα αναγνώρισης, ονομάζεται απάντηση piggybacked.
- **Ξεχωριστή απάντηση (Separate response):** Μετά τη λήψη ενός μηνύματος που απαιτεί επιβεβαίωση, υπάρχει η επιλογή ο κόμβος που το λαμβάνει αρχικά να επιβεβαιώσει τη λήψη του με ένα μήνυμα τύπου "κενό μήνυμα" (empty message) και ύστερα να στείλει ξεχωριστό μήνυμα που εμπεριέχει πληροφορία ως απάντηση στο μήνυμα που έλαβε. Αυτή η επιλογή είναι χρήσιμη στην περίπτωση που ζητηθεί κάποια πληροφορία από κάποιον κόμβο (με τη χρήση ενός μηνύματος με επιβεβαίωση), αλλά αυτός ο κόμβος δεν μπορεί να επιστρέψει τη ζητούμενη πληροφορία άμεσα.
- **Κενό μήνυμα (Empty message):** Είναι ένα μήνυμα που αποτελείται απλά από 4 bytes, χωρίς καμία πληροφορία. Έχει κωδικό 0.00 και δεν είναι ούτε μήνυμα αιτήματος, ούτε μήνυμα απάντησης.

Για να μπορέσει ένας κόμβος να διαχρίνει ποια απάντηση αντιστοιχεί σε ποιο αίτημα που αυτός δημιούργησε, γίνεται η χρήση ενός αριθμού - ένδειξης (token). Για παράδειγμα, όταν ένας κόμβος δημιουργήσει ένα αίτημα τύπου GET σε έναν πόρο που διαθέτει ένας εξυπηρετητής, εμπεριέχει στο μήνυμα αιτήματος και την ένδειξη (token), οπότε όταν ο εξυπηρετητής επιστρέψει κάποια απάντηση στον κόμβο, θα περιέχει μέσα σε αυτό το μήνυμα απάντησης την ίδια ένδειξη. Ανά πάσα στιγμή, ο κόμβος πρέπει να φροντίζει ώστε τα ενεργά αιτήματα (που εκφρεμεί λήψη απάντησης) να έχουν όλα ξεχωριστή ένδειξη.

Για την υλοποίηση αξιόπιστης επικοινωνίας με το πρωτόκολλο CoAP, χρησιμοποιείται ο τύπος μηνύματος με επιβεβαίωση, όπου ο κόμβος που στέλνει το μήνυμα αυτό, επαναλαμβάνει την αποστολή του μέχρι να λάβει την επιβεβαίωση λήψης, ενώ στην περίπτωση της υλοποίησης μιας επικοινωνίας που η αξιόπιστία δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, χρησιμοποιείται ο τύπος μηνύματος χωρίς επιβεβαίωση.

2.1.3.3 Παρακολούθηση πόρων

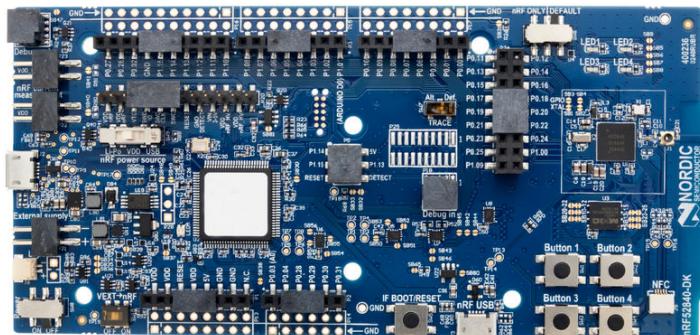
Γενικά, κατά τη χρήση του CoAP πρωτοκόλλου, για να ληφθεί η πληροφορία που διαθέτει ένας πόρος που υπάρχει σε έναν εξυπηρετητή (server), αποστέλεται αίτημα με μέθοδο GET, που αναφέρεται σε αυτόν τον πόρο, και ακολουθεί η απάντηση σε αυτό το αίτημα με την πληροφορία αυτή. Πολλές φορές όμως η πληροφορία που διαθέτει ένας πόρος μπορεί να αλλάζει/ενημερώνεται ασύγχρονα, χωρίς να γνωρίζουν, οι ενδιαφερόμενοι για αυτόν τον πόρο, για αυτές τις αλλαγές. Για να μην υπάρχει η ανάγκη συνεχών αιτημάτων από τους ενδιαφερόμενους για να μάθουν για αυτές τις αλλαγές, το πρωτόκολλο CoAP υποστηρίζει την επιλογή παρατήρησης (Observe). Για να ενεργοποιηθεί η παρατήρηση σε έναν πόρο, ένας κόμβος δημιουργεί μήνυμα - αίτημα τύπου GET προς αυτόν τον πόρο, προσθέτοντας στο μήνυμα αυτό την επιλογή για παρατήρηση. Μετά την αποστολή αυτού του μηνύματος, ο εξυπηρετητής, σε κάθε αλλαγή στην πληροφορία αυτού του πόρου, αποστέλει μήνυμα απάντησης προς τον ενδιαφερόμενο κόμβο, χωρίς να λάβει πρώτα μήνυμα αιτήματος. Η ένδειξη (token) της απάντησης αυτής έχει συνεχώς την ίδια τιμή, με αυτή που είχε καταχωριθεί κατά το αίτημα που είχε δημιουργήσει ο κόμβος αρχικά. [34][33][35]

2.2 Περιγραφή υλικού που χρησιμοποιήθηκε

2.2.1 Πλακέτες ανάπτυξης του συστήματος

2.2.1.1 Πλακέτα ανάπτυξης: NRF52840DK

To nRF52840dk είναι μια πλατφόρμα για σχεδιασμό και ανάπτυξη εφαρμογών στο ολοκληρωμένο κύκλωμα (SoC) nRF52840.



Σχήμα 2.5: NRF52840DK πλακέτα [5].

To nRF52840 παρέχει υποστήριξη για τα ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας Bluetooth Low Energy, Bluetooth mesh, Thread, Zigbee, ANT, και 802.15.4, ενώ ενσωματώνει τον μικροεπεξεργαστή Cortex-M4 της ARM.

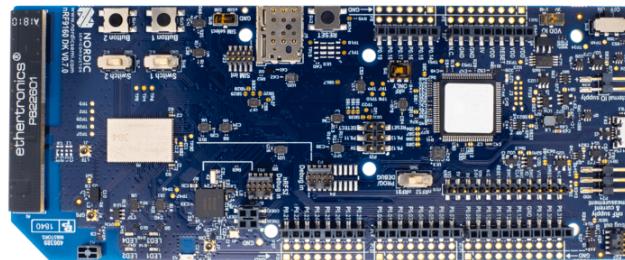
Η πλατφόρμα ανάπτυξης περιλαμβάνει:

- 4 Φωτοδιόδους (Leds) και 4 κουμπιά (buttons) για αλληλεπίδραση με τον χρήστη.
- Διεπαφές εισόδου/εξόδου για υποστήριξη περιφερειακών που κατασκευάστηκαν για Arduino.
- 48 Εισόδους/εξόδους για τη σύνδεση περιφερειακών.
- Υποστήριξη τροφοδοσία μέσω μπαταρίας ή εξωτερικής τροφοδοσίας με εύρος τάσης 1.7-5V.
- Διεπαφές για εύκολη μέτρηση της κατανάλωσης της πλατφόρμας.
- Υποστήριξη για κεραία NFC.
- Ενσωματωμένο εργαλείο αποσφαλμάτωσης (Segger J-Link debugger)

Όλες αυτές οι λειτουργίες που περιλαμβάνει η πλατφόρμα ανάπτυξης, την καθιστούν κατάλληλη επιλογή για εύκολη ανάπτυξη εφαρμογών πάνω στο ολοκληρωμένο κύκλωμα nRF52840. [36]

2.2.1.2 Πλακέτα ανάπτυξης: NRF9160DK

Το nRF9160DK είναι μια πλατφόρμα για σχεδιασμό και ανάπτυξη εφαρμογών στο ολοκληρωμένο κύκλωμα nRF9160, που ενσωματώνει τον μικροεπεξεργαστή Cortex-M33 της ARM.



Σχήμα 2.6: NRF9160DK πλακέτα [5].

Όπως και στην περίπτωση της nRF52840DK, παρέχει και αυτή η πλατφόρμα φωτοδιόδους και κουμπιά για διεπαφή με τον χρήστη, καθώς και υποστήριξη για εξωτερική τροφοδοσία αλλά και εισόδους/εξόδους για τη σύνδεση περιφερειακών. Παράλληλα ενσωματώνει επίσης τον Segger J-Link debugger για την αποσφαλμάτωση του υπό ανάπτυξη λογισμικού. Στην περίπτωση της nRF9160DK πλατφόρμας, ωστόσο, περιλαμβάνονται 2 υπολογιστικά συστήματα, το nRF9160 που αναφέρθηκε, αλλά και το ολοκληρωμένο nRF52840.

Το nRF52840 είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, ενώ το nRF9160 για επικοινωνίες μέσω δικτύου LTE-M, NB-IoT και GNSS. Για να πραγματοποιηθεί η σύνδεση με τα δίκτυα LTE-M και NB-IoT, υπάρχει η δυνατότητα είτε εισαγωγής μιας κάρτας SIM στην αντίστοιχη θύρα της πλατφόρμας, είτε μέσω χρήσης eSIM.

Τα δύο υποσυστήματα nRF52840 και nRF9160 μοιράζονται μεταξύ τους πόρους που παρέχονται στην πλατφόρμα ανάπτυξης, ενώ υποστηρίζεται και η επικοινωνία μεταξύ τους, μέσω του πρωτοκόλλου UART.

2.2.2 Αισθητήρια συστήματα

2.2.2.1 BME280

Ο αισθητήρας BME280 είναι ένας αισθητήρας σχεδιασμένος για εγκατάσταση σε φορητές συσκευές, όπου υπάρχει απαίτηση για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Αξιοποιείται για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας, θερμοκρασίας και πίεσης. Η κατανάλωσή του στην κατάσταση ύπνου (sleep mode) βρίσκεται στα $0.1\mu\text{A}$. Ενδεικτικά, η μέση κατανάλωσή του με ρυθμό λήψης μετρήσεων 1 μέτρηση ανά δευτερόλεπτο, λαμβάνοντας μετρήσεις υγρασίας και θερμοκρασίας, είναι τα $1.8\mu\text{A}$. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του συνοψίζονται ως εξής:[37]

- Τάση λειτουργίας: $1.7 - 3.6\text{V}$
- Όρια λειτουργίας: Πίεσης από 300 έως 1100hPa - Θερμοκρασίας: -40 έως 85°C .
- Επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου SPI και I_C.

2.2.2.2 Αισθητήρας υγρασίας χώματος: SEN0193

Ο αισθητήρας υγρασίας χώματος SEN0193 είναι ένας αισθητήρας για τον προσδιορισμό της σχετικής υγρασίας χώματος. Είναι σχεδιασμένος για χρήση με μικροελεγκτές που έχουν χαμηλή τάση λειτουργίας (3.3 έως 5.5V). Τα βασικά του τεχνικά χαρακτηριστικά είναι:[38]

- Τάση εξόδου: 0 έως 3.0V , που δειγματοληπτείται για τον προσδιορισμό της υγρασίας του χώματος.
- Κατανάλωση: 5mA σε περίοδο λειτουργίας.

2.2.2.3 Αισθητήρας φωτός BH1750

Ο αισθητήρας φωτός BH1750 είναι ένας αισθητήρας που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της έντασης φωτός. Ο BH1750 είναι κατάλληλος για χρήση σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης, καθώς σε κατάσταση αδράνειας η κατανάλωσή του βρίσκεται κατά μέγιστο στο 1μΑ. Μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα αυτού είναι τα εξής:[39]

- Εύρος μέτρησης φωτός: 1 έως 65535 lux
- Επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου I2C.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μέσω της λειτουργίας ύπνου (Power down).
- Τάση λειτουργίας 2.4 έως 3.6 Volts.

2.2.3 Raspberry Pi

Raspberry pi είναι ένας μικρός υπολογιστής, χαμηλού κόστους. Ενσωματώνει επεξεργαστή αρχιτεκτονικής ARM, υποστηρίζει έξοδο εικόνας και εισόδους τύπου USB. Παράλληλα διαθέτει θύρα ethernet ώστε να συνδέεται στο διαδίκτυο. Υποστηρίζεται από λειτουργικά συστήματα Linux.[40]

2.3 Λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου

2.3.1 Τι είναι λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου - RTOS

Το λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (RTOS), είναι ένας τύπος λειτουργικού συστήματος για εφαρμογές που έχουν απαιτήσεις εκτέλεσης διεργασιών με χρονικούς περιορισμούς. Ένα λειτουργικό πραγματικού χρόνου προσφέρει χρονοδρομολόγηση, εργαλεία για διαχείρηση των πόρων του συστήματος, συγχρονισμό μεταξύ πολλαπλών διεργασιών, ακρίβεια στην απόκριση σε διάφορα αιτήματα και διεπαφές εισόδου/εξόδου πληροφοριών. Βασικές προδιαγραφές που πρέπει να πληροί ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου είναι οι εξής:[41][42]

- Γρήγορη εναλλαγή μεταξύ ενεργών διεργασιών.
- Δυνατότητα για παύση μιας διεργασίας και εκκίνησης μιας άλλης, με υψηλότερη προτεραιότητα για άμεση εκτέλεση,
- Δυνατότητα επικοινωνίας και συγχρονισμού μεταξύ διεργασιών.

- Δυνατότητα για προσδιορισμό των προτεραιότητων των διαφόρων διεργασιών που πρέπει να εκτελεί ένα σύστημα.

2.3.2 Λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου: Zephyr RTOS

Το λειτουργικό σύστημα Zephyr είναι ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου που έχει υιοθετήσει χαρακτηριστικά του Linux. Είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα, γραμμένο στη γλώσσα C και από τα βασικά του πλεονεκτήματα είναι η υποστήριξη πολλαπλών αρχιτεκτονικών και η εύκολη ενσωμάτωσή του σε οποιαδήποτε πλακέτα. Η προσαρμοστικότητα του Zephyr στις διάφορες πλακέτες οφείλεται στην υποστήριξη των συστημάτων παραμετροποίησης Kconfig και devicetree, που έχει υιοθετήσει από τον πυρήνα ελέγχου του συστήματος (kernel) του Linux. Το Kconfig είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει την εύκολη επιλογή και προσθήκη χαρακτηριστικών στο πρόγραμμα, ενώ το devicetree είναι μια δομή δεδομένων που περιγράφει το υλικό ενός υπολογιστικού συστήματος, για να το διαχειριστεί ο kernel του λειτουργικού συστήματος.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα - χαρακτηριστικά που προσφέρει το λειτουργικό σύστημα Zephyr είναι τα εξής:

- Σύστημα προσαρμογής και παραμετροποίησης του συστήματος (Kconfig, devicetree).
- Υποστήριξη για μια μεγάλη γκάμα από πρωτόκολλα όπως: CoAP, IPv6, MQTT, Bluetooth Low Energy.
- Σύστημα διαχείρισης μνήμης (filesystem), για έλεγχο του τρόπου εγγραφής και ανάκτησης δεδομένων στη μνήμη του υπολογιστή.
- Υποστήριξη για αναβάθμιση λογισμικού (firmware upgrade) στον μικροελεγκτή.

2.3.2.1 Διαχείριση διεργασιών και χρονοπρογραμματισμός

Ο πυρήνας του Zephyr υποστηρίζει χρονοπρογραμματισμό με τη λογική της προεκχώρησης (preemption), όπου μπορεί να διακόψει τη λειτουργία μιας διεργασίας όταν χρειαστεί να εκτελεστεί μια άλλη διεργασία με μεγαλύτερη προτεραιότητα, αλλά και με τη λογική της συνεργατικότητας (cooperative), όπου το λειτουργικό σύστημα δε διακόπτει μια διεργασία για να εκκινήσει μια άλλη.[5]

2.3.3 Βάση δεδομένων

Σύστημα διαχείρισης βάσης δεδομένων είναι ένα λογισμικό που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέψει την διατήρηση και εύκολη διαχείριση μεγάλης ποσότητας δεδομένων.

Βάση δεδομένων είναι μια συλλογή από δεδομένα. Συγκεκριμένα, βάση δεδομένων είναι ένα σύνολο από οντότητες (tables) τα οποία περιέχουν διάφορες εγγραφές. Κάθε εγγραφή αποτελείται από ένα σύνολο πεδίων που ονομάζονται γνωρίσματα. Αυτά τα πεδία μπορεί να είναι διαφορετικού τύπου (για παράδειγμα, αριθμητικά δεδομένα, δεδομένα τύπου ημερομηνίας, αλφαριθμητικά). Ένα από αυτά τα πεδία, ή ένα σύνολο πεδίων θα πρέπει να αποτελεί κλειδί. Κλειδί είναι το γνώρισμα ή το σύνολο γνωρισμάτων που έχει διαφορετική τιμή για κάθε εγγραφή της βάσης δεδομένων, προκειμένου να διαφοροποιούνται οι εγγραφές, βάσει αυτού. [43]

2.4 Διαδικασία ανάπτυξης

Κατά την ανάπτυξη λογισμικού, ειδικά όταν πολλοί άνθρωποι εμπλέκονται στην ανάπτυξή του, χρησιμοποιούνται ειδικά εργαλεία και τεχνικές ώστε αφενός να επιταχυνθεί η διαδικασία ανάπτυξης και αφετέρου να υποβοηθηθεί η συνεργασία και η συνεννόηση μεταξύ των ατόμων που συνεισφέρουν.

2.4.1 Σύστημα ελέγχου έκδοσης - (Version control system)

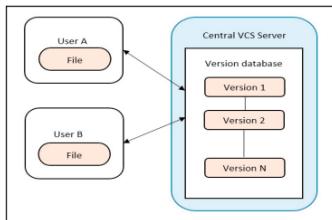
Το σύστημα ελέγχου έκδοσης (VCS - version control system), είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιείται από τους προγραμματιστές προκειμένου να διαχειριστούν τα διάφορα αρχεία που απαρτίζουν το υπό ανάπτυξη λογισμικό. Το σύστημα ελέγχου έκδοσης είναι ένα εργαλείο το οποίο καταγράφει όλο το ιστορικό των αλλαγών που έχουν συμβεί στο λογισμικό. Εκτός από την καταγραφή των αλλαγών που συμβαίνουν σε επίπεδο προσθαφαίρεσης κώδικα, το σύστημα ελέγχου έκδοσης συνδέει την εκάστοτε αλλαγή με ένα μήνυμα επεξήγησης. Παράλληλα διατηρεί πληροφορίες σχετικά με το ποιος έκανε την κάθε αλλαγή και πότε την έκανε. Επίσης, το σύστημα ελέγχου έκδοσης επιτρέπει στον προγραμματιστή να πλοηγηθεί στις διάφορες εκδόσεις του λογισμικού, κάτι που βοηθάει πρώτον στη σύγκριση δύο εκδόσεων, με σκοπό την εύρεση της αλλαγής που δημιούργησε κάποιο πρόβλημα στο λογισμικό και δεύτερον στην ανάκτηση χαμένων δεδομένων, που υπήρχαν σε παλαιότερη έκδοση. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά που προσφέρει το σύστημα ελέγχου έκδοσης επιτρέπουν στους προγραμματιστές τα εξής:

- Παράλληλη εργασία σε διαφορετικά κομμάτια του λογισμικού από διαφορετικούς προγραμματιστές.
- Ασφάλεια ως προς την απώλεια δεδομένων.
- Ευκολότερη εύρεση μιας αλλαγής που ενδεχομένως προκάλεσε κάποιο πρόβλημα στο λογισμικό.

- Καταγραφή της προόδου ανάπτυξης.

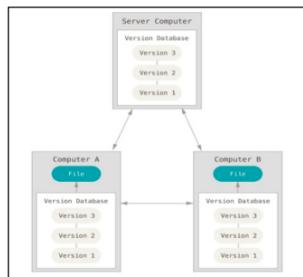
Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων ελέγχου έκδοσης:

- **Συγκεντρωτικό σύστημα ελέγχου έκδοσης (CVCS):** Προσέγγιση του συστήματος ελέγχου έκδοσης όπου το αντίγραφο του συνόλου των αρχείων, αλλά και του ιστορικού των αλλαγών, που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς, βρίσκεται σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή, με τον οποίον θα επικοινωνεί ο κάθε προγραμματιστής για να κάνει τις αλλαγές του.



Σχήμα 2.7: Συγκεντρωτικό σύστημα ελέγχου έκδοσης [6].

- **Διανεμημένο σύστημα ελέγχου έκδοσης (DVCS):** Προσέγγιση στην οποία το ιστορικό των αλλαγών που έχουν συμβεί στα διάφορα αρχεία του λογισμικού, αποθηκεύονται τοπικά στον υπολογιστή του εκάστοτε προγραμματιστή, ενώ όποτε ο προγραμματιστής το επιθυμεί, μπορεί να συγχρονίσει το δικό του αντίγραφο, με αυτό που διαθέτει ο κεντρικός εξυπηρετητής. Αυτό επιτρέπει στους προγραμματιστές να δουλεύουν στο λογισμικό, χωρίς να είναι συνεχώς σε επικοινωνία με τον κεντρικό εξυπηρετητή. Παράδειγμα τέτοιου συστήματος ελέγχου έκδοσης είναι το Git[6].



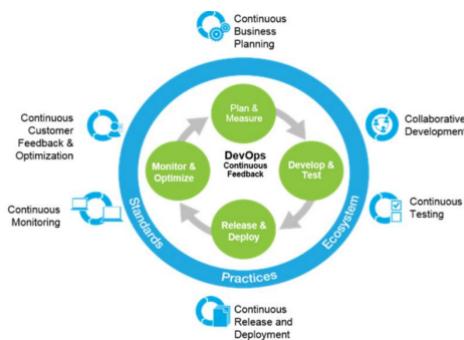
Σχήμα 2.8: Διανεμημένο σύστημα ελέγχου έκδοσης [6].

2.4.2 Πρακτικές DevOps

To DevOps είναι μια ορολογία που απαρτίζεται από τις λέξεις ανάπτυξη (Dev - Development) και λειτουργίες τεχνολογίας πληροφοριών (Ops - Operations). To DevOps είναι ένα σύνολο από πρακτικές, που έχουν στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας στην ανάπτυξη εφαρμογών και υπηρεσιών.

Ο κύκλος DevOps απαρτίζεται από τα εξής στάδια:

- **Συνεχής ενσωμάτωση (continuous integration - CI):** Στάδιο του DevOps όπου οι προγραμματιστικές αλλαγές ενσωματώνονται σε ένα κεντρικό αποθετήριο (repository) μερικές φορές την ημέρα. Στόχος αυτού του βήματος είναι η ταχύτερη εύρεση προβλημάτων στο λογισμικό μέσω διαφόρων διαδικασιών αυτοματοποιημένου ελέγχου.
- **Συνεχής επιχειρηματικός σχεδιασμός (Continuous business planning):** Στάδιο όπου ενσωματώνονται οι εταιρικές απαιτήσεις και στρατηγικές και τα σχόλια των πελατών στη διαδικασία ανάπτυξης του λογισμικού ή της υπηρεσίας.
- **Επικοινωνία και συνεργασία:** Η επικοινωνία και η συνεργασία μεταξύ των ατόμων που συμμετέχουν στη διαδικασία ανάπτυξης ενός λογισμικού ή μιας υπηρεσίας είναι σημαντικό κομμάτι της φιλοσοφίας του DevOps.
- **Συνεχής έλεγχος ποιότητας (Continuous testing):** Μέρος των καλών πρακτικών του DevOps είναι ο συνεχής έλεγχος ποιότητας και λειτουργίας του λογισμικού ή της υπό ανάπτυξη υπηρεσίας, με τη βοήθεια υποδομής για αυτοματοποιημένες δοκιμές.
- **Συνεχής παράταξη (Continuous deployment - CD):** Στάδιο όπου όταν ένας προγραμματιστής πραγματοποιεί μια αλλαγή στο λογισμικό, αυτό το λογισμικό, αφότου περάσει από μια διαδικασία δοκιμών, είναι διαθέσιμο προς χρήση/εγκατάσταση.
- **Συνεχής παρακολούθηση (Continuous monitoring):** Κατά το στάδιο της συνεχής παρακολούθησης, παρέχονται πληροφορίες για το πόσο καλά λειτουργεί το υπό ανάπτυξη λογισμικό ή η υπηρεσία, μέσα από ορισμένες μετρικές ποιότητας.
- **Συνεχής ανατροφοδότηση από τους πελάτες (Continuous customer feedback):** Η αξιοποίηση της ανατροφοδότησης από τους χρήστες του λογισμικού ή της υπηρεσίας βοηθά στην άμεση και αποτελεσματική βελτιστοποίηση της εμπειρίας του χρήστη.



