



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΣΕ ΥΓΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Γκαραγκούνης

Επιβλέπων: Γεώργιος Σταμούλης

Φεβρουάριος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

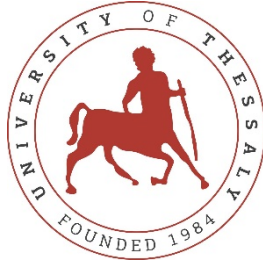
**ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΣΕ ΥΓΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Γκαραγκούνης

Επιβλέπων: Γεώργιος Σταμούλης

Φεβρουάριος 2022



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**SENSORS SETUP FOR
REMOTE FOOD STORAGE MONITORING IN LIQUID
CONDITIONS**

Diploma Thesis

Dimitrios Gkaragkounis

Supervisor: Georgios Stamoulis

February 2022

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Γεώργιος Σταμούλης

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Χρήστος Σωτηρίου

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Γεώργιος Σταμπουλής

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο/Η Δηλών/ούσα

Δημήτριος Γκαραγκούνης

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Dimitrios Gkaragkounis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίβλέπων καθηγητή κύριο Γεώργιο Σταμούλη καθώς και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κύριο Χρήστο Σωτηρίου και κύριο Γεώργιο Σταμπουλή για τη σημαντική τους συμβολή και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Διπλωματική Εργασία

**ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΣΕ ΥΓΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Δημήτριος Γκαραγκούνης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των διαθέσιμων τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός αυτόνομου συστήματος που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Το υπό ανάπτυξη σύστημα στοχεύει στην απομακρυσμένη παρακολούθηση των συνθηκών pH και θερμοκρασίας των τροφίμων που αποθηκεύονται ή παράγονται σε υγρές συνθήκες. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν οι διαθέσιμες αρχιτεκτονικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνδεσιμότητα και τη μεταφορά δεδομένων από το σύστημα μέτρησης μέχρι την υποδομή υπολογιστικού νέφους. Τα ζητούμενα της υλοποίησης επικεντρώνονται στη δυνατότητα λειτουργίας με μπαταρία με την μέγιστη δυνατή αυτονομία, στην εμβέλεια αποστολής δεδομένων και την ασφάλεια των μεταδιδόμενων δεδομένων.

Λέξεις-κλειδιά:

Διαδίκτυο των πραγμάτων, αισθητήρες, ενσωματωμένα συστήματα, απομακρυσμένη παρακολούθηση

Diploma Thesis

SENSORS SETUP FOR REMOTE FOOD STORAGE MONITORING IN LIQUID CONDITIONS

Dimitrios Gkaragkounis

Abstract

This thesis describes the study of available technologies that can be used to create an autonomous system that uses the architecture of the Internet of Things. The under-development system aims to remotely monitor the pH and temperature conditions of food stored or produced in liquid conditions. Specifically, the available architectures that can be used for connectivity and data transfer from the metering system to the cloud computing infrastructure were studied. The requirements of the implementation focus on the possibility of battery operation with the maximum possible autonomy, the range of data transmission and the security of the transmitted data.

Keywords:

Internet of Things, IoT, Embedded systems, sensors, remote monitoring

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i>	<i>xii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>xiii</i>
<i>Abstract</i>	<i>xv</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>xvii</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxi</i>
<i>Συνομογραφίες</i>	<i>xxiii</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	1
1.1.1 Συνεισφορά	2
1.2 Οργάνωση του τόμου	2
Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο	3
2.1 Εισαγωγή	3
2.2 Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0)	3
2.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)	5
2.3.1 Οφέλη της εφαρμογής του IoT	7
2.3.2 Μέγεθος της αγοράς του IoT	7
2.3.3 Πεδίο εφαρμογής του υλοποιημένου συστήματος	8
2.4 Αρχιτεκτονική υλικού δικτύων IoT	8
2.4.1 Μικροελεγκτές (Microcontrollers)	8
2.4.2 Συσκευές πύλες (Gateways).....	10
2.5 Μεταφορά δεδομένων σε ένα δικτύων IoT	11
2.5.1 Μεταφορά δεδομένων ενός επιπέδου	11
2.5.2 Μεταφορά δεδομένων πολλαπλών επιπέδων	12
2.5.3 LoRa & LoRaWAN	13

2.5.4 BLE (Bluetooth Low Energy)	17
2.5.5 ZigBee	19
Κεφάλαιο 3 Υλοποίηση	20
3.1 Επιλογή αρχιτεκτονικής του IoT δικτύου	20
3.2 Επιλογή αρχιτεκτονικής υλικού	21
3.3 Ανάπτυξη πρωτοτύπου	22
3.4 Βελτιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης	24
3.4.1 Δημιουργία βασικού υλικολογισμικού	24
3.4.2 Απομόνωση περιττών εξαρτημάτων	25
3.4.3 Κύκλωμα απενεργοποίησης αισθητήρων	25
3.4.4 Κύκλωμα μπαταρίας και μετατροπέας τάσης	26
3.4.5 Τελική διάταξη	27
3.5 Υποδομή LoRaWAN	29
3.6 Ανάπτυξη υλικολογισμικού (firmware)	31
Κεφάλαιο 4 Απόδοση συστήματος	37
4.1 Ενεργειακή απόδοση	37
4.2 Ακρίβεια μετρήσεων	37
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα	42
5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	42
5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	42
Βιβλιογραφία	45

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Βιομηχανία 4.0 και σχετικές τεχνολογικές εξελίξεις [1].....	3
Εικόνα 2.2: Βιομηχανία 4.0 και καινοτόμες τεχνολογίες [4].....	4
Εικόνα 2.3: Ο μικροελεγκτής ATSAM21G18 [14].....	8
Εικόνα 2.4: Το Arduino Uno [15].....	9
Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ροής δεδομένων σε μια υποδομή IoT [16]	10
Εικόνα 2.6: SIM800 IoT Module [19].....	12
Εικόνα 2.7: Αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων [17].	13
Εικόνα 2.8: Το δίκτυο Proximus [20].....	14
Εικόνα 2.9: Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN [21].....	15
Εικόνα 2.10: Οι κλάσεις συσκευών στο LoRaWAN [21]	16
Εικόνα 2.11: Σύγκριση Bluetooth Classic και BLE [24]	18
Εικόνα 2.12: Δίκτυο πλέγματος Zigbee [27].....	19
Εικόνα 3.1: Arduino MKR WAN 1310 [29].....	21
Εικόνα 3.2: Σχηματικό του πρωτοτύπου	23
Εικόνα 3.3: Firmware με λειτουργία deep sleep	24
Εικόνα 3.4: Ψηφιακός διακόπτης με τη χρήση MOSFET.....	26
Εικόνα 3.5: Μετατροπέας τάσης χαμηλής κατανάλωσης.....	27
Εικόνα 3.6: Σχηματικό βελτιστοποιημένου κυκλώματος.....	27
Εικόνα 3.7: Printed Circuit Board	28
Εικόνα 3.8: Τα υποσυστήματα ενός δικτύου LoRaWAN στο TTS.....	29
Εικόνα 3.9: Προβολή δεδομένων ενός μηνύματος uplink.....	30
Εικόνα 3.10: Αρχική οθόνη εφαρμογής TTS.....	30
Εικόνα 3.11: Σελίδα λεπτομερειών συσκευής	31
Εικόνα 3.12: Διάγραμμα ροής της συσκευής.....	32

Εικόνα 3.13: Αρχικοποίηση LoRaWAN modem & Join Request.....	33
Εικόνα 3.14: Συλλογή μετρήσεων και δημιουργία μέσων όρων	34
Εικόνα 3.15: Αποστολή δεδομένων	35
Εικόνα 3.16: Λήψη δεδομένων από τον Network Server – downlink.....	35
Εικόνα 3.17: Μετάβαση σε λειτουργία χαμηλής ισχύος – deep sleep	36
Εικόνα 4.1: Κατανάλωση ενέργειας σε mA για ένα μήνυμα uplink.....	37
Εικόνα 4.2: Μετρήσεις στο υγρό με σταθερό pH 4.....	38
Εικόνα 4.3: Μετρήσεις σε υγρό με σταθερό pH 7	39
Εικόνα 4.4: Μετρήσεις σε υγρό με σταθερό pH 10	40

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Διαδικτυακό ενδιαφέρον του «Internet of Things» 2004-2021	5
Πίνακας 2: Εξέλιξη κόστους αισθητηρίων [8]	6
Πίνακας 3: Σύγκριση μετρήσεων pH	41

Συντομογραφίες

IoT	Internet of Things
BLE	Bluetooth Low Energy
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
TTS	The Things Stack
API	Application Programming Interface
GPIO	General Purpose Input Output
PCB	Printed Circuit Board

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται ένα σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης των συνθηκών της αποθήκευσης τροφίμων σε υγρές συνθήκες, το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Η τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων ή όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως Internet of Things (IoT σε συντομογραφία), αποτελεί μία από τις κύριες τεχνολογίες που επέτρεψαν την έλευση της νέας εποχής για τη βιομηχανία, που αναφέρεται ως Βιομηχανία 4.0. Μπορεί να βρει εφαρμογή σε όλο το φάσμα της ζωής, από την καθημερινότητα μέχρι τον πρωτογενή τομέα και τη βιομηχανία.

Η τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων βασίζεται στη δημιουργία δικτύων αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, να επικοινωνούν τόσο μεταξύ τους όσο και με ένα κέντρο αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά αξιολογούνται με στόχο τη δημιουργία συμπερασμάτων. Για την αξιοποίηση αυτών των συμπερασμάτων οι αισθητήρες συνδυάζονται με ένα δίκτυο ενεργοποιητών, οι οποίοι στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται ως actuators, που λαμβάνουν εντολές από το κέντρο διαχείρισης για την εκτέλεση ενεργειών αυτόματα, χωρίς την απαίτηση ανθρώπινης παρέμβασης.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των διαθέσιμων τεχνολογιών και η υλοποίηση ενός αυτόνομου συστήματος παρακολούθησης, που βασίζεται στην τεχνολογία Internet of Things. Η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στην συνδεσιμότητα της συσκευής και τον τρόπο που αποστέλλει τα δεδομένα που συλλέγει στο διαδίκτυο. Τα ζητούμενα είναι η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και η δυνατότητα χρήσης μπαταρίας, η καλύτερη αξιοπιστία για λειτουργία σε βιομηχανικό περιβάλλον και η απλοποίηση του τρόπου χρήσης σε σχέση με τον υπάρχοντα εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, θα υλοποιηθεί διάταξη που επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση των τιμών θερμοκρασίας και pH σε υγρές συνθήκες.

Αυτή τη στιγμή στη βιομηχανία τροφίμων η παρακολούθηση επιτυγχάνεται με ενσύρματα συστήματα παρακολούθησης. Αυτά δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο εντός των εγκαταστάσεων της βιομηχανίας αλλά δεν επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση αλλά ούτε και την αποθήκευση και εκμετάλλευση των δεδομένων με σκοπό τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών. Βασίζονται σε ηλεκτρονικά συστήματα υψηλού κόστους, όπως οι ελεγκτές PLC (Programmable Logic Controllers), δύσκολα στη χρήση, την εγκατάσταση και με υψηλό κόστος αγοράς. Σημαντικά οφέλη της εφαρμογής εμφανίζονται κυρίως στα τρόφιμα, τα οποία κατά την αποθήκευση τους υπόκεινται σε διαδικασίες ζύμωσης ή ωρίμανσης, όπως τα γαλακτοκομικά/τυροκομικά

προϊόντα, τα προϊόντα ελιάς, το κρασί και η μύρα. Σε αυτού του είδους τα τρόφιμα κατά τις διαδικασίες ζύμωσης ή ωρίμανσης, για την βέλτιστη αποτελεσματικότητα των διαδικασιών, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία, το pH κ.α.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δυνατότητα συλλογής δεδομένων με ικανοποιητική ακρίβεια στη μέτρηση και η μεταφοράς τους στο πρώτο επίπεδο μιας υποδομής υπολογιστικού νέφους από όπου θα μπορούν να μεταφερθούν σε διαδικτυακές πλατφόρμες αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων.

1.1.1 Συνεισφορά

Οι μεθοδολογία για την ανάπτυξη του συστήματος μέτρησης ακολούθησε τα παρακάτω βήματα:

1. Μελετήθηκαν οι διαθέσιμες αρχιτεκτονικές ενός IoT δικτύου
2. Επιλέχθηκε η κατάλληλη αρχιτεκτονική, ώστε να ικανοποιηθούν τα ζητούμενα
3. Έγινε σύγκριση των τεχνολογιών LoRa, BLE & Zigbee, ώστε να επιλεχθεί η ιδανικότερη, σύμφωνα με τις ανάγκες του συστήματος
4. Επιλέχθηκε ο κατάλληλος μικροελεγκτής, συμβατός με την τεχνολογία επικοινωνίας που επιλέχθηκε
5. Δημιουργήθηκε πρωτότυπο βασισμένο στον επιλεχθέντα μικροελεγκτή
6. Αναπτύχθηκε και βελτιστοποιήθηκε ενεργειακά το πρωτότυπο
7. Αναπτύχθηκε κατάλληλο υλικολογισμικό (firmware), το οποίο υλοποιεί όλες τις ζητούμενες λειτουργίες
8. Δοκιμάστηκε η απόδοση του συστήματος

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το επιστημονικό και τεχνολογικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες που οδήγησαν στην Βιομηχανία 4.0, καθώς και ο ρόλος του Internet of Things σε αυτή. Επίσης, παρουσιάζεται η τεχνολογική μελέτη και η παρουσίαση των τεχνολογιών που εξετάστηκαν.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος και η αρχιτεκτονική του, τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε λογισμικού.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η απόδοση του συστήματος, ο τρόπος αξιολόγησης, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η επιτευχθείσα αυτονομία μπαταρίας .

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα συμπεράσματα από τη χρήση του συστήματος, τόσο σε εργαστηριακές συνθήκες όσο και σε πιλοτικές δοκιμές.

Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο

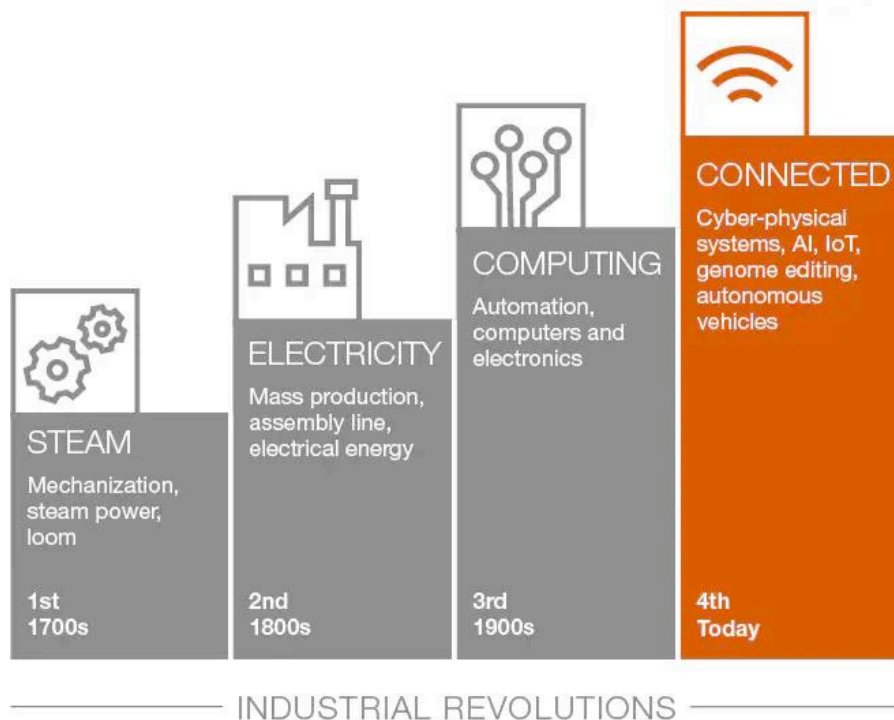
2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα ευρήματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πεδίο της Βιομηχανίας 4.0 και στο πεδίο της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων ή Internet of Things.

2.2 Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0)

Ο όρος Βιομηχανία 4.0 προήλθε το 2011 από ένα έργο στη στρατηγική υψηλής τεχνολογίας της Γερμανικής κυβέρνησης. Εισήχθη δημόσια την ίδια χρονιά στην Έκθεση του Ανόβερου με τον Γερμανό καθηγητή Wolfgang Wahlster να αποκαλείται ο εφευρέτης του όρου περιγράφοντας με αυτόν την τάση προς την αυτοματοποίηση και την ανταλλαγή δεδομένων σε τεχνολογίες και διαδικασίες παραγωγής [1].

Από την πρώτη βιομηχανική επανάσταση, η οποία βασίστηκε στην εφεύρεση της ατμομηχανής, έχουν σημειωθεί μέχρι και σήμερα μεγάλες τεχνολογικές εξελίξεις και αλλαγές στην καθημερινότητα και σε όλες τις εκφάνσεις της ζωής. Στην Εικόνα 2.1, παραθέτουμε μία γραφική ιστορική αναδρομή των βιομηχανικών επαναστάσεων, οι οποίες έχουν συμβεί μέχρι και σήμερα, ενώ αναφέρεται και η σχετική τεχνολογία ή οι σχετικές καινοτομίες, για το χρόνο εκείνο, τεχνολογίες που επέτρεψαν την κάθε βιομηχανική επανάσταση.

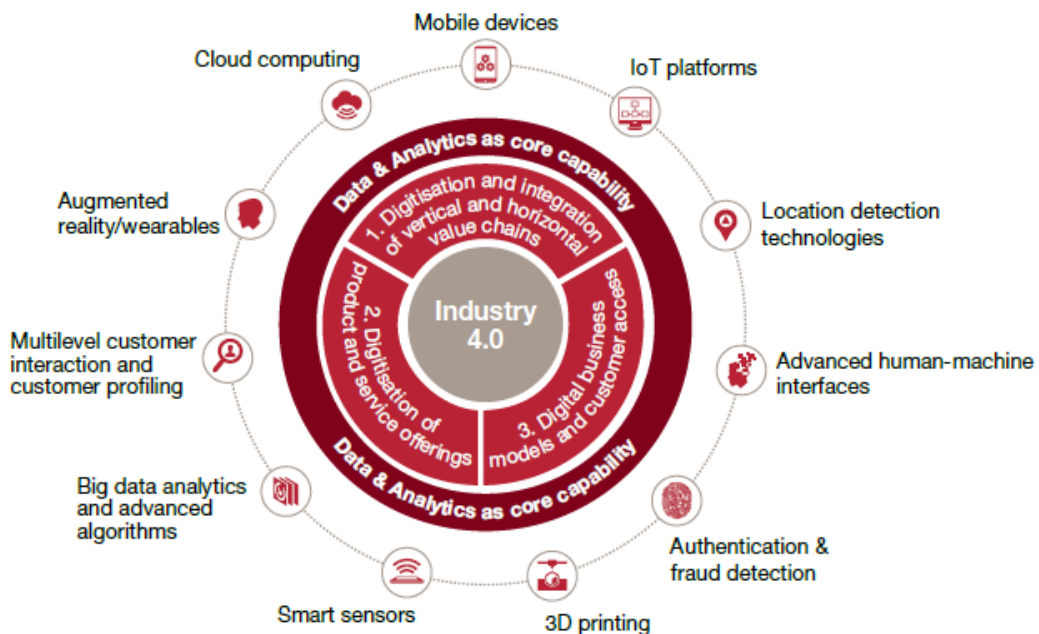


Εικόνα 2.1: Βιομηχανία 4.0 και σχετικές τεχνολογικές εξελίξεις [1]

Η ανάγκη για ένα μοντέλο βιώσιμης ανάπτυξης, η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης όλων των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και κυρίως της βιομηχανίας και η ανάγκη κάλυψης των ολοένα αυξανόμενων αναγκών σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας, οδήγησαν στην έλευση της μετάβασης που ονομάζουμε Βιομηχανία 4.0.

