



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Έξυπνου Δικτύου LoRa Mesh για τη Συλλογή Δεδομένων από Αισθητήρες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ Φ. ΠΕΡΣΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης
Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2024



Σχεδιασμός και Υλοποίηση Έξυπνου Δικτύου LoRa Mesh για τη Συλλογή Δεδομένων από Αισθητήρες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ Φ. ΠΕΡΣΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Ευάγγελος Μαρινάκης
Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Ιουλίου 2024.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Ευάγγελος Μαρινάκης
Επικουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτρης Ασκούνης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Ψαράς
Καθηγητής ΕΜΠ



.....

Ευάγγελος Φ. Περσόπουλος

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

Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Ευάγγελος Φ. Περσόπουλος, 2024.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Περίληψη

Καθώς οι αστικοί πληθυσμοί συνεχίζουν να αυξάνονται, η ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των πόρων της πόλης γίνεται όλο και πιο κρίσιμη. Οι παραδοσιακοί αστικοί χώροι εξελίσσονται σε «έξυπνες πόλεις», όπου η τεχνολογία αξιοποιείται για τη βελτίωση της υποδομής και τη βελτίωση της παροχής υπηρεσιών. Τελικός στόχος είναι η βελτιστοποίηση των λειτουργιών της πόλης και η βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων μέσω διαδικασιών λήψης αποφάσεων βασισμένων σε δεδομένα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός δικτύου LoRa Mesh, ένα κρίσιμο τεχνολογικό συστατικό στην υποδομή των έξυπνων πόλεων. Το δίκτυο υποστηρίζει δυναμικούς κόμβους που συλλέγουν περιβαλλοντικά δεδομένα μέσω αισθητήρων που παρακολουθούν τη θερμοκρασία και την υγρασία. Αυτή η συλλογή δεδομένων είναι θεμελιώδης στην αποτελεσματική διαχείριση των αστικών περιβαλλόντων, επιτρέποντας αποκρίσεις σε πραγματικό χρόνο σε περιβαλλοντικές αλλαγές και τη βελτίωση των πρακτικών βιωσιμότητας.

Ένα κομβικό στοιχείο της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός web-based dashboard που παρουσιάζει τα συλλεχθέντα δεδομένα μέσω έξυπνων διαγραμμάτων. Αυτό το περιβάλλον επιτρέπει στους χειριστές της πόλης και τους κατοίκους να αλληλεπιδρούν με τα δεδομένα με σημαντικό τρόπο, προσφέροντας ενδείξεις που οδηγούν σε ενημερωμένη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον σχεδιασμό και τη διαχείριση της πόλης.

Η έρευνα αυτή υπογραμμίζει την πρακτική εφαρμογή των τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) στις έξυπνες πόλεις, επισημαίνοντας τον ρόλο των δικτύων LoRa Mesh στη δημιουργία διασυνδεδεμένων, ανταποκρινόμενων αστικών χώρων. Το δίκτυο προτείνεται ως εργαλείο για την επέκταση των δυνατοτήτων της έξυπνης πόλης, δείχνοντας πώς το IoT μπορεί να μεταμορφώσει την αστική ζωή μέσω της ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών για την αποτελεσματική διαχείριση των αστικών περιβαλλόντων.

Η μελέτη αυτή όχι μόνο τονίζει τη σημασία του IoT στην αστική ανάπτυξη αλλά και εξερευνά τις δυνατότητες της τεχνολογίας LoRa στην ενίσχυση της συνδεσιμότητας και της μετάδοσης δεδομένων σε ευρεία αστικά περιβάλλοντα, προετοιμάζοντας το έδαφος για πιο ανθεκτικές και προσαρμοστικές έξυπνες πόλεις.

Λέξεις Κλειδιά

Έξυπνη πόλη, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, LoRa, Δίκτυο Mesh

Abstract

As urban populations continue to grow, the demand for efficient management of city resources becomes increasingly crucial. Traditional urban environments are evolving into "smart cities," where technology is harnessed to enhance infrastructure and improve the delivery of services. The ultimate goal is to optimize city operations and improve the quality of life for residents by using data-driven decision-making processes.

This thesis presents the design and implementation of a LoRa Mesh network, a key technological component in smart city infrastructure. The network supports dynamic nodes that collect environmental data through sensors that monitor temperature and humidity. This data collection is fundamental in managing city environments effectively, enabling real-time responses to environmental changes and improving sustainability practices.

A key element of this thesis is the development of a web-based dashboard that presents the collected data through intelligent visualization tools. This interface allows city administrators and residents to interact with the data meaningfully, providing insights that lead to informed decision-making regarding city planning and management.