Σχήμα 2.9: Κύκλος DevOps [7].

Για την εφαρμογή αυτών των πρακτικών έχουν δημιουργηθεί ειδικές πλατφόρμες που ενσωματώνουν κατάλληλα εργαλεία. Μια τέτοια πλατφόρμα είναι αυτή της Microsoft, Azure DevOps, η οποία προσφέρει τα εξής εργαλεία:[44][7][45]

- **Azure Boards:** Εργαλείο που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων στην ανάπτυξη ενός λογισμικού ή υπηρεσίας.
- **Azure pipelines:** Εργαλείο που επιτρέπει την συνεχή ενσωμάτωση και τη συνεχή παράταξη (CI/CD).
- **Azure Repos:** Εργαλείο που παρέχει αποθετήρια Git.
- **Azure Test Plans:** Εργαλεία που βοηθούν στο να γίνουν δοκιμές στις υπό ανάπτυξη εφαρμογές.
- **Azure Artifacts:** Εργαλείο που επιτρέπει τον διαμοιρασμό του κώδικα μεταξύ διαφορετικών ομάδων και οργανισμών.

2.5 Λοιποί ορισμοί

UART - Universal asynchronous receiver transmitter: Πρωτόκολλο σειριακής ασύγχρονης επικοινωνίας μεταξύ συσκευών. Χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ συσκευών που βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Υποστηρίζει επικοινωνία είτε ταυτόχρονης λήψης - αποστολής δεδομένων μεταξύ των συσκευών (full-duplex), είτε μόνο λήψης ή αποστολής πληροφορίας σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (half-duplex).[46]

SPI - Serial peripheral interface: Πρωτόκολλο σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας μεταξύ συσκευών. Είναι ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στο μοντέλο επικοινωνίας Master - Slave, όπου ένας master μπορεί να επικοινωνεί με αρκετούς slaves.[47]

PPFD - Photosynthetic Photon Flux Density: Φωτοσυνθετική πυκνότητα ροής φωτονίων είναι μια μονάδα μέτρησης που περιγράφει την ποσότητα φωτός που λαμβάνει μια καλλιέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Εκφράζεται σε $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$.

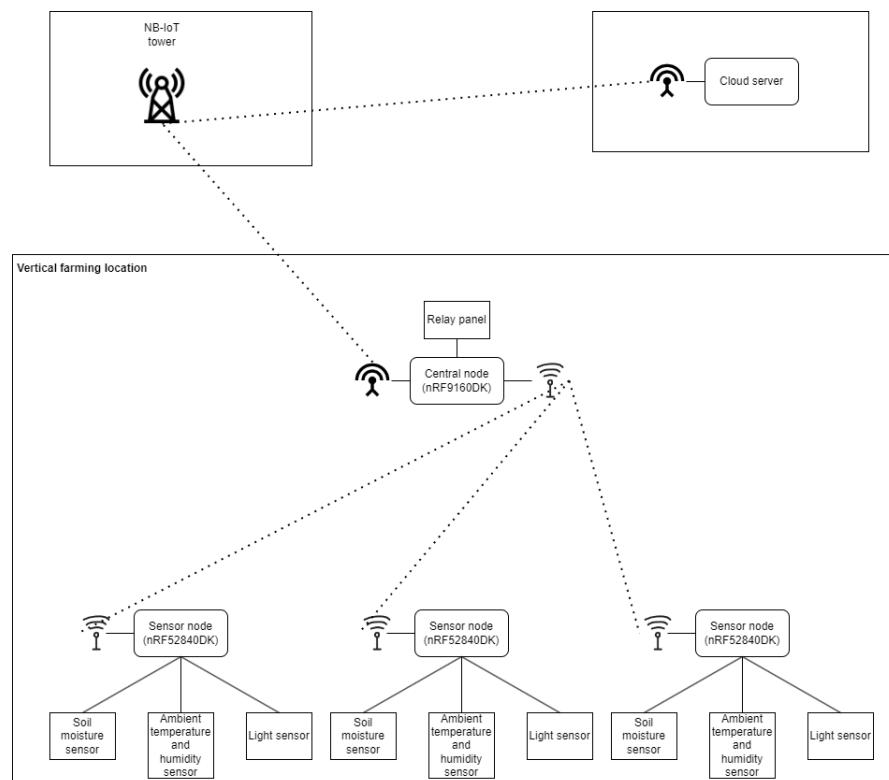
MAC Address : Μία διεύθυνση MAC, που καλείται επίσης και φυσική διεύθυνση ή διεύθυνση υλικού, είναι μία μοναδική ταυτότητα που αποδίδεται στις διασυνδέσεις δικτύου για την επικοινωνία στο physical layer του δικτύου. Οι διευθύνσεις MAC χρησιμοποιούνται σαν διευθύνσεις δικτύου στις περισσότερες τεχνολογίες δικτύου. [48]

Κεφάλαιο 3

Τεχνική ανάλυση της υλοποίησης της εφαρμογής

3.1 Παρουσίαση της αρχιτεκτονικής του συστήματος

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας ως λύση για τη διαχείριση και την τηλεμετρία της κάθετης καλλιέργειας φαίνεται στο σχήμα 3.1



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση συστήματος

Συγκεκριμένα η λύση που προτείνεται αποτελείται από:

- Κόμβοι αισθητήρων:** Οι κόμβοι αισθητήρων υλοποιήθηκαν με τη χρήση της πλακέτας ανάπτυξης nRF52840DK. Σε αυτούς τους κόμβους έχουν εγκατασταθεί αισθητήρες υγρασίας περιβάλλοντος, θερμοκρασίας περιβάλλοντος, υγρασίας χώματος και έντασης φωτός. Η εγκατάσταση της κάθετης καλλιέργειας αποτελείται από ομάδες καλλιεργιών, όπου η κάθε ομάδα θα αξιοποιεί έναν ή περισσότερους κόμβους αισθητήρων. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν με μπαταρία, και είναι πλήρως ασύρματοι.
- Κεντρικός κόμβος:** Ο κεντρικός κόμβος υλοποιήθηκε με τη χρήση της πλακέτας ανάπτυξης nRF9160DK. Είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των κόμβων αισθητήρων αλλά και των συστημάτων για προσαρμογή των συνθηκών (περιβαλλοντικών και χώματος) της καλλιέργειας. Συγκεκριμένα, οι κόμβοι αισθητήρων συνδέονται με τον κεντρικό κόμβο, με τη λογική του δικτύου τύπου αστέρα, και ο κεντρικός κόμβος οφείλει να ζητήσει από τους κόμβους αισθητήρων να του αποστείλουν μετρήσεις από τους αισθητήρες που ενσωματώνουν. Αφότου ληφθούν οι μετρήσεις, ο κεντρικός κόμβος υπολογίζει το μέσο όρο των μετρήσεων θερμοκρασίας, υγρασίας χώματος, υγρασίας περιβάλλοντος και έντασης φωτός για κάθε ομάδα καλλιέργειας, και με βάση αυτές τις τιμές, πραγματοποιεί αυτόματο έλεγχο των συνθηκών, με σκοπό να παραχθούν τελικά οι κατάλληλες συνθήκες καλλιέργειας για την κάθε ομάδα. Το σύστημα υποστηρίζει μέχρι 5 ζεχωριστές ομάδες καλλιεργειών και μέχρι 20 συνδεδεμένους κόμβους αισθητήρων. Παράλληλα, σε κάθε κύκλο λήψης μετρήσεων, αυτές στέλνονται σε έναν Cloud server, που υλοποιήθηκε επίσης στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.
- Cloud server:** Ο cloud server υλοποιήθηκε με τη χρήση ενός υπολογιστή Raspberry pi. Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε αρχικά ένας εξυπηρετητής για τη λήψη και αποστολή δεδομένων στον κεντρικό κόμβο (CoAP Server). Παράλληλα, υλοποιήθηκε και ένας διακομιστής ιστού, ώστε ο χρήστης του συστήματος να μπορεί εύκολα και γρήγορα να έχει πρόσβαση στις πληροφορίες που αποστέλλει ο κεντρικός κόμβος, ενώ του δίνεται και η δυνατότητα για απομακρυσμένο έλεγχο των συστημάτων προσαρμογής των συνθηκών στην εγκατάσταση κάθετης καλλιέργειας.

3.2 Εργαλεία και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν

Για την ανάπτυξη του συστήματος που περιγράφηκε στην ενότητα 3.1 αξιοποιήθηκαν διάφορα εργαλεία και λογισμικά που επέτρεψαν την ανάπτυξη του λογισμικού των ενσωματωμένων συστημάτων, καθώς και βοήθησαν στην οργάνωση και επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων στην ανάπτυξη του συστήματος.

3.2.1 Εργαλείο ανάπτυξης του λογισμικού

Η ανάπτυξη του κώδικα πραγματοποιήθηκε στο εργαλείο Visual Studio Code της Microsoft. Το Visual Studio Code, είναι ένα εργαλείο για επεξεργασία κώδικα, που παρέχει δυνατότητα εγκατάστασης πολλών πακέτων για προσθήκη δυνατοτήτων, κάτι που το διαφοροποιεί από απλούς επεξεργαστές κειμένου/κώδικα, όπως το Notepad++. [49] Ο βασικός λόγος που επιλέχθηκε αυτό το εργαλείο, έγκειται στο ότι η εταιρεία Nordic Semiconductor, που κατασκευάζει τις πλακέτες ανάπτυξης nRF, έχει δημιουργήσει ένα πρόσθετο, το nRF Connect for VS code, το οποίο είναι διαθέσιμο στην πλατφόρμα Visual Studio Code.

To nRF Connect for VS code είναι ένα πλήρες εργαλείο για ανάπτυξη και χτίσιμο κώδικα, αλλά προσφέρει και δυνατότητες για αποσφαλμάτωση του λογισμικού. Παράλληλα επιτρέπει το κατέβασμα του λογισμικού στη μνήμη των πλακετών ανάπτυξης, ενώ προσφέρει και δυνατότητες για έλεγχο του υλικού των πλακετών σε πιο χαμηλά επίπεδα, όπως πρόσβαση στή μνήμη της πλακέτας ή στους καταχωρητές του μικροεπεξεργαστή της.[50]

Παράλληλα, ένα άλλο πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε για να υποβοηθήσει την ανάπτυξη του λογισμικού, ήταν το Clang-Format. Το Clang-Format είναι ένα εργαλείο, που ενσωματώνεται στο Visual Studio code, και κάνει αυτόματη μορφοποίηση και στοίχιση του κώδικα. Η αξιοποίησή του έγινε, ώστε να υπάρχει μια οπτική δομή στον κώδικα συνεχώς, κάτι που βοηθάει στην ευκολότερη περιήγηση στον κώδικα.

3.2.2 Εργαλείο για εφαρμογή πρακτικών DevOps

Στην υποενότητα 2.4.2 εξηγήθηκε αναλυτικά η φιλοσοφία του DevOps. Στα πλαίσια της ανάπτυξης του συστήματος επιλέχθηκε να εφαρμοστούν κάποιες από τις πρακτικές DevOps, για αυτόν τον λόγο αξιοποιήθηκε η πλατφόρμα Azure DevOps της Microsoft. Συγκεκριμένα, από την πλατφόρμα Azure αξιοποιήθηκαν τα εργαλεία:

- Azure Boards: Το εργαλείο αυτό επέτρεψε τη δημιουργία και ανάθεση εργασιών μεταξύ των εμπλεκόμενων προγραμματιστών. Με τη χρήση αυτού του εργαλείου διευκολύνθηκε αρχικά η απομακρυσμένη συνεργασία των προγραμματιστών, αφού ο καθένας είχε συγκεκριμένες εργασίες να πραγματοποιήσει, ενώ ταυτόχρονα έγινε καλύτερος έλεγχος της προόδου ανάπτυξης.
- Azure Repos: Το εργαλείο αυτό επέτρεψε την αποθήκευση του λογισμικού και των δεδομένων που σχετίζονταν με το υπό ανάπτυξη σύστημα. Για την ανάπτυξη, όλες οι αλλαγές και οι προσθήκες πραγματοποιήθηκαν πάνω στο κεντρικό αποθετήριο που βρισκόταν στο εργαλείο αυτό.

Όταν ένας προγραμματιστής πραγματοποιούσε αλλαγή που ήθελε να ενσωματώθει στο κεντρικό αποθετήριο, ακολουθούνταν η διαδικασία της επιθεώρησης των αλλαγών από άλλον προγραμματιστή, ώστε να ελεγχθεί για τυχόν λάθη ή προβλήματα. Η πλατφόρμα της Microsoft προσφέρει την επιλογή για ενσωμάτωση των αλλαγών, μόνο μετά από έγκριση αυτών από άτομο διαφορετικό από αυτό που τις πραγματοποίησε. Αυτή η λειτουργία αξιοποιήθηκε σε όλη τη διαδικασία ανάπτυξης, κάτι που βοήθησε στην αποτροπή λαθών αλλά και στην ποιοτικότερη συνολικά υλοποίηση του λογισμικού.

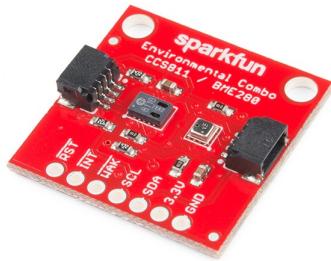
3.3 Κόμβοι αισθητήρων

Ο κόμβος αισθητήρων, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1, αναπτύχθηκε στην πλακέτα ανάπτυξης nRF52840DK. Ο κόμβος αισθητήρων ενσωματώνει, όπως θα παρουσιαστεί πιο αναλυτικά στη συνέχεια, αισθητήρες ώστε να λαμβάνονται μετρήσεις σχετικά με τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης καλλιέργειας, όπου θα αξιοποιηθούν. Είναι πλήρως ασύρματος, αφού η επικοινωνία με τον κεντρικό κόμβο (που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια αναλυτικά) πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου Bluetooth Low Energy και η κατανάλωσή του, όπως θα φανεί και από ανάλογες μετρήσεις, είναι αρκετά χαμηλή ώστε με μια μικρή μπαταρία να μπορεί να είναι μια πλήρως αυτόνομη συσκευή.

3.3.1 Αισθητήρες και συνδεσμολογία

Ο κόμβος αισθητήρων μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη σχετική υγρασία χώματος, τη σχετική υγρασία περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ένταση του φωτός στην οποία εκτίθεται η καλλιέργεια. Αυτό έχει επιτευχθεί με τη χρήση των εξής αισθητήρων:

- Αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος - BME280: Στον κόμβο αισθητήρων έχει εγκατασταθεί ένας αισθητήρας BME280, του οποίου τα χαρακτηριστικά έχουν αναλυθεί στην υποενότητα 2.2.2.1. Η επικοινωνία μεταξύ της πλακέτας ανάπτυξης και του αισθητήρα πραγματοποιείται με τη χρήση του πρωτοκόλλου SPI. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας επιλέχθηκε χυρίως για την αρκετά χαμηλή κατανάλωσή του σε ρεύμα. Η υγρασία περιβάλλοντος αναφέρεται σε ποσοστό επί τοις %, ενώ η μονάδα μέτρησης της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας είναι σε βαθμούς κελσίου.



Σχήμα 3.2: Αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

- Αισθητήρας υγρασίας χώματος - SEN0193: Για την παρακολούθηση της σχετικής υγρασίας χώματος, ενσωματώθηκε στον κόμβο αισθητήρων ο αισθητήρας SEN0193. Ο συγκεκριμένος, όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 2.2.2.2, έχει αρκετά υψηλή κατανάλωση για τα δεδομένα της εφαρμογής (5mA). Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ένα transistor, το οποίο επιτρέπει την πλήρη απενεργοποίηση του αισθητήρα και τη μη διέλευση ρεύματος σε αυτόν, όταν δε λαμβάνονται μετρήσεις από αυτόν. Όταν λοιπόν χρειαστεί να ληφθεί μέτρηση για την υγρασία χώματος, το transistor επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος προς τον αισθητήρα και όταν η μέτρηση ληφθεί, τη διακόπτει. Το transistor ελέγχεται από την πλακέτα με τη χρήση ενός GPIO. Η μέτρηση της υγρασίας χώματος θα αναφέρεται σε ποσοστό επί τοις %.



Σχήμα 3.3: Αισθητήρας υγρασίας εδάφους.

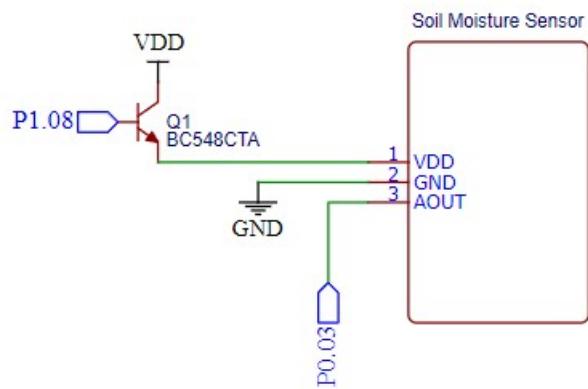
- Αισθητήρας έντασης φωτός - BH1750: Η ένταση φωτός στην οποία εκτίθεται η καλλιέργεια, είναι σημαντικός παράγοντας για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών. Για την παρακολούθηση της έντασης φωτός ενσωματώθηκε στον κόμβο αισθητήρων ο αισθητήρας BH1750, ικανός να αποδώσει μέτρηση σε μονάδες LUX. (2.2.2.3). Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει αρκετά χαμηλή κατανάλωση ισχύος με ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης. Η μονάδα μέτρησης που θα αναφέρεται η ένταση του φωτός είναι η PPFD που περιγράφηκε στην υποενότητα 2.5 και εξάγεται από την τιμή σε LUX του BH1750.

Στη συνέχεια παρατίθεται η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση των αισθητήρων στην αναπτυξιακή πλακέτα.



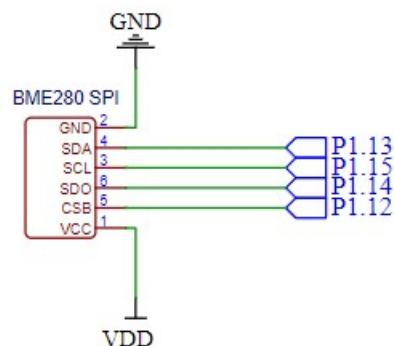
Σχήμα 3.4: Αισθητήρας έντασης φωτός.

Soil Moisture Sensor Connection



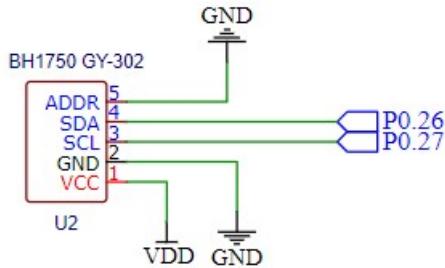
Σχήμα 3.5: Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας εδάφους.

Temperature and Humidity Sensor Connection



Σχήμα 3.6: Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (BME280).

Light Intensity Sensor Connection



Σχήμα 3.7: Συνδεσμολογία αισθητήρα έντασης φωτός.

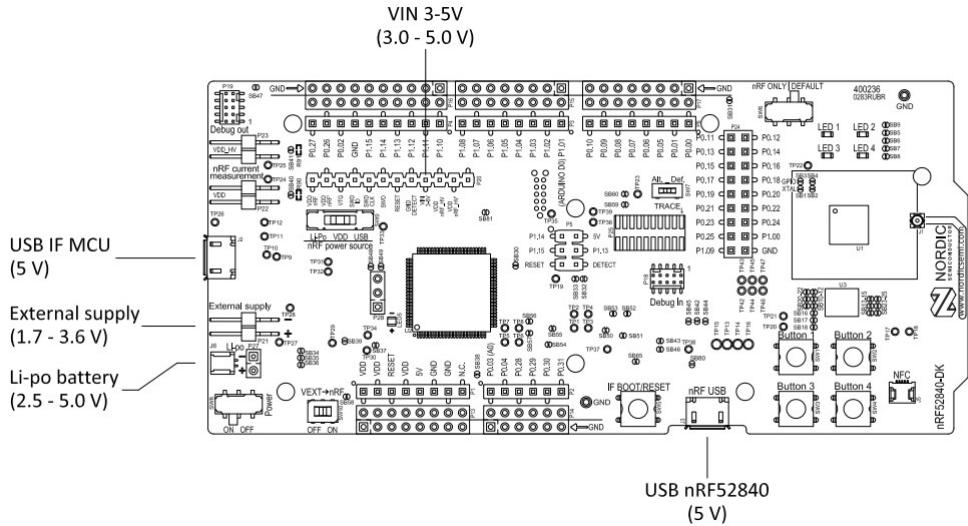
3.3.2 Μέθοδος τροφοδοσίας και επιλογή μπαταρίας

Γίνεται κατανοητό πως οι κόμβοι αισθητήρων (sensor nodes) θα πρέπει να καταναλώνουν όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια, ώστε να μπορούν να έχουν και τη μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής. Μία από τις βασικότερες προδιαγραφές των κόμβων αυτών είναι πως θα πρέπει να τροφοδοτούνται από μπαταρία, η συνολική κατασκευή να είναι μικρή σε μέγεθος και η αυτονομία του συστήματος να είναι ικανοποιητικά μεγάλη. Επομένως, η επιλογή της μπαταρίας είναι εξαιρετικά σημαντική.

Η αναπτυξιακή πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει σύνδεση για μπαταρία τύπου Lithium Polymer (LiPo) με εύρος τάσης 2.5 έως 5 V. Ωστόσο, ο μικροελεγκτής nRF52840 που διαθέτει η πλακέτα μπορεί να λειτουργήσει σε ένα εύρος τάσης από 1.7 εως και 3.6 V. Επομένως μεταξύ της εισόδου της μπαταρίας που προαναφέρθηκε και του μικροελεγκτή παρεμβάλλεται πάνω στην αναπτυξιακή πλακέτα ένας voltage regulator, ο οποίος φροντίζει να μετατρέπει την τάση της μπαταρίας σε μια σταθερή τάση για τον μικροελεγκτή.

Παρόλα αυτά, ακόμη και ο voltage regulator αυτός καταναλώνει κάποια ισχύ μιάς και δεν έχει τέλεια απόδοση. Στη περίπτωση μας, καθώς στόχος μας ήταν η συνολική μέση καταναλωση να είναι εξαιρετικά χαμηλή, η χρήση του voltage regulator που διαθέτει η πλακέτα, άρα και της προδιαγεγραμμένης εισόδου της πλακέτας για τη μπαταρία ήταν απαγορευτική. Για αυτόν τον λόγο, ήταν απαραίτητη η εύρεση ενός άλλου τρόπου τροφοδοσίας.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8 η πλακέτα διαθέτη μια είσοδο τροφοδοσίας με όνομα External Supply. Υπό κανονικές συνθήκες σε αυτή την είσοδο τοποθετείται μια πηγή σταθερής τάσης καθώς η είσοδος αυτή τροφοδοτεί απευθείας το nRF52840 και έχει σχεδιαστεί με τη λογική πως ο χρήστης έχει φροντίσει ο ίδιος να τοποθετήσει τον δικό του μετατροπέα τάσης σε κάποιο άλλο κύκλωμα ώστε να παρέχει σταθερή τάση.