Από την άλλη, οι τεχνολογικές εξελίξεις της τελευταίας δεκαετίας, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη, εξελίξεις στους τομείς της ηλεκτρονικής, των υπολογιστών και των επικοινωνιών, εξελίξεις όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) και το Διαδίκτυο των Υπηρεσιών (Internet of Services) που κατέστησαν εφικτή τη διασύνδεση του φυσικού κόσμου με τον ψηφιακό κόσμο και την επιτήρηση αλλά και τον έλεγχο του φυσικού κόσμου με χρήση υπολογιστικών συστημάτων, το Διαδίκτυο 2.0, το υπολογιστικό νέφος (cloud computing), τα Big Data κ.α. κατέστησαν εφικτή τη Βιομηχανία 4.0 [2] [3].

Η φιλοσοφία πίσω από την Βιομηχανία 4.0 είναι η μετάβαση σε ένα μοντέλο όπου ο φυσικός κόσμος διασυνδέεται με τον ψηφιακό κόσμο μέσω δικτύων αισθητηρίων, τα οποία συλλέγουν δεδομένα από τον φυσικό κόσμο και μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους και με ένα κεντρικό υπολογιστικό σύστημα για την μεταφορά των δεδομένων αυτών, και δικτύων «ενεργοποιητών», δηλαδή συσκευών οι οποίες μπορούν να δέχονται εντολές από ένα κεντρικό υπολογιστικό σύστημα και να αλληλοεπιδρούν με το φυσικό περιβάλλον.



Εικόνα 2.2: Βιομηχανία 4.0 και καινοτόμες τεχνολογίες [4]

Γίνεται αντιληπτή η δυνατότητα που προσφέρουν οι καινοτόμες αυτές τεχνολογίες για τη συλλογή δεδομένων από το φυσικό κόσμο, τη μετάδοσή τους σε ένα υπολογιστικό σύστημα, όπου και αν αυτό βρίσκεται, την επεξεργασία τους και τη λήψη αυτόματων

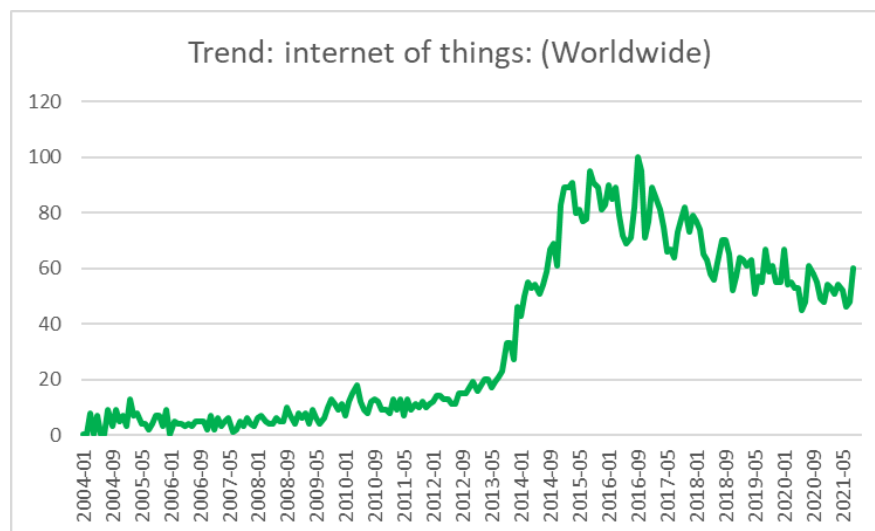
αποφάσεων ή και την εκτέλεση των αποφάσεων και αυτόματων σεναρίων αντίστοιχα με τα δεδομένα που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο.

Αναμένονται οφέλη τόσο σε ό,τι αφορά στην καλύτερη και ταχύτερη λήψη αποφάσεων όσο και σε ό,τι αφορά στη μείωση της πιθανότητας ανθρώπινου σφάλματος κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης αλλά και σε ό,τι αφορά στο χρόνο απόκρισης από την ανίχνευση μίας κατάστασης μέχρι τη λήψη απόφασης και την εκτέλεσή της. Παραπάνω, στην Εικόνα 2.2, παρατίθενται γραφικά οι τεχνολογίες στις οποίες βασίστηκε η Βιομηχανία 4.0, οι οποίες συνοψίζουν την παροχή της δυνατότητας συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων από τον φυσικό κόσμο.

2.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Το IoT είναι μία τεχνολογία που ήρθε να καλύψει την ανάγκη των ανθρώπων να μετρούν δεδομένα από τον φυσικό κόσμο διαρκώς, με ακρίβεια και να λαμβάνουν αποφάσεις με βάση τα συλλεγόμενα δεδομένα από τον φυσικό κόσμο τα οποία μεταφέρονται στον ψηφιακό κόσμο. Το IoT αποτελείται από ένα ευρύ δίκτυο συσκευών οι οποίες διασυνδέονται μεταξύ τους και με το Διαδίκτυο, έχουν τη δυνατότητα να μετρούν δεδομένα από τον φυσικό κόσμο και να τα μεταφέρουν από το μία συσκευή στην άλλη. Πιο συγκεκριμένα, βασίζεται σε αισθητήρες, συσκευές και πρωτόκολλα επικοινωνίας, καθώς και μονάδες αποθήκευσης και επεξεργασίας των συλλεγόμενων δεδομένων.

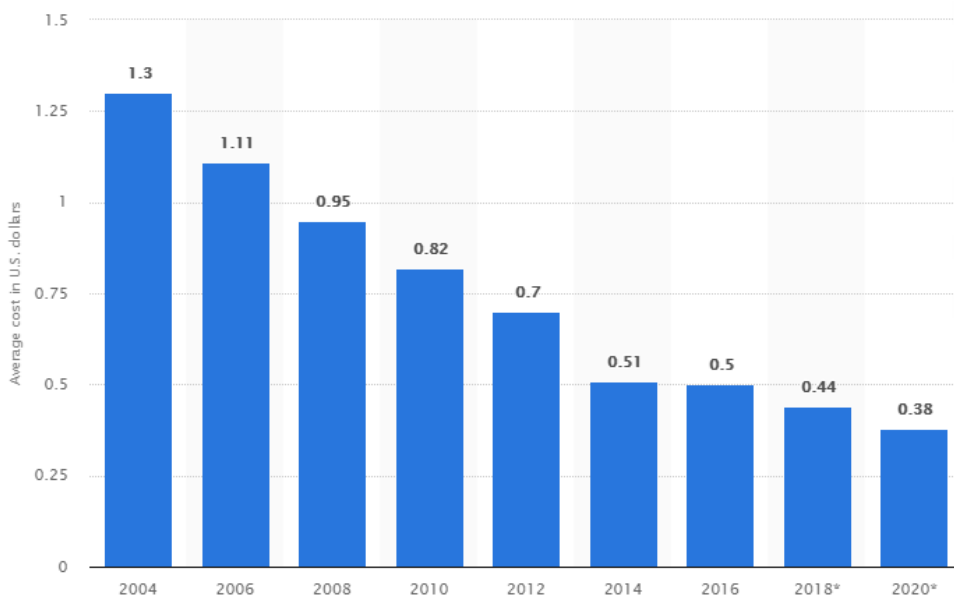
Ο όρος IoT προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Kevin Ashton στα πλαίσια έρευνας για την τεχνολογία RFID το 1999 [5]. Η πρώτη συσκευή που ενσωμάτωσε την αρχιτεκτονική του IoT λειτούργησε πολύ νωρίτερα, χωρίς να έχει προταθεί ο όρος για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, και ήταν ένας αυτόματος πωλητής Coca-Cola στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon University. Ο έξυπνος αυτός αυτόματος πωλητής στόχευε στη διαρκή αναπλήρωση των αποθεμάτων αναψυκτικών, καθώς ήταν συνδεδεμένο μέσω του Διαδικτύου με τον προμηθευτή και μετέδιδε πληροφορίες σχετικά με το απόθεμά του [6].



Πίνακας 1: Διαδικτυακό ενδιαφέρον του «Internet of Things» 2004-2021

Από το 1999 το ενδιαφέρον για το IoT αυξάνει σταθερά καθώς ολοένα και περισσότεροι αντιλαμβάνονται τα πλεονεκτήματα που εισάγει. Μάλιστα, αποτελεί μία εκ των βασικών τεχνολογιών στις οποίες στηρίχθηκε η Βιομηχανία 4.0. Σύμφωνα με τον δείκτη τάσεων της Google που απεικονίζει ο Πίνακας 1, το λήμμα IoT έφτασε στο μέγιστο του ενδιαφέροντος των χρηστών το 2016, ενώ έκτοτε το ενδιαφέρον έχει καμφθεί, υποδηλώνοντας ότι η τεχνολογία αυτή έχει περάσει σε φάση ωριμότητας.

Σε ό,τι αφορά στους παράγοντες οι οποίοι ενίσχυσαν και υποστήριξαν την ανάπτυξη της τεχνολογίας IoT, σε αυτούς συγκαταλέγεται η αλματώδης αύξηση της απόδοσης των μικροεπεξεργαστών, η οποία ξεπερνά το 30%, και η μείωση του κόστους τους, το οποίο φτάνει τις 60 φορές, σε σχέση με την προηγούμενη δεκαετία [7]. Επιπλέον, σε αυτούς συγκαταλέγεται η μείωση του κόστους των διαφόρων ειδών αισθητηρίων, η οποία φτάνει στο 50% κατά την προηγούμενη δεκαετία, μείωση την οποία αναπαριστά ο Πίνακας 2.



Πίνακας 2: Εξέλιξη κόστους αισθητηρίων [8]

Επιπλέον, εντοπίζεται εξέλιξη στο πεδίο των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, ιδίως με την εισαγωγή του IPv6. Σε ό,τι αφορά στο Wi-Fi, όχι μόνον έχει εξελιχθεί με την εισαγωγή του Wi-Fi 6 ή 802.11ax, αλλά παράλληλα εντοπίζεται πλέον σημαντική διαθεσιμότητα Wi-Fi σε μεγάλα αστικά κέντρα. Το δε κόστος των ευρυζωνικών υπηρεσιών έχει μειωθεί 50 φορές την τελευταία δεκαετία, με το κόστος υπηρεσιών όπως το GPRS/GSM να σημειώνει ακόμα μεγαλύτερη μείωση, καθώς οι σχετικές τεχνολογίες βρίσκονται σε φάση ωρίμανσης και αντικατάστασης από τα δίκτυα 4G, 4G+ και 5G τελευταία. Μάλιστα το κόστος χρήσης του διαδικτύου έχει μειωθεί κατά 98% σε σχέση με το 2000 [9], ενώ οι χρήστες έξυπνων και φορητών συσκευών αυξάνουν έντονα κάθε χρόνο, φτάνοντας στους 7,5 δις χρήστες το 2020 από τους 3,7 δις χρήστες το 2016 [11]. Το τελευταίο έχει αξία να σημειωθεί, καθώς κάθε χρήστης έξυπνου τηλεφώνου μπορεί να λειτουργεί ως μέρος του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Επιπλέον, σημαντική είναι και η συνεισφορά της εξέλιξης της επιστήμης των

Δεδομένων και των Μεγάλων Δεδομένων, η οποία κατέστησε εφικτή την αποθήκευση και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως αυτά τα οποία δημιουργούνται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, σε μικρό χρόνο και με βιώσιμο κόστος.

2.3.1 Οφέλη της εφαρμογής του IoT

Η ωρίμανση και εξέλιξη της τεχνολογίας του IoT αναμένεται να ωφελήσει τον σύγχρονο κόσμο σε τρία κύρια επίπεδα· αυτό των καταναλωτών, των επιχειρήσεων και των κρατών, με τα οφέλη να είναι κοινά στα τρία αυτά επίπεδα.

- Μείωση κόστους

Η εφαρμογή του μπορεί να συνεισφέρει στην μείωση του κόστους και στα τρία αυτά επίπεδα. Η μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την εξοικονόμηση ενέργειας, την καλύτερη διαχείριση πόρων και την μείωση των προϊόντων τα οποία απορρίπτονται πριν χρησιμοποιηθούν καθώς είτε λήγουν (αν αφορά σε τρόφιμα) είτε καθίστανται παρωχημένα.

- Αύξηση της αποδοτικότητας

Η καλύτερη διαχείριση πόρων θα οδηγήσει σε αύξηση της αποδοτικότητας όλου του φάσματος λειτουργιών σε κάθε επίπεδο.

- Καινοτομία στη δημιουργία προϊόντων και υπηρεσιών

Η τεχνολογία του IoT καθιστά εφικτή την καλύτερη χαρτογράφηση των αναγκών των καταναλωτών. Η καλύτερη γνώση για τις καταναλωτικές ανάγκες και τάσεις μπορεί να επιτρέψει τον καλύτερο σχεδιασμό καινοτόμων προϊόντων και υπηρεσιών, τα οποία μπορούν να συμβαδίζουν με τις σύγχρονες τάσεις.

- Δημιουργία αξίας

Η εφαρμογή της τεχνολογίας του IoT μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία αξίας σε όλο το φάσμα της οικονομίας. Καθώς διεισδύει περισσότερο η τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων, δημιουργούνται ολοένα περισσότερα δεδομένα, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν πηγή για τη δημιουργία αξίας.

2.3.2 Μέγεθος της αγοράς του IoT

Σύμφωνα με έρευνα της Gartner, περίπου 70 νέες συσκευές συνδέονται στο Διαδίκτυο κάθε δευτερόλεπτο ανά τον κόσμο. Σύμφωνα με την ίδια έρευνα εκτιμάται ότι ο αριθμός των συσκευών που θα είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο θα φτάσει στα 20,4 δις το 2020 από τα 8,4 δις στο τέλος του 2017. Επιπλέον, σημειώνεται ότι περίπου το 70% της αγοράς της τεχνολογίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων αφορά στη Δυτική Ευρώπη, τη Βόρεια Αμερική και την Κίνα [11].

2.3.3 Πεδίο εφαρμογής του υλοποιημένου συστήματος

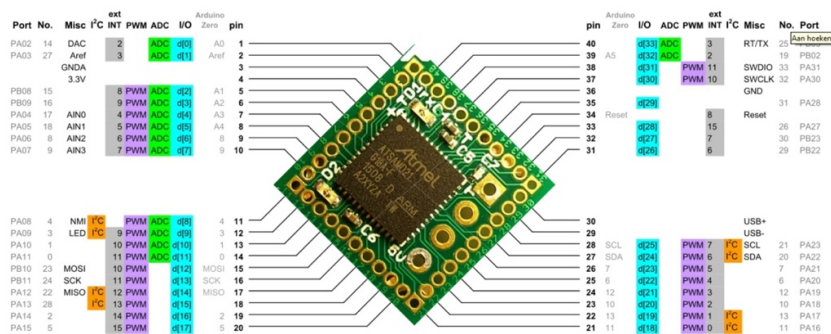
Τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας στα οποία στοχεύει το υλοποιημένο σύστημα, είναι η διαδικασία ποιοτικού ελέγχου της ζύμωσης και ωρίμανσης τροφίμων. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες απαιτούν συνεχή παρακολούθηση του υπό παραγωγή προϊόντος ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να είναι διακριτές οι μεταβολές στη χημική σύσταση του αλλά και η μελέτη της επαναληψιμότητας της διαδικασίας. Στόχος του συστήματος είναι η μέτρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας και του pH του προϊόντος με σκοπό την απομακρυσμένη παρακολούθηση των μεταβολών τους.

2.4 Αρχιτεκτονική υλικού δικτύων IoT

Κάθε υποδομή IoT ξεκινάει με την ύπαρξη μιας συσκευής, που τοποθετείται στο περιβάλλον από το οποίο απαιτείται συλλογή δεδομένων και αλληλεπίδραση. Οι συσκευές αυτές συχνά ονομάζονται κόμβοι ή nodes στη διεθνή βιβλιογραφία. Για την συλλογή των δεδομένων απαιτείται μια διάταξη αισθητήρων η οποία πραγματοποιεί την ανίχνευση των συνθηκών του περιβάλλοντος και μεταφέρει τα δεδομένα στο κύριο μέρος της συσκευής-κόμβου τον μικροελεγκτή.

2.4.1 Μικροελεγκτές (Microcontrollers)

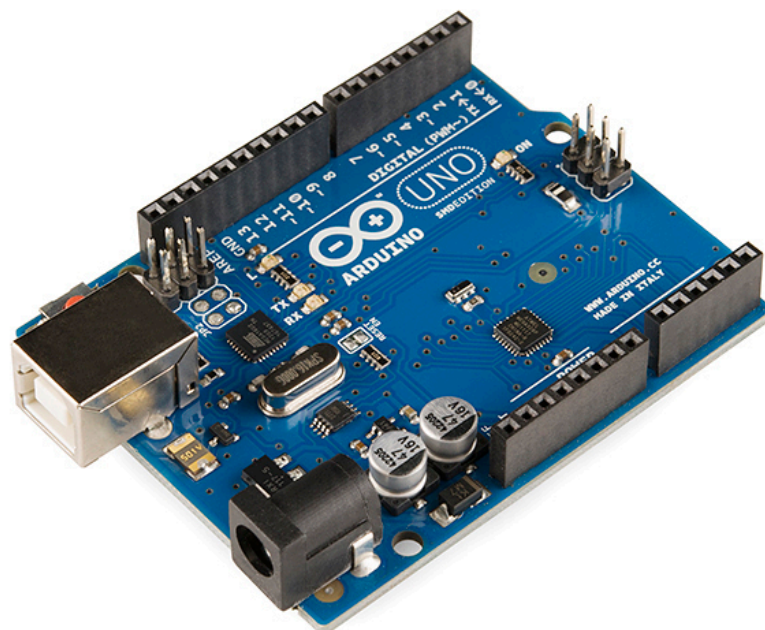
Ένας μικροελεγκτής [13] είναι ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα το οποίο συγκεντρώνει όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα και περιφερειακά σε ένα τσιπ ολοκληρωμένου κυκλώματος. Ένας μικροελεγκτής περιέχει έναν ή περισσότερους πυρήνες επεξεργαστή, ενσωματωμένη μνήμη τυχαίας προσπέλασης, μνήμη για αποθήκευση δεδομένων και προγραμματιζόμενα περιφερειακά εισόδου/εξόδου. Μερικοί μικροελεγκτές περιλαμβάνουν επίσης περιφερειακά για λειτουργίες συνδεσιμότητας όπως Wi-Fi, Bluetooth κλπ. Σε αντίθεση με τους μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούνται σε προσωπικούς υπολογιστές, οι μικροελεγκτές έχουν σχεδιαστεί για ενσωματωμένες εφαρμογές με ευρεία εφαρμογή στις συσκευές Internet of Things. Σε αυτές, η χρήση μικροελεγκτή μειώνει το μέγεθος και το κόστος, σε σύγκριση με μια διάταξη που χρησιμοποιεί ξεχωριστό μικροεπεξεργαστή, μνήμη και συσκευές εισόδου/εξόδου. Στην Εικόνα 2.1 αναπαρίστανται ο μικροελεγκτής ATSAM21G18 στον οποίο θα βασιστεί η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής.