The research highlights the practical application of Internet of Things (IoT) technologies in smart cities, emphasizing the role of LoRa Mesh networks in creating interconnected, responsive urban spaces. The network is proposed as a tool for expanding smart city capabilities, demonstrating how IoT can transform city living by integrating advanced technologies to manage urban environments efficiently.

This study not only underscores the importance of IoT in urban development but also explores the potential of LoRa technology in enhancing connectivity and data transmission over wide urban areas, paving the way for more resilient and adaptive smart cities.

Keywords

Smart city, Internet of Things (IoT), LoRa, Mesh

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Μαρινάκη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων & Διοίκησης. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τους κυρίους Ιωάννη Παπία και Φίλιππο Σερέπα για την καθοδήγησή τους και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τη γυναίκα μου για την υποστήριξη και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Ιούλιος 2024

Ευάγγελος Φ. Περόπουλος

Περιεχόμενα

Περίληψη	7
Abstract	9
Ευχαριστίες	11
Πρόλογος	17
1 Η ιδέα της Έξυπνης Πόλης	19
1.1 Smart City	19
1.2 Internet of Things (IoT)	20
1.2.1 Δυνατότητες και Περιοχές εφαρμογών IoT	20
1.2.2 Πρωτόκολλα IoT	22
1.3 Δίκτυα LPWAN	24
2 Πρωτόκολλο LoRa	27
2.1 Διαμόρφωση σημάτων στο LoRa	27
2.1.1 Chirp Spread Spectrum (CSS)	28
2.2 Βασικές Παράμετροι LoRa	30
2.2.1 Code Rate (CR)	30
2.2.2 Spreading Factors (SF)	30
2.2.3 Bandwidth (BW)	33
2.3 Δομή πακέτου LoRa	33
2.4 Time on Air (TOA)	34
2.5 Εμβέλεια LoRa	36
2.5.1 Διαμόρφωση PHY	37
2.5.2 Παράγοντας περιβάλλον	38
2.6 LoRaWAN	38
2.6.1 Αρχιτεκτονική LoRaWAN	39
2.6.2 Κλάσεις συσκευών δικτύου LoRaWAN	42
2.7 Τοπολογία δικτύου LoRaWAN	43
3 Δίκτυα Πλέγματος (Mesh)	45
3.1 Εισαγωγή στα Δίκτυα Mesh	45
3.1.1 Αρχιτεκτονική WMNs	46
3.1.2 Χαρακτηριστικά WMNs	48

3.2	Πρωτόκολλα	50
3.3	Ενσωμάτωση με άλλα δίκτυα	51
3.3.1	Πρότυπο IEEE 802.11 (WiFi)	51
3.3.2	Δίκτυα Bluetooth/BLE	52
3.3.3	ZigBee Pro & ZigBee 3.0	55
3.3.4	Thread	57
3.3.5	Lightweight Mesh (LWMesh)	58
3.4	Δίκτυο LoRa Mesh	59
3.4.1	Ανάγκη αναβάθμισης LoRaWAN σε Mesh	60
4	Υλοποίηση δικτύου LoRa Mesh	63
4.1	Εξοπλισμός	63
4.2	Περιγραφή Λειτουργίας	65
4.2.1	Συλλογή Δεδομένων	65
4.2.2	Μεταφορά Δεδομένων	67
4.2.3	Επεξεργασία και Αποθήκευση Δεδομένων (Backend)	67
4.2.4	Παρουσίαση Δεδομένων (Frontend)	68
4.3	Ανάλυση Επιπρόσθετων Εννοιών	69
4.3.1	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	69
4.3.2	Βάση Δεδομένων MongoDB	71
4.3.3	Βιβλιοθήκες Highcharts	72
4.4	Δοκιμή Λειτουργίας και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	72
4.5	Μελλοντικές Αναβαθμίσεις	75
4.5.1	Απομακρυσμένος Έλεγχος Κόμβου	75
4.5.2	Δημιουργία WiFi Access Point	76
5	Πεδία εφαρμογών και Υλοποίηση στον Πραγματικό Κόσμο	77
5.1	Υλοποίηση μέσα στην έξυπνη πόλη	77
5.2	Μελλοντικές Εφαρμογές	79
6	Συμπέρασμα	81
	Παραρτήματα	83
	Α' Ανάλυση Πηγαίου Κώδικα	85
	Β' Πίνακας Υλικών	87
	Βιβλιογραφία	91
	Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	93