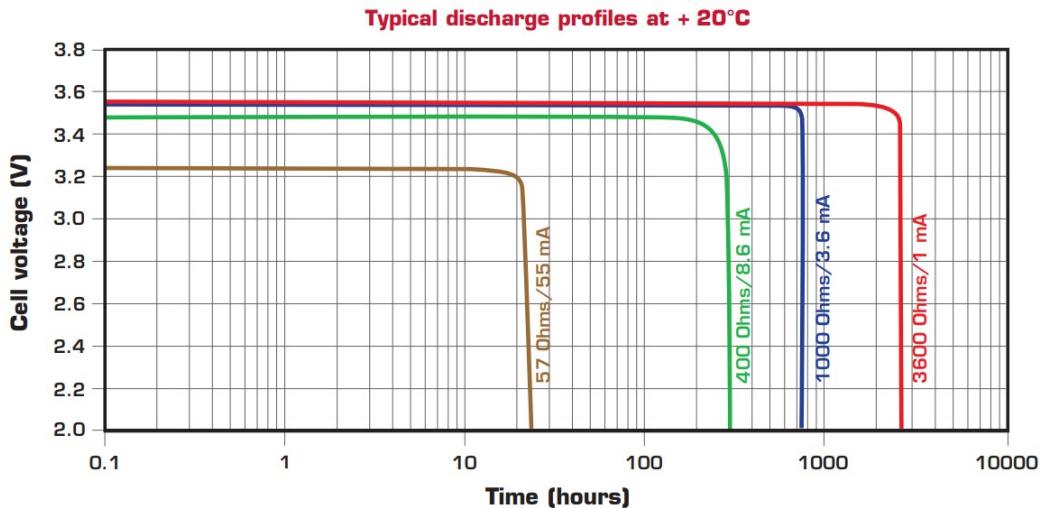


Σχήμα 3.8: Δυνατές Επιλογές Τροφοδοσίας.

Με στόχο να αποφύγουμε τη χρήση κάποιου μετατροπέα τάσης, ο οποίος θα στοίχιζε σε ενεργειακή κατανάλωση, επιλέχθηκε μπαταρία τύπου LiSOCl₂. Οι μπαταρίες αυτού του τύπου έχουν ως χαρακτηριστικό τη διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου κατά την αποφόρτιση τους με σχετικά μικρή διακύμανση. Η ονομαστική τάση εξόδου της μπαταρίας, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.9, είναι τα 3.6 V και έτσι μας επιτρέπει να τροφοδοτήσουμε απευθείας το nRF52840. Το μοντέλο που επιλέχθηκε έχει χωρητικότητα 2600mAh και έχει αρκετά μικρό μέγεθος. Επιπλέον στο σχήμα 3.10 διακρίνεται η σχέση της τάσης εξόδου με το μέσο ρεύμα εκφόρτισης. Παρατηρείται πως για ρεύμα 1mA η τάση μένει σχεδόν σταθερή, πόσω μάλλον για το αρκετά χαμηλότερο μέσο ρεύμα που καταναλώνει η εφαρμογή μας.



Σχήμα 3.9: Μπαταρία που επιλέχθηκε SAFT-LS14500[8].



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα σχέσης τάσης εξόδου - ρεύματος εκφόρτισης[8].

3.3.3 Bluetooth Server

Όπως έχει αναφερθεί, ο κόμβος αισθητήρων επικοινωνεί με τον κεντρικό κόμβο μέσω της χρήσης του πρωτοκόλλου BLE. Συγκεκριμένα, ο κόμβος αισθητήρων έχει τον ρόλο του περιφερειακού (peripheral), που περιγράφηκε στην υποενότητα 2.1.1.6. Για τον σκοπό αυτό, στο λογισμικό του κόμβου αισθητήρων αναπτύχθηκαν τα εξής BLE services:

- **Measurement service:** Το οποίο περιέχει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ώστε ο BLE client να αντλεί τις σχετικές πληροφορίες των αισθητήρων που ενσωματώνει ο κόμβος αισθητήρων.
- **Device service:** Που περιέχει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για τη ρύθμιση της ίδιας της συσκευής (του κόμβου αισθητήρων).

3.3.3.1 Ανάλυση: Device Service

Συγκεκριμένα, στο Device Service έχει ενσωματωθεί ένα μόνο χαρακτηριστικό, αυτό του **Row ID**. Για το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπεται η εγγραφή και η ανάγνωσή του. Δηλαδή, επιτρέπεται η συσκευή που θα συνδεθεί και θα εντοπίσει το χαρακτηριστικό αυτό του Device Service, να μεταβάλλει την τιμή του και να τη διαβάσει. Το Device Service δημιουργήθηκε προκειμένου σε αυτό να περιέχονται τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ίδια τη συσκευή.

Η χρησιμότητα του Row ID χαρακτηριστικού έγκειται στο ότι ο κάθε κόμβος αισθητήρων πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα, ώστε να αναγνωρίζεται η γραμμή της καλλιέργειας

στην οποία ανήκει. Κάθε ομάδα καλλιέργειας της εγκατάστασης κάθετης καλλιέργειας για την οποία αναπτύχθηκε το σύστημα που περιγράφεται στην παρούσα εργασία, περιέχει συγκεκριμένα φυτά με συγκεκριμένες (ίδιες μεταξύ τους) ανάγκες. Κάθε ομάδα καλλιέργειας μπορεί να περιέχει έναν ή περισσότερους, κατανεμημένους στην έκταση της ομάδας αυτής, κόμβους αισθητήρων. Οι μετρήσεις που θα λαμβάνει ο κεντρικός κόμβος, θα πρέπει να συνδυάζονται με ένα αναγνωριστικό, ώστε να γνωρίζει από ποια ομάδα καλλιέργειας προέρχεται το εκάστοτε σετ μετρήσεων που λήγει. Επομένως, ο χρήστης του συστήματος, κατά την εγκατάσταση ενός κόμβου αισθητήρων, θα πρέπει να ορίσει την τιμή του Row ID χαρακτηριστικού, του κόμβου αυτού.

Στα πλαίσια της εργασίας έχει ενσωματωθεί στο Device Service μόνο το χαρακτηριστικό Row ID, αλλά σε μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος θα μπορούσαν να προστεθούν και άλλα χαρακτηριστικά, όπως το όνομα της συσκευής, η στάθμη της μπαταρίας που ενσωματώνει η συσκευή και άλλες σχετικές με τη συσκευή πληροφορίες.

Device Service		
Service UUID	64c7404e-ba92-11ec-8422-0242ac120002	
Characteristic	UUID	Permissions
Row ID	e4fd83a4-ba92-11ec-8422-0242ac120002	Read/Write

Πίνακας 3.1: Device service: technical information

3.3.3.2 Ανάλυση: Measurement Service

Στο Measurement Service έχουν ενσωματωθεί τα χαρακτηριστικά:

- **Soil Moisture:** Για τη λήψη μετρήσεων σχετικά με την υγρασία χώματος, από τον αισθητήρα SEN0193. Επιτρέπεται μόνο η ανάγνωσή του. Η επιστρεφόμενη τιμή του χαρακτηριστικού αυτού είναι από 0-100 και αντιστοιχεί σε ποσοστό επί τοις %.
- **Humidity:** Για τη λήψη μετρήσεων σχετικά με την υγρασία περιβάλλοντος, από τον αισθητήρα BME280. Υποστηρίζει μόνο ανάγνωση. Η επιστρεφόμενη τιμή του χαρακτηριστικού αυτού είναι από 0-100 και αντιστοιχεί σε ποσοστό επί τοις %.
- **Temperature:** Για τη λήψη μετρήσεων σχετικά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, από τον αισθητήρα BME280. Υποστηρίζει μόνο ανάγνωση. Η επιστρεφόμενη τιμή του χαρακτηριστικού αυτού είναι της δομής XXYY. Είναι ένας αριθμός όπου τα ψηφία XX είναι το ακέραιο μέρος της θερμοκρασίας (σε βαθμούς κελσίου) και τα YY είναι το δεκαδικό μέρος της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 22,51 βαθμούς κελσίου, η ανάγνωση του χαρακτηριστικού temperature θα επιστρέψει την τιμή 2251.

- **Light intensity:** Για τη λήψη μετρήσεων σχετικά με την ένταση του φωτός στην οποία εκτίθεται η καλλιέργεια, από τον BH1750. Και αυτό το χαρακτηριστικό υποστηρίζει μόνο ανάγνωση, ενώ η επιστρεφόμενη τιμή του χαρακτηριστικού είναι σε μονάδα PPF. Η ανάγνωση του χαρακτηριστικού αυτού θα επιστρέψει μια τιμή, για παράδειγμα 351, που δηλώνει 351 PPF.

Η Bluetooth SIG έχει ορίσει ήδη τη δομή χαρακτηριστικών για σχετική υγρασία περιβάλλοντος και περιβαλλοντικής θερμοκρασίας. Τα χαρακτηριστικά λοιπόν temperature και humidity έχουν τα UUIDs που έχει ορίσει η Bluetooth SIG.

Measurement Service		
Service UUID	6a796d28-a1f1-11ec-b909-0242ac120002	
Characteristic	UUID	Permissions
Humidity	2a6f	Read only
Light intensity	0b208f09-a0bf-4d57-b778-38f899264e76	Read only
Temperature	2ab6	Read only
Soil moisture	07a3e336-ccad-11ec-9d64-0242ac120002	Read only

Πίνακας 3.2: Measurement service: technical information

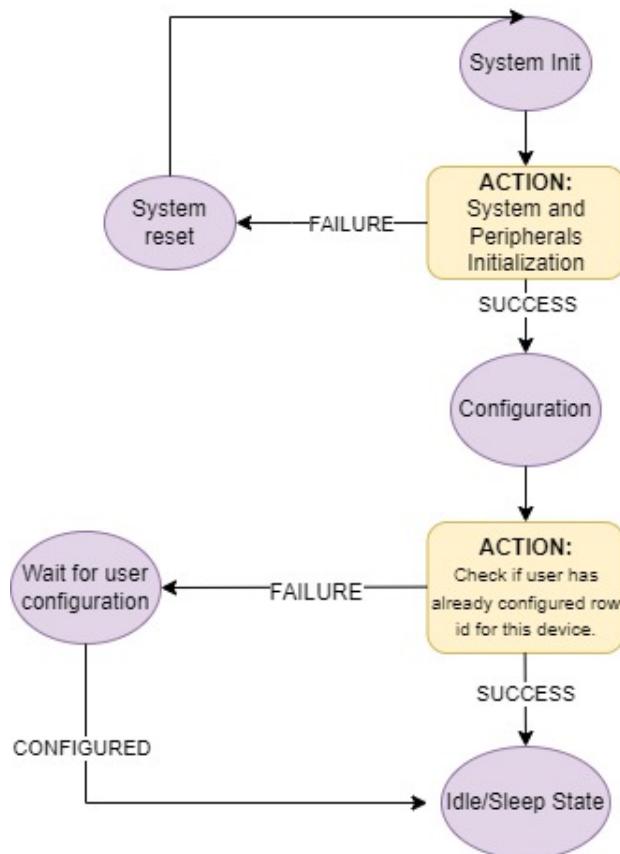
3.3.3.3 Μηχανισμός: Sensor Node FSM

Η κύρια ροή λειτουργίας των μετρητικών κόμβων (sensor nodes) απεικονίζεται στο σχήμα 3.11 με το δίαγραμμα του κύριου μηχανισμού πεπερασμένων στοιχείων. Κατα το ξεκίνημα του ο sensor node βρίσκεται στο στάδιο της αρχικοποίησης των απαραίτητων περιφερειακών για τη λειτουργία του. Αν η αρχικοποίηση, η οποία περιλαμβάνει και την αρχική ρύθμιση των αισθητήρων αποτύχει, τότε η ροή του προγράμματος ζεκινά από την αρχή (reset) και επαναλαμβάνεται. Στη περίπτωση αποτυχίας, αν το επιθυμούμε, καταγράφεται και το σφάλμα για το οποίο η αρχικοποίηση απέτυχε, ώστε να μπορεί να διορθωθεί. Ένα τέτοιο σφάλμα θα μπορούσε να είναι η ανεπιτυχής επικοινωνία με κάποιον αισθητήρα, αν για παράδειγμα η διασύνδεση του αισθητήρα στην αναπτυξιακή πλακέτα είναι λανθασμένη.

Άν η αρχικοποίηση είναι επιτυχής, τότε η ροή λειτουργίας συνεχίζει στο στάδιο της παραμετροποίησης της συσκευής (Configuration). Στο στάδιο αυτό γίνεται έλεγχος, άν ο χρήστης έχει ήδη ορίσει τη γραμμή καλλιέργειας στην οποία ανήκει ο κόμβος αυτός. Πρακτικά πρόκειται για το χαρακτηριστικό **Row Id** του Configuration Service, όπως αυτό έχει ήδη αναλύθει. Άν ο χρήστης δεν έχει ορίσει την παράμετρο αυτή, τότε ο κόμβος ζεκινά τη διαδικασία του BLE advertising και αναμένει μέχρι ο χρήστης να συνδεθεί μαζί του μέσω της ειδικής εφαρμογής που αναλύεται στην υποενότητα 3.3.4.1 και να ορίσει το χαρακτηριστικό του **Row Id**. Μόλις οριστεί από το χρήστη η παράμετρος αυτή, ο sensor

node φροντίζει να αποθηκεύσει στη μνήμη flash την τιμή της. Έτσι η τιμή θα διατηρηθεί ακόμα και αν ο sensor node απενεργοποιηθεί. Από την άλλη, όντας ο χρήστης πραγματοποίησε την παραμετροποίηση όπως αναλύθηκε ή αυτή έχει ήδη πραγματοποιηθεί, τότε η ροή του προγράμματος συνεχίζει στο Idle/Sleep στάδιο.

Στο Idle/Sleep στάδιο, ο κόμβος ξεκινά τη διαδικασία του advertising αποστέλλοντας τα κατάλληλα advertising πακέτα ώστε ο κεντρικός κόμβος να αντιληφθεί πως είναι έτοιμος για σύνδεση. Όστερα το κύριο νήμα του λειτουργικού συστήματος τερματίζει. Τα advertising packets αποστέλλονται αυτόματα ανα τακτά χρονικά διαστήματα από τα Bluetooth Tx/Rx νήματα μέχρι να υπάρξει κάποια σύνδεση. Αφού υπάρξει σύνδεση με τον κεντρικό κόμβο, αυτός αντλεί όλες τις μετρήσεις που επιθυμεί διαβάζοντας τα κατάλληλα BLE χαρακτηριστικά από τον αντίστοιχο sensor node. Ο sensor node παίρνει την αντίστοιχη μέτρηση μόνο τη στιγμή που ο κεντρικός κόμβος τη ζητά.



Σχήμα 3.11: Μηχανή Πεπερασμένων Στοιχείων των sensor nodes.

3.3.4 Μηχανισμός Watchdog

Κάθε ένας από τους μετρητικούς κόμβους και ο κεντρικός διαθέτουν μηχανισμό Watchdog. Πρακτικά ο Watchdog Timer είναι ένα περιφερειακό του μικροελεγκτή που επιτηρεί την

ορθή λειτουργία του. Κατά την εκκίνηση ο Watchdog ξεκινά περιοδικά και αυξάνει έναν μετρητή μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή. Η αύξηση του μετρητή από το μηδέν έως την ορισμένη τιμή, αντιστοιχεί σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Ο μικροελεγκτής φροντίζει το χρονικό διάστημα αυτό να μη παρέλθει ποτέ, μηδενίζοντας ανα ταχτά χρονικά διαστήματα την τιμή του Watchdog timer.

Αν ωστόσο ο μικροελεγκτής δε λειτουργεί σωστά και ο Watchdog timer ολοκληρώσει μια περίοδο χωρίς ο μικροελεγκτής να τον διακόψει, τότε άμεσα ο Watchdog θα επαναφέρει το σύστημα και τη ροή λειτουργίας από την αρχή (reset). Το περιφερειακό του Watchdog Timer είναι εξαιρετικά χρήσιμο καθώς με αυτόν τον τρόπο, αν προκύψει κάποιο σφάλμα το σύστημα επαναφέρεται και πάλι σε λειτουργική κατάσταση.

Ένα παράδειγμα σφάλματος από το οποίο μπορεί να μας προστατεύσει ο μηχανισμός του watchdog είναι το εξής: Αν υποθέσουμε πως ένα νήμα υψηλής προτεραιότητας χρησιμοποιεί μεγάλο ποσοστό του επεξεργαστή ή έχει κολλήσει, τότε τα νήματα χαμηλότερης προτεραιότητας δεν εκτελούνται ποτέ.

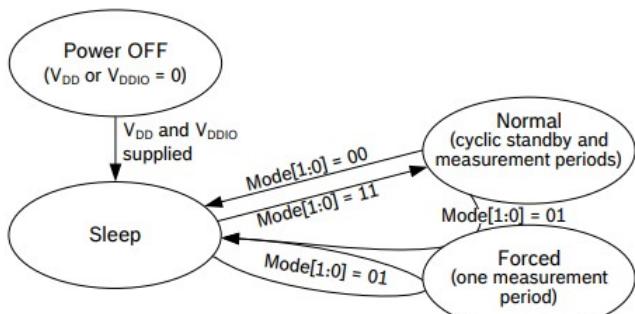
Για το λόγο αυτό, η προσέγγιση που ακολουθήσαμε είναι η τοποθέτηση του κυκλικού επαναμηδενισμού του Watchdog timer σε ένα νήμα με τη μικρότερη προτεραιότητα από όλα. Έτσι άν κάποιο νήμα κολλήσει και εμποδίζει την εκτέλεση των υπόλοιπων, το σύστημα θα ξεκινήσει από την αρχή.

3.3.5 Χρήση των κόμβων αισθητήρων

Για την επίτευξη μιας αρκετά χαμηλής κατανάλωσης ισχύος είναι απαραίτητο οι αισθητήρες να ρυθμιστούν και να χρησιμοποιούνται με τον κατάλληλο τρόπο.

3.3.5.1 BME280 - Temperature Humidity Pressure Sensor

Αρχικά ο BME280 διαθέτει τρείς δυνατές καταστάσεις λειτουργίας:



Σχήμα 3.12: Μηχανή Πεπερασμένων Στοιχείων για τον αισθητήρα BME280. [9]

Κατα το ξεκίνημα του ο αισθητήρας βρίσκεται σε Sleep, όπου και καταναλώνει το ελάχιστο δυνατό ρεύμα (0.1-0.3 μΑ). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.12 υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας του BME280. Σε Normal state ο BME280 καταγράφει περιοδικά νέες μετρήσεις τις οποίες αποθηκεύει εσωτερικά, ώστε ο κόμβος με τον οποίον είναι συνδεδεμένος να τις αντλήσει άμεσα. Ωστόσο σε αυτόν τον τύπο λειτουργίας ο BME280 πρέπει συνεχώς να λαμβάνει νέες μετρήσεις, άρα να καταναλώνει και ενέργεια.

Έποι επιλέγουμε τον δεύτερο τρόπο λειτουργίας, δηλαδή αυτόν του Forced. Εδώ ο BME280 παραμένει σε sleep state μέχρις ότου ο κόμβος του ζητήσει να λάβει κάποια μέτρηση, στέλνοντας τον την αντίστοιχη εντολή. Μόλις ο αισθητήρας πάρει τη μέτρηση τότε αυτός επιστρέφει αυτόματα σε sleep state. Μια επιπλέον επιλογή ήταν πως απενεργοποιήθηκε η μέτρηση της πιέσης του αέρα καθώς δεν ήταν χρήσιμη για τους σκοπούς μας, ενώ ταυτόχρονα υπήρξε ενεργοβόρα.

Συνολικά ο αισθητήρας, λαμβάνοντας υπόψην την περιοδικότητα με την οποία λαμβάνουμε μετρήσεις καταναλώνει περίπου 1-2 μΑ. [9]

3.3.5.2 BH1750 - Ambient Light Sensor

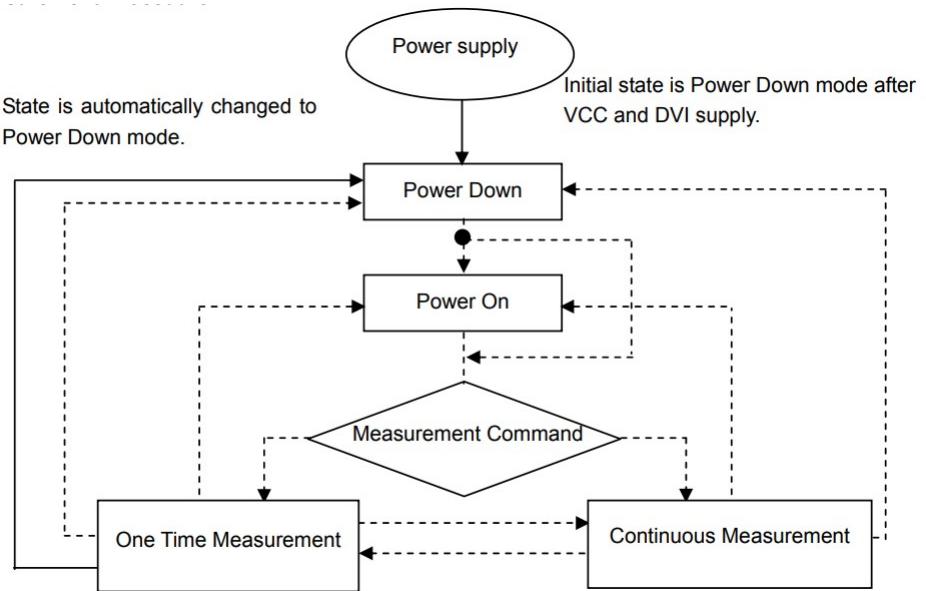
Σε δεύτερη φάση ο αισθητήρας έντασης φωτός BH1750 δεν είναι όσο σύνθετος είναι ο BME280. Με την ίδια προσέγγιση όπως και ο BME, ο αισθητήρας BH1750 διαθέτει λειτουργία συνεχούς μέτρησης και μέτρησης κατα παραγγελία του sensor node. Όπως και προηγουμένως για λόγους κατανάλωσης ισχύος επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος.

Επιπλέον ο αισθητήρας BH1750 διαθέτει δύο επιλογές, οι οποίες αφορούν την ακρίβεια των μετρήσεων. Σε High Resolution Mode ο αισθητήρας μετρά με ακρίβεια 0.5 lux με τη μέτρηση να κρατά εως και 180 ms. Σε Low Resolution Mode ο αισθητήρας μετρά με ακρίβεια 4 lux, όμως η μέτρηση κρατά κατά μέγιστο 24 ms. Στη περίπτωση μας και για τις ανάγκες μας, το Low Resolution Mode ήταν αρκετό.

Στο σχήμα 3.18 που ακολουθεί φαίνεται η ροή λειτουργίας του αισθητήρα. Οι μη διακεκομένες γραμμές αναφέρονται σε αυτόματες μεταβάσεις, ενώ οι διακεκομένες απαιτούν την αποστολή της αντίστοιχης εντολής προς τον αισθητήρα.

3.3.5.3 Soil Moisture Sensor

Τέλος ο αισθητήρας υγρασίας χώματος είναι ο πιο απλός στη χρήση εκ των τριών. Ο αισθητήρας αυτός προσφέρει αναλογική μέτρηση μέσω του pH εξόδου του. Η τάση σε αυτό μειώνεται σχεδόν γραμμικά όσο η υγρασία του χώματος αυξάνει.



Σχήμα 3.13: Μηχανή Πεπερασμένων Στοιχείων για τον αισθητήρα BH1750. [10]

Ωστόσο λόγω της υψηλής του κατανάλωσης (5mA) υπήρξε επιτακτική ανάγκη ο αισθητήρας να είναι ενεργός μόνο όταν τον χρειαζόμαστε. Έτσι στην υλοποίηση μας παρεμβάλλεται ένα transistor που λειτουργεί ως διακόπτης τροφοδοσίας. Με αυτόν τον τρόπο η κατανάλωση των 5mA του αισθητήρα αυτού δεν εμφανίζεται συνεχώς στο σύστημα μας παρα μόνο στη διάρκεια της μέτρησης.