Εικόνα 2.3: Ο μικροελεγκτής ATSAM21G18 [14]

Σημαντικό ρόλο στην απλοποίηση της διαδικασίας δημιουργίας των εφαρμογών IoT, τα τελευταία χρόνια έχουν παίξει οι πλατφόρμες ανάπτυξης εφαρμογών. Πρόκειται για ολοκληρωμένους μικροϋπολογιστές που βασίζονται σε κάποιο μικροελεγκτή, αλλά προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα ανάπτυξης εφαρμογών, που διευκολύνουν τους χρήστες να εξοικειωθούν με την ανάπτυξη εφαρμογών IoT. Η απλότητα στη χρήση τους έχει κάνει τόσο δημοφιλείς, ώστε να χρησιμοποιούνται ακόμη και σε σχολικά μαθήματα. Με τη χρήση αυτών των πλατφορμών, οι οποίες είναι εύκολα προσβάσιμες στην ευρεία κοινότητα προγραμματιστών και μηχανικών, απλοποιείται η διαδικασία ανάπτυξης πρωτοτύπων, που στη συνέχεια θα μετατραπούν σε εμπορικά προϊόντα με δυο από τις σημαντικότερες πλατφόρμες ανάπτυξης είναι οι Raspberry PI και Arduino. Στην πλατφόρμα Arduino βασίστηκε και η ανάπτυξη του συστήματος που περιγράφεται στην παρούσα διπλωματική. Δημοφιλέστερη έκδοση του, αποτελεί το Arduino Uno το οποίο αναπαριστάτε στην Εικόνα 2.4.

Το Arduino [15] αποτελεί ταυτόχρονα μια εταιρεία υλικού και λογισμικού ανοιχτού κώδικα, ένα έργο ανοιχτού κώδικα αλλά και μια κοινότητα χρηστών που σχεδιάζει και κατασκευάζει μικροελεγκτές και κιτ μικροελεγκτών για την κατασκευή ψηφιακών συσκευών. Οι διαφορετικές εκδόσεις πλακέτας Arduino χρησιμοποιούν μεγάλη ποικιλία μικροελεγκτών διαφορετικών αρχιτεκτονικών και χαρακτηριστικών. Είναι εξοπλισμένες με ψηφιακές και αναλογικές ακίδες εισόδου/εξόδου (I/O) που μπορούν να συνδεθούν με άλλα κυκλώματα. Μπορούν να προγραμματιστούν χρησιμοποιώντας τις γλώσσες προγραμματισμού C και C++, μέσω ένα API που είναι επίσης γνωστό ως γλώσσα Arduino. Το Arduino παρέχει επίσης ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE), το οποίο επιτρέπει τόσο την ανάπτυξη εφαρμογών αλλά και το ανέβασμα τους σε κάθε πλακέτα Arduino.



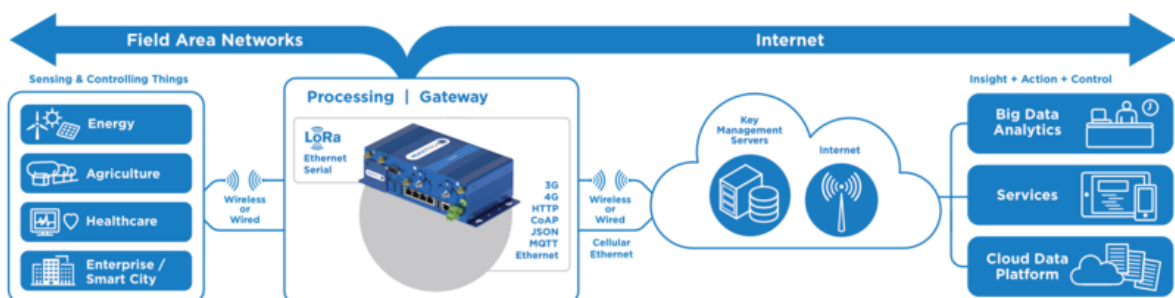
Εικόνα 2.4: Το Arduino Uno [15]

Το Arduino είναι υλικό ανοιχτού κώδικα, προσβάσιμο σε οποιονδήποτε με αρχεία διάταξης και παραγωγής διαθέσιμα για ορισμένες εκδόσεις. Οι περισσότερες πλακέτες Arduino αποτελούνται από έναν μικροελεγκτή της εταιρείας Atmel, αρχιτεκτονικής AVR 8-bit (ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280 ή ATmega2560) με ποικίλες ποσότητες μνήμης flash, pins και δυνατότητες. Ωστόσο, υπάρχουν πλέον διαθέσιμες και πλακέτες άλλης αρχιτεκτονικής, όπως αυτή της ARM, που προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες όσον αφορά τις επιδόσεις.

Βασική διαφορά του Arduino και του Raspberry Pi είναι ότι το πρώτο τρέχει απευθείας και φορτώνεται με τον κώδικα μιας εφαρμογής χωρίς την ύπαρξη λειτουργικού συστήματος σε αντίθεση με το Raspberry. Αυτό του δίνει τη δυνατότητα να τρέχει παρόμοιες εφαρμογές με ελάχιστους πόρους και κατ' επέκταση να λειτουργεί σε συνθήκες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως απαιτείται στο IoT. Το Arduino είναι υλικό ανοιχτού κώδικα, προσβάσιμο σε οποιονδήποτε με αρχεία διάταξης και παραγωγής διαθέσιμα για ορισμένες εκδόσεις. Οι περισσότερες πλακέτες Arduino αποτελούνται από μικροελεγκτή της αρχιτεκτονικής AVR 8-bit ωστόσο, υπάρχουν πλέον διαθέσιμες και πλακέτες άλλης αρχιτεκτονικής, όπως αυτή της ARM, που προσφέρουν αυξημένες δυνατότητες όσον αφορά τις επιδόσεις. Οι μικροελεγκτές Arduino είναι προ-προγραμματισμένοι με ένα bootloader που απλοποιεί τη μεταφόρτωση προγραμμάτων στη μνήμη flash στο chip μέσω σειριακής σύνδεσης με άλλον υπολογιστή. Λόγω της πολύ μεγάλης κοινότητας δημιουργών που έχει δημιουργηθεί γύρω από την πλατφόρμα Arduino, έχει αναπτυχθεί επίσης η αγορά των περιφερειακών, περιλαμβάνοντας μεγάλη ποικιλία αισθητήρων και ενεργοποιητών σε πολύ χαμηλές τιμές η οποία βοηθά στην εύκολη δημιουργία IoT πρωτοτύπων και προϊόντων.

2.4.2 Συσσκευές πύλες (Gateways)

Πέραν της συσκευής κόμβου, συχνά χρησιμοποιούνται και συσκευές που αναλαμβάνουν την συνδεσιμότητα του τοπικού δικτύου IoT. Οι συσκευές αυτές συχνά αναφέρονται ως πύλες ή gateways [16]. Μια πύλη είναι ένας κεντρικός κόμβος για πολλαπλές συσκευές IoT. Οι πύλες αναλαμβάνουν την προώθηση των δεδομένων από το τοπικό IoT δίκτυο σε κάποια απομακρυσμένη υποδομή, που συνήθως λειτουργεί σε υπολογιστικό νέφος.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα ροής δεδομένων σε μια υποδομή IoT [16]

Στην Εικόνα 2.5 παρίσταται το διάγραμμα ροής δεδομένων σε ένα IoT δίκτυο και η θέση μιας συσκευής πύλης σε αυτό.

Άλλες λειτουργίες που μπορεί να παρέχουν οι συσκευές πύλης είναι:

- Σύνδεση των συσκευών μεταξύ τους
- Σύνδεση των συσκευών στο υπολογιστικό νέφος
- Λήψη των δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας σε τοπικό επίπεδο (LORA, Bluetooth, κλπ.) και προώθηση τους στο υπολογιστικό νέφος.
- Φιλτράρισμα δεδομένων. Εισαγωγή μετα-δεδομένων όπως τοποθεσία κλπ.
- Ενίσχυση της ασφάλειας στην αναμετάδοση των δεδομένων

2.5 Μεταφορά δεδομένων σε ένα δικτύων IoT

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν οι διαφορετικές επιλογές πρωτοκόλλων επικοινωνίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα δίκτυο IoT, αναλύοντας είτε συσκευές που είναι μόνιμα συνδεδεμένες στο διαδίκτυο και λειτουργούν αυτόνομα είτε διατάξεις που χρησιμοποιούν πολλαπλά πρωτόκολλα και απαιτούν ενδιάμεσες συσκευές αναμετάδοσης για την αποστολή των δεδομένων [17].

2.5.1 Μεταφορά δεδομένων ενός επιπέδου

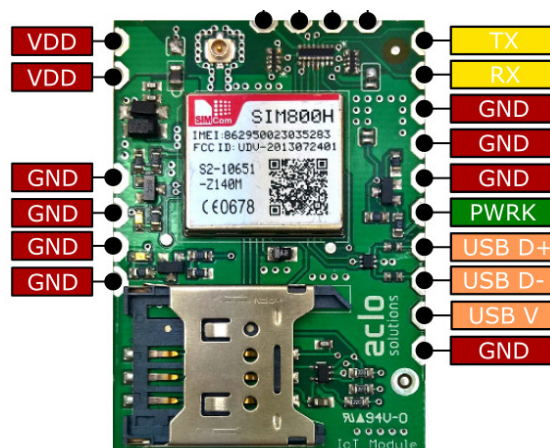
Οι συσκευές τεχνολογίας IoT έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Η επιλογή του πρωτοκόλλου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την τοποθεσία, την απαιτούμενη αλληλεπίδραση με κοντινές συσκευές, τον όγκο των δεδομένων που ανταλλάσσουν με αυτές αλλά και τις διαθέσιμες παροχές ενέργειας και συνδεσιμότητας στην τοποθεσία. Άλλοι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι ο προϋπολογισμός, οι περιορισμοί του κόστους και οι απαιτήσεις στο φυσικό μέγεθος της συσκευής.

Στην απλούστερη μορφή μια υποδομής IoT οι συσκευές έχουν ενσωματωμένη λειτουργικότητα ασύρματης δικτύωσης για σύνδεση στο διαδίκτυο και επικοινωνούν απευθείας με αυτό. Εκεί συνήθως δεν απαιτείται ύπαρξη συσκευής πύλης. Τα δεδομένα συλλέγονται, προετοιμάζονται και αποστέλλονται στο υπολογιστικό νέφος από την ίδια τη συσκευή κόμβο. Οι τρόποι ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι το Wi-Fi ή οι τεχνολογίες δικτύου κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS.

Το Wi-Fi [18] επιλέγεται συνήθως σε συσκευές που θα εγκατασταθούν σε χώρους με υψηλή κάλυψη σε αυτό όπως σπίτια ή χώροι εργασίας. Οι ζώνες κύματος του Wi-Fi έχουν σχετικά υψηλή απορρόφηση και λειτουργούν καλύτερα για χρήση σε οπτική επαφή. Τα φυσικά εμπόδια όπως τα κτίρια μπορεί να μειώσουν σημαντικά την εμβέλεια, παρόλα αυτά βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών δικτύων σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα. Ένα σημείο πρόσβασης (ή hotspot) έχει συχνά εμβέλεια περίπου 20 μέτρων σε εσωτερικούς χώρους, ενώ ορισμένα σύγχρονα σημεία πρόσβασης

μπορούν να φτάσουν εμβέλεια έως και 150 μέτρων σε εξωτερικούς χώρους. Με την πάροδο του χρόνου η ταχύτητα και η απόδοση του Wi-Fi έχουν αυξηθεί. Από το 2019, σε κοντινή απόσταση, ορισμένες εκδόσεις Wi-Fi, που λειτουργούν με κατάλληλο υλικό, μπορούν να επιτύχουν ταχύτητες 9,6 Gbit/s (gigabit ανά δευτερόλεπτο).

Αντίθετα η συνδεσιμότητα μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας εφαρμόζεται σε συσκευές που θα εγκατασταθούν σε απομακρυσμένες τοποθεσίες στις οποίες δεν παρέχεται κάλυψη Wi-Fi. Το GSM και το GPRS συχνά συνδυάζονται σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Η τεχνολογία GSM μεταφέρει τις φωνητικές κλήσεις και τα μηνύματα κειμένου, ενώ η τεχνολογία GPRS χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων μαζί με φωνητικά μηνύματα και μηνύματα κειμένου. Συλλογικά, αυτό το σύστημα αναφέρεται ως σύστημα GSM/GPRS. Οι συσκευές IoT μπορούν να συνδεθούν σε ένα δίκτυο GSM/GPRS με τη χρήση μόντεμ. Ένα από τα δημοφιλή μόντεμ GSM/GPRS είναι η μονάδα SIM800, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.6. Υποστηρίζει συχνότητα Quad-band 850/900/1800/ 1900 MHz. Μπορεί να μεταδίδει πληροφορίες φωνής, SMS και δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Παρέχει επίσης σειριακή επικοινωνία UART για αλληλεπίδραση με κάποιο υπολογιστή ή μικροελεγκτή [19].



Εικόνα 2.6: SIM800 IoT Module [19]

Με τη χρήση των παραπάνω τεχνολογιών, καταλήγουμε σε μια αρχιτεκτονική της συσκευής κόμβου, με την οποία διαθέτει απευθείας και μόνιμη σύνδεση στο διαδίκτυο. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική IoT δικτύου είναι σαφώς απλούστερη παρόλα αυτά περιορισμένη. Συχνά συνδέεται με περιορισμούς κυρίως λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων ή λόγω της περιορισμένης εμβέλειας στην περίπτωση του Wi-Fi με αποτέλεσμα να επιλέγονται πιο σύνθετοι συνδυασμοί πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

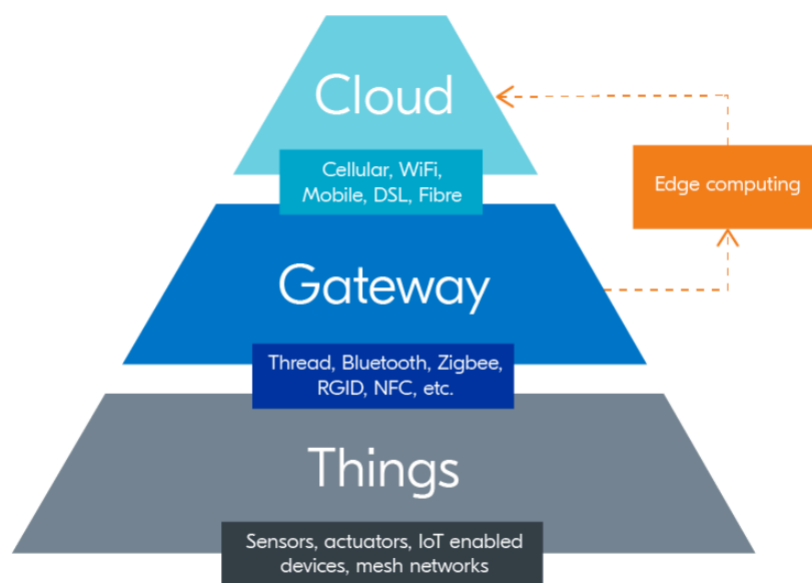
2.5.2 Μεταφορά δεδομένων πολλαπλών επιπέδων

Για την υλοποίηση συσκευών κόμβων υψηλής ενεργειακής αποδοτικότητας αλλά και υψηλής εμβέλειας στη μετάδοση των δεδομένων απαιτείται η χρήση πολλαπλών επιπέδων μετάδοσης δεδομένων. Σε αυτή την περίπτωση η συσκευή πύλη διαχειρίζεται την προώθηση των δεδομένων και υποστηρίζει τουλάχιστον δύο μεθόδους

συνδεσιμότητας, μία χαμηλής κατανάλωσης για την λήψη των δεδομένων από τις συσκευές κόμβους και μια δεύτερη μέθοδο συνδεσιμότητας για την αποστολή των δεδομένων στο υπολογιστικό νέφος η οποία μπορεί να είναι το Wi-Fi, το GSM/GPRS ή ακόμη και η ενσύρματη σύνδεση στο διαδίκτυο. Ο τρόπος μετάδοσης των δεδομένων χωρίζεται στα δυο εξής επίπεδα:

- Μετάδοση των δεδομένων από συσκευές κόμβους σε συσκευές πύλες
- Μετάδοση των δεδομένων από συσκευές πύλες στο υπολογιστικό νέφος

Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζονται τα διαφορετικά επίπεδα μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής. Μερικές από τις συνηθέστερες τεχνολογίες μετάδοσης των δεδομένων από συσκευές κόμβους σε συσκευές πύλες είναι το LoRa, το BLE (Bluetooth Low Energy) και το ZigBee.



Εικόνα 2.7: Αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων [17].

2.5.3 LoRa & LoRaWAN

Το LoRa (από Long Range) [20] είναι μια μέθοδος διαμόρφωσης δικτύου ευρείας περιοχής και ταυτόχρονα χαμηλής κατανάλωσης. Αναπτύχθηκε από την Γαλλική Cycleo και εξαγοράστηκε από τη Semtech, η οποία αποτελεί ιδρυτικό μέλος του LoRa Alliance. Χρησιμοποιεί συνήθως ζώνες ραδιοσυχνότητας κάτω του 1 GHz οι οποίες δεν απαιτούν άδεια χρήσης και αναλυτικότερα τις:

- EU433 (433,05-434,79 MHz) και EU863-870 (863–870/873 MHz) στην Ευρώπη,
- AU915-928/AS923-1 (915–928 MHz) στην Αυστραλία,
- US902-928 (902–928 MHz) στη Βόρεια Αμερική,
- IN865-867 (865–867 MHz) στην Ινδία,
- AU915-928/AS923-1 και EU433 Νοτιοανατολική Ασία,
- 2,4 GHz παγκοσμίως.

Το LoRa είναι το φυσικό επίπεδο ή η ασύρματη διαμόρφωση που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας, ενώ άλλες τεχνολογίες και πρωτόκολλα όπως το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) καλύπτουν τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου. Το LoRa βασίζεται στο φάσμα διαμόρφωσης spread chirp, το οποίο διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά χαμηλής ισχύος με τη διαμόρφωση FSK, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως σε παλαιότερους τύπους ασύρματων συστημάτων, αλλά αυξάνει σημαντικά την εμβέλεια της επικοινωνίας. Το spread chirp χρησιμοποιείται σε στρατιωτικά και διαστημικά συστήματα επικοινωνίας εδώ και δεκαετίες λόγω της μεγάλης εμβέλειας που μπορεί να επιτύχει αλλά και λόγω της αντίστασης του στις παρεμβολές. Το LoRa είναι η πρώτη εφαρμογή χαμηλού κόστους για εμπορική χρήση που βασίζεται σε αυτού του είδους τη διαμόρφωση σήματος.