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Διάγραμμα Έξυπνης πόλης [1]	19
1.2	Γεωγραφική κάλυψη δικτύων [2]	24
1.3	Συγκριτικός πίνακας των πιο χαρακτηριστικών LPWAN τεχνολογιών [3]	25
2.1	Μη αδειοδοτημένες συχνότητες LoRa ανά ήπειρο [4]	27
2.2	Μοντέλο δικτύου OSI επτά στρωμάτων [5]	28
2.3	Διαμόρφωση [6]	28
2.4	Αποδιαμόρφωση [6]	29
2.5	LoRa Chirp Spread Spectrum [5]	29
2.6	Codes Rates [7]	30
2.7	Data rates για διαφορετικά code rates και bandwidth (SF=7) [7]	31
2.8	Spreading in LoRa [7]	31
2.9	SF με τα αντίστοιχα μήκη chips [7]	32
2.10	Data rates για διαφορετικά SF και bandwidth (CR=0) [7]	32
2.11	Το BW του LoRa αντιστοιχεί στο μεταδιδόμενο φάσμα διπλής ζώνης [7]	33
2.12	Δομή πακέτου LoRa [7]	33
2.13	TOA πακέτου LoRa με BW = 125Khz και CR = 0 [7]	35
2.14	TOA πακέτου LoRa με BW = 125Khz και SF = 0 [7]	36
2.15	TOA πακέτου LoRa με CR = 0 και SF = 7 [7]	36
2.16	Spreading Factors για κανάλι 125KHz (UL) [5]	36
2.17	Εμβέλεια σε σχέση με Spreading factor και data rate [8]	37
2.18	Συγκεντρωτικός πίνακας με την επίδραση των παραμέτρων LoRa στην εμβέλεια μετάδοσης [9]	37
2.19	Δείκτης RSSI σε σχέση με τη θερμοκρασία [9]	38
2.20	Δομή LoRaWAN [5]	39
2.21	Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN [5]	39
2.22	Πύλες ενός τυπικού δικτύου LoRaWAN [5]	40
2.23	Gateways: Αποστολή και λήψη μηνυμάτων από τερματικούς κόμβους [5]	41
2.24	Παράθυρα λήψης κλάσης A [10]	43
2.25	Παράθυρα λήψης κλάσης B [10]	43
2.26	Παράθυρα λήψης κλάσης C [10]	43
2.27	Τοπολογία αστέρα LoRaWAN [8]	44
2.28	Τοπολογία stars-of-stars [8]	44
3.1	Infrastructure/backbone WMNs [11]	47

3.2	Client WMNs	47
3.3	Hybrid WMNs [11]	48
3.4	Δίκτυο βάσει του προτύπου IEEE 802.11s [12]	52
3.5	Λειτουργίες Bluetooth Mesh [12]	54
3.6	(a) Τοπολογία star-of-star σε LoRaWAN δίκτυο (b) Τοπολογία Mesh σε LoRaWAN δίκτυο [12]	60
3.7	Επέκταση εμβέλειας πύλης. Τα κόκκινα και πορτοκαλί πλοία βρίσκονται εκτός εμβέλειας αλλά το μήνυμα μεταδίδεται μέσω των πράσινων πλοίων. Επιπλέον τα κίτρινα πλοία συνεισφέρουν για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης [13]	61
3.8	Μετά από καταστροφή τελικοί κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με το δίκτυο και να προωθούν μηνύματα. [13]	61
3.9	Ανάπτυξη δικτύου Mesh χωρίς υποδομή LoRaWAN [13]	62
4.1	TTGO LORA32 868/915MHz SX1276 ESP32 Oled-display Bluetooth WIFI Lora	63
4.2	Breadboard	64
4.3	Αισθητήρας DHT11	64
4.4	Jump wires	65
4.5	Ο κόμβος 3 με αισθητήρα DHT11 πάνω σε breadboard	66
4.6	Διεύθυνση κόμβου 3	66
4.7	Πακέτα δεδομένων στον broker	67
4.8	Βάση δεδομένων MongoDB	68
4.9	Dashboard	68
4.10	Αρχιτεκτονική MQTT [14]	70
4.11	Ενέργειες πρωτοκόλλου MQTT	71
4.12	Πληροφορίες από το terminal για κόμβο με αισθητήρα	73
4.13	Πληροφορίες από το terminal για τον κόμβο γέφυρα	73
4.14	Οι μετρήσεις των κόμβων στο terminal του VS Code	74
4.15	Αρχεία text θερμοκρασίας και υγρασίας	74
4.16	Μετρητές τύπου gauges για τις τιμές θερμοκρασίας/υγρασίας σε πραγματικό χρόνο του κόμβου 2	74
4.17	Διάγραμμα με τις θερμοκρασίες των κόμβων	74
4.18	JSON εντολή για κόμβο 3	75
4.19	Πορεία εντολής στο δίκτυο mesh	75
4.20	WiFi access point κόμβου 3	76
A.1	Αρχικοποίηση LoRa	85
A.2	Ρύθμιση παραμέτρων PHY	85
A.3	Αρχείο RHRouter.h	86
A.4	Δοκιμαστικά δίκτυα Mesh	86