[51]

3.3.6 Λειτουργία Device Firmware Update - DFU

Μετά την εγκατάσταση των κόμβων είναι πολύ πιθανό να πρέπει να ενσωματωθούν νέες λειτουργίες, ή να τροποποιηθούν οι υπάρχουσες στις νέες ανάγκες του χρήστη ή ακόμα και να διορθωθούν τυχόν σφάλματα. Σε περίπτωση που υπάρχουν πολλαπλοί χρήστες με πολλούς κόμβους αισθητήρων, η αναβάθμιση κάθε κόμβου με το νέο λογισμικό γίνεται μια αρκετά δύσκολη διαδικασία. Υπό κανονικές συνθήκες θα ήταν απαραίτητη η επέμβαση σε κάθε κόμβο ξεχωριστά και δια ζώσης, περνώντας το νέο λογισμικό.

Αντ' αυτού οι κόμβοι διαθέτουν λειτουργία Device Firmware Upgrade (DFU). Με τη λειτουργία αυτή ο χρήστης λαμβάνει από τους προγραμματιστές του λογισμικού τη νέα έκδοση του λογισμικού με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί (π.χ. μέσω ίντερνετ). Στη συνέχεια, πάλι μέσω της ειδικής εφαρμογής της Nordic nRF Connect επιλέγει για κάθε κόμβο την αναβάθμιση του λογισμικού. Έτσι η αναβάθμιση γίνεται γρήγορα και ασύρματα μέσω BLE. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται πως ο χρήστης λαμβάνει εύκολα και γρήγορα την τελευταία έκδοση του λογισμικού χωρίς να χρειαστεί ο προγραμματιστής να παραστεί αυτοπροσώπως.

Η λειτουργία του Device Firmware Update προσφέρεται από τη Nordic και προστέθηκε στην εργασία με σχετικά εύκολο τρόπο. Το χυρότερο βήμα είναι η προσθήκη του MCUBoot Bootloader [22].

3.4 Κεντρικός κόμβος

Όπως εξηγήθηκε στην υποενότητα 3.1 ο κεντρικός κόμβος αναπτύχθηκε με τη χρήση της πλακέτας ανάπτυξης nRF9160DK. Η συγκεκριμένη πλακέτα, όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 2.2.1.2, περιλαμβάνει 2 υποσυστήματα, αυτό του nRF52840 και αυτό του nRF9160.

Συγκεκριμένα, ο nRF52840 αξιοποιήθηκε ως ο συντονιστής του δικτύου των αισθητήρων, επικοινωνία που πραγματοποιείται μέσω του πρωτοκόλλου Bluetooth Low Energy (BLE), ενώ ο nRF9160 αξιοποιήθηκε για τη διασύνδεση με τον Cloud Server (που θα αναλυθεί σε επόμενες υποενότητες), μέσω του δικτύου NB-IoT.

3.4.1 Διαχείριση του δικτύου αισθητήρων - nRF52840

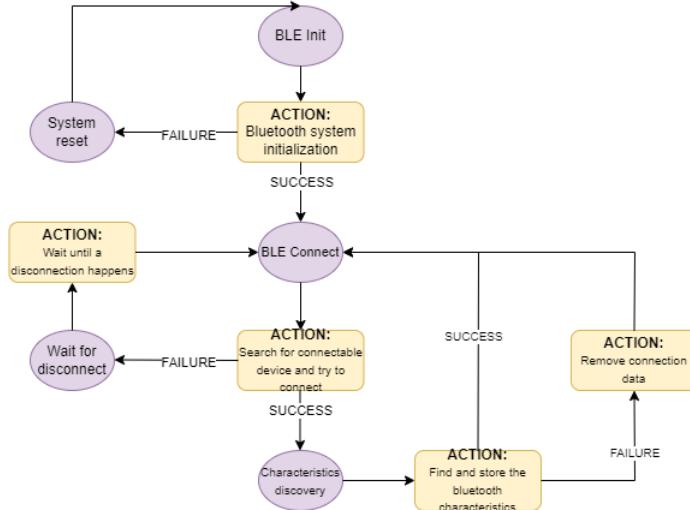
Το λογισμικό που γράφτηκε για το υποσύστημα nRF52840 αποτελείται από διάφορους μηχανισμούς. Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της αρχιτεκτονικής του λογισμικού και περιγραφή αυτών των μηχανισμών. Η βασική λειτουργικότητα του κώδικα που αναπτύχθηκε βασίζεται στους εξής μηχανισμούς:

- Μηχανισμός για εδραίωση σύνδεσης με κόμβους αισθητήρων (Bluetooth FSM).
- Μηχανισμός για λήψη μετρήσεων από τους κόμβους αισθητήρων (Measurements FSM).
- Μηχανισμός για έλεγχο των συστημάτων προσαρμογής των συνθηκών καλλιέργειας (Control FSM).

3.4.1.1 Ανάλυση μηχανισμού: Bluetooth FSM

Ο μηχανισμός Bluetooth FSM, όπως γίνεται αντιληπτό από την ονομασία, είναι ένα σύνολο από καταστάσεις, που εκτελούνται υπό συνθήκες, με τελικό στόχο την εδραίωση σύνδεσης και επικοινωνίας του κεντρικού κόμβου με τους κόμβους αισθητήρων.

Μια σύντομη παρουσίαση του μηχανισμού αυτού μπορεί να γίνει μέσω του σχεδιαγράμματος που ακολουθεί:



Σχήμα 3.14: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τη σύνδεση Bluetooth

Για τη μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων (FSM) αυτή έχει δημιουργηθεί ξεχωριστό νήμα (thread) στο λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου Zephyr. Κατά την εκκίνηση του συστήματος, το πρώτο στάδιο που εκτελείται είναι αυτό της αρχικοποίησης του συστήματος Bluetooth (**BLE Init**). Κατά την εκτέλεσή του, ενεργοποιείται το Bluetooth στην πλατφόρμα ανάπτυξης και δημιουργούνται 2 νέα νήματα στο σύστημα, ένα για τη διαχείριση της λήψης δεδομένων μέσω Bluetooth (BT RX thread) και ένα για τη διαχείριση της αποστολής δεδομένων (BT TX thread). Στο στάδιο αυτό, ουσιαστικά, καλούνται οι απαραίτητες συναρτήσεις, που προσφέρονται από το λειτουργικό σύστημα Zephyr (μέσω οδηγών - drivers), ώστε να γίνει η αρχικοποίηση του Bluetooth. Η υλοποίηση των BT RX/TX νημάτων προσφέρεται από τους οδηγούς του Zephyr.

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα [2.3.2](#), μέσω των επιλογών που θα προστεθούν στο αρχείο KConfig, προστίθεται λειτουργικότητα στο λειτουργικό σύστημα. Για την προσθήκη των βιβλιοθηκών που περιέχουν τους οδηγούς του Bluetooth LE, λοιπόν, προστέθηκαν οι κατάλληλες επιλογές σε αυτό.

Στην περίπτωση που η αρχικοποίηση πραγματοποιηθεί με επιτυχία, η FSM συνεχίζει στο επόμενο στάδιο, διαφορετικά πραγματοποιείται επανεκκίνηση του συστήματος (System reset).

Το επόμενο στάδιο της FSM είναι αυτό της πραγματοποίησης της σύνδεσης με κάποιον κόμβο αισθητήρων (**BLE Connect**). Όταν το σύστημα εισέλθει σε αυτό το στάδιο, ξεκινάει την αναζήτηση Bluetooth LE συσκευών με σκοπό την εύρεση συμβατής συσκευής και τη σύνδεση με αυτή. Όταν αναγνωριστεί μία συσκευή Bluetooth LE, ελέγχεται αν είναι συμβατή με το σύστημα και, αν είναι, ο κεντρικός κόμβος θα κάνει προσπάθεια σύνδεσης με αυτή. Για να διαπιστωθεί αν μια συσκευή είναι συμβατή, ελέγχονται τα Advertising data, και αν σε αυτά βρεθεί το UUID του Measurement Service (που αναφέρθηκε στην υποενότητα

[3.3](#)), τότε πραγματοποιείται προσπάθεια σύνδεσης με αυτήν. Παράλληλα σε αυτό το στάδιο ορίζονται και οι παράμετροι της σύνδεσης (όπως τα διαστήματα σύνδεσης - connection intervals). Αν η σύνδεση είναι επιτυχής, τότε η FSM προχωράει στο στάδιο της χαρτογράφισης των Services και των αντίστοιχων χαρακτηριστικών (**Characteristic discovery**). Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο [2.1.1](#), τα Services και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά που υποστηρίζει μια Bluetooth LE συσκευή, αναπαρίστανται από έναν πίνακα, οπότε η χαρτογράφιση αυτή έγκειται στην εύρεση των κατάλληλων θέσεων των χαρακτηριστικών, μέσα σε αυτόν. Κατά το στάδιο BLE Connect ωστόσο, παρατηρήθηκε ένα πρόβλημα:

Αν για τον οποιονδήποτε λόγο μια ήδη συνδεδεμένη συσκευή, κάνει επανεκκίνηση, θα αναγνωριστεί ως "διαθέσιμη προς σύνδεση", αλλά η προσπάθεια σύνδεσης με αυτή, θα αποτύχει. Αυτό βρέθηκε ότι προκαλείται λόγω του ότι γίνεται προσπάθεια σύνδεσης με μια καταχωρημένη ως συνδεδεμένη συσκευή. Λόγω των μεγάλων διαστημάτων σύνδεσης (connection intervals), που επιλέχθηκαν για εξοικονόμηση ενέργειας, ο κεντρικός κόμβος δε θα διαπιστώσει την αποσύνδεση της συσκευής, που έκανε επανεκκίνηση, άμεσα. Οπότε η προσπάθεια σύνδεσης με αυτή θα αποτύχει, αφού θα αναγνωριστεί ως συνδεδεμένη. Για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα, επιλέχθηκε κατά την αποτυχία σύνδεσης με μια συμβατή συσκευή, να μεταβαίνει η FSM στο στάδιο αναμονής για αποσύνδεση (**Wait for disconnect**), καθώς χωρίς αυτό το βήμα, πραγματοποιούνταν συνεχείς αποτυχημένες προσπάθειες σύνδεσης.

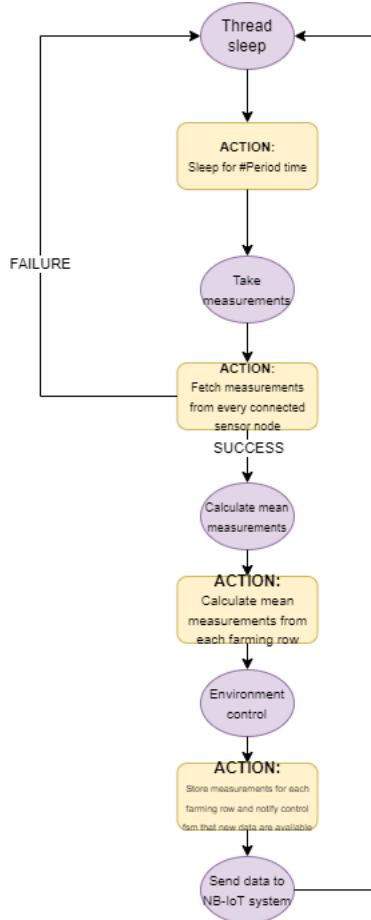
Παράλληλα, ένας άλλος λόγος που θα οδηγήσει στη μετάβαση από το στάδιο BLE Connect στο στάδιο Wait for disconnect, είναι ότι διαπιστώθηκε πως έχει πραγματοποιηθεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός συνδέσεων με τον κεντρικό κόμβο. Αυτός ο αριθμός ανέρχεται στις 20 ταυτόχρονες συνδέσεις και είναι περιορισμός της ίδιας της πλακέτας και όχι του πρωτοκόλλου BLE.

Στο στάδιο του Characteristic discovery, όπως αναφέρθηκε, πραγματοποιείται η χαρτογράφηση των Services και των χαρακτηριστικών που διαθέτει ο κόμβος αισθητήρων. Σε περίπτωση αποτυχίας της χαρτογράφισης αυτού του κόμβου, πραγματοποιείται διαγραφή των δεδομένων σύνδεσης με αυτόν και η FSM μεταβαίνει στο στάδιο BLE Connect, ώστε να ξεκινήσει νέα διαδικασία σύνδεσης με κάποια συσκευή. Σε περίπτωση επιτυχούς χαρτογράφισης, εκκινεί νέα διαδικασία σύνδεσης, χωρίς κάποια άλλη ενδιάμεση διαδικασία.

3.4.1.2 Ανάλυση μηχανισμού: Measurements FSM

Ο μηχανισμός Measurements FSM είναι υπεύθυνος για τη λήψη, επεξεργασία και αποθήκευση μετρήσεων από τους κόμβους αισθητήρων.

Στο σχήμα που ακολουθεί, περιγράφεται η ροή λειτουργίας αυτού του μηχανισμού:



Σχήμα 3.15: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τη λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων

Για την υλοποίηση και λειτουργία αυτού του μηχανισμού, δημιουργήθηκε ξεχωριστό νήμα στο λειτουργικό σύστημα, όπως και στην περίπτωση του μηχανισμού Bluetooth FSM.

Κατά την εκκίνηση του συστήματος, αφού αρχικά δεν υπάρχουν συνδεδεμένοι κόμβοι αισθητήρων με τον κεντρικό κόμβο, ο μηχανισμός αυτός είναι σε κατάσταση αναμονής (**Thread Sleep**). Όταν ένας ή περισσότεροι κόμβοι αισθητήρων συνδεθούν με τον κεντρικό κόμβο, ο μηχανισμός αυτός ενεργοποιείται και μπορεί να μεταβεί σε επόμενα στάδια. Όταν λοιπόν υπάρχουν ενεργές συνδέσεις, ο μηχανισμός μεταβαίνει αρχικά στο στάδιο όπου ζητάει από τον κάθε συνδεδεμένο κόμβο αισθητήρων να του στείλει μετρήσεις σχετικά με την υγρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία περιβάλλοντος, υγρασία χώματος και έντασης φωτός (**Take measurements**). Αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην επικοινωνία και δε ληφθεί καμία απάντηση με μετρήσεις από κάποιον κόμβο αισθητήρων, ο μηχανισμός θα επιστρέψει στην κατάσταση αναμονής. Παράλληλα με τη λήψη μετρήσεων, ο κεντρικός κόμβος ζητάει από τον κάθε κόμβο αισθητήρων την πληροφορία για το σε ποια ομάδα καλλιέργειας ανήκει. Αν η λήψη μετρήσεων από τους κόμβους αισθητήρων είναι επιτυχημένη, ο μηχανισμός μεταβαίνει στην κατάσταση επεξεργασίας των μετρήσεων (**Calculate mean measurements**) που έλαβε.

Στο στάδιο επεξεργασίας των μετρήσεων, οι μετρήσεις που λήφθηκαν κατηγοριοποιούνται βάσει του σε ποια ομάδα καλλιέργειας (υποστηρίζονται μέχρι 5 ξεχωριστές ομάδες καλλιέργειας) ανήκει ο κόμβος αισθητήρων που έδωσε το εκάστοτε σύνολο μετρήσεων. Υπότερα, για κάθε ομάδα καλλιέργειας βγαίνει ένας μέσος όρος για την υγρασία χώματος, την υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος και την ένταση φωτός.

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων που λήφθηκαν, ο μηχανισμός μεταβαίνει στην κατάσταση **Environment control**. Στο στάδιο αυτό, αποθηκεύονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων για κάθε ομάδα καλλιέργειας για την οποία λήφθηκαν μετρήσεις και αμέσως μετά παράγεται ένα σήμα (event) στο σύστημα ότι οι μετρήσεις είναι έτοιμες προς χρήση. Αυτό το σήμα θα γίνει αντιληπτό από τον μηχανισμό Control FSM, που θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Υπότερα, ο μηχανισμός μεταβαίνει στην κατάσταση **Send data to NB-IoT system**. Σε αυτό το στάδιο, αποστέλονται οι μετρήσεις για την κάθε ομάδα καλλιέργειας στο υποσύστημα nRF9160, το οποίο διαχειρίζεται το κομμάτι του NB-IoT και την επικοινωνία με τον Cloud Server. Όταν ολοκληρωθεί η αποστολή όλων των ληφθέντων μετρήσεων, ειδοποιείται το υποσύστημα nRF9160 ότι οι μετρήσεις είναι έτοιμες να αποσταλούν στο Cloud. Τέλος, ο μηχανισμός μεταβαίνει στην κατάσταση αναμονής, στην οποία παραμένει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

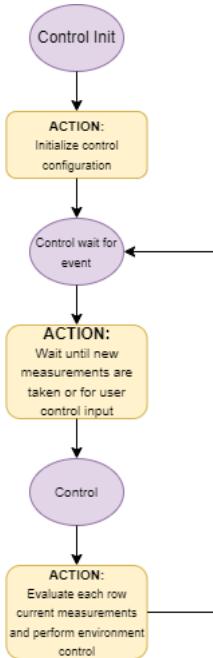
Αυτό το χρονικό διάστημα είναι η περίοδος λήψης μετρήσεων και έχει οριστεί στα 15 λεπτά. Επομένως κάθε 15 λεπτά, κάνει έναν κύκλο ο μηχανισμός λήψης και επεξεργασίας μετρήσεων (Measurements FSM).

3.4.1.3 Ανάλυση μηχανισμού: Control FSM

Ο τρίτος δομικός μηχανισμός που υλοποιήθηκε στον κεντρικό κόμβο είναι αυτός του ελέγχου του συστήματος διαχείρισης των περιβαλλοντικών συνθηκών στην εγκατάσταση της καλλιέργειας (Control FSM). Και σε αυτή την περίπτωση, ο μηχανισμός αυτός τρέχει σε ξεχωριστό νήμα στο λειτουργικό σύστημα. Ο σκοπός αυτού του μηχανισμού είναι να αξιολογεί τις μετρήσεις που πάρθηκαν από τον μηχανισμό Measurements FSM και με βάση και τις ρυθμίσεις που θα δώσει ο χρήστης, να πραγματοποιεί τον έλεγχο του φωτισμού, του κλιματισμού και του συστήματος κυκλοφορίας υδατικού διαλύματος στην εγκατάσταση της καλλιέργειας.

Η ροή λειτουργίας αυτού του μηχανισμού περιγράφεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Κατά την εκκίνηση του συστήματος, το πρώτο στάδιο του μηχανισμού έχει να κάνει με την αρχικοποίηση των ρυθμίσεων με βάση τις οποίες θα πραγματοποιείται ο έλεγχος των συνθηκών (**Control Init**). Οι ρυθμίσεις αυτές είναι αποθηκευμένες στην μνήμη flash του



Σχήμα 3.16: Μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων για τη διαχείριση των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών της καλλιέργειας

συστήματος, ώστε να μπορεί να γίνει ανάκτηση σε περίπτωση επανεκκίνησης του συστήματος. Αυτές οι ρυθμίσεις είναι οι εξής:

- Όριο θερμοκρασίας περιβάλλοντος: Ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει ένα όριο θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πάνω από το οποίο θα ενεργοποιείται το σύστημα ανακύκλωσης του αέρα (ανεμιστήρας).
- Όριο υγρασίας περιβάλλοντος: Ο χρήστης μπορεί να θέσει ένα όριο υγρασίας, πάνω από το οποίο ενεργοποιείται το σύστημα ανακύκλωσης του αέρα (ανεμιστήρας).
- Όριο υγρασίας χώματος: Δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να θέσει ένα κατώτατο όριο υγρασίας χώματος, κάτω από το οποίο θα ενεργοποιείται το σύστημα κυκλοφορίας υδατικού διαλύματος στις ομάδες καλλιέργειών.

Επίσης, εκτός από τα όρια περιβαλλοντικών συνθηκών με βάση τα οποία θα πραγματοποιείται ο αυτόματος έλεγχος των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών της καλλιέργειας, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει αν θέλει αυτόματο ή χειροκίνητο έλεγχο στο σύστημα ανακύκλωσης του αέρα, στο σύστημα φωτισμού και στο σύστημα κυκλοφορίας υδατικού διαλύματος. Δίνεται δηλαδή η δυνατότητα στο χρήστη να ανοίξει και να κλείσει τα συστήματα αυτά χειροκίνητα. Επομένως υπάρχουν και οι ρυθμίσεις:

- Αυτόματη διαχείριση συστημάτων.
- Χειροκίνητη διαχείριση συστημάτων:

- Φωτισμός ανοιχτός ή κλειστός.
- Πότισμα ανοιχτό ή κλειστό.
- Ανακύκλωση αέρα ενεργή ή ανενεργή.

Οι ρυθμίσεις αυτές που περιγράφηκαν διαφοροποιούνται ανά ομάδα καλλιεργειών. Για παράδειγμα, για την ομάδα καλλιέργειας νούμερο 1, ο χρήστης μπορεί να θέσει τις ρυθμίσεις:

- Όριο θερμοκρασίας: 25 oC.
- Όριο υγρασίας περιβάλλοντος: 60%.
- Όριο υγρασίας χώματος: 80%.
- Αυτόματος έλεγχος ανεμιστήρα.
- Αυτόματος έλεγχος φωτισμού. (Ανοιχτός αν η ομάδα καλλιέργειας είναι ενεργή, κλειστός αν η ομάδα καλλιέργειας είναι ανενεργή)
- Αυτόματος έλεγχος συστήματος ποτίσματος.

ενώ για την ομάδα νούμερο 2:

- Όριο θερμοκρασίας: 28 oC.
- Όριο υγρασίας περιβάλλοντος: 55%.
- Όριο υγρασίας χώματος: 50%.
- Χειροκίνητος έλεγχος ανεμιστήρα: Ανεμιστήρας κλειστός.
- Χειρικίνητος έλεγχος φωτισμού: Φως κλειστό.
- Χειρικίνητος έλεγχος συστήματος ποτισμού: Πότισμα ανοιχτό.

Αυτές τις ρυθμίσεις ο χρήστης μπορεί να τις εφαρμόσει μέσω της ιστοσελίδας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας (και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια).

Στο στάδιο λοιπόν Control Init, αυτές οι ρυθμίσεις ανακτώνται από τη μνήμη flash του συστήματος και είναι διαθέσιμες προς αξιοποίηση σε επόμενο στάδιο. Να σημειωθεί ότι οποιαδήποτε αλλαγή σε αυτές τις ρυθμίσεις πραγματοποιηθεί από τον χρήστη, αυτή θα αποθηκευτεί στη μνήμη flash του συστήματος, ώστε να μην χαθεί σε περίπτωση επανεκκίνησης του συστήματος.

Αφότου πραγματοποιηθεί η αρχικοποίηση αυτή, ο μηχανισμός μεταβαίνει στο στάδιο αναμονής (**Control Wait for event**). Σε αυτό το στάδιο, ο μηχανισμός περιμένει πριν μεταβεί στο επόμενο, είτε μέχρι να ληφθούν νέες μετρήσεις από τους κόμβους αισθητήρων (μέσω του μηχανισμού Measurements FSM) είτε μέχρι να ληφθούν νέες ρυθμίσεις από τον χρήστη. Άμα κάτι από αυτά τα δύο συμβεί τότε ο μηχανισμός θα μεταβεί στο στάδιο ελέγχου και διαχείρισης των συστημάτων (**Control**).

Στο στάδιο Control, για κάθε ομάδα καλλιέργειας, αξιολογούνται οι τελευταίες μετρήσεις υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος και υγρασίας χώματος και σε συνάρτηση με τις ρυθμίσεις που έχουν οριστεί για αυτήν την ομάδα καλλιέργειας, λαμβάνονται αποφάσεις για το αν θα ανοίξει ή θα κλείσει το κάθε σύστημα προσαρμογής των συνθηκών (πότισμα, κλιματισμός), ενώ ενεργοποιείται και το σύστημα φωτισμού, σε περίπτωση που έχουν ληφθεί μετρήσεις για την εκάστοτε ομάδα καλλιέργειας. Αφού ληφθούν οι αποφάσεις αυτές, ο μηχανισμός μεταβαίνει πάλι στην κατάσταση Control Wait for event.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως: Τα συστήματα αυτά ελέγχονται μέσω χρήσης GPIOs που παρέχονται από την πλατφόρμα ανάπτυξης. Το υποσύστημα nRF52840, ως δευτερεύον στην πλατφόρμα, έχει έλεγχο ελάχιστων GPIOs, επομένως ο τελικός έλεγχος των συστημάτων θα πραγματοποιηθεί από την πλευρά του nRF9160. Στο στάδιο Control που περιγράφηκε, ουσιαστικά λαμβάνονται οι αποφάσεις για το ποια συστήματα (φωτισμού, ποτίσματος ή κλιματισμού) ανά ομάδα καλλιέργειας θα πρέπει να είναι ανοιχτά ή όχι. Όταν ληφθούν αυτές οι αποφάσεις, η πλευρά του nRF52840 θα ειδοποιήσει την πλευρά nRF9160 να πραγματοποιήσει τον έλεγχο των κατάλληλων GPIOs με έναν μηχανισμό που θα αναλυθεί στη συνέχεια, κατά το στάδιο Control.