Το κύριο πλεονέκτημα του είναι η δυνατότητα μεγάλης εμβέλειας της τεχνολογίας σε συνδυασμό με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 0,3 kbit/s έως 27 kbit/s. Μια συσκευή πύλη μπορεί να καλύψει ολόκληρες πόλεις ή εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα με την εμβέλεια να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον και τα εμπόδια σε κάθε τοποθεσία. Το LoRa διαθέτει δυνατότητα σύνδεσης μεγαλύτερη από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας.

Η εμβέλεια που μπορεί να επιτευχθεί από το LoRa μπορεί να φτάσει έως και 5 χιλιόμετρα σε αστικές περιοχές και έως και 15 χιλιόμετρα ή και περισσότερο σε μη-αστικές περιοχές με οπτική επαφή των δύο σημείων.

Στην Εικόνα 2.8 διακρίνονται οι χάρτες κάλυψης από το δίκτυο Proximus που έχει αναπτυχθεί στο Βέλγιο και με ελάχιστες υποδομές καλύπτει μεγάλο μέρος της χώρας.

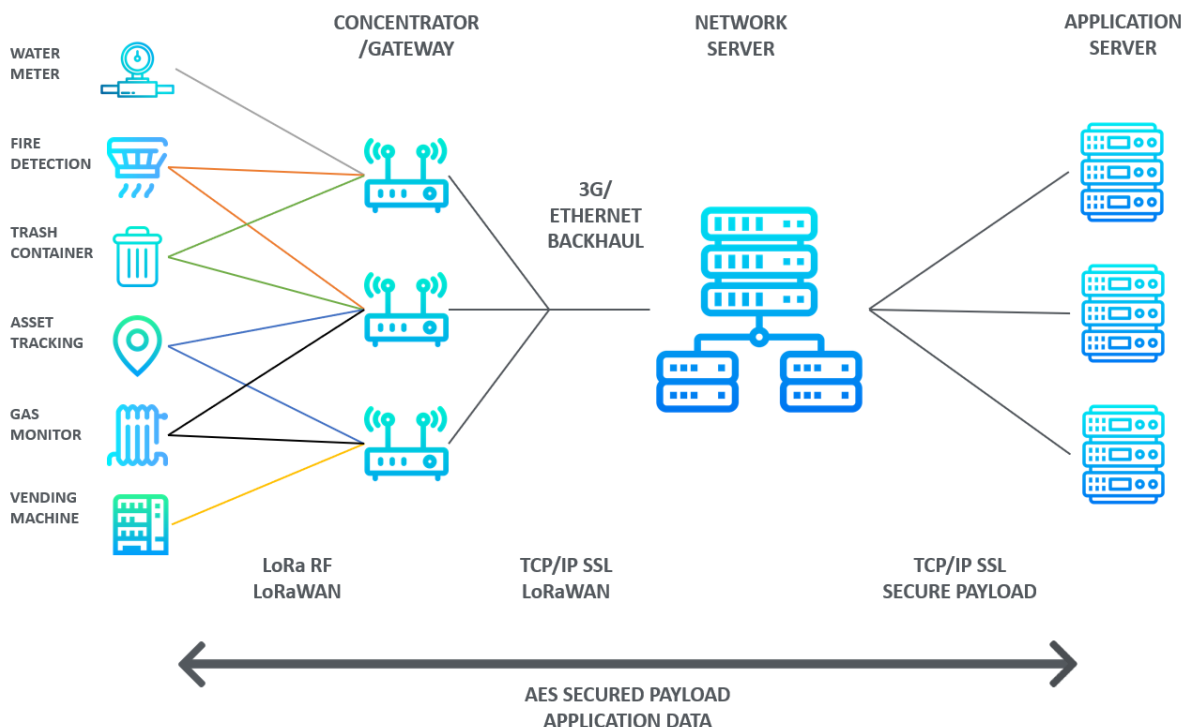


Εικόνα 2.8: Το δίκτυο Proximus [20]

Το LoRaWAN [21] ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική για το δίκτυο ενώ χρησιμοποιώντας το LoRa στο φυσικό επίπεδο επιτρέπει την επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας. Η αρχιτεκτονική του δικτύου, όπως αυτή ορίζεται από τις προδιαγραφές του LoRaWAN, ορίζει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ενός κόμβου, τη χωρητικότητα του δικτύου, την ποιότητα και αξιοπιστία της υπηρεσίας και την ασφάλεια.

- Αρχιτεκτονική Δικτύου

Σε πολλές υπάρχουσες τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς δεδομένων χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονική δικτύου πλέγματος ή mesh. Σε ένα δίκτυο πλέγματος, οι διάφορες συσκευές κόμβοι προωθούν τις πληροφορίες άλλων κόμβων για να αυξήσουν την εμβέλεια της επικοινωνίας επειδή δεν μπορούν μεμονωμένα να φτάσουν τον τελικό παραλήπτη με απευθείας επικοινωνία. Αν και αυτό αυξάνει την εμβέλεια, προσθέτει πολυπλοκότητα, μειώνει τη χωρητικότητα του δικτύου και μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας καθώς οι κόμβοι λαμβάνουν και προωθούν πληροφορίες και από άλλους κόμβους εκτός των δικών τους δεδομένων. Στο LoRaWAN λόγω της μεγάλης εμβέλειας που μπορεί να επιτευχθεί, είναι δυνατή η χρήση της αρχιτεκτονικής αστεριού ή star. Η αρχιτεκτονική αστεριού εστιάζει στη βέλτιστη διάρκεια ζωής της μπαταρίας με τις συσκευές κόμβους να επικοινωνούν απευθείας με τις συσκευές πύλες χωρίς ενδιάμεσες αναμεταδόσεις.



Εικόνα 2.9: Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN [21]

Σε ένα δίκτυο LoRaWAN, οι κόμβοι δεν συσχετίζονται με μια συγκεκριμένη συσκευή πύλη. Αντίθετα, τα δεδομένα που μεταδίδονται από έναν κόμβο λαμβάνονται συνήθως από

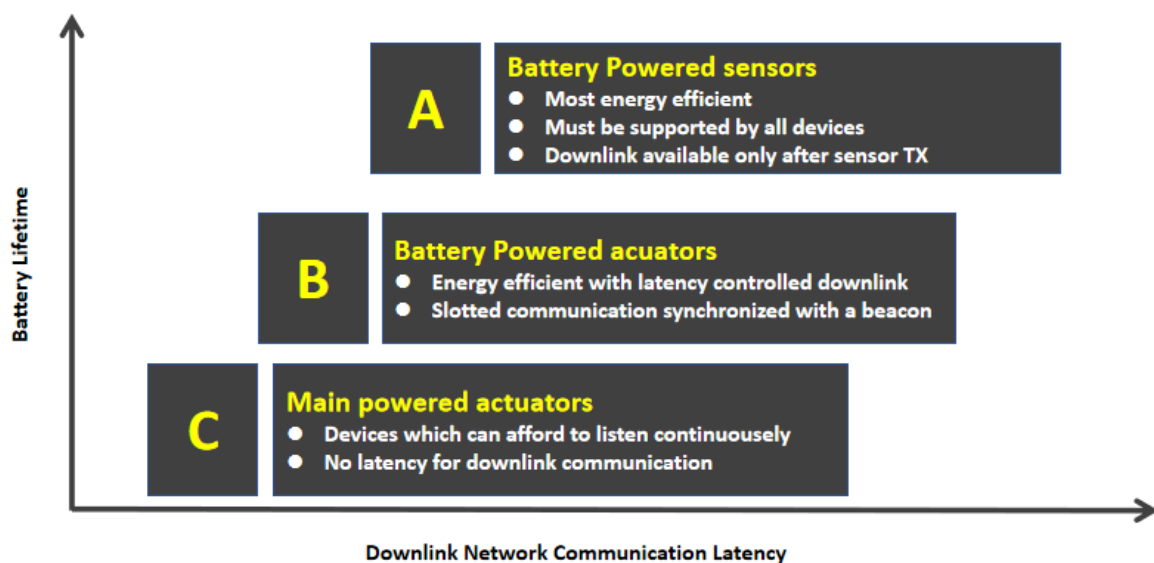
διάφορες πύλες, όπως περιγράφεται στην Εικόνα 2.9. Κάθε πύλη θα προωθήσει το πακέτο που έλαβε από τον τελικό κόμβο στον διακομιστή δικτύου ή network server μέσω κάποιου backhaul (GSM/GPRS, 3G/4G , Ethernet, Wi-Fi). Με αυτό τον τρόπο η πολυπλοκότητα μεταφέρεται στο επίπεδο του διακομιστή δικτύου, ο οποίος διαχειρίζεται το δίκτυο, την ασφάλεια και τις περισσότερες από τις λειτουργίες που προσφέρει το LoRaWAN.

- Χωρητικότητα δικτύου

Για να καταστεί βιώσιμο ένα δίκτυο αστεριού , η συσκευή πύλη πρέπει να έχει πολύ υψηλή χωρητικότητα ή ικανότητα λήψης ταυτόχρονων μηνυμάτων από συσκευές κόμβους. Η υψηλή χωρητικότητα δικτύου σε ένα δίκτυο LoRaWAN επιτυγχάνεται με τη χρήση συσκευών πύλης πολλών καναλιών, ώστε να μπορούν να ληφθούν ταυτόχρονα μηνύματα. Ένα δίκτυο μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και με μία συσκευή πύλη και καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις χωρητικότητας, μπορούν να προστεθούν περισσότερες πύλες. Πρόσθετη λειτουργία του LoRaWAN αποτελεί και ο αλγόριθμος μεταβαλλόμενου ρυθμού δεδομένων ή Adaptive Data Rate (ADR) που προσαρμόζει δυναμικά την χρονική διάρκεια που ένα πακέτο θα κάνει να μεταδοθεί ανάλογα με τους δείκτες που ορίζουν την ποιότητα της μετάδοσης. Μεγαλώνοντας την διάρκεια της μετάδοσης ένα πακέτο είναι πιο εύκολο να ληφθεί από μια μακρινή συσκευή πύλη θυσιάζοντας όμως περισσότερη ενέργεια. Μέσω του αλγόριθμου ADR η διάρκεια μετάδοσης βελτιστοποιείται δυναμικά για κάθε συσκευή κόμβο μειώνοντας έτσι την κίνηση πακέτων στο δίκτυο.

- Κλάσεις συσκευών - Device Classes

Οι συσκευές κόμβοι εξυπηρετούν διαφορετικές εφαρμογές που συνήθως έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις. Οι κλάσεις συσκευών, οι οποίες περιγράφονται στην Εικόνα 2.10, προσαρμόζουν τα περιθώρια που μια συσκευή αποστέλλει ή δέχεται μηνύματα από το δίκτυο με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα 2.10: Οι κλάσεις συσκευών στο LoRaWAN [21]

Κλάση A: Οι συσκευές επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία με το δίκτυο κάθε φορά που η συσκευή ενεργοποιείται για να αποστείλει δεδομένα. Κάθε φορά που η συσκευή στέλνει ένα μήνυμά ακολουθούν δύο σύντομα χρονικά περιθώρια μέσα στα οποία μπορεί να λάβει ένα μήνυμα από το δίκτυο. Η κλάση A είναι η αποδοτικότερη ενεργειακά με τον περιορισμό ότι αν το δίκτυο δεν προλάβει να στείλει κάποιο μήνυμα στη συσκευή στα δύο σύντομα περιθώρια πρέπει να περιμένει την επόμενη φορά που αυτή θα ενεργοποιηθεί.

Κλάση B: Εκτός από τα περιθώρια λήψης της κλάσης A, οι συσκευές κλάσης B ανοίγουν επιπλέον περιθώρια λήψης σε προγραμματισμένες ώρες. Προκειμένου η τελική συσκευή να ανοίξει το παράθυρο λήψης της, την προγραμματισμένη ώρα, λαμβάνει ένα χρονικά συγχρονισμένο μήνυμα από τη συσκευή πύλη. Αυτό επιτρέπει στον διακομιστή δικτύου να γνωρίζει πότε η συσκευή είναι διαθέσιμη. Λόγω των περισσότερων ενεργοποιήσεων των συσκευών αυτό τις κάνει λιγότερο αποδοτικές από αυτές της κλάσης A.

Κλάση C: Οι συσκευές της κλάσης C έχουν σχεδόν συνεχώς ανοιχτό περιθώριο λήψης εκτός από την ώρα που αποστέλλουν κάποιο μήνυμα. Οι συσκευές έτσι δεν μπορούν να τεθούν σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης και αυτό τις κάνει τις λιγότερο αποδοτικές ενεργειακά από όλες τις κλάσεις.

- Ασφάλεια

Το LoRaWAN χρησιμοποιεί δύο επίπεδα ασφάλειας, ένα για το δίκτυο και ένα για την εφαρμογή. Η ασφάλεια στο επίπεδο δικτύου διασφαλίζει την αυθεντικότητα του κόμβου στο δίκτυο ενώ στο επίπεδο της εφαρμογής διασφαλίζει ότι ο πάροχος του δικτύου δεν έχει πρόσβαση στα δεδομένα του τελικού χρήστη. Η κρυπτογράφηση του δικτύου χρησιμοποιεί το αλγόριθμο AES-128.

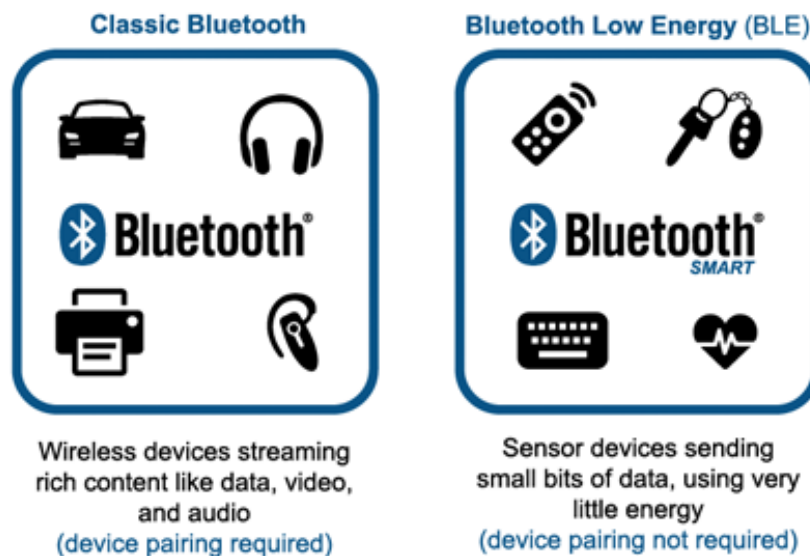
2.5.4 BLE (Bluetooth Low Energy)

Το BLE (Bluetooth Low Energy) [22] [23] είναι μια ασύρματη τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση συσκευών μεταξύ τους. Το BLE λειτουργεί στη ζώνη ISM (Βιομηχανική, Επιστημονική και Ιατρική) των 2,4 GHz και στοχεύει σε εφαρμογές που χρειάζονται λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και μπορεί να χρειαστεί να λειτουργούν με μπαταρίες για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Το BLE ξεκίνησε στην έκδοση 4.0 της προδιαγραφής Bluetooth το 2010 με το αρχικό Bluetooth που ορίστηκε στις προηγούμενες εκδόσεις να αναφέρεται πλέον ως Bluetooth Classic. Δεν θεωρείται αναβάθμιση στο αρχικό Bluetooth Classic, αλλά μια νέα τεχνολογία που χρησιμοποιεί την επωνυμία Bluetooth και εστιάζει στις εφαρμογές Internet of Things όπου μικρές ποσότητες δεδομένων μεταφέρονται με χαμηλότερες ταχύτητες. Τα βασικά πεδία εφαρμογής των δύο προδιαγραφών περιγράφονται στην Εικόνα 2.11.

Η ενεργειακή απόδοση του BLE το έχει κάνει αρκετά ανταγωνιστικό και μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες επιλογές για τη μετάδοση δεδομένων στο IoT κυρίως σε οικιακές συσκευές. Είναι ενεργειακά πιο αποδοτικό από το ZigBee, το Bluetooth classic και

το Wi-Fi και αυτό σημαίνει ότι μπορεί να επιτύχει καλύτερα τη συνδεσιμότητα IoT συσκευών για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, από τις παραπάνω τεχνολογίες ειδικά όταν οι συσκευές τροφοδοτούνται με μπαταρία. Επίσης, ο χαμηλός ρυθμός δεδομένων του BLE το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε περιπτώσεις όπου ανταλλάσσονται μόνο δεδομένα κατάστασης, όπως δεδομένα αισθητήρων. Είναι επίσης η κυρίαρχη τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης στα smartphone. Κύριες εφαρμογές του BLE είναι οι φορούμενες συσκευές ή wearables (fitness trackers, smartwatches κ.α.), οι ιατρικές συσκευές και μετρητές, οι συσκευές οικιακού αυτοματισμού όπως κλειδαριές, λαμπτήρες, αισθητήρες και άλλα. Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Bluetooth Low Energy στις εφαρμογές IoT [24] .



Εικόνα 2.11: Σύγκριση Bluetooth Classic και BLE [24]

Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Χαμηλό εύρος ζώνης – ιδανικό για συλλογή δεδομένων από συσκευές αισθητήρων
- Σχετικά απλή διαδικασία ανάπτυξης εφαρμογών
- Χαμηλό κόστος υλικών

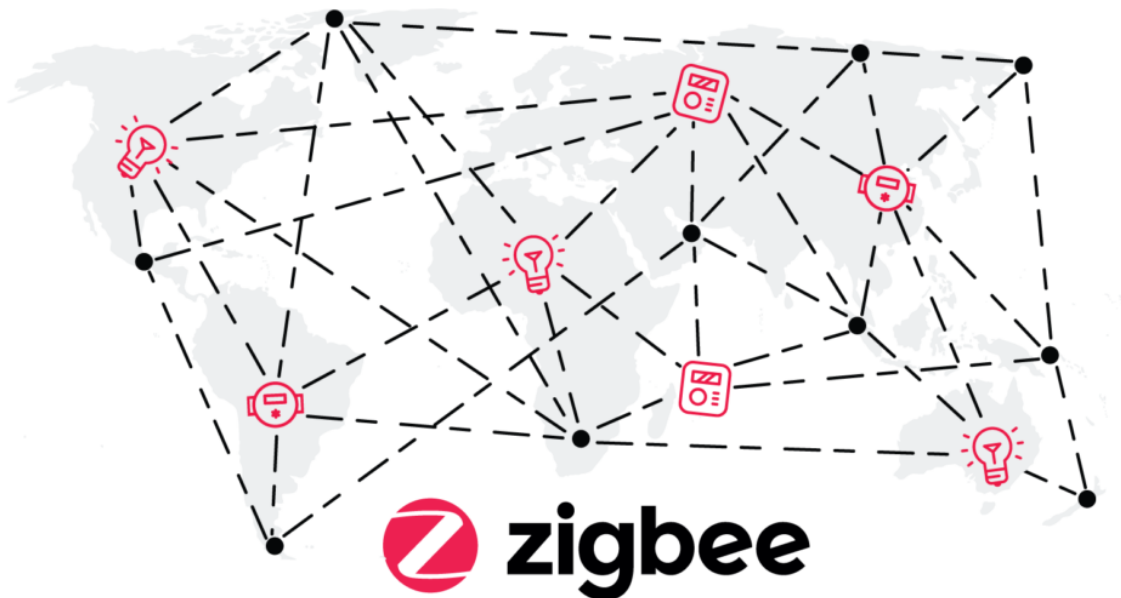
Μειονεκτήματα:

- Περιορισμένη εμβέλεια – Από 30 έως 100 μέτρα.
- Απαιτεί συσκευή πύλης για τη σύνδεση των IoT συσκευών στο διαδίκτυο (smartphones ή αποκλειστικές συσκευές πύλης)
- Παρεμβολές και θόρυβος από άλλα πρωτόκολλα στο φάσμα 2,4 GHz (Wi-Fi, Bluetooth classic, ZigBee κ.λπ.)