3.4.1.4 Επικοινωνία nRF52840 - nRF9160

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα [2.2.1.2](#), η πλατφόρμα ανάπτυξης nRF9160DK αποτελείται από τα υποσυστήματα nRF52840 και nRF9160. Ο κεντρικός κόμβος λοιπόν, στην πραγματικότητα είναι 2 ξεχωριστά υποσυστήματα τα οποία συνεργάζονται ώστε να ληφθούν οι μετρήσεις από το δίκτυο αισθητήρων (μέσω Bluetooth LE επικοινωνίας) και να ανέβουν αυτές στο Cloud (μέσω δικτύου NB-IoT). Υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας αυτών των 2 υποσυστημάτων, μέσω του πρωτοκόλλου UART. Για να επιτευχθεί λοιπόν η επικοινωνία μεταξύ τους, υλοποιήθηκε στα πλαίσια της ανάπτυξης του συστήματος, ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που παρουσιάζεται στη συνέχεια:

Τα 2 αυτά υποσυστήματα ανταλλάσουν, μέσω UART, τα μηνύματα:

MESSAGE_ROW_MEAN_DATA	
Message that is sent from nRF52840 to nRF9160 that conveys information about each farming row	
Message field	Description
Type	Message type code 0xA2
Length	Length of message in bytes
Mean row temperature	Mean temperature value
Mean row humidity	Mean humidity value
Mean row soil moisture	Mean soil moisture value
Mean light	Mean light exposure value
Row active	1 if at least one measurement for this row ID was received, 0 otherwise
Row ID	Vertical farming group ID
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.3: Row information message

MESSAGE_READY_FOR_CLOUD	
Message that is sent from nRF52840 to nRF9160 to inform nRF9160 that all row mean values have been sent and it can start sending them to cloud	
Message field	Description
Type	Message type code 0xC0
Length	Length of message in bytes
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.4: Ready to send info to cloud message

MESSAGE_CONTROL_GPIOS	
Message that is sent from nRF52840 to nRF9160 and contains information about which GPIOs need to be enabled or disabled in order for environment control systems of vertical farming to be enabled or disabled	
Message field	Description
Type	Message type code 0x82
Length	Length of message in bytes
Row fan control	Array with size of 5 (5 supported farming groups) with information about which groups should have fan on and which fan off
Row water control	Array with size of 5 with information about which groups should have watering system on and which off
Row light control	Array with size of 5 with information about which groups should have lights on and which off
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.5: GPIO control message

MESSAGE_COAP_ROW_CONTROL_USER_DATA	
Message that is sent from nRF9160 to nRF52840 that conveys information about the control configuration for a corresponding row ID.	
Message field	Description
Type	Message type code 0xB2
Length	Length of message in bytes
Row ID	Vertical farming group ID (1 - 5)
Automatic control	1 if user requested automatic control for this farming group (Row ID), 0 if user requested manual control
Light switch	1 if user requested the lights for this Row ID to be on, 0 otherwise
Water switch	1 if user requested the watering system to be on for this Row ID, 0 otherwise
Fan switch	1 if user requested the fan to be on for this Row ID, 0 otherwise
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.6: User row control settings

MESSAGE_COAP_ROW_THRESHOLDS_USER_DATA	
Message that is sent from nRF9160 to nRF52840 that conveys information about the temperature, humidity, soil moisture and light thresholds set by the user for each farming group, in order to automatically control environment control systems (fans, lights, water systems)	
Message field	Description
Type	Message type code 0xB3
Length	Length of message in bytes
Row ID	Vertical farming group ID (1 - 5) - Row number
Temperature threshold	Temperature threshold value that, if exceeded, fan will turn on for this row
Humidity threshold	Humidity threshold value that, if exceeded, fan will turn on for this row
Soil moisture threshold	Soil moisture threshold value that, if row soil moisture is below, watering system will turn on for this row
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.7: Automatic control threshold values

MESSAGE_OPERATION_RESULT	
Message that is sent from either from nRF9160 to nRF52840, or from nRF52840 to nRF9160 as a response to each received message. It is a type of an ACK/NACK message, containing an error code (if communication error happened)	
Message field	Description
Type	Message type code 0xFD
Length	Length of message in bytes
Operation result	Field that contains the error code of the message received. For example if a message was received with a crc error, it will contain crc_error_code.
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.8: Response message for every received message

Ο μηχανισμός που αναπτύχθηκε προκειμένου να μπορούν να μεταδοθούν αυτά τα μηνύματα από το ένα υποσύστημα του nRF9160DK στο άλλο λειτουργεί ως εξής:

Όταν ένα υποσύστημα στείλει, μέσω UART, ένα μήνυμα, το άλλο υποσύστημα θα ελέγξει αρχικά το 1o Byte του μηνύματος. Αυτό είναι το πεδίο Type, που φαίνεται στους πίνακες ανάλυσης των υποστηριζόμενων μηνυμάτων που προηγήθηκαν. Αν ο τύπος του μηνύματος είναι ένας από τους υποστηριζόμενους τύπους (0xA2, 0xC0, 0x82, 0xB2, 0xB3, 0xFD), τότε ο μηχανισμός προχωράει στο επόμενο στάδιο. Σε αυτό, αρχικά υπολογίζεται το CRC όλου του μηνύματος που λήφθηκε (στον υπολογισμό του CRC συμμετέχουν τα bytes από το πεδίο Type έως και το byte πριν το πεδίο CRC16), και αν η υπολογισμένη τιμή ταυτίζεται με το CRC16 πεδίο του μηνύματος, τότε ο μηχανισμός το αποδέχεται. Ανάλογα με τον τύπο του μηνύματος, πραγματοποιείται η ανάλογη διαχείριση. Για παράδειγμα, αν η πλευρά nRF52840 στείλει στην πλευρά nRF9160 ένα μήνυμα τύπου 0x82 - MESSAGE_CONTROL_GPIOS, τότε η πλευρά nRF9160 θα διαβάσει το περιεχόμενο του μηνύματος και θα ανοίξει ή θα κλείσει τα GPIOs που χρειάζεται, ώστε να ανοίξουν ή να κλείσουν τα συστήματα προσαρμογής συνθηκών (ανεμιστήρας, σύστημα ποτίσματος, φως) για την κάθε γραμμή καλλιέργειας. Αφότου η πλευρά που έλαβε ένα μήνυμα, το διαχειρίστει, απαντάει με ένα μήνυμα τύπου 0xFD - MESSAGE_OPERATION_RESULT. Μέσα σε αυτό το μήνυμα εμπεριέχεται και ο κωδικός σφάλματος (αν υπήρξε κάποιο σφάλμα), ώστε η πλευρά που έστειλε το αρχικό μήνυμα να γνωρίζει αρχικά αν ο αποδέκτης το έλαβε και ύστερα αν το διαχειρίστηκε χωρίς προβλήματα.

3.4.1.5 Μηχανισμός Watchdog

Για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του κεντρικού κόμβου, εφαρμόστηκε στο λογισμικό του nRF52840 αλλά και στο λογισμικό του nRF9160 υποσυστήματος, ο μηχανισμός Watchdog που περιγράφηκε στην υποενότητα [3.3.4](#).

3.4.2 Διαχείριση της διεπαφής με το cloud - nRF9160

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα σημεία, το υποσύστημα nRF9160 είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τον Cloud server μέσω του δικτύου NB-IoT. Η επικοινωνία με τον Cloud server γίνεται με χρήση του πρωτοκόλλου CoAP, που αναλύθηκε στην ενότητα [2.1.3](#). Επομένως, στο λογισμικό του nRF9160 ο βασικός μηχανισμός που έχει υλοποιηθεί είναι αυτός της υλοποίησης του CoAP πρωτοκόλλου (CoAP FSM).

3.4.2.1 Σύνδεση με το δίκτυο NB-IoT

Κατά την εκκίνηση του συστήματος, η εφαρμογή επιχειρεί ως πρώτο βήμα να πραγματοποιήσει σύνδεση με το δίκτυο NB-IoT. Για να υπάρχει πρόσβαση στο δίκτυο αυτό, πρέπει να υπάρχει ενεργή συνδρομή σε κάποιον διαθέσιμο πάροχο τηλεπικοινωνιών, και να έχει

εισαγθεί η κάρτα SIM που παρέχει ο πάροιχος. Το λειτουργικό σύστημα Zephyr παρέχει τη δυνατότητα, μέσω επιλογών στο αρχείο KConfig, για αυτόματη σύνδεση με το δίκτυο NB-IoT πριν ξεκινήσει η εκτέλεση της ίδιας της εφαρμογής. Επομένως, για να πραγματοποιηθεί η σύνδεση στο δίκτυο, αρχικά παρέχονται οι ρυθμίσεις στο KConfig:

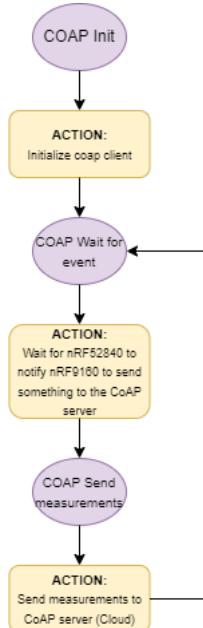
- Επιλογή του τύπου δικτύου NB-IoT.
- Χρήση της επιλογής για αυτόματη αρχικοποίηση του συστήματος LTE και αυτόματη προσπάθεια σύνδεσης με το δίκτυο.

Αφού πραγματοποιηθεί η σύνδεση με το δίκτυο, ξεκινάει η εκτέλεση της εφαρμογής.

3.4.2.2 Ανάλυση μηχανισμού: CoAP FSM

Για την επικοινωνία με τον CoAP cloud server, έχει υλοποιηθεί ένας μηχανισμός στο λογισμικό του nRF9160 (σε ξεχωριστό νήμα), για να δουλεύει ως CoAP Client.

Ο μηχανισμός αυτός συνοψίζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.17: Μηχανισμός για την αποστολή δεδομένων στον CoAP server (Στο Cloud)

Το πρώτο στάδιο του μηχανισμού CoAP FSM είναι η αρχικοποίηση του CoAP Client και η πραγματοποίηση σύνδεσης με τον CoAP Server. Ο CoAP Server έχει υλοποιηθεί και λειτουργεί σε ένα Raspberry Pi (θα αναλυθεί σε επόμενη υποενότητα), το οποίο έχει σύνδεση στο διαδίκτυο. Για να πραγματοποιηθεί η επικοινωνία με τον Cloud Server, δημιουργείται ένα UDP Socket με αυτόν τον server, με χρήση της δημόσιας διεύθυνσης IP του server.

Αφού ολοκληρωθεί η σύνδεση, ο μηχανισμός μεταβαίνει σε κατάσταση αναμονής (**CoAP Wait for event**). Σε αυτό το στάδιο ο μηχανισμός παραμένει μέχρι η πλευρά του nRF52840 να ειδοποιήσει την πλευρά του nRF9160 να αποστείλει τις νέες μετρήσεις (υγρασίας, θερμοκρασίας, υγρασίας χώματος και έκθεσης φωτός), για την κάθε γραμμή καλλιέργειας, στον Cloud server. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, όταν ο nRF52840 λάβει μετρήσεις από τους κόμβους αισθητήρων, τις προωθεί στην πλευρά nRF9160 με μήνυμα τύπου MESSAGE_ROW_MEAN_DATA (3.3), και ύστερα με το μήνυμα MESSAGE_READY_FOR_CLOUD (3.4) ειδοποιείται η πλευρά nRF9160 ότι μπορεί να ξεκινήσει η αποστολή τους στο Cloud. Η ειδοποίηση του μηχανισμού γίνεται με τη χρήση της διομής events του λειτουργικού συστήματος που ενσωματώνει η εφαρμογή. Η αποστολή των μετρήσεων στο Cloud γίνεται μέσω αιτήματος τύπου PUT στον κατάλληλο πόρο του CoAP Server, στο στάδιο **COAP Send measurements**. Συγκεκριμένα, το περιεχόμενο του αιτήματος PUT στον πόρο αυτό του Server περιγράφεται από τον πίνακα 3.9 που ακολουθεί:

MESSAGE_COAP_ROW_MEAN_DATA	
Message that is sent from either from nRF9160 to CoAP server, via PUT request on a specific coap resource.	
Message field	Description
Type	Message type code 0xFD
Length	Length of message in bytes
Mean temperature	Mean row temperature value
Light exposure	Row light exposure
Mean soil moisture	Mean soil moisture value
Mean humidity	Mean humidity value
Timestamp	When the message was created
Row ID	The farming group those measurements correspond to
CRC16	CRC16 of this message

Πίνακας 3.9: Message containing row measurements that is sent to CoAP server

Η αρχιτεκτονική με την οποία σχεδιάστηκε ο μηχανισμός CoAP FSM, επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση και υποστήριξη νέων πόρων. Σε περίπτωση που χρειαστεί να εισαχθεί και να υποστηριχθεί ένας νέος πόρος, μπορεί πολύ εύκολα, αφότου αυτός υλοποιηθεί στην πλευρά του CoAP Server, να εισαχθεί ένα ξεχωριστό στάδιο στον μηχανισμό CoAP FSM, στο οποίο ο μηχανισμός θα μεταβαίνει από το COAP Wait for event, όταν παραχθεί το κατάλληλο event στο σύστημα.

Μετά το στάδιο COAP Send measurements, ο μηχανισμός μεταβαίνει στην κατάσταση COAP Wait for event μέχρι να ειδοποιηθεί εκ νέου για επόμενη αποστολή.

3.4.2.3 Μηχανισμός Resource Observe

Ο μηχανισμός που εξηγήθηκε προηγουμένως, εξυπηρετεί την ανάγκη για αποστολή δεδομένων στον CoAP cloud server. Όπως όμως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το σύστημα που αναπτύχθηκε υποστηρίζει και διεπαφή με τον χρήστη. Μπορεί δηλαδή ο ίδιος ο χρήστης να στέλνει εντολές και να ρυθμίζει τον κεντρικό κόμβο. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, δημιουργήθηκε στον CoAP server ένας πόρος με τη δυνατότητα για παρατήρηση. Όταν υπάρχουν αλλαγές στο περιεχόμενο αυτού του πόρου, ένας παρατηρητής θα ενημερωθεί για αυτές, χωρίς να χρειαστεί να ζητήσει τη νέα πληροφορία αυτή μέσω ξεχωριστού αιτήματος τύπου GET. Επομένως, χρειάστηκε να υλοποιηθεί ένας μηχανισμός για την παρατήρηση αυτού του πόρου. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργήθηκε ενά ξεχωριστό νήμα στην εφαρμογή. Ο μηχανισμός αυτός είναι ένας ατέρμονας βρόχος, ο οποίος περιοδικά ελέγχει τη γραμμή λήψης δεδομένων για κάποιο νέο πακέτο πληροφορίας. Αυτό το πακέτο πληροφορίας θα είναι της δομής που περιγράφηκε είτε στον πίνακα 3.6 είτε της δομής 3.7.

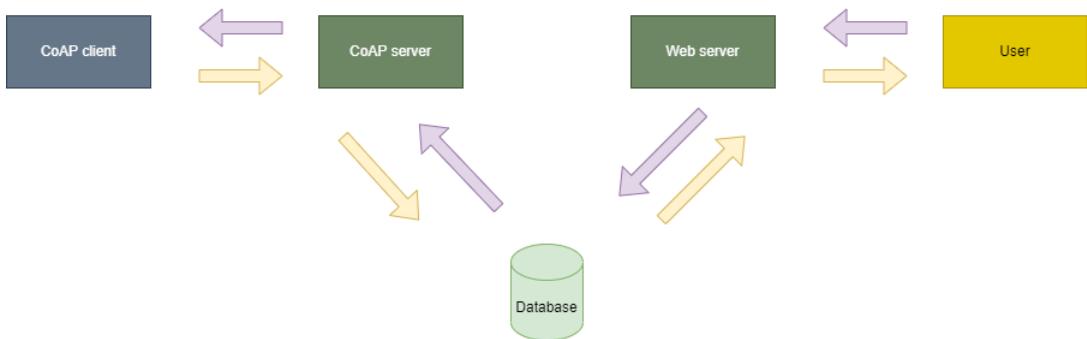
Μέσω, λοιπόν, των μηχανισμών CoAP FSM και Resource Observe που περιγράφηκαν παραπάνω, δίνεται η δυνατότητα στο δίκτυο αισθητήρων να μοιραστεί τις πληροφορίες που

λαμβάνει με τον έξω κόσμο. Αυτό περιλαμβάνει τόσο τον διαμοιρασμό της πληροφορίας των μετρήσεων με τον χρήστη, όσο και τη λήψη πληροφορίας από αυτόν.

3.5 Cloud servers - Διεπαφή με τον χρήστη

Στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκε και η υποδομή προκειμένου ο χρήστης να μπορεί να έχει εύκολη πρόσβαση στις πληροφορίες τις εγκατάστασης όπου χρησιμοποιεί το σύστημα αισθητήρων που αναπτύχθηκε. Για την υλοποίηση αυτής της υποδομής αναπτύχθηκαν οι εξής τρεις μηχανισμοί:

- CoAP server: Εξυπηρετητής που διαχειρίζεται την επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου CoAP.
- Web server: Εξυπηρετητής που επιτρέπει στον χρήστη να έχει πρόσβαση στο σύστημα αισθητήρων της εγκατάστασής του, εύκολα, ακόμα και από το κινητό του τηλέφωνο.
- Βάση δεδομένων: Αποθήκη των απαραίτητων πληροφορίων, που συμμετέχει τόσο στην αποθήκευση όλης της πληροφορίας που λαμβάνεται από το δίκτυο αισθητήρων που περιγράφηκε στις προηγούμενες υποενότητες, όσο και ως συνδετικός κρίκος μεταξύ των εξυπηρετητών CoAP και Web.



Σχήμα 3.18: Ροή πληροφορίας από το δίκτυο αισθητήρων προς τον χρήστη (κίτρινο χρώμα) και από τον χρήστη στο δίκτυο αισθητήρων (μωβ χρώμα)

3.5.1 CoAP server

Ο εξυπηρετητής CoAP υλοποιήθηκε με τη χρήση της γλώσσας python και συγκεκριμένα αξιοποιήθηκε η βιβλιοθήκη aiocoap.

Στον CoAP server έχουν υλοποιηθεί 2 πόροι προκειμένου να λαμβάνεται η απαραίτητη πληροφορία από το δίκτυο αισθητήρων, αλλά και να προωθούνται οι εντολές του χρήστη προς το δίκτυο αυτό. Συγκεκριμένα έχουν υλοποιηθεί οι πόροι:

- **rowmeadata:** Στον οποίον ο CoAP client (nRF9160) μπορεί να δημιουργεί αυτή-ματα τύπου PUT.

- **userpayload:** Το οποίο αξιοποιείται προκειμένου να προωθούνται οι ρυθμίσεις που θέλει να κάνει ο χρήστης στο δίκτυο αισθητήρων. Ο πόρος userpayload υποστηρίζει τη δυνατότητα παρατήρησης.

Όταν το δίκτυο αισθητήρων στέλνει τις πληροφορίες των μετρήσεων στο cloud, το καταφέρνει κάνοντας αίτημα τύπου PUT στον πόρο rowmeadata. Ο server λαμβάνει με τη σειρά του τις απεσταλμένες πληροφορίες και τις καταχωρεί στη βάση δεδομένων που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Στην περίπτωση του πόρου userpayload, έχει υλοποιηθεί ένας μηχανισμός που λειτουργεί ως εξής:

Όταν ο χρήστης πραγματοποιεί τις ρυθμίσεις που επιθυμεί για το σύστημα αισθητήρων, αυτό το αίτημα καταχωρείται στη βάση δεδομένων. Κάθε αίτημα ρυθμίσεων που καταχωρείται στη βάση δεδομένων, συνοδεύεται από την ώρα καταχώρησης του. Ο μηχανισμός που υλοποιήθηκε για την παρατήρηση του πόρου userpayload, είναι ένας ατέρμονας βρόχος, ο οποίος εκτελείται περιοδικά, με περίοδο 2 δευτερολέπτων. Σε κάθε κύκλο του βρόχου εντοπίζονται τυχόν νέα καταχωρημένα αιτήματα από τον χρήστη στη βάση δεδομένων, και εξυπηρετούνται με τη λογική FIFO (First in - First out). Όταν λοιπόν βρεθεί κάποιο καινούργιο αίτημα του χρήστη, αποστέλεται το κατάλληλο μήνυμα στον κεντρικό κόμβο, ο οποίος το λαμβάνει με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην υποενότητα [3.4.2.3](#). Η δομή των μηνυμάτων που αποστέλονται από τον CoAP server στον κεντρικό κόμβο είναι είτε αυτή του πίνακα [3.6](#), είτε του [3.7](#).

3.5.2 Web server

Για την αλληλεπίδραση με τον χρήστη επιλέχθηκε να αναπτυχθεί ένας web server ώστε να υποστηριχθεί μια ιστοσελίδα. Ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στο σύστημα αισθητήρων του απλά, μέσω μιας ιστοσελίδας, που μπορεί να ανοίξει από το κινητό του ή τον προσωπικό υπολογιστή του. Η υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε, επιτρέπει στον χρήστη να βλέπει τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το δίκτυο αισθητήρων, μέσω κατάλληλων γραφημάτων, αλλά και να επιλέγει τις ρυθμίσεις, που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα [3.4.1.3](#), με βάση τις οποίες θα λειτουργούν τα συστήματα ελέγχου περιβαλλοντικών συνθηκών. Συγκεκριμένα, ο τρόπος λειτουργίας του Web server είναι ο εξής:

Αρχικά, για την παραγωγή των γραφημάτων, κάθε φορά που ο χρήστης ανανεώνει την ιστοσελίδα, ο web server λαμβάνει τις τελευταίες 20 (κατά μέγιστο) μετρήσεις που έχουν

αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων, για κάθε γραμμή παραγωγής που υπάρχει στην εγκατάσταση. Συνολικά δημιουργούνται 4 διαγράμματα:

- **Τγρασίας χώματος:** Το διάγραμμα δείχνει τις τιμές υγρασίας χώματος στον έναν άξονα (σε ποσοστό επί τοις εκατό) και στον άλλον τη χρονική στιγμή λήψης της μετρησης. Αυτό το διάγραμμα περιλαμβάνει ξεχωριστή γραφική παράσταση (με διαφορετικό χρώμα) για κάθε "ενεργή" γραμμή, δηλαδή για κάθε ομάδα κάθετης καλλιέργειας που υπάρχει.
- **Τγρασίας περιβάλλοντος:** Αντίστοιχα το διάγραμμα υγρασίας περιβάλλοντος έχει στον έναν άξονα την υγρασία περιβάλλοντος σε ποσοστό επί τοις εκατό και στον άλλον άξονα τη χρονική στιγμή λήψης του εκάστοτε δείγματος.
- **Θερμοκρασίας περιβάλλοντος:** Η θερμοκρασία περιβάλλοντος αναπαρίσταται σε βαθμούς κελσίου και έχει την ίδια δομή ως διάγραμμα, με αυτά που περιγράφηκαν προηγουμένως.
- **Έκθεσης στο φως:** Η μονάδα μέτρησης για την έκθεση φωτός που χρησιμοποιήθηκε είναι, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η PPFD - Φωτοσυνθετική πυκνότητα ροής φωτονίων.