2.5.5 ZigBee

Το Zigbee [25] [26] είναι μια ασύρματη τεχνολογία δικτύωσης που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής χαμηλής ισχύος, χαμηλής ταχύτητας δεδομένων και κοντινής απόστασης, όπως οι οικιακοί και βιομηχανικοί αυτοματισμοί, η συλλογή δεδομένων ιατρικών συσκευών και άλλα. Προσφέρει χαμηλή κατανάλωση και έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές χαμηλού εύρους ζώνης που χρειάζονται ασύρματη σύνδεση. Η τεχνολογία που ορίζεται από την προδιαγραφή Zigbee προορίζεται να είναι απλούστερη και φθηνότερη στη χρήση σε σχέση με άλλα ασύρματα προσωπικά δίκτυα περιοχής (WPAN), όπως το Bluetooth ή το Wi-Fi.

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας περιορίζει ωστόσο τις αποστάσεις μετάδοσης στα 10 έως 100 περίπου μέτρα με οπτική επαφή των συσκευών, ανάλογα πάντα με την ισχύ εξόδου του κυκλώματος και το περιβάλλον λειτουργίας. Παρόλα αυτά, οι συσκευές ZigBee μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις περνώντας δεδομένα μέσω ενός δικτύου πλέγματος (mesh network) [26] ενδιάμεσων συσκευών για να φτάσουν σε πιο απομακρυσμένες, όπως αναπαρίσταται στην Εικόνα 2.12. Το ZigBee χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που απαιτούν συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, προσφέροντας μεγάλη διάρκεια ζωής αλλά και ασφαλή δικτύωση που επιτυγχάνεται μέσω της κρυπτογράφησης 128-bit από συμμετρικά κλειδιά που προσφέρεται στα δίκτυα ZigBee.



Εικόνα 2.12: Δίκτυο πλέγματος Zigbee [27]

Κεφάλαιο 3 Υλοποίηση

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύγκριση των τεχνολογιών που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2 και η διαδικασία ανάπτυξης του πρωτοτύπου. Για τη μελέτη και επιλογή της αρχιτεκτονικής που θα χρησιμοποιηθεί βασικό κριτήριο αποτελούν οι δυνατότητες που πρέπει να παρέχει η συσκευή και συγκεκριμένα, η μέγιστη δυνατή αυτονομία λειτουργίας με μπαταρία και η μέγιστη δυνατή εμβέλεια μετάδοσης δεδομένων, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 .

3.1 Επιλογή αρχιτεκτονικής του IoT δικτύου

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η αρχιτεκτονική απευθείας σύνδεσης της συσκευής στο διαδίκτυο, δεν μπορεί να προσφέρει τις απαιτούμενες δυνατότητες στη συσκευή. Στην περίπτωση της σύνδεσης με δίκτυο κινητής τηλεφωνίας GSM/GPRS, είναι δύσκολο να επιτύχουμε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και στην περίπτωση του Wi-Fi είναι εφικτή η υλοποίηση με ικανοποιητική αλλά όχι βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας παρόλα αυτά υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί στην εμβέλεια. Μια υλοποίηση βασισμένη στο Wi-Fi θα απαιτούσε διαθέσιμο και αξιόπιστο δίκτυο σε όλο το χώρο της βιομηχανίας πράγμα που είναι δύσκολα εφικτό.

Στην αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων, οι απαιτήσεις για σύνδεση στο διαδίκτυο και παροχή ηλεκτρικού ρεύματος απαιτούνται μόνο για τις συσκευές πύλες γεγονός που διευκολύνει την υλοποίηση του δικτύου IoT. Συγκρίνοντας τις τρεις διαθέσιμες τεχνολογίες LoRa, BLE και ZigBee, [28] σε όλες θα μπορούσαμε να επιτύχουμε την υλοποίηση μιας συσκευής χαμηλής κατανάλωσης. Ο παράγοντας που καθορίζει την επιλογή της τεχνολογίας αποτελεί η εμβέλεια μετάδοσης. Σύμφωνα με τα δεδομένα του κεφαλαίου 3 μπορούμε να επιτύχουμε:

- 5 χιλιόμετρα εμβέλειας σε αστική περιοχή με τη χρήση του LoRa,
- 30 έως 100 μέτρα με τη χρήση του BLE,
- 10 έως 100 περίπου μέτρα με οπτική επαφή με τη χρήση του ZigBee

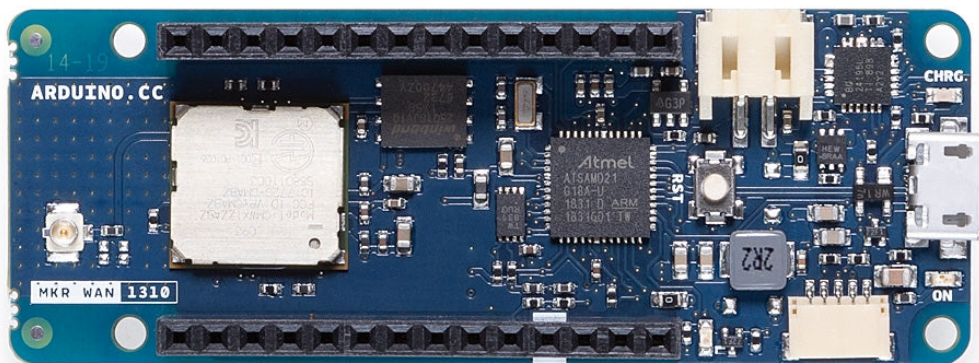
Στην περίπτωση του ZigBee θα μπορούσε να επιτευχθεί αρκετά μεγαλύτερη εμβέλεια με τη χρήση του mesh δικτύου. Παρόλα αυτά, αυτό απαιτεί την ύπαρξη πολλών συσκευών, πράγμα που δεν είναι δεδομένο στην περίπτωση που εξετάζεται. Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και συμπεράσματα, η ιδανική τεχνολογία στην περίπτωση μιας βιομηχανίας τροφίμων είναι το LoRa.

Λαμβάνουμε ως παραδοχή ότι στην τοποθεσία της συσκευής και εντός επιτρεπτής απόστασης υπάρχει διαθέσιμη συσκευή πύλη που θα συλλέγει τα δεδομένα από τη συσκευή κόμβο με τη χρήση του επιλεχθέντος πρωτοκόλλου και θα τα προωθεί στο διαδίκτυο.

3.2 Επιλογή αρχιτεκτονικής υλικού

Όπως περιεγράφηκε και στο Κεφάλαιο 2 , βασικό κομμάτι μιας συσκευής IoT αποτελεί ο μικροελεγκτής. Για την ταχεία ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται κιτ ανάπτυξης ή Development kits βασισμένα σε δημοφιλείς μικροελεγκτές τα οποία περιλαμβάνουν τα αναγκαία εξαρτήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία του μικροελεγκτή (minimal setup) αλλά και επιπρόσθετα εξαρτήματα που βοηθούν στην ανάπτυξη, όπως κυκλώματα για λειτουργία με μπαταρία, κεραίες, κυκλώματα σειριακής επικοινωνίας για μεταφόρτωση κώδικα στο μικροελεγκτή κ.α.

Τέτοια κιτ ανάπτυξης περιλαμβάνονται και στο οικοσύστημα ανάπτυξης Arduino τα οποία πέραν της υλοποίησης σε επίπεδο υλικού περιλαμβάνουν και προεγκατεστημένο το αναγκαίο λογισμικό για τον προγραμματισμό μέσω του Arduino IDE. Στην περίπτωση της τεχνολογίας LoRa προσφέρεται το κιτ ανάπτυξης Arduino MKR1310 [29] το οποίο και επιλέχθηκε για την ανάπτυξη του πρωτοτύπου και αναπαρίσταται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Arduino MKR WAN 1310 [29]

Εκτός της χαμηλής κατανάλωσης και της ενσωματωμένης συνδεσιμότητας LoRa, ο MKR1310 προσφέρει επιπλέον αρκετές λειτουργίες που μπορούν να απλοποιήσουν την υλοποίηση της συσκευής όπως:

- Ενσωματωμένο κύκλωμα διαχείρισης και φόρτισης για μπαταρία ιόντων λιθίου και μετατροπέα τάσης για τροφοδοσία του μικροελεγκτή με την απαιτούμενη τάση.
- Ενσωματωμένος μικροελεγκτής STM32, ο οποίος διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες για την ενσωμάτωση σε δίκτυο LoRaWAN με τη χρήση της βιβλιοθήκης MKRWAN
- Διαθέσιμη συνδεσιμότητα μέσω ακίδων για αλληλεπίδραση με τρίτους αισθητήρες συμβατούς με τα περισσότερα κοινά πρωτόκολλα επικοινωνίας
- Χαμηλό κόστος και διευκολυμένη διαδικασία ανάπτυξης χρησιμοποιώντας το Arduino IDE.

Για την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον απαιτούνται ψηφιακοί αισθητήρες θερμοκρασίας και pH, ικανοί να λειτουργήσουν σε πλήρως υγρές συνθήκες.

Ξεκινώντας από τη μέτρηση θερμοκρασίας, ευρέως διαδεδομένος αισθητήρας στην κοινότητα του Arduino, με δυνατότητα μέτρησης σε υγρό, αποτελεί ο DS18B20 [30]. Πρόκειται για ψηφιακό αισθητήρα που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας 1-Wire, προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια για την ζητούμενη εφαρμογή και ιδιαίτερα εύκολη διαδικασία ανάπτυξης και συλλογής δεδομένων.

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας μπορεί να τροφοδοτηθεί απευθείας από τον μικροελεγκτή και να λειτουργήσει σε εύρος θερμοκρασίας $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ με ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ στο εύρος -10°C έως 85°C . Σημαντικός παράμετρος αποτελεί επίσης η αρκετά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση που κυμαίνεται από $0.75\mu\text{A}$ έως $1\mu\text{A}$.

Για τη μέτρηση pH θα χρησιμοποιηθεί ψηφιακός αισθητήρας με δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων μέσω του ψηφιακού πρωτοκόλλου I2C.

3.3 Ανάπτυξη πρωτοτύπου

Για τις ανάγκες ανάπτυξης αλλά και προγραμματισμού του συστήματος, απαιτείται η δημιουργία ενός πρωτοτύπου που θα περιλαμβάνει όλη την απαραίτητη συνδεσμολογία του μικροελεγκτή με τους επιλεχθέντες αισθητήρες, καθώς και ένα ικανό μέσο τροφοδοσίας ρεύματος του κυκλώματος. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το εξάρτημα breadboard, το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση των υποσυνόλων του κυκλώματος με τη χρήση καλωδίων. Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης breadboard αποτελεί το ότι δεν απαιτείται κόλληση με εξειδικευμένα εργαλεία αλλά και η ευκολία υλοποίησης της συνδεσμολογίας του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Η μεθοδολογία ανάπτυξης του πρωτοτύπου περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Καταγραφή των υποσυστημάτων του κυκλώματος και του απαραίτητου υλικού.
2. Σχεδιασμός του ηλεκτρονικού κυκλώματος και δημιουργία σχηματικού.
3. Υλοποίηση και έλεγχος σωστής λειτουργίας.

Ακολουθεί η περιγραφή των υποσυστημάτων συμπεριλαμβανομένου του τρόπου επικοινωνίας με τον μικροελεγκτή, τις λειτουργικές απαιτήσεις όσον αφορά την τροφοδοσία, καθώς και την συνδεσμολογία.

- Αισθητήρας θερμοκρασίας

Ο αισθητήρας θα τροφοδοτηθεί απευθείας από τον μικροελεγκτή με ονομαστική τάση 3.3 Volt χρησιμοποιώντας τις ακίδες VCC και GND. Για την υλοποίηση της επικοινωνίας μέσω του πρωτοκόλλου 1-Wire, αρκεί η σύνδεση με οποιαδήποτε ακίδα γενικής χρήσης General Purpose Input Output – GPIO, που παρέχονται από τον μικροελεγκτή.

- Αισθητήρας pH I2C

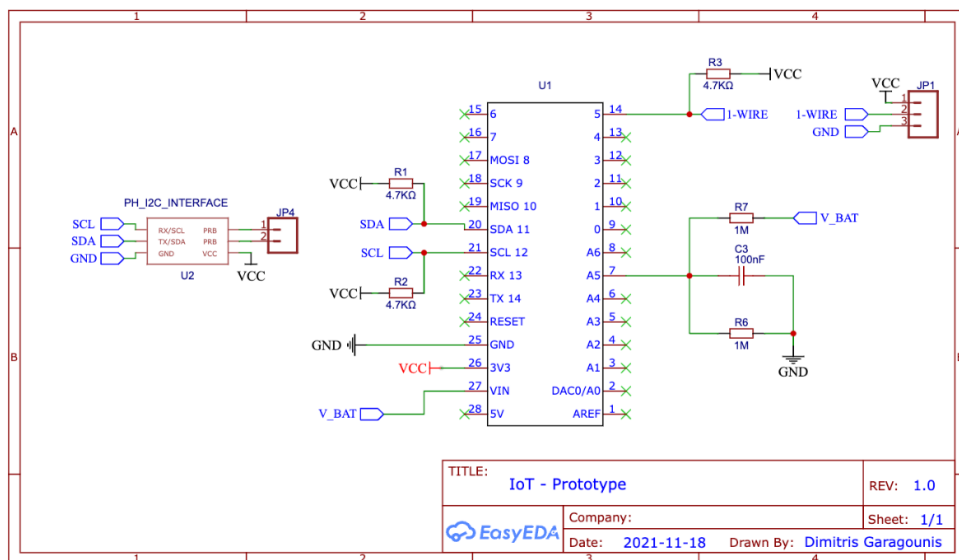
Ο αισθητήρας pH θα τροφοδοτηθεί ομοίως με τον αισθητήρα θερμοκρασίας και συγκεκριμένα απευθείας από τον μικροελεγκτή με ονομαστική τάση 3.3 Volt,

χρησιμοποιώντας τις ακίδες VCC και GND. Για την υλοποίηση της επικοινωνίας θα συνδεθούν οι έξοδοι Serial Data – SDA και Serial Clock SCL της διεπαφής I2C του αισθητήρα με τις αντίστοιχες του μικροελεγκτή. Σε κάθε σύνδεση παρεμβάλλεται ωμική αντίσταση 4,7kΩ τύπου pull-up μεταξύ της γραμμής επικοινωνίας και της ακίδας VCC 3.3V.

- Μπαταρία λιθίου και ενσωματωμένο κύκλωμα διαχείρισης

Ο μικροελεγκτής Arduino MKR WAN 1310 περιλαμβάνει ενσωματωμένο κύκλωμα λειτουργίας και φόρτισης μπαταρίας λιθίου, γεγονός που απλοποιεί αρκετά την υλοποίηση. Πέραν του συστήματος διαχείρισης περιλαμβάνει επίσης μετατροπέα τάσης που λαμβάνει ως είσοδο την τάση της μπαταρίας και τροφοδοτεί τον μικροελεγκτή με σταθερή έξοδο τάσης 3.3V. Για τη λειτουργία του μικροελεγκτή θα χρησιμοποιηθεί μπαταρία λιθίου τύπου 18650 και ονομαστικής χωρητικότητας 3000mAh η οποία θα συνδεθεί απευθείας στην είσοδο που παρέχει ο μικροελεγκτής.

Πρόσθετη δυνατότητα που απαιτείται να υλοποιηθεί είναι μια διεπαφή παρακολούθησης της τάσης της μπαταρίας ώστε ο μικροελεγκτής να μπορεί να παρακολουθεί την κατάσταση της μπαταρίας. Η διεπαφή αυτή θα δημιουργηθεί με μια σύνδεση του θετικού πόλου της μπαταρίας και μιας οποιασδήποτε αναλογικής ακίδας του μικροελεγκτή. Μοναδικός περιορισμός στη συγκεκριμένη λειτουργία αποτελεί το εύρος λειτουργίας της μπαταρίας. Οι κοινές μπαταρίες λιθίου λειτουργούν με ονομαστική τάση περίπου 4.2V σε συνθήκες πλήρους φόρτισης και φθάνουν μέχρι περίπου τα 3.0V κατά την αποφόρτιση. Καθώς οι αναλογικές ακίδες του μικροελεγκτή δεν μπορούν να διαβάσουν τιμές μεγαλύτερες των 3.3V, δημιουργήθηκε κύκλωμα διαιρέτης τάσης, με δυο αντιστάσεις ίδιας ονομαστικής αντίστασης, ώστε η τάση εισόδου να διαιρείται διά δύο και να μετατραπεί από 3.0 - 4.2V σε 1.5 – 2V. Η έξοδος του διαιρέτη τάσης θα συνδεθεί στην αναλογική ακίδα A5. Συνοπτικά, στην Εικόνα 3.2 περιγράφεται η συνδεσμολογία του πρωτοτύπου.



Εικόνα 3.2: Σχηματικό του πρωτοτύπου

3.4 Βελτιστοποίηση ενεργειακής κατανάλωσης

Το παραπάνω πρωτότυπο μπορεί να υλοποιήσει τις λειτουργικότητες που απαιτούνται για τη σωστή μέτρηση των συνθηκών του περιβάλλοντος, παρόλα αυτά μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά ως προς την ενεργειακή του αποτελεσματικότητα. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για να βελτιστοποιηθεί, αναλύεται στις παρακάτω υποενότητες.

3.4.1 Δημιουργία βασικού υλικολογισμικού

Αρχικά, για να επιτραπεί η μελέτη της κατανάλωσης του πρωτοτύπου, απαιτείται να υλοποιηθεί αρχικό υλικολογισμικό – firmware, το οποίο προβάλετε στην Εικόνα 3.3. Το firmware θα απενεργοποιεί τα μη χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα του μικροελεγκτή και θα μεταβαίνει σε λειτουργία χαμηλής ισχύος – deep sleep για ορισμένο χρονικό.

```
deep-sleep §
1 #include <ArduinoLowPower.h>
2
3 void setup() {
4     Serial.begin(115200);
5     for (int i=0; i <= 21; i++) {
6         pinMode(i, INPUT_PULLUP);
7     }
8     pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
9     digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
10    delay(1000);
11    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
12    delay(500);
13 }
14
15 void loop() {
16     Serial.end();
17     delay(500);
18     LowPower.deepSleep(120000); // 2 Minutes
19     USBDevice.init();
20     USBDevice.attach();
21     Serial.begin(115200);
22     delay(500);
23 }
```

Εικόνα 3.3: Firmware με λειτουργία deep sleep

Το firmware εκτελεί σειριακά τις ακόλουθες λειτουργίες:

1. Αρχικοποίηση της σειριακής θύρας
2. Αρχικοποίηση όλων των ακίδων του μικροελεγκτή σε κατάσταση INPUT_PULLUP ώστε να αποφευχθεί η κατάσταση floating. Ένα σήμα χαρακτηρίζεται ως αιωρούμενο – floating, όταν η κατάστασή του είναι απροσδιόριστη και πρακτικά δεν είναι ούτε συνδεδεμένο στο θετικό ρεύμα VCC ούτε στη γείωση. Η συγκεκριμένη κατάσταση σε μία ακίδα δημιουργεί υψηλή αντίσταση άρα και περιττή κατανάλωση ρεύματος [31].