Ο μηχανισμός που έχει υλοποιηθεί ώστε ο χρήστης να πραγματοποιεί τις ρυθμίσεις που επιθυμεί λειτουργεί ως εξής:

- **Ρυθμίσεις ορίων μετρήσεων για αυτόματο έλεγχο:** Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη υποενότητα, ο χρήστης μπορεί να θέσει τα όρια υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος και υγρασίας χώματος, ώστε αναλόγως τις μετρήσεις που θα λαμβάνει ο κεντρικός κόμβος από τους κόμβους αισθητήρων, να ελέγχει αυτόματα τα συστήματα προσαρμογής περιβαλλοντικών συνθηκών. Συγκεκριμένα, ο χρήστης μέσω της ιστοσελίδας μπορεί να θέσει τα όρια για τους παράγοντες που αναφέρθηκαν, για κάθε γραμμή καλλιέργειας ξεχωριστά. Όταν εισάγει τις τιμές που επιθυμεί για αυτά τα όρια, για την επιθυμητή γραμμή καλλιέργειας, και πατήσει το κουμπί καταχώρησης του αιτήματος, τότε δημιουργείται ένα αίτημα στον web server, ο οποίος όταν το λάβει, δημιουργεί μια καταχώρηση στη βάση δεδομένων που περιέχει τις σχετικές πληροφορίες, μαζί με το χρονικό στίγμα του αιτήματος. Έτσι, ο CoAP server που αναλύθηκε σε προηγούμενη υποενότητα, θα μπορεί να εντοπίσει αυτό το αίτημα και να το πρωθήσει στον κεντρικό κόμβο.

Row 2 temperature threshold	<input type="text"/>
Row 2 humidity threshold	<input type="text"/>
Row 2 soil moisture threshold	<input type="text"/>
<input type="button" value="Submit row 2 thresholds"/>	

Σχήμα 3.19: Γραφική διεπαφή για ρύθμιση ορίων συνθηκών αυτόματου ελέγχου

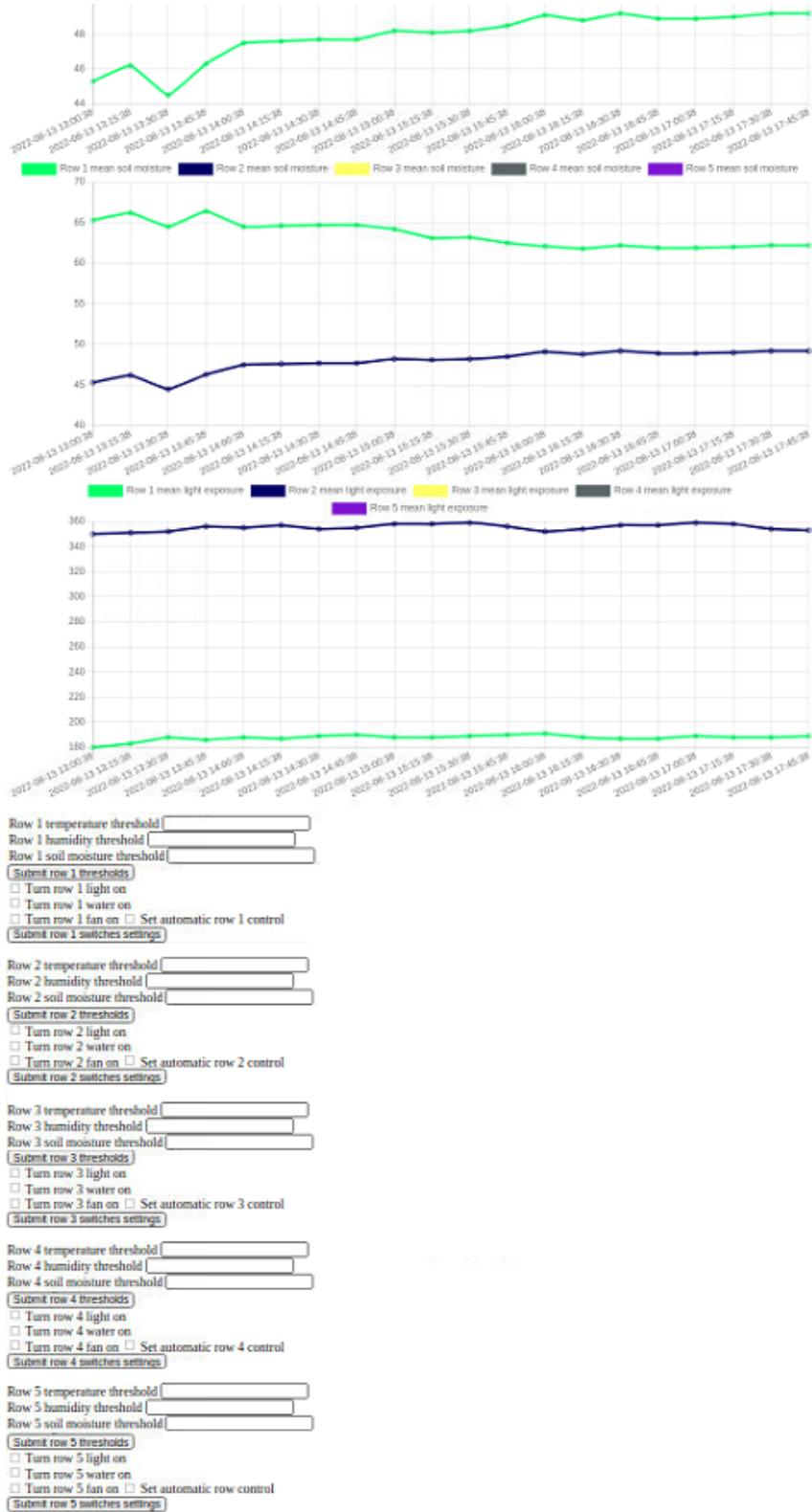
- Ρυθμίσεις χειροκίνητου ελέγχου συστημάτων: Αντίστοιχα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα, για την εκάστοτε γραμμή καλλιέργειας, να επιλέξει χειροκίνητο έλεγχο των συστημάτων προσαρμογής των συνθηκών. Συγκεκριμένα, για τη γραμμή καλλιέργειας που τον ενδιαφέρει, μπορεί να καταχωρήσει ένα αίτημα στον web server, μέσω της ιστοσελίδας, ώστε να απενεργοποιήσει τον αυτόματο έλεγχο σε αυτήν και να ανοίξει ή να κλείσει χειροκίνητα τα συστήματα που τον ενδιαφέρει. Και σε αυτή την περίπτωση, δημιουργείται μια καταχώρηση στη βάση δεδομένων από τον web server, που περιέχει τις ανάλογες πληροφορίες, αλλά και το χρονικό στίγμα πραγματοποίησης του αιτήματος.

<input type="checkbox"/> Turn row 2 light on
<input type="checkbox"/> Turn row 2 water on
<input type="checkbox"/> Turn row 2 fan on
<input type="checkbox"/> Set automatic row 2 control
<input type="button" value="Submit row 2 switches settings"/>

Σχήμα 3.20: Γραφική διεπαφή για χειροκίνητο έλεγχο συστημάτων προσαρμογής περιβαλλοντικών συνθηκών

Ο web server αναπτύχθηκε με τη χρήση της γλώσσας python και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Flask [52].

Η σελίδα μέσω της οποίας ο χρήστης λαμβάνει όλη την απαραίτητη πληροφορία για την εγκατάσταση της καλλιέργειάς του και αλληλεπιδρά με το σύστημά του φαίνεται στην εικόνα 3.21:



Σχήμα 3.21: Ιστοσελίδα μέσω της οποίας γίνεται η αλληλεπίδραση με το σήστημα

3.5.3 Βάση δεδομένων

Η βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, εξυπηρετεί κυρίως στην διεπαφή και ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των εξυπηρετητών CoAP και Web που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υποενότητες. Πρόκειται για μια SQL βάση δεδομένων, στην οποία έχουν πρόσβαση οι 2 εξυπηρετητές με τη χρήση της βιβλιοθήκης mysql, μέσω python. Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες υποενότητες, αποθηκεύει τις εξής πληροφορίες:

- Μετρήσεις από το δίκτυο αισθητήρων: Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το δίκτυο αισθητήρων για κάθε γραμμή της κάθετης καλλιέργειας αποθηκεύονται σε ξεχωριστό πίνακα, με τη δομή που φαίνεται στον πίνακα 3.10:

Sensor network measurements table	
Database table where all measurements received from sensor network are stored	
Primary key	row_id ->integer timestamp ->datetime
Attributes	temperature ->float humidity ->float soil_moisture ->float light_exposure ->float

Πίνακας 3.10: Database table to store measurements

- Αιτήματα για ρύθμιση ορίων για αυτόματο έλεγχο: Τα αιτήματα που δημιουργεί ο χρήστης προκειμένου να καθορίσει τα όρια συνθηκών, που καθορίζουν το πότε θα ανοίγουν τα συστήματα προσαρμογής των συνθηκών στην καλλιέργεια καταχωρούνται σε πίνακα της βάσης δεδομένων με την εξής δομή 3.11:

Measurements thresholds user settings table	
Database table where all requests for threshold configuration are stored	
Primary key	row_id ->integer timestamp ->datetime
Attributes	temperature_threshold ->float water_threshold ->float humidity_threshold ->float

Πίνακας 3.11: Database table for user thresholds configuration requests

- Αιτήματα για χειροκίνητο έλεγχο των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών: Τα αιτήματα που δημιουργεί ο χρήστης προκειμένου να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει

τα συστήματα προσαρμογής των περιβαλλοντικών συνθηκών στο σύστημα καλλιέργειας καταχωρούνται σε έναν πίνακα της βάσης δεδομένων με την εξής δομή [3.12](#):

Manual control user settings table	
Database table where all requests for manual control of environment control systems are stored	
Primary key	row_id ->integer timestamp ->datetime
Attributes	light_switch ->boolean water_switch ->boolean fan_switch ->boolean automatic_control_switch ->boolean

Πίνακας 3.12: Database table for storing request for manual control of environment control systems

Κεφάλαιο 4

Μετρήσεις και αποτελέσματα

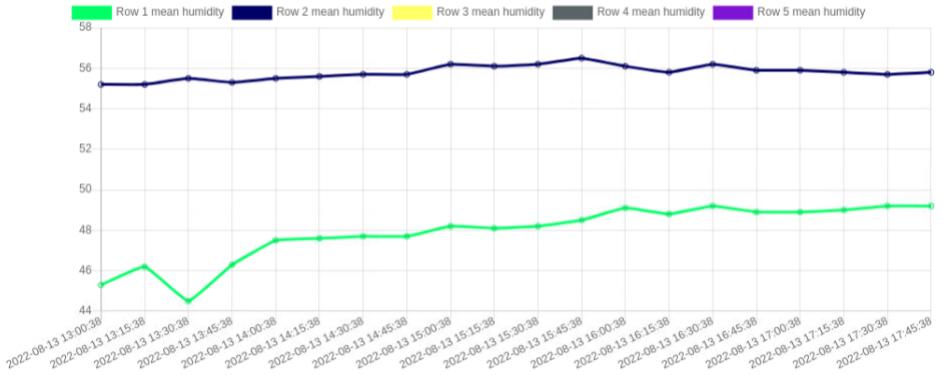
4.1 Αποτελέσματα λειτουργίας του συστήματος

Για την απόδειξη της λειτουργίας του συστήματος, το σύστημα αισθητήρων εγκαταστάθηκε στην διάταξη κάθετης καλλιέργειας που φαίνεται στην εικόνα 4.1.



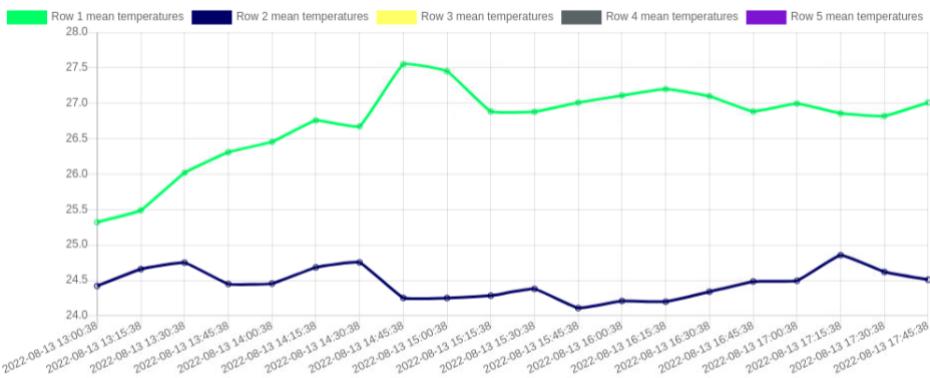
Σχήμα 4.1: Εγκατάσταση κάθετης καλλιέργειας λαχανικών

Συγκεκριμένα, εγκαταστάθηκαν 2 κόμβοι αισθητήρων στο πρώτο (πάνω) ράφι (γραμμή 1) και 2 κόμβοι αισθητήρων στο 2ο ράφι (γραμμή 2). Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν από το σύστημα αισθητήρων σε μια δεδομένη χρονική περίοδο της λειτουργίας του συστήματος. Ο ρυθμός λήψης μετρήσεων τέθηκε στα 15 λεπτά, επομένως ο κεντρικός κόμβος λάμβανε μετρήσεις από τους κόμβους αισθητήρων και τις ανέβαζε στον server, μία φορά κάθε 15 λεπτά.



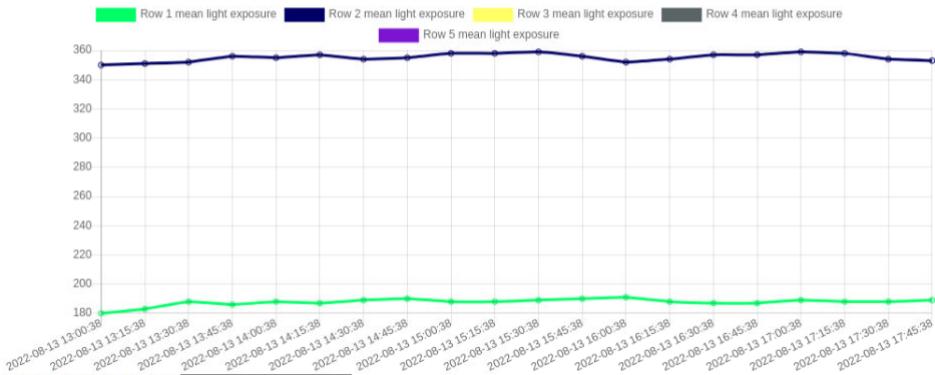
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα μετρήσεων σχετικής περιβαλλοντικής υγρασίας

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.2, την περίοδο λειτουργίας 13-8-2022 13:00:38 έως 13-8-2022 15:45:38, η σχετική υγρασία της γραμμής 1 κυμάνθηκε από περίπου 44% έως, περίπου, 49% (πράσινη γραμμή του διαγράμματος). Αντίστοιχα, για τη γραμμή 2, η σχετική υγρασία περιβάλλοντος φαίνεται ότι παρουσίασε μεγαλύτερη σταθερότητα, αφού το ίδιο χρονικό διάστημα κυμάνθηκε από περίπου 55% έως περίπου 56.5% (μπλε γραμμή του διαγράμματος).



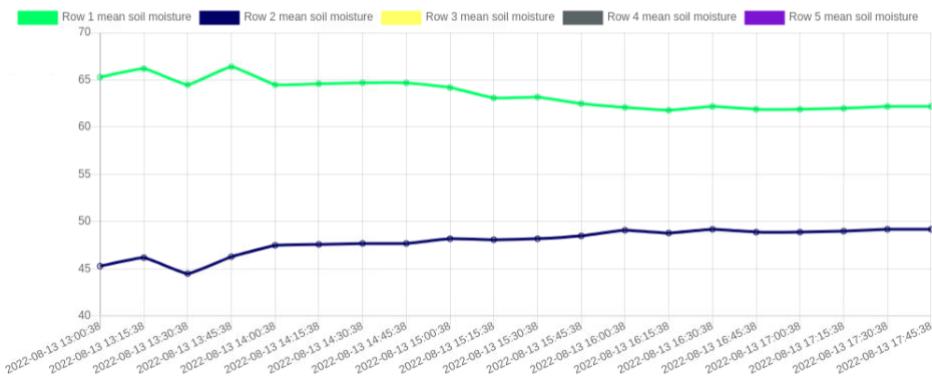
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα μετρήσεων περιβαλλοντικής θερμοκρασίας (σε βαθμούς κελσίου)

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.3, την περίοδο λειτουργίας 13-8-2022 13:00:38 έως 13-8-2022 15:45:38, η θερμοκρασία περιβάλλοντος της γραμμής 1 κυμάνθηκε από περίπου 25.3 βαθμούς κελσίου έως, περίπου, τους 27.5 βαθμούς κελσίου (πράσινη γραμμή του διαγράμματος). Αντίστοιχα, για τη γραμμή 2, η θερμοκρασία περιβάλλοντος το ίδιο χρονικό διάστημα κυμάνθηκε γύρω από τους 24.5 βαθμούς κελσίου (μπλε γραμμή του διαγράμματος).



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα μετρήσεων έκθεσης φωτός (σε PPFD)

Στο διάγραμμα 4.6 βλέπουμε ότι την περίοδο λειτουργίας 13-8-2022 13:00:38 έως 13-8-2022 15:45:38, η έκθεση φωτός της γραμμής 1 μετρήθηκε από 180 PPFD, έως περίπου 190 PPFD (πράσινη γραμμή του διαγράμματος). Αντίστοιχα, για τη γραμμή 2, το ίδιο χρονικό διάστημα, η έκθεση φωτός μετρήθηκε περίπου στα 350 με 360 PPFD (μπλε γραμμή του διαγράμματος).



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα μετρήσεων υγρασίας χώματος

Στο διάγραμμα 4.5 βλέπουμε ότι την περίοδο λειτουργίας 13-8-2022 13:00:38 έως 13-8-2022 15:45:38, η σχετική υγρασία χώματος της γραμμής 1 κυμάνθηκε γύρω από το 65% (πράσινη γραμμή του διαγράμματος). Αντίστοιχα, για τη γραμμή 2, το ίδιο χρονικό διάστημα, η σχετική υγρασία χώματος μετρήθηκε από 45% έως περίπου 49% (μπλε γραμμή του διαγράμματος).

4.2 Ενεργειακή κατανάλωση κόμβου αισθητήρων

4.2.1 Μέθοδοι λογισμικού και συνθήκες μετρήσεων

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, οι κόμβοι αισθητήρων τροφοδοτούνται από μία και μόνο μπαταρία χωρητικότητας 2600 mAh.

Σε όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης του λογισμικού είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη συνολική κατανάλωση των κόμβων. Έτσι μπορούμε να παρατηρήσουμε πως μπορεί μια νέα λειτουργία να την επηρεάζει και να παραμετροποιούμε το λογισμικό κατάλληλα.

Για την ακριβή μέτρηση της κατανάλωσης χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Power Profiler Kit II της Nordic Semiconductors. [53].



Σχήμα 4.6: Εργαλείο Power Profiler.

Το εργαλείο αυτό, σε λειτουργία αμπερομέτρου, προσφέρει αναλυτικότητα μέτρησης έως και 100 χιλιάδες δείγματα το δευτερόλεπτο. Έτσι μπορούμε να επιτηρούμε συνεχώς τη μέση κατανάλωση ρεύματος της εφαρμογής μας. Επιπλέον, το εργαλείο δίνει τη δυνατότητα μέτρησης σε Coulomb, του ηλεκτρικού φορτίου που χρειάστηκε η εφαρμογή μας σε δεδομένο χρόνο. Αυτό ίσως αποδεικνύεται χρήσιμο για την προσθήκη κάποιου πυκνωτή στην είσοδο της τροφοδοσίας. Στη συνέχεια ακολουθούν μερικά διαγράμματα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που εκτελέστηκαν για την ενεργειακή κατανάλωση των sensor nodes.

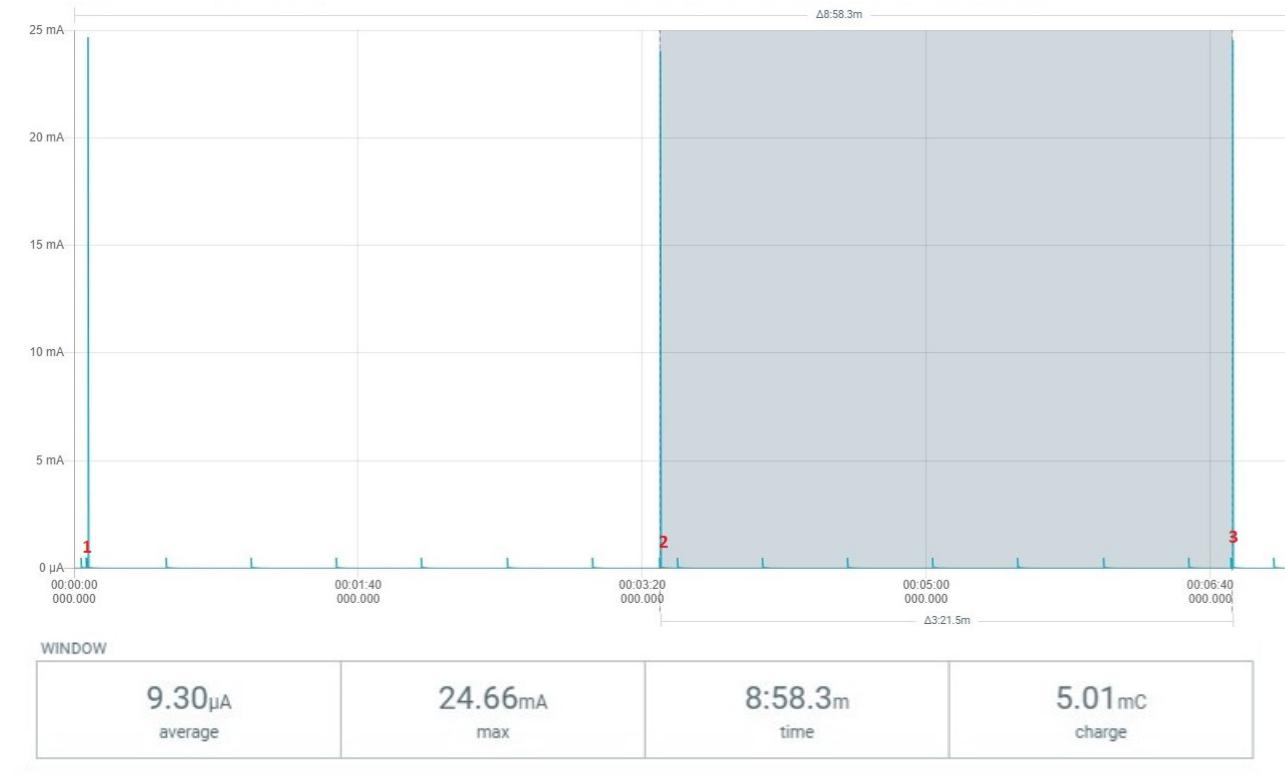
4.2.2 Συνολική μέση κατανάλωση κόμβων

Στο σχήμα 4.7 διακρίνεται η μέση κατανάλωση των κόμβων σε μΑ. Η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση των 9.3 μΑ οφείλεται στο γεγονός πως ο κόμβος τον περισσότερο χρόνο βρίσκεται σε πλήρως ανενεργή κατάσταση με όλα τα περιφερειακά απενεργοποιημένα.

Για τη μέτρηση η περίοδος με την οποία ο κεντρικός κόμβος ζητά μετρήσεις από τους sensor nodes τέθηκε στα 200 δευτερόλεπτα. Υπό κανονικές συνθήκες ο χρόνος αυτός θα ήταν ίσως ακόμη πιο υψηλός.