3. Απενεργοποίηση της ενσωματωμένης λυχνίας LED
4. Απενεργοποίηση της σειριακής θύρας
5. Μετάβαση σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης για 120 δευτερόλεπτα. Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα θα παρθούν μετρήσεις κατανάλωσης, ώστε να καταλήξουμε στην ενεργειακή απόδοση της συσκευής κατά το deep sleep.
6. Αρχικοποίηση εκ νέου της σειριακής θύρας.
7. Επαναλαμβανόμενη εκτέλεση των βημάτων 4 έως 6

Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο firmware και με τη χρήση εργαστηριακού πολύμετρου που παρεμβλήθηκε στον θετικό πόλο της μπαταρίας, η κατανάλωση κατά τη λειτουργία deep sleep έφτασε τα 110uA, όταν ο μικροελεγκτής δεν ήταν συνδεδεμένος με τους αισθητήρες και τα 1200uA μετά τη σύνδεση αυτών.

3.4.2 Απομόνωση περιττών εξαρτημάτων

Όπως προαναφέρθηκε, η υλοποίηση βασίστηκε στον kit ανάπτυξης Arduino MKR WAN 1310. Το συγκεκριμένο kit παρέχει λειτουργίες που κρίνονται χρήσιμες κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης, παρόλα αυτά κρίνονται περιττές για συσκευές που θα ενσωματωθούν σε βιομηχανικό περιβάλλον, όπως το κύκλωμα διαχείρισης και φόρτισης της μπαταρίας. Με την αφαίρεση αυτών των κυκλωμάτων η συσκευή θα μπορούσε να πολλαπλασιάσει την αυτονομία της, καθώς αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας σε λειτουργία deep sleep προέρχεται από το κύκλωμα φόρτισης της μπαταρίας.

Ο μικροελεγκτής παρέχει τη δυνατότητα απομόνωσης του συγκεκριμένου κυκλώματος, ανοίγοντας τον ενσωματωμένο διακόπτη που υπάρχει στον μικροελεγκτή. Σημαντικό περιορισμό αποτελεί, το ότι πλέον ο μικροελεγκτής απαιτεί τροφοδοσία 3.3V απευθείας στην ακίδα VCC και δεν δίνει τη δυνατότητα χρήσης μπαταρίας. Με το άνοιγμα του συγκεκριμένου διακόπτη και την τροφοδοσία του μικροελεγκτή με 3.3V απευθείας στις ακίδες VCC και GND, η κατανάλωση του μικροελεγκτή κατά τη λειτουργία deep sleep μειώθηκε στα 13uA όταν ο μικροελεγκτής δεν ήταν συνδεδεμένος με τους αισθητήρες και στα 1103uA μετά τη σύνδεση των αισθητήρων.

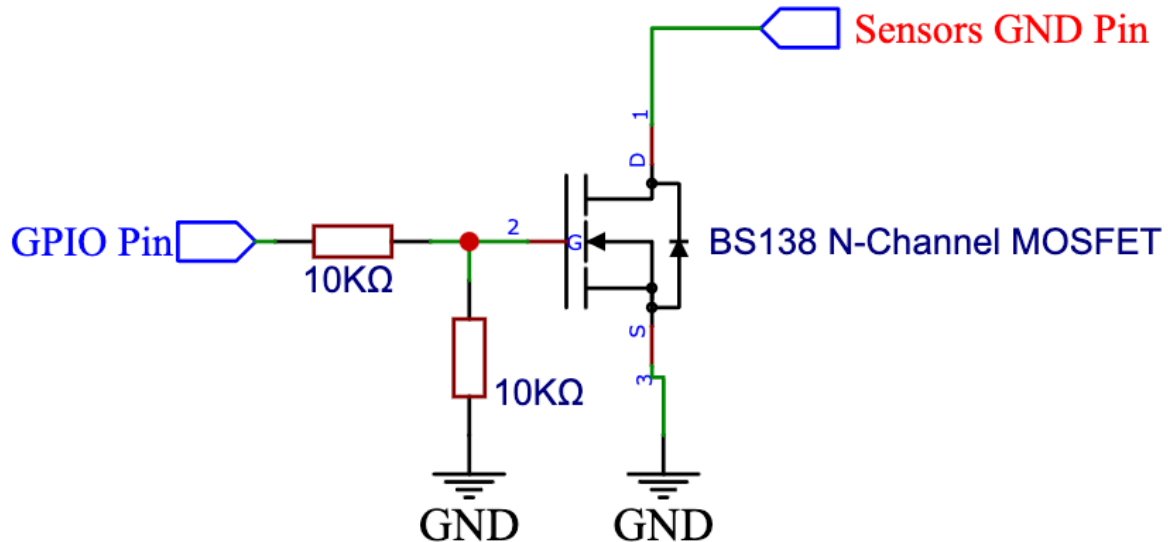
3.4.3 Κύκλωμα απενεργοποίησης αισθητήρων

Η μόνιμη τροφοδοσία των αισθητήρων παρατηρήθηκε να επιφέρει ανεπιθύμητη κατανάλωση ενέργειας όταν αυτοί δεν χρησιμοποιούνται. Για την διακοπή της τροφοδοσίας τους τοποθετήθηκε τρανζίστορ N-Channel mosfet το οποίο λειτουργεί ως ψηφιακός διακόπτης. Συγκεκριμένα το τρανζίστορ διακόπτει τη διαδρομή γείωσης που καταλήγει στους αισθητήρες, ανάλογα με την είσοδο που θα πάρει από τον μικροελεγκτή μέσω ακίδας GPIO. Η συνδεσμολογία του τρανζίστορ αναπαρίσταται στην Εικόνα 3.4 ακολουθεί την εξής μεθοδολογία:

1. Σύνδεση της ακίδας Gate του τρανζίστορ σε μια ακίδα GPIO του μικροελεγκτή. Με την αποστολή σήματος HIGH – 3.3V, το τρανζίστορ επιτρέπει την τροφοδοσία της γραμμής γείωσης που καταλήγει στους αισθητήρες. Αντίθετα με την αποστολή

σήματος LOW – 0V, το τρανζίστορ διακόπτει τη διαδρομή της γείωσης άρα και την τροφοδοσία των αισθητήρων.

2. Σύνδεση της ακίδας Source στην ακίδα γείωσης του μικροελεγκτή
3. Σύνδεση της ακίδας Drain στη γραμμή γείωσης των αισθητήρων



Εικόνα 3.4: Ψηφιακός διακόπτης με τη χρήση MOSFET

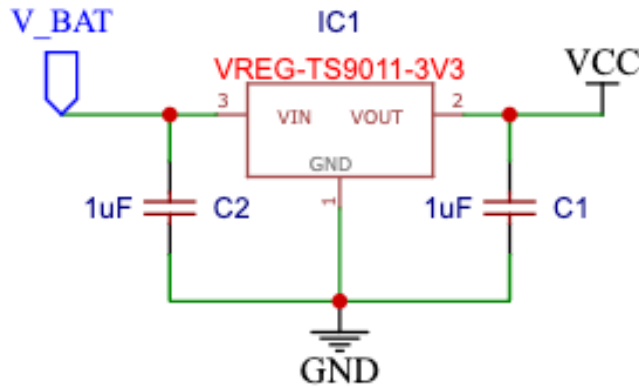
Με τη συγκεκριμένη διάταξη και τους αισθητήρες μόνιμα προσαρμοσμένους στον μικροελεγκτή επιτεύχθηκε σταθερή κατανάλωση 13uA κατά τη λειτουργία deep sleep.

3.4.4 Κύκλωμα μπαταρίας και μετατροπείας τάσης

Με το κύκλωμα διαχείρισης της μπαταρίας λιθίου να έχει απενεργοποιηθεί, είναι αναγκαία η δημιουργία ενός νέου κυκλώματος τροφοδοσίας. Για την εφαρμογή του συστήματος σε βιομηχανικό περιβάλλον, κρίνεται λογική η αντικατάσταση της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας λιθίου με διάταξη μη-επαναφορτιζόμενων αλκαλικών μπαταριών, καθώς μειώνουν σημαντικά το κόστος. Πέραν αυτών, οι αλκαλικές μπαταρίες χαρακτηρίζονται από μικρότερο ρυθμό αυτό-αποφόρτισης (self-discharge) σε σχέση με τις μπαταρίες λιθίου, γεγονός που θα αυξήσει επιπλέον την διάρκεια ζωής τους. Με την εγκατάσταση διάταξης τριών αλκαλικών μπαταριών χωρητικότητας 3000mAh σε σειρά, καταλήγουμε σε ένα εύρος τάσης 4.5V στο μέγιστο φορτίο τους, το οποίο φτάνει τα 2.8V σε συνθήκες πλήρους αποφόρτισης.

Καθώς ο μικροελεγκτής απαιτεί σταθερή τάση εισόδου 3.3V, απαιτείται επιπλέον κύκλωμα το οποίο θα λαμβάνει ως είσοδο την τροφοδοσία της μπαταρίας και με την κατάλληλη μετατροπή και σταθεροποίηση, θα εξάγει την απαιτούμενη τάση για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή. Χρησιμοποιήθηκε μετατροπείας τάσης χαμηλής κατανάλωσης – low dropout voltage regulator, για να δημιουργηθεί η ζητούμενη έξοδος. Το κύκλωμα της μετατροπής τάσης περιγράφεται στην Εικόνα 3.5. Η διάταξη του διαιρέτη τάσης κρίνεται ικανή και για τη νέα διάταξη, καθώς μετατρέπει το εύρος 2.8 - 4.5V σε 1,4

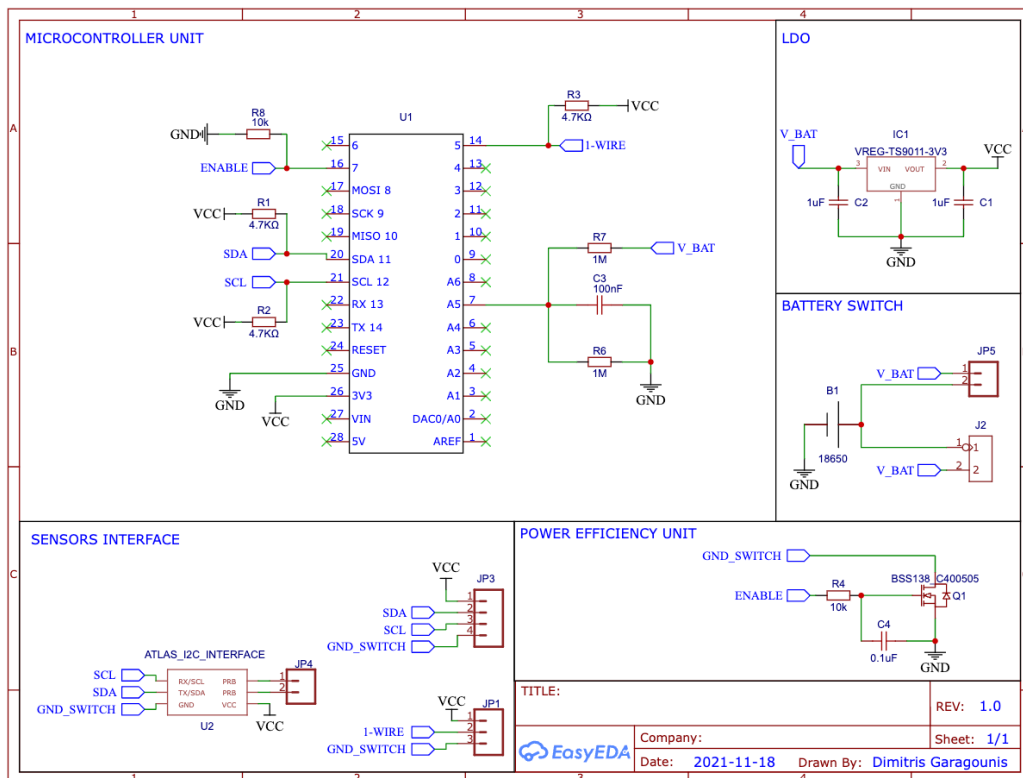
- 2.25V, το οποίο παραμένει αποδεκτό για το όριο των 3.3V στις αναλογικές ακίδες. Με τη συγκεκριμένη διάταξη τροφοδοσίας το σύστημα μετρήθηκε κατά τη λειτουργία deep sleep με κατανάλωση 14.5uA.



Εικόνα 3.5: Μετατροπέας τάσης χαμηλής κατανάλωσης

3.4.5 Τελική διάταξη

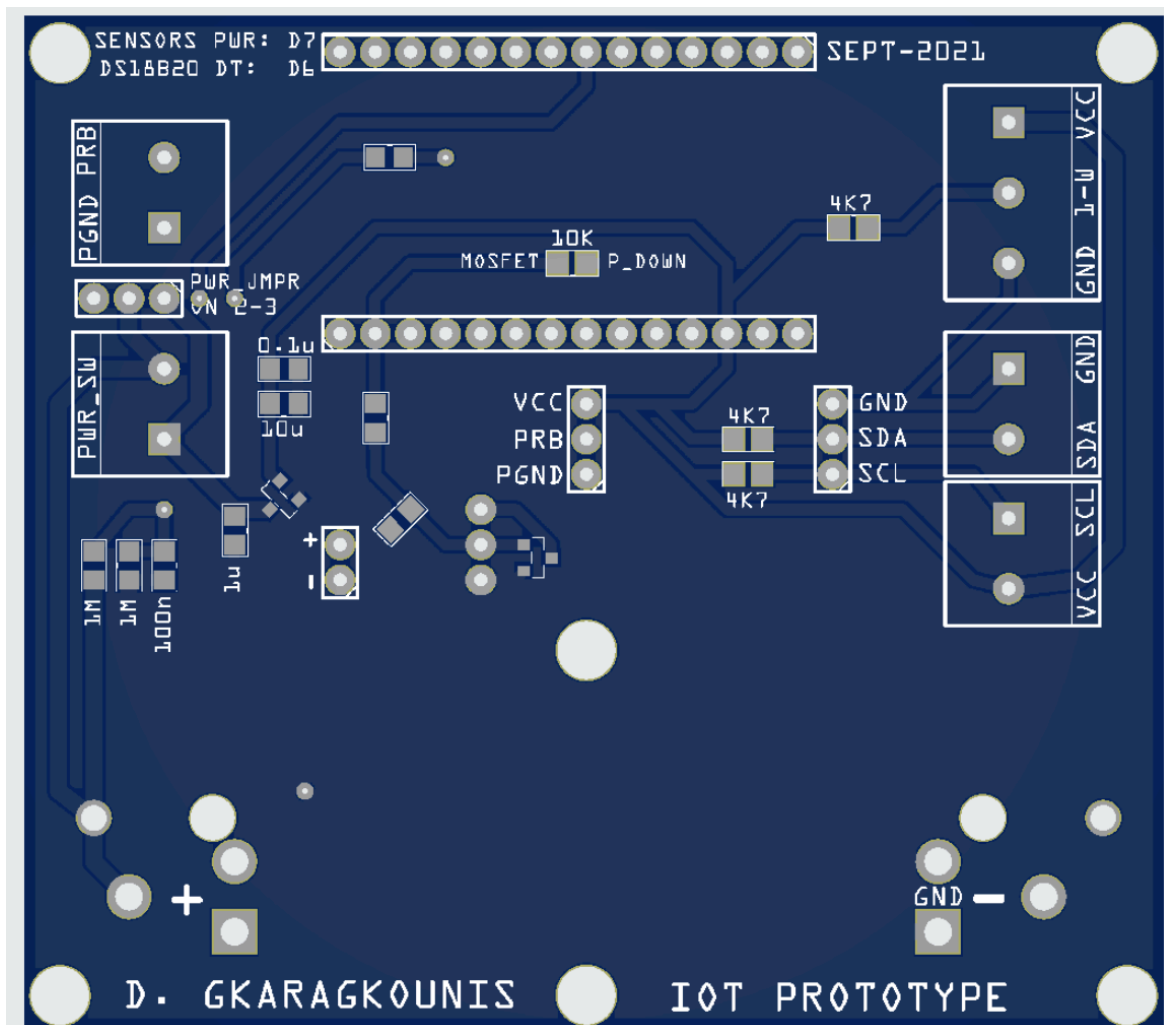
Με το σύνολο των παραπάνω αλλαγών η μέτρηση κατανάλωσης σε λειτουργία χαμηλής ισχύος μειώνεται από τα 1200uA σε 14.5uA, μείωση που φτάνει το 98,7%. Το ανανεωμένο σχηματικό διάγραμμα που προκύπτει από την ανανεωμένη διάταξη περιγράφεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Σχηματικό βελτιστοποιημένου κυκλώματος

Τέλος, για τη λειτουργία του πρωτοτύπου σε βιομηχανικό περιβάλλον απαιτείται η ανάπτυξη πλακέτας εκτυπωμένου κυκλώματος – Printed Circuit Board, στην οποία θα ενσωματωθούν όλα τα επιμέρους υποσυστήματα. Με τη δημιουργία ενιαίας πλακέτας, το κύκλωμα θα είναι ικανό να ενσωματωθεί σε βιομηχανικό κέλυφος, που θα φέρει τις απαραίτητες πιστοποιήσεις αδιαβροχοποίησης. Το παραπάνω σύνολο, θα είναι ικανό να προσαρμοστεί σε βιομηχανικό περιβάλλον και να παρέχει την απαραίτητη αξιοπιστία.

Σχεδιάστηκε, χρησιμοποιώντας το δωρεάν λογισμικό σχεδίασης κυκλωμάτων EasyEDA, πλακέτα εκτυπωμένου κυκλώματος – Printed Circuit Board δύο όψεων, η οποία βασίζεται στο σχηματικό διάγραμμα της Εικόνα 3.6 και ενσωματώνει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα. Κατόπιν, κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας την υποδομή που παρέχεται από το EasyEDA. Η πλακέτα προβάλλεται στην Εικόνα 3.7.

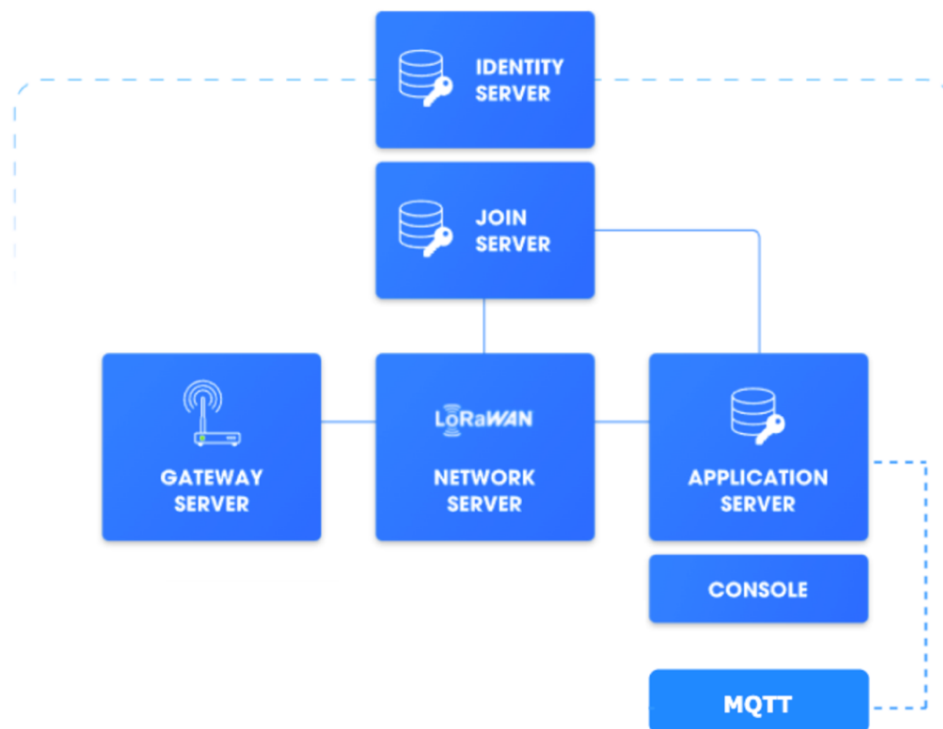


Εικόνα 3.7: Printed Circuit Board

3.5 Υποδομή LoRaWAN

Για την υλοποίηση της υποδομής LoRaWAN χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία The Things Stack ή TTS σε συντομογραφία, η οποία αποτελεί επέκταση του ευρέως διαδομένου ανοιχτού δικτύου LoRaWAN, The Things Network.

Πρακτικά η συγκεκριμένη υποδομή, όπως και οι περισσότερες διαθέσιμες, παρέχουν έτοιμο όλο το σύνολο των υπηρεσιών, όπως αυτές περιγράφονται στην Εικόνα 3.8, που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός δικτύου LoRaWAN, από άκρο σε άκρο. Η υπηρεσία περιλαμβάνει όλους τους απαραίτητους διακομιστές που απαιτούνται, παρέχοντας επίσης κρυπτογραφημένη επικοινωνία μεταξύ τους. Το σημείο επικοινωνίας του χρήστη αποτελεί ο διακομιστής δικτύου – Network Server. Όπως και στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με τη χρήση της υπηρεσίας TTS, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα ήδη υλοποιημένο δίκτυο LoRaWAN, εστιάζοντας στην ανάπτυξη της IoT συσκευής και των λειτουργιών της.



Εικόνα 3.8: Τα υποσυστήματα ενός δικτύου LoRaWAN στο TTS

Για τη εγγραφή μιας IoT συσκευής στο TTS απαιτείται η καταχώρηση της με τα τρία παρακάτω μοναδικά κλειδιά, τα οποία θα βρίσκονται καταχωρημένα και στην εσωτερική μνήμη της συσκευής και θα χρησιμοποιούνται για την αυθεντικοποίηση της με τον διακομιστή δικτύου:

- DevEUI: Μέγεθος 8Bit. Μοναδική διεύθυνση που βρίσκεται εγγεγραμμένη στο LoRaWAN modem αντίστοιχη.

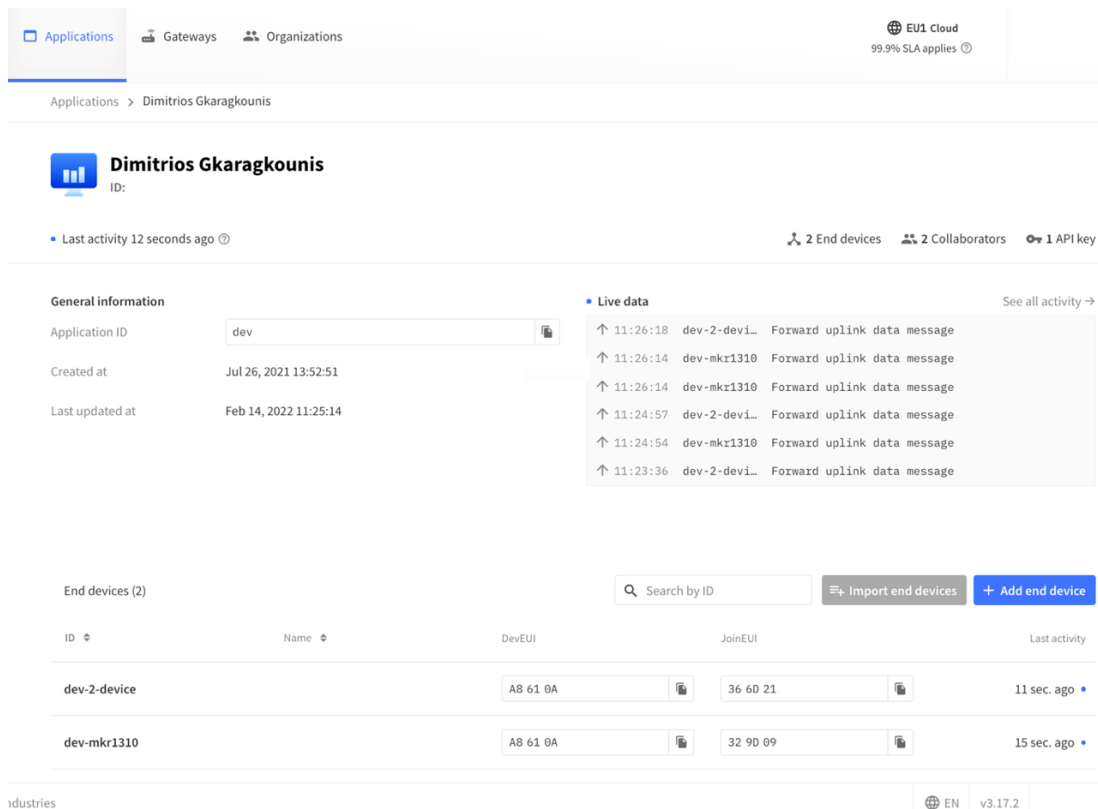
- AppEUI: Μέγεθος 16Bit. Μοναδική διεύθυνση που δημιουργείται από την κονσόλα του The Things Stack κατά την εγγραφή της συσκευής.
- AppKEY: Μέγεθος 16Bit. Μοναδική διεύθυνση που δημιουργείται από την κονσόλα του The Things Stack κατά την εγγραφή της συσκευής.

Για τη δημιουργία ολοκληρωμένων εφαρμογών IoT αλλά και για την αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων το TTS, παρέχει δυνατότητα διασύνδεσης με εξωτερικές διεργασίες, που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το HTTP ή το MQTT. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα χρησιμοποιηθεί η κονσόλα του TTS για να οπτικοποιηθούν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με τελική μορφή όπως στην Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Προβολή δεδομένων ενός μηνύματος uplink

Η δομή της κονσόλας του TTS προβάλετε στην Εικόνα 3.10 και χωρίζεται στις υποενότητες Overview, Applications, Gateways και Organizations. Για τις ανάγκες παρουσίασης της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε εφαρμογή που περιλαμβάνεται στην ενότητα Applications με όνομα Dimitrios Gkaragkounis. Η συγκεκριμένη εφαρμογή περιλαμβάνει δυο συσκευές κόμβους που στο TTS χαρακτηρίζονται ως end devices. Η συσκευή που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται με όνομα dev-2-device.



Εικόνα 3.10: Αρχική οθόνη εφαρμογής TTS

Επιλέγοντας τη συσκευή dev-2-device παρουσιάζεται η αναλυτική σελίδα της συγκεκριμένης συσκευής όπως στην Εικόνα 3.11. Στην αναλυτική σελίδα προβάλλονται στατιστικά στοιχεία για το σύνολο των δεδομένων που έχει αποστείλει η συσκευή, πληροφορίες τοποθεσίας αλλά και οι εκδόσεις υλικού και λογισμικού της.

The screenshot displays the configuration page for the device 'dev-2-device'. It includes sections for General information, Hardware, Activation information, and Live data. The hardware is identified as an Arduino MKR WAN 1310. The live data log shows a series of messages including 'Update end device', 'Schedule data downlink', and 'Forward uplink data message'.

Section	Field	Value
General information	End device ID	dev-2-device
	Description	This end device has no description
	Created at	Nov 29, 2021 10:53:14
Hardware	Brand	arduino
	Model	mkr-wan-1310
	Hardware version	1.0
	Firmware version	1.2.0
	AppEUI	36 6D 21 AF
DevEUI	A8 61 0A 34	

Live data log:

- 11:27:50 Update end device ["locations"]
- 11:27:39 Schedule data downlink for transmission on Gateway Server Rx1
- 11:27:39 Forward uplink data message Payload: { bytes: [9,1,100,7,135,
- 11:27:39 Successfully processed data message DevAddr: 27 FE 08 F1
- 11:26:18 Schedule data downlink for transmission on Gateway Server Rx1
- 11:26:18 Forward uplink data message Payload: { bytes: [9,1,100,7,131,

Εικόνα 3.11: Σελίδα λεπτομερειών συσκευής

3.6 Ανάπτυξη υλικολογισμικού (firmware)

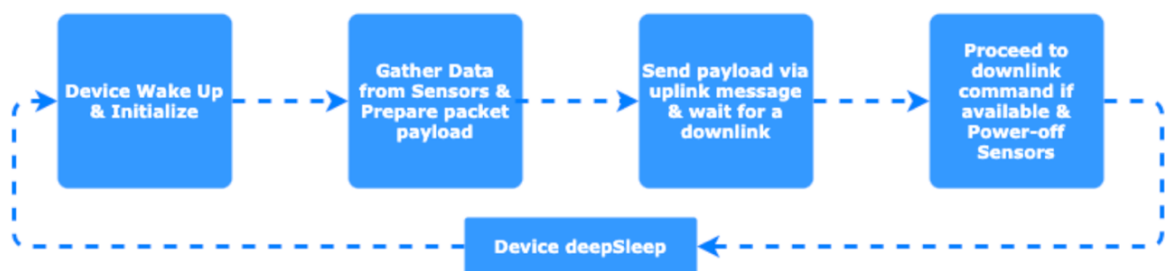
Η ανάπτυξη του firmware θα πραγματοποιηθεί μέσω του Arduino IDE, χρησιμοποιώντας απευθείας τη σειριακή θύρα του μικροελεγκτή. Μέσω του Arduino IDE, ο μικροελεγκτής φορτώνεται με ένα εκτελέσιμο αρχείο κώδικα της γλώσσας Arduino, που αποτελεί παραλλαγή της C. Οι βιβλιοθήκες λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. Βιβλιοθήκες Wire.h, OneWire.h, DallasTemperature.h: Μέσω αυτών επιτυγχάνεται η επικοινωνία με τους αισθητήρες θερμοκρασίας και pH.
2. Βιβλιοθήκη MKRWAN.h [32]: Αποτελεί αποκλειστική βιβλιοθήκη του μικροελεγκτή MKR WAN 1310, μέσω της οποίας υλοποιούνται όλες οι λειτουργίες του δικτύου LoRaWAN.

3. Βιβλιοθήκη ArduinoLowPower.h: Αποτελεί βιβλιοθήκη εξοικονόμησης ενέργειας, μέσω της οποίας είναι δυνατή η μετάβαση του μικροελεγκτή, σε συνθήκη εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης που αναφέρεται ως Deep Sleep.

Οι παραπάνω βιβλιοθήκες, αποτελούν βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα (open source), όποτε και μπορούν να χρησιμοποιηθούν δωρεάν για την ανάπτυξη πρωτοτύπων, αλλά και να τροποποιηθούν σύμφωνα με τις ανάγκες του κάθε συστήματος. Οι λειτουργίες που υλοποιήθηκαν προβάλλονται σχηματικά στην Εικόνα 3.12 και περιγράφονται παρακάτω:

1. Επικοινωνία με τους αισθητήρες και συλλογή δεδομένων.
2. Συλλογή πολλαπλών δεδομένων και δημιουργία μέσου όρου για την αποφυγή σφαλμάτων μέτρησης.
3. Αποστολή των δεδομένων (payload) στον Network Server του LoRaWAN μέσω μηνύματος τύπου uplink.
4. Αμφίδρομη επικοινωνία με τον Network Server του LoRaWAN μέσω μηνύματος τύπου downlink.



Εικόνα 3.12: Διάγραμμα ροής της συσκευής

Όπως είναι διακριτό και από την Εικόνα 3.9 με την ενεργοποίηση της συσκευής πραγματοποιείται η αρχικοποίηση της συσκευής, η συλλογή των δεδομένων, η αποστολή τους στον Network Server του LoRaWAN, η αναμονή για τη λήψη μηνυμάτων από αυτόν και η μετάβαση της συσκευής στην λειτουργία Deep Sleep, μέχρι την επόμενη ενεργοποίηση, όπου θα εκτελεσθεί και πάλι ο ίδιο βρόχος. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή με τις λειτουργίες που εκτελούνται.

- Αρχικοποίηση συσκευής

Με την ενεργοποίηση της συσκευής πραγματοποιείται η αρχικοποίηση των βασικών μεταβλητών και η ανάγνωση των απόρρητων κλειδιών του LoRaWAN.

- Αρχικοποίηση LoRaWAN modem & Join Request, Εικόνα 3.13

Στην πρώτη ενεργοποίηση της συσκευής, πραγματοποιείται η αρχικοποίηση του modem καθώς και η εγγραφή της συσκευής στο δίκτυο. Μέσω της λειτουργίας Join Request και

Over The Air Activation, η συσκευή αποστέλλει στο LoRaWAN τα τρία μοναδικά κλειδιά DevEUI, AppEUI και AppKey μέσω των οποίων πραγματοποιείτε η ασφαλής εγγραφή.

```
158 void connectToLoRaWAN(){
159     int attemptsToBegin = 0;
160     while (!modem.begin(EU868)) {
161         if(attemptsToBegin == 5){
162             NVIC_SystemReset();
163         }
164         delay(5000);
165         attemptsToBegin = attemptsToBegin + 1 ;
166         Serial.println("Failed to start module.");
167     }
168
169     Serial.println(F("Connecting to LoRaWAN... "));
170     int attemptsToConnect = 0;
171     int connected = modem.joinOTAA(appEui, appKey);
172     while (!connected) {
173         Serial.println("Error during Join Request... ");
174         Serial.print((String)"Connection status: "+connected);
175
176         if(attemptsToConnect == 5){
177             Serial.println(F("Rebooting device... "));
178             delay(2000);
179             NVIC_SystemReset();
180         }
181         delay(10000);
182         Serial.println("Retry to connect");
183         connected = modem.joinOTAA(appEui, appKey);
184         attemptsToConnect = attemptsToConnect + 1;
185     }
186     Serial.println("Device connected.");
187     delay(5000);
188     modem.minPollInterval(60);
189 }
```

Εικόνα 3.13: Αρχικοποίηση LoRaWAN modem & Join Request

- Συλλογή μετρήσεων και δημιουργία μέσω των όρων, Εικόνα 3.14

Στη συνέχεια, η συσκευή μέσω των κατάλληλων συναρτήσεων, συλλέγει τις μετρήσεις των αισθητήρων θερμοκρασίας, pH καθώς και της τάσης της μπαταρίας, στις οποίες δημιουργεί μέσο όρο πέντε τιμών, για την εξομάλυνση των τιμών. Η συλλογή των

μετρήσεων πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης `getMetrics()`, η οποία περιλαμβάνει τις μεθόδους `get` του αισθητήρα θερμοκρασίας και pH. Η μέτρηση της τάσης μπαταρίας πραγματοποιείται με απευθείας προσπέλαση της αναλογικής ακίδας που είναι συνδεδεμένος ο θετικός πόλος.

```
67     adcReading = analogRead(A5);
68     getMetrics(temporaryMeasurements,deviceType);
69     temperatureReading = temporaryMeasurements[0];
70     metricReading = temporaryMeasurements[1];
71     metricReadingB = temporaryMeasurements[2];
72
73     // Discard inaccurate 1st reading
74     adcReading = 0;
75     temperatureReading = 0;
76     metricReading = 0;
77     metricReadingB = 0;
78
79     // Perform averaging
80     for (counter = 5; counter > 0; counter--){
81         adcReading += analogRead(A5);
82         getMetrics(temporaryMeasurements,deviceType);
83         temperatureReading += temporaryMeasurements[0];
84         metricReading += temporaryMeasurements[1];
85         metricReadingB += temporaryMeasurements[2];
86     }
87     adcReading = adcReading / 5;
88     temperatureReading = temperatureReading / 5;
89     metricReading = metricReading / 5;
90     metricReadingB = metricReadingB / 5;
91
92     // Convert from raw ADC reading to volts
93     batteryVoltage = adcReading * ((3.3 / 1023) * 2 );
```

Εικόνα 3.14: Συλλογή μετρήσεων και δημιουργία μέσων όρων

- Αποστολή δεδομένων – `urlink`, Εικόνα 3.15

Στη συνέχεια και αφού οι απαιτούμενες μετρήσεις έχουν συγκεντρωθεί, η συσκευή προχωρά στη δημιουργία του `payload`, το οποίο αποτελεί το σύνολο των δεδομένων που

θα αποσταλούν στον Network Server. Για την αποστολή των δεδομένων χρησιμοποιείται η συνάρτηση της βιβλιοθήκης MKRWAN `modem.write()`.

```
234     int err;
235     modem.beginPacket();
236     for (int k = 0; k < payloadSize; k++){
237         modem.write(data[k]);
238     }
239     err = modem.endPacket(true);
240     if (err > 0) {
241         Serial.println("Message sent correctly!");
242     } else {
243         Serial.println((String)"Error sending message, Error "+err);
244         delay(100);
245         NVIC_SystemReset(); // Reboot the device in case of error
246     }
247     delay(500);
248 }
```

Εικόνα 3.15: Αποστολή δεδομένων

- Λήψη δεδομένων από τον Network Server – downlink, Εικόνα 3.16

Μετά από κάθε αποστολή δεδομένων, η συσκευή σε ορισμένο χρόνο περιμένει για λήψη δεδομένων από τον Network Server ανάλογα με την κλάση της, όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 2.5.3. Η λήψη των μηνυμάτων downlink πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης `modem.read()` της βιβλιοθήκης MKRWAN.

```
265     if (modem.available()) {
266         Serial.println("New downlink message: ");
267         int rcv[8];
268         int i = 0;
269         while (modem.available()) {
270             rcv[i++] = (int)modem.read();
271         }
```

Εικόνα 3.16: Λήψη δεδομένων από τον Network Server – downlink

- Μετάβαση σε λειτουργία χαμηλής ισχύος – Deep Sleep, Εικόνα 3.17

Αφού η συσκευή ολοκληρώσει έναν πλήρη κύκλο του διαγράμματος ροής, μεταβαίνει σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Ο χρόνος που η συσκευή θα παραμείνει σε αυτή την

κατάσταση αλλάζει δυναμικά μέσω της συνάρτησης `getFrequency()` με τη χρήση ενός μηνύματος `downlink`.

```
329     Serial.println((String)"Going into deepSleep for "+frequency+" minutes.");
330     Serial.end();
331     delay(500);
332     LowPower.deepSleep(getFrequency());
333
334     USBDevice.init();
335     USBDevice.attach();
336     Serial.begin(115200);
337     delay(500);
```

Εικόνα 3.17: Μετάβαση σε λειτουργία χαμηλής ισχύος – deep sleep

Επιπρόσθετο πλεονέκτημα στην επιλογή του LoRaWAN αποτελεί και η ενσωματωμένη κρυπτογράφηση και οι τεχνικές ασφάλειας και αυθεντικότητας. Παρέχεται μέσω της βιβλιοθήκης MKRWAN ενσωματωμένη κρυπτογράφηση δεδομένων AES-128 για κάθε μετάδοση δεδομένων μεταξύ της συσκευής και του Network Server αλλά και μέσω των υπολοίπων server του LoRaWAN. Ο τρόπος κρυπτογράφησης, δεν είναι προσβάσιμος στο χρήστη οπότε δεν απαιτείται περαιτέρω υλοποίηση.