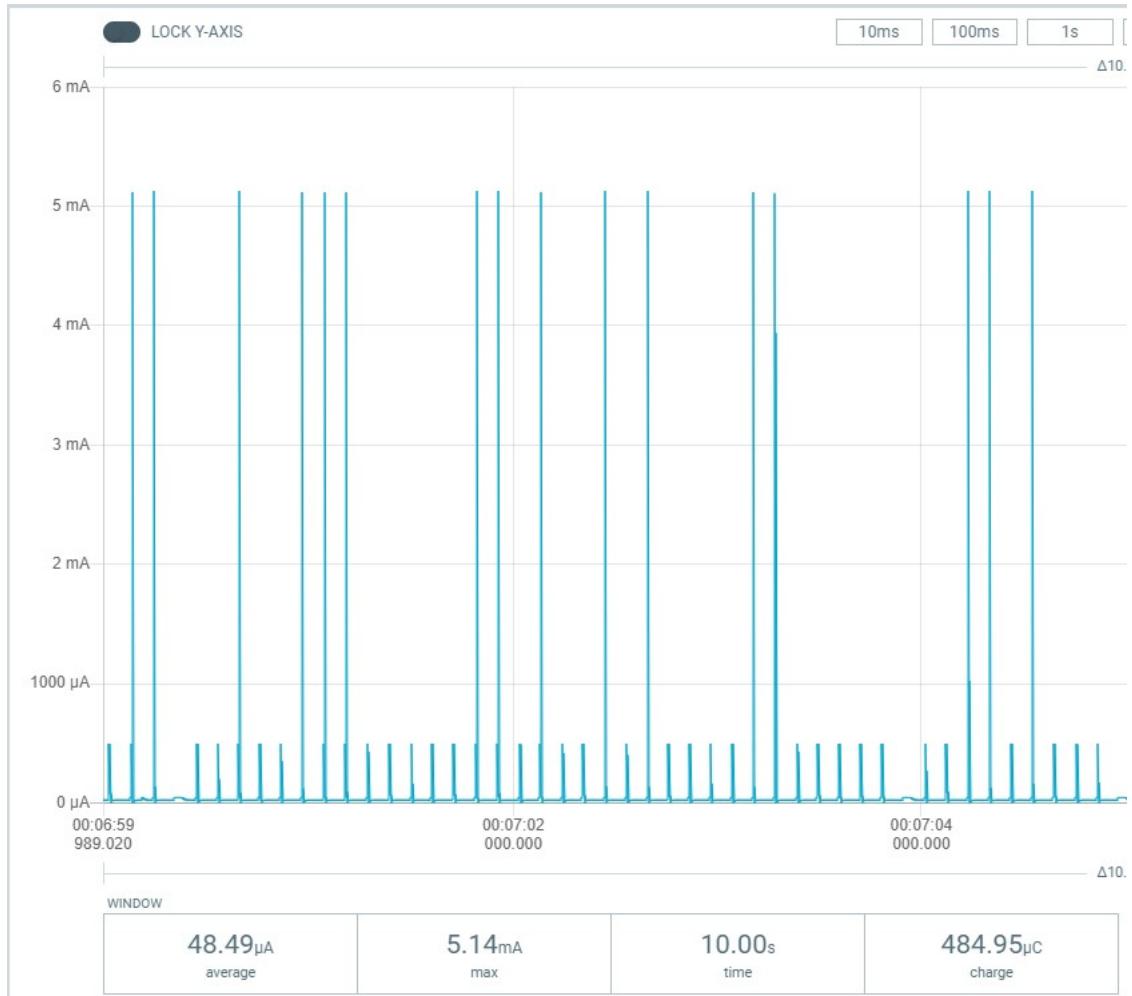
Στο σχήμα διακρίνονται εύκολα οι στιγμές κατά τις οποίες ο κεντρικός κόμβος ζήτησε να λάβει τα δεδομένα των μετρήσεων. Παρατηρείται πως εκείνες τις στιγμές, οι οποίες όπως φαίνεται πράγματι απέχουν 200 δευτερόλεπτα μεταξύ τους (στιγμές 00:00:25 σημείο 1 σχήμα 4.7, 00:03:45 σημείο 2 σχήμα 4.7, 00:07:05 σημείο 3 σχήμα 4.7) η κατανάλωση αυξάνεται κατακόρυφα. Ωστόσο, η διάρκεια αυτής της αυξημένης κατανάλωσης είναι αρκετά μικρή.

Οι μικρότερες περιοδικές αυξήσεις (spikes) που διαφαίνονται προκύπτουν λόγω της περιοδικής ενεργοποίησης του περιφερειακού του ADC για τη διαδικασία του calibration.



Σχήμα 4.7: Συνολική μέση κατανάλωση

Στο σχήμα 4.7 ωστόσο φαίνεται η κατανάλωση αφού πραγματοποιηθεί η σύνδεση με τον κεντρικό κόμβο. Κατά τη διαδικασία του advertising η κατανάλωση είναι αυξημένη όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά το advertising ο κόμβος στέλνει συχνά advertising πακέτα με σκοπό να εντοπιστεί από τον κεντρικό κόμβο.



Σχήμα 4.8: Μέση κατανάλωση κατά το advertising.

4.2.3 Απόδειξη λειτουργίας - Παράθυρο αποσφαλμάτωσης

Για να παρουσιαστεί η λειτουργία των συστημάτων που περιγράφηκαν στα πλαίσια της εργασίας, εκτός από τις πρακτικές μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.1, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν συνοπτικά και τα παράθυρα αποσφαλμάτωσης (debug windows) των κόμβων (κεντρικού και κόμβου αισθητήρων). Σε αυτά εκτυπώνονται πληροφορίες για την οποιαδήποτε διεργασία πραγματοποιείται στο εκάστοτε λογισμικό, με σκοπό να βοηθήσουν τον προγραμματιστή των συστημάτων αυτών να επιβεβαιώσει την ορθή λειτουργία τους και να εντοπίσει τυχόν σφάλματα.

4.2.3.1 Κόμβος αισθητήρων

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.3, για να χρησιμοποιηθεί ο κόμβος αισθητήρων, πρέπει πρώτα να ρυθμιστεί από τον χρήστη και μόνο μετά από τη ρύθμιση μπορεί να ακολουθήσει σύνδεση με τον κεντρικό κόμβο.

```

*** Booting Zephyr OS build v2.7.99-ncs1-1 ***
[00:00:00.011,810] <inf> sdc_hci_driver: SoftDevice Controller build revision:
          0e e7 c5 66 67 18 3c ac b3 d2 cc 81 a3 dc f1 c0 |...fg.<. .....
          c0 36 02 22                                     |.6."
[00:00:00.015,930] <inf> ble_m: Bluetooth initialized

[00:00:00.022,857] <inf> fs_nvs: 3 Sectors of 4096 bytes
[00:00:00.022,857] <inf> fs_nvs: alloc wra: 0, fd8
[00:00:00.022,857] <inf> fs_nvs: data wra: 0, 4
[00:00:00.023,956] <inf> ble_m: Advertising successfully started 2

[00:00:01.045,471] <inf> adc_interface_m: ADC Calibration Done!
[00:00:05.825,134] <inf> ble_m: Connection succeed (err 0) 3

[00:00:06.821,655] <inf> ble_m: Connection parameters updated!
[00:00:07.309,082] <inf> ble_m: Connection parameters updated!
[00:00:13.708,282] <inf> ble_m: Advertising successfully started 4

[00:00:17.846,374] <inf> ble_m: Disconnected (reason 19) 5

```

Σχήμα 4.9: Αρχική ρύθμιση του κόμβου αισθητήρων.

Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η εξής διαδικασία:

- Σημείο 1: Το λειτουργικό σύστημα εκκινεί.
- Σημείο 2: Στο σημείο αυτό βλέπουμε ότι λίγο μετά την εκκίνηση και την αρχικοποίηση του bluetooth, ξεκινάει το advertising του Device Service. Όπως είχε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3.3, όταν ένας κόμβος αισθητήρων δεν έχει ρυθμιστεί, πρώτα κάνει Advertise το Device Service, και αφότου ρυθμιστεί από τον χρήστη το Row ID χαρακτηριστικό του, προχωράει στο advertising του Measurement service.
- Σημείο 3: Σε αυτό το σημείο, συνδέθηκε ο χρήστης με το κινητό του τηλέφωνο στον κόμβο αισθητήρων, προκειμένου να τον ρυθμίσει.
- Σημείο 4: Μετά την πραγματοποίηση της ρύθμισης, ο κόμβος αισθητήρων προχωράει στο advertising του Measurement service.
- Σημείο 5: Ο χρήστης σε αυτό το σημείο αποσυνδέεται, αφού πραγματοποίησε τη ρύθμιση του κόμβου.

```

*** Booting Zephyr OS build v2.7.99-ncs1-1 ***
[00:00:00.011,840] <inf> sdc_hci_driver: SoftDevice Controller build revision:
          0e e7 c5 66 67 18 3c ac b3 d2 cc 81 a3 dc f1 c0 |...fg.<. .....
          c0 36 02 22                                     |.6."
[00:00:00.015,930] <inf> ble_m: Bluetooth initialized

[00:00:00.022,857] <inf> fs_nvs: 3 Sectors of 4096 bytes
[00:00:00.022,857] <inf> fs_nvs: alloc wra: 0, fe0
[00:00:00.022,857] <inf> fs_nvs: data wra: 0, 4
[00:00:00.022,918] <inf> main_m: Configuration id is: 2 2
[00:00:00.023,986] <inf> ble_m: Advertising successfully started 3

[00:00:01.045,471] <inf> adc_interface_m: ADC Calibration Done!

```

Σχήμα 4.10: Εκκίνηση ρυθμισμένου κόμβου αισθητήρων.

Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η λειτουργία του κόμβου αισθητήρων, όταν αυτός έχει ήδη ρυθμιστεί από τον χρήστη. Συγκεκριμένα, στο σημείο 1 της εικόνας, το λειτουργικό σύστημα εκκινεί. Στο σημείο 2 διαχρίνεται ότι ο κόμβος έχει δεχτεί την αρχική ρύθμιση του χρήστη, που καθορίζει τη γραμμή καλλιέργειας στην οποία ανήκει, και στην προκειμένη γραμμή καλλιέργειας που ανήκει αυτός ο κόμβος, είναι η **γραμμή 2**. Στο σημείο 3 ξεκινάει το advertising του Measurement service.

Οι εικόνες 4.9 και 4.10 αποδεικνύουν τους μηχανισμούς του λογισμικού του κόμβου αισθητήρων που περιγράφηκαν κατά την ανάλυση της εφαρμογής.

4.2.3.2 Κεντρικός κόμβος - nRF52840

```
*** Booting Zephyr OS build v2.7.99-ncsl-1 *** 1
[00:00:00.000,122] <inf> board_control: led1_pin_routing is ENABLED
--- 2 messages dropped ---
[00:00:00.000,152] <inf> board_control: led2_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,152] <inf> board_control: led3_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,183] <inf> board_control: led4_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,183] <inf> board_control: switch1_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,213] <inf> board_control: switch2_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,213] <inf> board_control: button1_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,244] <inf> board_control: button2_pin_routing is ENABLED
[00:00:00.000,244] <inf> board_control: nrf_interface_pins_0_2_routing is ENABLED
[00:00:00.000,244] <inf> board_control: nrf_interface_pins_3_5_routing is ENABLED
[00:00:00.000,274] <inf> board_control: nrf_interface_pins_6_8_routing is ENABLED
[00:00:00.000,274] <inf> board_control: Board configured.
[00:00:00.011,260] <inf> fs_nvs: 3 Sectors of 4096 bytes
[00:00:00.011,260] <inf> fs_nvs: alloc wra: 0, fc0
[00:00:00.011,260] <inf> fs_nvs: data wra: 0, 64
[00:00:00.011,383] <inf> sdc_hci_driver: SoftDevice Controller build revision:
          0e e7 c5 66 67 18 3c ac b3 d2 cc 81 a3 dc f1 c0 |...fg.<. .....
          c0 36 02 22                                |.6."
[00:00:00.011,840] <inf> environment_control_m: Loaded default row control config params from flash, row_id = 1
[00:00:00.011,901] <inf> environment_control_m: Loaded default row control config params from flash, row_id = 2
[00:00:00.016,693] <inf> bt_hci_core: HW Platform: Nordic Semiconductor (0x0002)
[00:00:00.016,693] <inf> bt_hci_core: HW Variant: nRF52x (0x0002)
[00:00:00.016,693] <inf> bt_hci_core: Firmware: Standard Bluetooth controller (0x00) Version 14.50663 Build 1008232294
[00:00:00.018,493] <inf> bt_hci_core: Identity: D1:DC:9C:41:43:43 (random)
[00:00:00.018,493] <inf> bt_hci_core: HCI: version 5.2 (0x0b) revision 0x12fe, manufacturer 0x0059
[00:00:00.018,493] <inf> bt_hci_core: LMP: version 5.2 (0x0b) subver 0x12fe
[00:00:00.018,524] <inf> ble_m: Ble initialized 2
[00:00:00.019,714] <inf> ble_m: Scan started 3
[00:00:00.019,714] <inf> environment_control_m: Loaded default row control config params from flash, row_id = 3
[00:00:00.019,775] <inf> environment_control_m: Loaded default row control config params from flash, row_id = 4
[00:00:00.019,805] <inf> environment_control_m: Loaded default row control config params from flash, row_id = 5
[00:03:02.785,949] <inf> ble_m: Scan started 4
[00:03:20.634,552] <inf> measurements_m: ----- MEAN DATA ----- row id: 2 5
[00:03:20.634,582] <inf> measurements_m: Mean Temperature is: 24.3 C
[00:03:20.634,582] <inf> measurements_m: Mean Humidity is: 41.14 percent
[00:03:20.634,582] <inf> measurements_m: Mean Soil moisture is: 33 percent
[00:03:20.634,582] <inf> measurements_m: Mean Light intensity is: 26
[00:03:20.638,488] <inf> environment_control_m: Row not registered, so all off 1 6
[00:03:20.638,488] <inf> environment_control_m: Auto fan off for 2 7
[00:03:20.638,519] <inf> environment_control_m: Auto water on for 2 8
[00:03:20.638,519] <inf> environment_control_m: Auto lights on for 2 9
[00:03:20.638,519] <inf> environment_control_m: Row not registered, so all off 3 10
[00:03:20.638,519] <inf> environment_control_m: Row not registered, so all off 4 11
[00:03:20.638,519] <inf> environment_control_m: Row not registered, so all off 5 12
[00:03:20.638,854] <inf> internal_uart_m: Received op result msg from 9160 13
[00:03:20.638,946] <inf> internal_uart_m: Message length is: 6
```

Σχήμα 4.11: Εκκίνηση υποσυστήματος nRF52840 του κεντρικού κόμβου.

Στην εικόνα 4.11 παρουσιάζεται η λειτουργία του κεντρικού κόμβου, του υποσυστήματος nRF52840, που διαχειρίζεται το δίκτυο αισθητήρων, όπως περιγράφηκε στην αντίστοιχη ενότητα ανάλυσής του. Συγκεκριμένα βλέπουμε τα εξής σημεία:

- Σημείο 1: Εκκινεί το λειτουργικό σύστημα.

- Σημείο 2: Εκκινεί ο μηχανισμός Bluetooth FSM.
- Σημείο 3: Ξεκινάει η αναζήτηση συμβατών συσκευών, δηλαδή κόμβων αισθητήρων προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύνδεση.
- Σημείο 4: Ξεκινάει εκ νέου αναζήτηση κόμβου αισθητήρων, κάτι που υποδηλώνει ότι βρέθηκε ήδη ένας κόμβος και πραγματοποιήθηκε σύνδεση με αυτόν, οπότε ο κεντρικός κόμβος αναζητά τον επόμενο. Αυτή η διαδικασία περιγράφηκε αναλυτικά στην υποενότητα [3.4.1.1](#).
- Σημείο 5: Πραγματοποιήθηκε η πρώτη μέτρηση από τον μηχανισμό Measurements FSM που αναλύθηκε στην υποενότητα [3.4.1.2](#). Κάτω από το σημείο παρουσιάζονται τα δεδομένα που λήφθησαν κατά την πρώτη μέτρηση. Παρατηρούμε στο σημείο 5 ότι έγινε λήψη μετρήσεων μόνο για τη γραμμή καλλιέργειας 2, αφού ο κόμβος αισθητήρων είχε ρυθμιστεί προηγουμένως ότι ανήκει σε αυτή τη γραμμή.
- Σημεία 6 - 12: Μετά τη λήψη των μετρήσεων από τον κόμβο αισθητήρων, ο μηχανισμός Measurements FSM μεταδίδει την αντίστοιχη πληροφορία στον μηχανισμό Control FSM (που αναφέρεται στο σημείο 6 ως environment_control_m). Ο μηχανισμός Control FSM διαπιστώνει ότι έχει διαθέσιμη πληροφορία μόνο για τη γραμμή καλλιέργειας 2, και με βάση τις μετρήσεις που έλαβε, πήρε τις αποφάσεις να κρατήσει τα συστήματα προσαρμογής συνθηκών των υπόλοιπων γραμμών κλειστά (σημεία 6, 10, 11, 12). Αντίστοιχα στα σημεία 7, 8, 9 φαίνεται ότι ο μηχανισμός Control FSM αποφάσισε να κρατήσει τον ανεμιστήρα της γραμμής 2 κλειστό, ενώ ενεργοποίησε το ποτιστικό σύστημα και τα φώτα της γραμμής.
- Σημείο 13: Στο σημείο 13 έγινε λήψη μηνύματος MESSAGE_OPERATION_RESULT. Αυτό συνέβη διότι αφότου λήφθησαν μετρήσεις από τον μηχανισμό Measurements FSM, αυτός τις προώθησε στο υποσύστημα nRF9160, επομένως το υποσύστημα nRF9160 απάντησε με το μήνυμα MESSAGE_OPERATION_RESULT, προκειμένου να ενημερώσει το υποσύστημα nRF52840 ότι έλαβε τις μετρήσεις. Αυτή η διαδικασία εξηγήθηκε στην υποενότητα [3.4.1.4](#).

4.2.3.3 Κεντρικός κόμβος - nRF9160

```
*** Booting Zephyr OS build v2.7.99-ncs1-1 *** 1
%XMODEMSLEEP: 4
%XMODEMSLEEP: 4
%XMODEMSLEEP: 4,0
+CEREG: 2,"1F40","03116247",9
+CSCON: 1
+CEREG: 1,"1F40","03116247",9,,,,"11100000","11100000"
%XTIME: "21","22014081753321","01"
[00:00:04.873,474] <inf> internal_uart_m: Got UART 2
+CSCON: 0
+CSCON: 1
[00:00:18.883,789] <inf> coap_m: Null coap payload received
+CSCON: 0
+CSCON: 1
[00:01:13.129,364] <inf> internal_uart_m: Received raw mean data message from 52 2
840
[00:01:13.132,354] <inf> internal_uart_m: Received gpio control msg from 52840
[00:01:13.132,385] <inf> gpio_interface_m: Controlling 9160 gpios 3
```

Σχήμα 4.12: Εκκίνηση υποσυστήματος nRF9160 του κεντρικού κόμβου.

Στην εικόνα 4.12 παρουσιάζεται η λειτουργία του κεντρικού κόμβου, του υποσυστήματος nRF9160, που διαχειρίζεται το δίκτυο NB-IoT, όπως περιγράφηκε στην αντίστοιχη ενότητα ανάλυσής του. Συγκεκριμένα βλέπουμε τα εξής σημεία:

- Σημείο 1: Εκκίνηση του λειτουργικού συστήματος του υποσυστήματος nRF9160.
- Σημείο 2: Πραγματοποιήθηκε προώθηση των μετρήσεων από την πλευρά του υποσυστήματος nRF52840.
- Σημείο 3: Αφότου ο μηχανισμός Control FSM του υποσυστήματος nRF52840 έλαβε τις αποφάσεις για την ρύθμιση των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών στην εγκατάσταση της καλλιέργειας, προώθησε τις αποφάσεις αυτές στην πλευρά nRF9160. Συγκεκριμένα, η πλευρά nRF52840 προώθησε στην πλευρά nRF9160 μήνυμα τύπου MESSAGE_CONTROL_GPIOS που αναλύθηκε στην υπενότητα 3.4.1.4. Αυτή η συμπεριφορά συνάδει με την περιγραφή του μηχανισμού Control FSM που έγινε στην υπενότητα 3.4.1.3, όπου, αφότου ληφθούν μετρήσεις από τον μηχανισμό Measurements FSM του υποσυστήματος nRF52840, ο μηχανισμός Control FSM τις αναλύει και παίρνει αποφάσεις για τη ρύθμιση των συστημάτων προσαρμογής συνθηκών στην εγκατάσταση κάθετης καλλιέργειας (ανεμιστήρας, ποτιστικό σύστημα, φωτισμός). Έτσειρα ο μηχανισμός Control FSM θα αποστέλλει μήνυμα τύπου MESSAGE_CONTROL_GPIOS που εμπεριέχει τις απαραίτητες πληροφορίες ώστε η πλευρά nRF9160 να ενεργοποιήσει τα αντίστοιχα συστήματα (ενεργοποιώντας τα αντίστοιχα GPIOs).

Με τη βοήθεια των παραθύρων αποσφαλμάτωσης που παρουσιάστηκαν στην υπενότητα 4.2.3 επιβεβαιώθηκε λοιπόν η βασική λειτουργικότητα του δικτύου αισθητήρων, που περιγράφηκε κατά την ανάλυση της εφαρμογής, στην ενότητα 3.

Κεφάλαιο 5

Μελλοντική εργασία

Στις προηγούμενες ενότητες προτάθηκε μια λύση ασύρματου δικτύου αισθητήρων με σκοπό τον αυτοματοποιημένο (και όχι μόνο) έλεγχο μιας εγκατάστασης κάθετης καλλιέργειας. Παρουσιάστηκε μια συνολική αρχιτεκτονική, που περιλαμβάνει αρκετές τεχνολογίες, προκειμένου αφενώς να υλοποιηθεί το μετρητικό σύστημα και αφετέρου να δημιουργηθεί μια διεπαφή με τον χρήστη, προκειμένου και ο ίδιος να αλληλεπιδρά με το σύστημα. Όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα 4, οι στόχοι για ενεργειακή αυτονομία των κόμβων αισθητήρων έχουν επιτευχθεί και η διεπαφή που δημιουργήθηκε με τον χρήστη είναι άμεση και εύχρηστη. Η συνολική υλοποίηση, ωστόσο, επιδέχεται αρκετές βελτιώσεις προκειμένου να θεωρηθεί πλήρης και να καλύπτει της περισσότερες ανάγκες που μπορεί να έχει ένας χρήστης αυτού του συστήματος. Μερικές ιδέες που θα μπορούσαν να καλυφθούν σε μελλοντική εργασία είναι οι εξής:

- Υλοποίηση Android εφαρμογής: Στην υποενότητα 3.3 παρουσιάστηκε η εξάρτηση από την εφαρμογή της Nordic, προκειμένου να ρυθμιστεί ένας κόμβος αισθητήρων. Θα μπορούσε λοιπόν σε μελλοντική εργασία να υλοποιηθεί μια τέτοια εφαρμογή για να καλύπτει αυτή την ανάγκη.
- Σχεδίαση πλακετών για τον κεντρικό κόμβο και για τον κόμβο αισθητήρων: Η υλοποίηση έγινε κάνοντας χρήση των πλακετών ανάπτυξης της Nordic. Αυτές, όπως παρουσιάστηκε στην υποενότητα 2.2, εμπεριέχουν αρκετά άλλα υποκυλώματα, τα οποία η εφαρμογή δε χρειάζεται άμεσα (όπως η υποστήριξη GNSS της πλακέτας nRF9160DK ή το κύκλωμα αποσφαλμάτωσης που περιέχουν και οι 2 πλακέτες ανάπτυξης). Φτιάχνοντας εξειδικευμένες πλακέτες που θα περιλαμβάνουν τα ολοκληρωμένα nRF52840 και nRF9160 θα μπορούσε να μειώσει το συνολικό κόστος του υλικού και να στήσει τις βάσεις για δημιουργία εμπορικού προιόντος.
- Ασφάλεια δεδομένων: Η αλληλεπίδραση με τον χρήστη παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.5. Ο web server είναι ένας ανοιχτός server που μπορεί να έχει πρόσβαση

ο καθένας ανά πάσα στιγμή. Σε μελλοντική εργασία θα μπορούσε να υλοποιηθεί η υποδομή για ασφαλή είσοδο του χρήστη, με κωδικούς πρόσβασης, στα δεδομένα του.