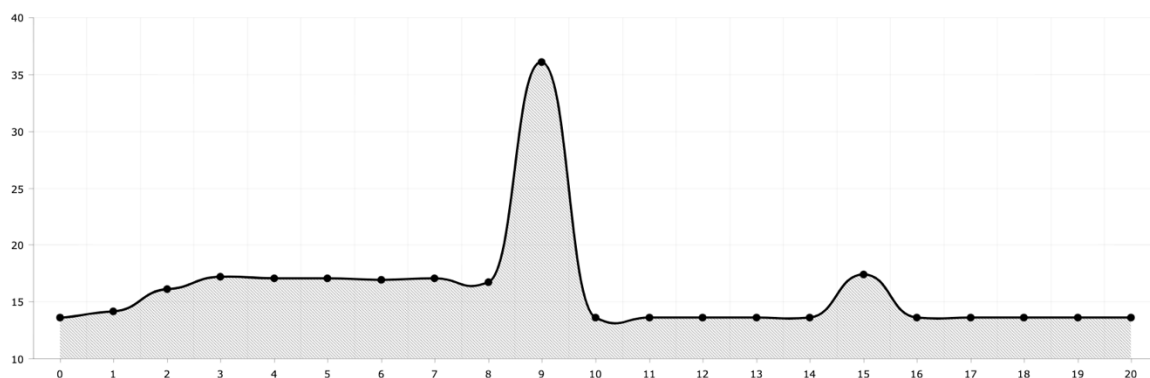
Κεφάλαιο 4 Απόδοση συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί η απόδοση του συστήματος, μελετώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα αλλά και την ακρίβεια των αισθητήρων με την πραγματοποίηση δοκιμών σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

4.1 Ενεργειακή απόδοση

Αρχικό ζητούμενο της παρούσας διπλωματικής, ήταν η δημιουργία μιας συσκευής, η οποία θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε βιομηχανικό περιβάλλον και να λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα, χωρίς να απαιτείται συντήρηση. Σημαντική ανάγκη στη συντήρηση βιομηχανικών αυτοματισμών που λειτουργούν με μπαταρία, είναι η φόρτιση ή αντικατάσταση αυτών.

Από το σχεδιασμό του συστήματος βασικό ζητούμενο ήταν η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και η μέγιστη διάρκεια ζωής με μπαταρία. Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρωτότυπο, η συνολική κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας deep sleep έφτασε τα 14.5uA, νούμερο ικανοποιητικό για την αρχική παραδοχή των απαιτήσεων. Το σύστημα, πραγματοποιεί τις περισσότερες ώρες λειτουργίας του σε αυτή την κατάσταση, με την ενεργοποίηση του συστήματος για μέτρηση του περιβάλλοντος, να πραγματοποιείται δώδεκα φορές τη μέρα και να διαρκεί 20 δευτερόλεπτα όπως προβάλλεται στην Εικόνα 4.1. Σε κάθε ενεργοποίηση η μέση κατανάλωση είναι τα 15.55mA. Συνδυάζοντας τις δύο λειτουργίες προκύπτει μια μέση κατανάλωση ενέργειας 58uA η οποία με τη χρήση μιας ιδανικής μπαταρίας 3000mAh μπορεί να επιφέρει αυτονομία 5 ετών και 11 μηνών.



Εικόνα 4.1: Κατανάλωση ενέργειας σε mA για ένα μήνυμα uplink

4.2 Ακρίβεια μετρήσεων

Για την εξακρίβωση της ακρίβειας του συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν υγρά σταθερού pH σε ονομαστικές τιμές 4, 7 και 10. Σε επτά συνεχόμενες μετρήσεις το σύστημα κατέγραψε τις παρακάτω τιμές:

- Μέσο όρο 4.043 στο υγρό ονομαστικής τιμής 4 – απόκλιση < 2%
- Μέσο όρο 7.100 στο υγρό ονομαστικής τιμής 7 – απόκλιση < 2%
- Μέσο όρο 10.379 στο υγρό ονομαστικής τιμής 10 – απόκλιση < 4%

Αναλυτικά, το σύστημα έλαβε τις εξής μετρήσεις:

Για το υγρό με σταθερό pH 4, το σύστημα έλαβε μετρήσεις 4.045, 4.054, 4.042, 4.048, 4.041, 4.036, 4.038 καταλήγοντας στο μέσο όρο 4,043, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

dev-2-device
ID: dev-2-device

↑ 5,363 ↓ 5,377 • Last activity 30 seconds ago ⓘ

Overview Live data Messaging Location Payload formatters Claiming General settings

Data preview

Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.26, Type: 9, pH: 4.038 }	09 01 64 07 EA 17 FA 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5362	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 14 RSSI: -60	
Rx1 Delay: 5		
Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.25, Type: 9, pH: 4.036 }	09 01 64 07 E9 17 F9 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5361	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 10.5 RSSI: -60	
Rx1 Delay: 5		
Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.2, Type: 9, pH: 4.041 }	09 01 64 07 E4 17 FD 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5360	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 14 RSSI: -58	
Rx1 Delay: 5		
Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.18, Type: 9, pH: 4.048 }	09 01 64 07 E2 18 04 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5359	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 10.25 RSSI: -59	
Rx1 Delay: 5		
Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.16, Type: 9, pH: 4.042 }	09 01 64 07 E2 18 04 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5358	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 13.25 RSSI: -60	
Rx1 Delay: 5		
Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.12, Type: 9, pH: 4.054 }	09 01 64 07 DC 18 0A 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5357	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 10 RSSI: -60	
Rx1 Delay: 5		
Payload: { Battery: 3.56, Temperature: 20.11, Type: 9, pH: 4.045 }	09 01 64 07 DB 18 01 04 ...	FPort: 2
DevAddr: 27 FCnt: 5356	FPort: 2 Confirmed uplink Data rate: SF7BW125 SNR: 13.5 RSSI: -58	

Εικόνα 4.2: Μετρήσεις στο υγρό με σταθερό pH 4

Για το υγρό με σταθερό pH 7, το σύστημα έλαβε μετρήσεις 7.136, 7.092, 7.093, 7.092, 7.086, 7.098, 7.107 καταλήγοντας στο μέσο όρο 7.100, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3.

The screenshot displays the 'dev-2-device' interface with the following details:

- Device Info:** dev-2-device, ID: dev-2-device
- Activity:** ↑ 5,370, ↓ 5,384, Last activity 14 seconds ago
- Navigation:** Overview, **Live data**, Messaging, Location, Payload formatters, Claiming, General settings
- Data Preview:** A list of 8 data points, each showing a payload with Battery, Temperature, Type, and pH values, along with DevAddr, FCnt, FPort, and other technical details.

Index	Battery	Temperature	Type	pH	DevAddr	FCnt	FPort	SNR	RSSI
1	3.56	20.39	9	7.107	27	5370	2	14	-60
2	3.56	20.36	9	7.098	27	5369	2	9.75	-60
3	3.56	20.36	9	7.086	27	5368	2	14	-59
4	3.56	20.35	9	7.092	27	5367	2	13.75	-58
5	3.56	20.34	9	7.093	27	5366	2	13.75	-60
6	3.56	20.33	9	7.092	27	5365	2	10.5	-61
7	3.56	20.29	9	7.136	27		2		

Εικόνα 4.3: Μετρήσεις σε υγρό με σταθερό pH 7

Για το υγρό με σταθερό pH 10, το σύστημα έλαβε μετρήσεις 10.365, 10.369, 10.371, 10.381, 10.387, 10.394, 10.391 καταλήγοντας στο μέσο όρο 10.379 , όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4

The screenshot shows the 'dev-2-device' dashboard. At the top, there's a blue icon of a device and the text 'dev-2-device' with 'ID: dev-2-device' below it. Below that, there are statistics: '↑ 5,377 ↓ 5,391' and 'Last activity 14 seconds ago'. A navigation bar includes 'Overview', 'Live data' (highlighted), 'Messaging', 'Location', 'Payload formatters', 'Claiming', and 'General settings'. The 'Data preview' section contains a list of data points, each with a 'Rx1 Delay: 5' label. Each entry shows a JSON payload with fields: Battery, Temperature, Type, and pH. The pH values are 10.391, 10.394, 10.387, 10.381, 10.371, 10.369, and 10.365. Each entry also includes a hex payload, DevAddr (27), FCnt (5377-5373), FPort (2), and other technical details like 'Confirmed uplink', 'Data rate: SF7BW125', 'SNR', and 'RSSI'.

Εικόνα 4.4: Μετρήσεις σε υγρό με σταθερό pH 10

Συνοψίζοντας, ο Πίνακας 1 αναγράφει τις αποκλίσεις των μετρήσεων σε σχέση με την ονομαστική τιμή του κάθε υγρού. Παρατηρήθηκε ότι η ακρίβεια του συστήματος είναι μεγαλύτερη σε όξινα υγρά με χαμηλό pH και ελαφρώς μικρότερη σε βασικά υγρά με μεγαλύτερο pH.

Ονομαστική τιμή	Μέσος όρος μετρήσεων.	Απόκλιση
4	4.043	< 2%
7	7.100	< 2%
10	10.379	< 4%

Πίνακας 3: Σύγκριση μετρήσεων pH

Για την ακρίβεια των μετρήσεων θερμοκρασίας δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα καθώς δεν κατέστη δυνατή η δημιουργία περιβάλλοντος ελεγχόμενης θερμοκρασίας έτσι ώστε να διασταυρωθεί η ακρίβεια που δηλώνεται από των κατασκευαστή ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$).

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της ανάπτυξης του πρωτοτύπου, καθώς και οι προοπτικές για μελλοντική βελτίωση και συνέχεια της έρευνας.

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Ζητούμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η συνεισφορά των σύγχρονων τεχνολογιών και συγκεκριμένα του Internet of Things, στην απλοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών της βιομηχανίας τροφίμων. Το υλοποιημένο σύστημα κρίνεται ικανό να αλληλοεπιδράσει με υγρά περιβάλλοντα με ικανοποιητική ακρίβεια, παρόλα αυτά οι ελεγχόμενες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, δεν μπορούν να εγγυηθούν την αξιοπιστία των μετρήσεων σε βάθος χρόνου και σε βιομηχανικό περιβάλλον. Όσον αφορά την υποδομή μετάδοσης δεδομένων και το δίκτυο LoRaWAN, αυτό κρίνεται απόλυτα αξιόπιστο με μηδενική απώλεια δεδομένων ή αλλοίωση αυτών κατά τις δοκιμές του πρωτοτύπου.

5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός πλήρως λειτουργικού πρωτοτύπου βασισμένο στην αρχιτεκτονική του Internet of Things και επιβεβαιώθηκαν τα πολλαπλά οφέλη που μπορεί να προσφέρει η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική στη βιομηχανία τροφίμων, αλλά και σε πολλά παρεμφερή σενάρια απομακρυσμένης παρακολούθησης υγρών συνθηκών. Παρακάτω παρατίθενται τα πιθανά μελλοντικά σενάρια βελτίωσης του προτύπου.

- Ενσωμάτωση σε υποδομή οπτικοποίησης και διαχείρισης των δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε, κατά την εξήγηση των δυνατοτήτων της πλατφόρμας The Things Stack, παρέχεται η δυνατότητα σύνδεσης με τρίτες εφαρμογές διαχείρισης δεδομένων με τη χρήση των πρωτοκόλλων HTTP και MQTT. Με αυτό τον τρόπο θα δημιουργηθεί ένα πιο λειτουργικό και εύχρηστο περιβάλλον για τον τελικό χρήστη, που μπορεί να περιλαμβάνει δείκτες και στατιστικά στοιχεία των μετρήσεων, γραφήματα και πίνακες ιστορικών δεδομένων.

- Απομακρυσμένη ενημέρωση υλικολογισμικού – firmware update over the air

Κύριος περιορισμός των IoT συσκευών αποτελεί το γεγονός ότι βρίσκονται εγκατεστημένες σε απομακρυσμένα περιβάλλοντα, συχνά δύσκολα στην πρόσβαση. Επίσης, στην πλειοψηφία τους οι συγκεκριμένες συσκευές, δεν φορτώνονται με λειτουργικό σύστημα το οποίο να μπορεί να επιτρέψει ενημέρωση συγκεκριμένων σημείων του απομακρυσμένα. Κρίνεται έτσι σημαντική, η δημιουργία μιας υποδομής που

θα ενσωματώνεται στο υλικολογισμικό και θα επιτρέπει την ενημέρωση του απομακρυσμένα.

- Βιομηχανική πρωτοτυποποίηση

Το αναπτυγμένο πρωτότυπο κρίνεται ικανό, από άποψη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, να λειτουργήσει σε βιομηχανικό περιβάλλον, παρόλα αυτά, για να επιτευχθεί αυτό, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία βιομηχανικού κελύφους, που θα φιλοξενεί τα επιμέρους υποσυστήματα και θα χαρακτηρίζεται από όλες τις απαραίτητες πιστοποιήσεις ανθεκτικότητας και αντοχής σε σκόνη και υγρασία.

Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia, «Fourth Industrial Revolution,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution. [Πρόσβαση 18 Δεκέμβριος 2021].
- [2] PwC, «The Fourth Industrial Revolution,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pwc.com/us/en/library/4ir-ready.html>. [Πρόσβαση 30 Ιούλιος 2021].
- [3] Y. Liao, F. Deschamps, E. d. F. R. Loures και L. F. P. Ramos, «Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal,» *International Journal of Production Research*, τόμ. 55, αρ. 12, pp. 3609-3629, 2017.
- [4] G. Li, Y. Hou και A. Wu, «Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods,» *Chinese Geographical Science*, τόμ. 27, pp. 626-637, 2017.
- [5] PwC, «2016 Global Industry 4.0 Survey: Industry 4.0: Building the digital enterprise,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>. [Πρόσβαση 30 Ιούλιος 2021].
- [6] S. Ray, P. Adhikary, S. Iana, S. Mitra, T. Halder, M. Paul, A. Mukherjee, D. A. Koshika, N. Chakravorty, R. Goswami, V. Kundu και D. Sarkar, «A Survey Paper on Architecture of Internet of Things,» *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2018 .
- [7] IBM, «The little-known story of the first IoT device,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ibm.com/blogs/industries/little-known-story-first-iot-device/>. [Πρόσβαση 4 Αύγουστος 2021].
- [8] Columbia University computer science, «History of Processor Performance,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.cs.columbia.edu/~sedwards/classes/2012/3827-spring/advanced-arch-2011.pdf>.
- [9] Statista, «Average costs of industrial Internet of Things (IoT) sensors from 2004 to 2020,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.statista.com/statistics/682846/vr-tethered-hmd-average-selling-price/>. [Πρόσβαση 11 Αύγουστος 2021].

- [10] NTCA, «High-Speed Internet: Industry data,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ncta.com/industry-data/92-decrease-in-price-per-megabit>. [Πρόσβαση 12 Αύγουστος 2021].
- [11] Statista, «Number of smartphone users from 2016 to 2021,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>. [Πρόσβαση 12 Αύγουστος 2021].
- [12] Gartner, «Gartner,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-07-gartner-says-8-billion-connected-things-will-be-in-use-in-2017-up-31-percent-from-2016>.
- [13] Wikipedia, «Microcontroller, Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>. [Πρόσβαση 9 Δεκέμβριος 2021].
- [14] Avdweb, «SAMD21 MCU,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.avdweb.nl/arduino/samd21/samd21-variant>. [Πρόσβαση 10 Δεκέμβριος 2021].
- [15] Wikipedia, «Arduino on Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>. [Πρόσβαση 7 Δεκέμβριος 2021].
- [16] Multitech, «What is an IoT Gateway,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.multitech.com/landing-pages/what-is-an-iot-gateway>. [Πρόσβαση 5 Δεκέμβριος 2021].
- [17] Nordic, «IoT Wireless Architecture,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/iot-wireless-architecture>. [Πρόσβαση 20 Δεκέμβριος 2021].
- [18] Wikipedia, «Wikipedia WiFi,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>. [Πρόσβαση 1 Δεκέμβριος 2022].
- [19] E. Solutions, «SIM800 IoT Module,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ecl.github.io/SIM800h-IoT-module/>. [Πρόσβαση 3 Δεκέμβριος 2021].
- [20] Semtech, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan>. [Πρόσβαση 5 Ιανουάριος 2022].
- [21] Lora Alliance, 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>. [Πρόσβαση 5 Ιανουάριος 2022].

- [22] M. Afaneh, 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/bluetooth-low-energy-ble-internet-things-iot-mohammad-afaneh/>. [Πρόσβαση 5 Φεβρουάριος 2022].
- [23] M. Afaneh. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.novelbits.io/basics-bluetooth-low-energy/>. [Πρόσβαση 5 Φεβρουάριος 2022].
- [24] Signils, «Difference between Bluetooth Classic and BLE,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.signils.com/whats-the-difference-between-classic-bluetooth-and-bluetooth-low-energy/>. [Πρόσβαση 5 Φεβρουάριος 2022].
- [25] Wikipedia. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>. [Πρόσβαση 20 Δεκέμβριος 2021].
- [26] Digi. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>. [Πρόσβαση 5 Νοέμβριος 2021].
- [27] I. I. Devices, «Zigbee mesh network,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://iot-industrial-devices.com/zigbee-mesh-used-in-end-point-iot-devices/>. [Πρόσβαση 5 Νοέμβριος 2021].
- [28] R. W. World. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LoRa-vs-Zigbee.html>. [Πρόσβαση 2 Φεβρουάριος 2022].
- [29] Arduino, «MKR WAN 1310 MCU,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-wan-1310>. [Πρόσβαση 1 Φεβρουάριος 2022].
- [30] B. m. projects, «All About the DS18B20 Temperature Sensor,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.best-microcontroller-projects.com/ds18b20.html>. [Πρόσβαση 20 Ιανουάριος 2022].
- [31] E. Artistry, «Demystifying MCU GPIO Settings,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://embeddedartistry.com/blog/2018/06/04/demystifying-microcontroller-gpio-settings/>. [Πρόσβαση 10 Φεβρουάριος 2022].
- [32] Arduino, «MKRWAN Library,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/MKRWAN>. [Πρόσβαση 1 Φεβρουάριος 2022].