- **Πρόσθετες λειτουργίες:** Στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκαν κατά βάση οι κύριοι μηχανισμοί προκειμένου τα διάφορα υποσυστήματα που περιγράφηκαν στην ενότητα. **3** να συνεργάζονται επιτυχώς. Σε μελλοντική εργασία θα μπορούσαν αυτοί οι μηχανισμοί να εμπλουτισθούν με περισσότερες δυνατότητες προκειμένου η εμπειρία χρήσης του συστήματος να βελτιωθεί. Για παράδειγμα θα ήταν αρκετά σημαντικό να σχεδιαστεί μια πιο οργανωμένη ιστοσελίδα που θα προσφέρει στον χρήστη μεγαλύτερη διαφάνεια για το σύστημά του, αλλά και καλύτερη αλληλεπίδραση με αυτό.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Harris. and L. Small, ``A summary of bluetooth low energy," 2020. [Online]. Available: <https://www.dta.mil.nz/assets/Publications/A-Summary-of-Bluetooth-Low-Energy.pdf>
- [2] M. Afaneh, ``Ble primer," *Interrupt*, Jul 2019. [Online]. Available: <https://interrupt.memfault.com/blog/bluetooth-low-energy-a-prime>
- [3] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino, and D. Formica, ``Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review," *Sensors*, vol. 17, no. 12, p. 2898, 2017.
- [4] ``Bluetooth low energy characteristics, a beginner's tutorial." [Online]. Available: <https://devzone.nordicsemi.com/guides/short-range-guides/b/bluetooth-low-energy/posts/ble-characteristics-a-beginners-tutorial>
- [5] ``Zephyr project," <https://www.zephyrproject.org/>, accessed: 18-07-2022.
- [6] N. N. Zolkifli, A. Ngah, and A. Deraman, ``Version control system: A review," *Procedia Computer Science*, vol. 135, pp. 408--415, 2018.
- [7] M. Gokarna, ``Devops phases across software development lifecycle," 2020.
- [8] *3.6V Primary lithium-thionyl chloride (Li-SOCl₂) High energy density AA-size bobbin cell*, Saft Specialty Battery Group. [Online]. Available: <https://www.tme.eu/Document/675bc13462a8c9578549ecf09cc4c465/SAFT-LS14500.pdf>
- [9] *BME280 Combined humidity and pressure sensor*, BOSCH, document version : 1.6. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf>
- [10] *BH1750 Ambient Light Sensor IC*, ROHM. [Online]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- [11] M. Delorme and A. Santini, ``Energy-efficient automated vertical farms," *Omega*, 2022.

- [12] A. Santini, E. Bartolini, M. Schneider, and V. G. de Lemos, ``The crop growth planning problem in vertical farming," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 294, pp. 377--390, 2021.
- [13] F. B. de Oliveira, H. Forbes, D. Schaefer, and J. M. Syed, ``Lean principles in vertical farming: A case study," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 712--717, 2020.
- [14] A. Zaręba, A. Krzemińska, and R. Kozik, ``Urban vertical farming as an example of nature-based solutions supporting a healthy society living in the urban environment," *Resources*, 2021.
- [15] K. K. Benke and B. A. Tomkins, ``Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture," *Sustainability: Science, Practice and Policy*, vol. 13, pp. 13 -- 26, 2017.
- [16] T. V. Gerrewey, N. Boon, and D. Geelen, ``Vertical farming: The only way is up?'' *Agronomy*, 2021.
- [17] E. S. Mohamed, A. Belal, S. K. Abd-Elmabod, M. A. El-Shirbeny, A. Gad, and M. Zahran, ``Smart farming for improving agricultural management," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2021.
- [18] K. Jha, A. Doshi, P. Patel, and M. Shah, ``A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence," *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2019.
- [19] M. H. M. Saad, N. M. Hamdan, and M. R. Sarker, ``State of the art of urban smart vertical farming automation system: Advanced topologies, issues and recommendations," *Electronics*, vol. 10, p. 1422, 2021.
- [20] ``Bluetooth 5.2," https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=521059, accessed: 09-08-2022.
- [21] C. Coleman, ``A practical guide to ble throughput," *Interrupt*, Sep 2019. [Online]. Available: <https://interrupt.memfault.com/blog/ble-throughput-primer>
- [22] ``About mcuboot." [Online]. Available: <https://www.mcuboot.com/about/>
- [23] ``Lesson 2 : Ble profiles services characteristics and network topology." [Online]. Available: <https://embeddedcentric.com/lesson-2-ble-profiles-services-characteristics-device-roles-and-network-topology/>
- [24] M. Aboubakar, M. Kellil, and P. Roux, ``A review of iot network management: Current status and perspectives," *J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, pp. 4163--4176, 2022.

- [25] B. Bansal and S. Rana, ``Internet of things: Vision, applications and challenges," *international journal of engineering trends and technology*, vol. 47, pp. 380--384, 2017.
- [26] M. Kashyap, V. Sharma, and N. Gupta, ``Taking mqtt and nodemcu to iot: Communication in internet of things," *Procedia Computer Science*, vol. 132, pp. 1611--1618, 2018.
- [27] A. Lazidis, K. Tsakos, and E. G. M. Petrakis, ``Publish-subscribe approaches for the iot and the cloud: Functional and performance evaluation of open-source systems," *Internet of Things*, 2022.
- [28] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao, and K. Hwang, ``Narrow band internet of things," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20557--20577, 2017.
- [29] S. K. Routray, K. P. Sharmila, E. Akanskha, A. Ghosh, L. Sharma, and M. Pappa, ``Narrowband iot (nb-iot) for smart cities," *2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, pp. 393--398, 2021.
- [30] S. K. Routray, E. Akanskha, K. P. Sharmila, L. Sharma, A. Ghosh, and M. Pappa, ``Narrowband iot based support functions in smart cities," *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, pp. 1459--1464, 2021.
- [31] J. Wirges and U. Dettmar, ``Performance of tcp and udp over narrowband internet of things (nb-iot)," *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoTaIS)*, pp. 5--11, 2019.
- [32] S. S. Basu, J. Haxhibeqiri, M. Baert, B. Moons, A. Karaagac, P. Crombez, P. Camerlynck, and J. Hoebcke, ``An end-to-end lwm2m-based communication architecture for multimodal nb-iot/ble devices," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 20, 2020.
- [33] M. A. Tariq, M. Khan, M. T. R. Khan, and D. Kim, ``Enhancements and challenges in coap—a survey," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 20, 2020.
- [34] Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, ``The Constrained Application Protocol (CoAP)," RFC 7252, Jun. 2014. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7252>
- [35] V. Seoane, C. García-Rubio, F. Almenáres, and C. Campo, ``Performance evaluation of coap and mqtt with security support for iot environments," *Comput. Networks*, vol. 197, p. 108338, 2021.

- [36] ``nRF52840DK," <https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF52840-DK-product-brief.pdf?la=en&hash=5D78D8104D4FC04D539DBBACFB5150F34487447>, accessed: 01-08-2022.
- [37] ``BME280 sensor," bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/, accessed: 09-08-2022.
- [38] ``Soil moisture sensor," https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193, accessed: 09-08-2022.
- [39] ``Light sensor," <https://datasheetspdf.com/pdf-file/679289/Rohm/BH1750FVI/1>, accessed: 09-08-2022.
- [40] ``Raspberry pi," <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>, accessed: 09-08-2022.
- [41] J. A. Stankovic and R. R. Rajkumar, ``Real-time operating systems," *Real-Time Systems*, vol. 28, pp. 237--253, 2004.
- [42] W. Cedeño and P. A. Laplante, ``An overview of real-time operating systems," *Journal of Laboratory Automation*, vol. 12, pp. 40 -- 45, 2007.
- [43] R. Ramakrishnan, ``Database management systems (2nd ed.).pdf," 2000.
- [44] P. Jha and R. Khan, ``A review paper on devops: Beginning and more to know," *International Journal of Computer Applications*, 2018.
- [45] ``Azure DevOps," <https://docs.microsoft.com/el-gr/azure/devops/user-guide/what-is-azure-devops?toc=%2Fazure%2Fdevops%2Fget-started%2Ftoc.json&bc=%2Fazure%2Fdevops%2Fget-started%2Fbreadcrumb%2Ftoc.json&view=azure-devops>, accessed: 01-08-2022.
- [46] A. K. Gupta, A. Raman, N. Kumar, and R. Ranjan, ``Design and implementation of high-speed universal asynchronous receiver and transmitter (uart)," *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, pp. 295--300, 2020.
- [47] D. Trivedi, A. Khade, K. Jain, and R. Jadhav, ``Spi to i2c protocol conversion using verilog," *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)*, pp. 1--4, 2018.
- [48] Wikipedia, ``MAC address --- Wikipedia, the free encyclopedia," <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=MAC%20address&oldid=1107874543>, 2022, [Online; accessed 11-September-2022].

- [49] ``VS code," <https://code.visualstudio.com/docs/editor/whyvscode>, accessed: 04-08-2022.
- [50] ``nRF Connect for VS code," [https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-VS-Code/Tutorials#:~:text=The%20nRF%20Connect%20for%20VS,cross%2Dplatform%20and%20popular%20IDE.}, accessed: 04-08-2022.](https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-VS-Code/Tutorials#:~:text=The%20nRF%20Connect%20for%20VS,cross%2Dplatform%20and%20popular%20IDE.)
- [51] *SEN0193 Capacitive Soil Moisture Sensor*, DFROBOT. [Online]. Available: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/SEN0193_Web.pdf
- [52] ``flask python lib," <https://flask.palletsprojects.com/en/2.2.x/>, accessed: 09-08-2022.
- [53] ``Power profiler kit ii." [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2>

Παράρτημα Α'

Εγχειρίδιο χρήσης εφαρμογής

A'.1 Αρχική ρύθμιση

Οι κόμβοι αισθητήρων προσφέρονται στο χρήστη ήδη συνδεδεμένοι με τους κατάλληλους αισθητήρες.

Ένας μετρητικός κόμβος αφού συνδεθεί με τη μπαταρία και ενεργοποιηθεί, κατά την εκκίνηση περνά από το στάδιο του Configuration. Στο στάδιο αυτό, αν ο χρήστης δεν έχει ήδη ορίσει τη γραμμή καλλιέργειας στην οποία ανήκει ο κόμβος, καλείται να συνδεθεί με αυτόν και να την ορίσει. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της ειδικής εφαρμογής που προσφέρει η Nordic, κατασκευάστρια εταιρεία των μικροελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν.

Η εφαρμογή με όνομα nRF Connect, που προσφέρεται από την εταιρεία Nordic Semiconductors, διαθέσιμη μέσω του Playstore σε συσκευές με λογισμικό Android, διευκολύνει σημαντικά τον χρήστη καθώς όσο ο κόμβος βρίσκεται σε advertising mode και αναμένει το configuration, η εφαρμογή μέσα από το γραφικό της περιβάλλον απεικονίζει τις διαθέσιμες BLE συσκευές προς σύνδεση.

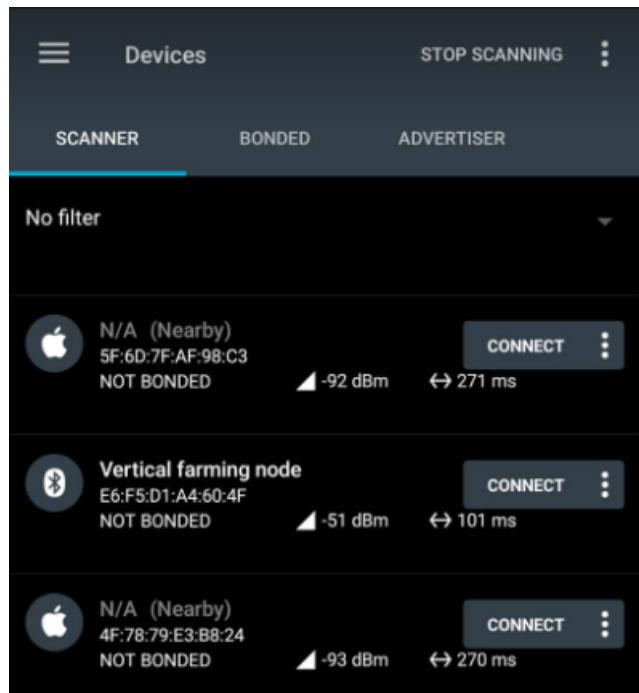


Σχήμα A'.1: Εφαρμογή nRF Connect για εύκολη ρύθμιση από τον χρήστη.

Οι κόμβοι αισθητήρων εμφανίζονται με το όνομα Vertical farming node. Σε περίπτωση που δύο κόμβοι είναι ταυτόχρονα ενεργοί στο στάδιο αυτό, διαχωρίζονται από τη MAC Address τους. Ωστόσο για την ευκολότερη ρύθμιση, προτείνεται η ρύθμιση ενός κόμβου τη φορά πριν ενεργοποιηθεί ο επόμενος.

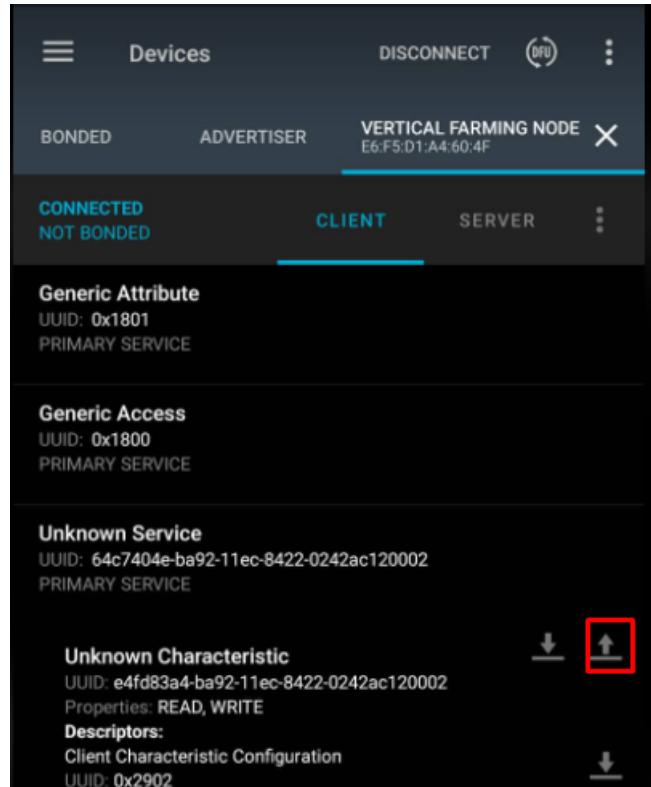
Οδηγίες αρχικής ρύθμισης:

- **Βήμα 1ο:** Ενεργοποίηση του αισθητήριου κόμβου (sensor node).
- **Βήμα 2ο:** Άνοιγμα της εφαρμογής nRF Connect και αναζήτηση συσκευών προς σύνδεση. Σύνδεση με το μόλις ενεργοποιημένο vertical farming node.

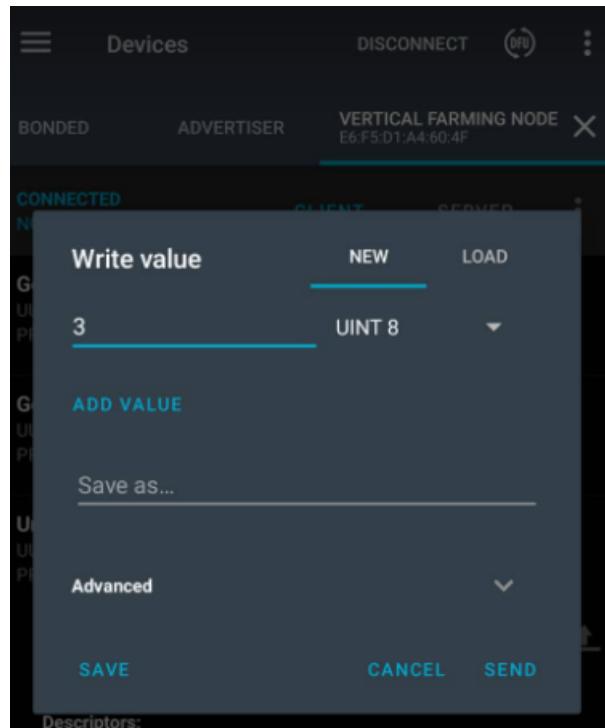


Σχήμα A'.2: Αναζήτηση διαθέσιμων BLE συσκευών με την εφαρμογή nRF Connect.

- **Βήμα 3ο:** Επιλογή του χαρακτηριστικού για τη γραμμή καλλίεργειας (Row Id) και αποστολή της επιθυμητής τιμής. Το χαρακτηριστικό Row ID διαχρίνεται με βάση το UUID του. [3.1](#)



Σχήμα Α'.3: BLE Configuration Service.



Σχήμα Α'.4: Αποστολή τιμής για τη γραμμή καλλιέργειας στην οποία ανήκει ο κόμβος.

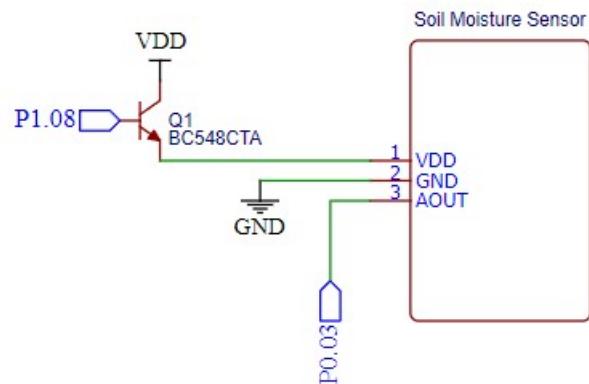
Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα ορίζουμε πως η γραμμή καλλιέργειας στην οποία ανήκει ο κόμβος είναι η γραμμή 3.

Χρησιμοποιώντας το κουμπί Button 1 της πλακέτας, ο κόμβος αισθητήρων επανέρχεται στις εργοστασιακές του ρυθμίσεις.

A'.2 Επανατοποθέτηση αισθητήρων

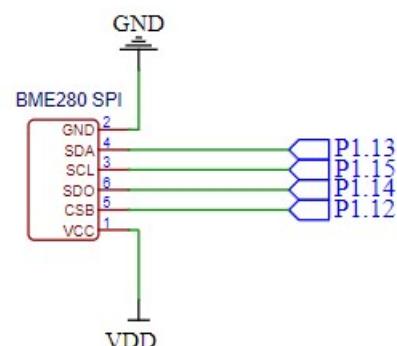
Σε περίπτωση που κάποιος αισθητήρας αποσυνδεθεί ή είναι λανθασμένα συνδεδεμένος και ο χρήστης δε λαμβάνει σωστές μετρήσεις, τότε θα πρέπει να συνδέσει τους αισθητήρες σύμφωνα με τις παραχάτω εικόνες.

Soil Moisture Sensor Connection



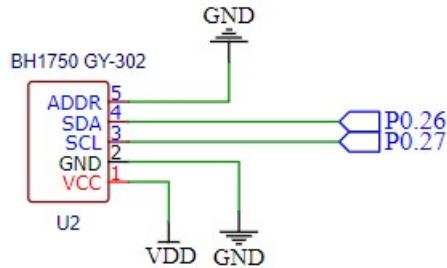
Σχήμα A'.5: Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας εδάφους.

Temperature and Humidity Sensor Connection



Σχήμα A'.6: Συνδεσμολογία αισθητήρα υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (BME280).

Light Intensity Sensor Connection

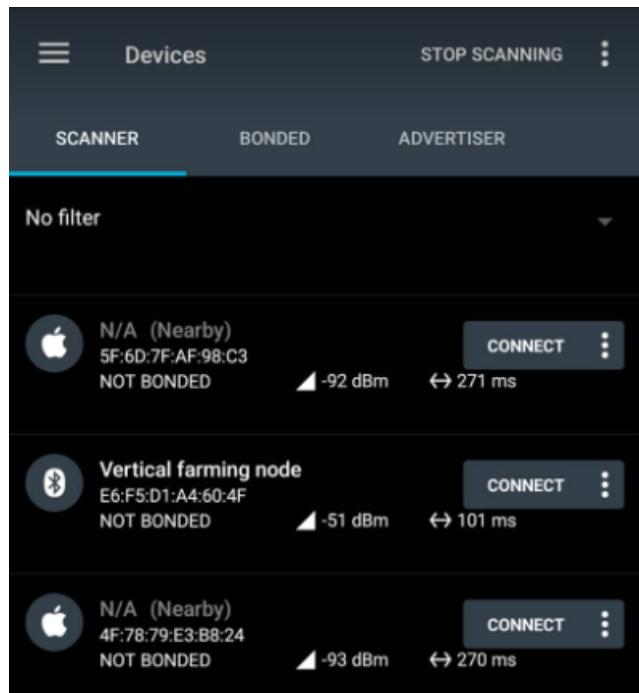


Σχήμα A'.7: Συνδεσμολογία αισθητήρα έντασης φωτός.

A'.3 Firmware update - Περιγραφή διαδικασίας

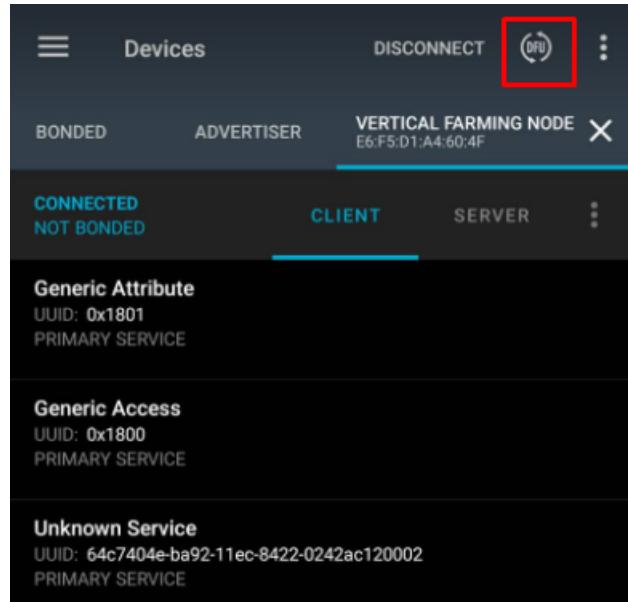
Ακολουθούν οι οδηγίες χρήσης προς αναβάθμιση του λογισμικού ενός sensor node.

- **Βήμα 1ο:** Ενεργοποίηση του αισθητήρου κόμβου (sensor node).
- **Βήμα 2ο:** Άνοιγμα της εφαρμογής nRF Connect και αναζήτηση συσκευών προς σύνδεση. Σύνδεση με το μόλις ενεργοποιημένο vertical farming node.



Σχήμα A'.8: Αναζήτηση διαθέσιμων BLE συσκευών με την εφαρμογή nRF Connect.

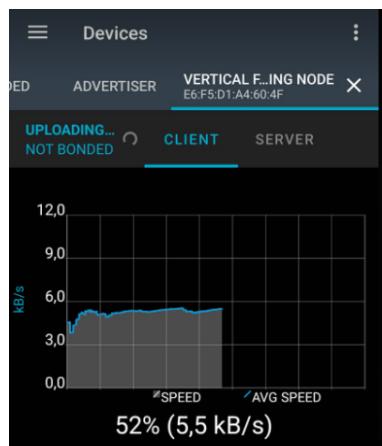
- **Βήμα 3ο:** Επιλογή αναβάθμισης λογισμικού αφού συνδεθούμε με τον κόμβο.



Σχήμα A'.9: Επιλογή Device Firmware Update.

- **Βήμα 4ο:** Επιλογή του αρχείου που έχουμε λάβει και της επιλογής Test and Confirm.

Στο σχήμα A'.10 διακρίνεται η απεικόνιση μιας τρέχουσας αναβάθμισης λογισμικού μέσω της εφαρμογής nRF Connect.



Σχήμα A'.10: Επιλογή Device Firmware Update.

A'.4 Σύνδεση κεντρικού κόμβου

Ο κεντρικός κόμβος παραδίδεται έχοντας ήδη συνδεδεμένους διακόπτες υψηλής τάσης (ρελέ). Σε κάθε ρελέ αναγράφεται η συσκεύη που πρέπει να συνδεθεί (π.χ. ανεμιστήρας, φώτα, ...).

Σε κάθε περίπτωση η σύνδεση προτείνεται να γίνει από επαγγελματία ηλεκτρολόγο για την αποφυγή ατυχημάτων.