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης της προπτυχιακής μου φοίτησης στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η υλοποίηση της εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων & Διοίκησης του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων. Το εργαστήριο παρείχε τον απαραίτητο εξοπλισμό για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός δικτύου LoRa Mesh, στο οποίο οι δυναμικοί κόμβοι θα συνδέονται και θα συλλέγουν δεδομένα από αισθητήρες (θερμοκρασίας, υγρασίας). Για την απεικόνιση των δεδομένων θα αναπτυχθεί ένα web-based dashboard με έξυπνα γραφήματα. Τελικός σκοπός της εργασίας είναι το προτεινόμενο δίκτυο να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στην υλοποίηση και ανάπτυξη της έξυπνης πόλης.

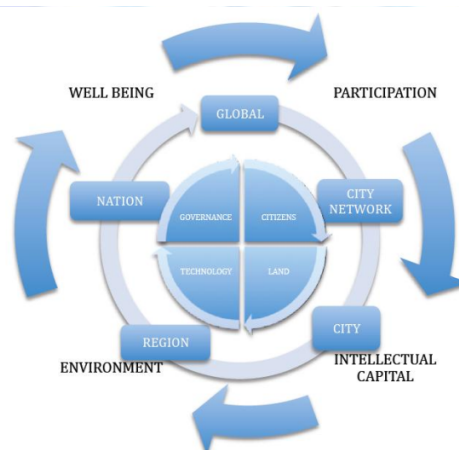
Κεφάλαιο 1

Η ιδέα της Έξυπνης Πόλης

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτύξουμε έναν ορισμό για την έξυπνη πόλη (Smart city), όπως επίσης θα γίνει και μια αναφορά για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) το οποίο μπορούμε να πούμε πως είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την υλοποίηση της έξυπνης πόλης. Τέλος θα γίνει μια αναφορά στα LPWAN δίκτυα και στα κύρια χαρακτηριστικά που διέπει το καθένα.

1.1 Smart City

Σύμφωνα με τον ορισμό που έχει προταθεί από την Renata Dameri, καθηγήτρια στο Πανεπιστήμιο της Γένοβα, έξυπνη πόλη είναι μια καλά ορισμένη γεωγραφική περιοχή, στην οποία υψηλές τεχνολογίες όπως η Πληροφορική και οι Επικοινωνίες, η λογιστική, η παραγωγή ενέργειας και άλλες, συνεργάζονται για να δημιουργήσουν οφέλη για τους πολίτες σε όρους ευημερίας, συμμετοχής, περιβαλλοντικής ποιότητας και έξυπνης ανάπτυξης. Διοικείται από ένα καθορισμένο σύνολο θεμάτων, ικανό να ορίσει τους κανόνες και την πολιτική για την κυβέρνηση και την ανάπτυξη της πόλης [1].



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα Έξυπνης πόλης [1]

Οι έξυπνες πόλεις αναπτύσσονται ως απάντηση στην ανάγκη για βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αστικών κέντρων και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων τους. Αυτές

οι πόλεις εφαρμόζουν τεχνολογίες IoT για να συλλέξουν, να αναλύσουν και να χρησιμοποιήσουν δεδομένα με σκοπό τη βελτίωση της διαχείρισης των υποδομών και των υπηρεσιών της πόλης. Με τη χρήση αυτών των δεδομένων οι έξυπνες πόλεις μπορούν να προβλέπουν προβλήματα όπως η υπερβολική κίνηση, η ρύπανση και η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων και να λαμβάνουν αποτελεσματικά μέτρα για την αντιμετώπισή τους. Συνολικά, οι έξυπνες πόλεις συμβάλλουν στη δημιουργία πιο βιώσιμων, ασφαλών και αποδοτικών αστικών κέντρων [15].

1.2 Internet of Things (IoT)

Η εποχή μας σηματοδοτείται από την αναπτυσσόμενη σημασία του Διαδικτύου, το οποίο έχει εισχωρήσει σε κάθε γωνιά του πλανήτη και επηρεάζει την καθημερινότητά μας. Η εξέλιξη αυτή οδηγεί στην έναρξη μιας νέας εποχής, του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), όπου συσκευές κάθε είδους θα συνδέονται διαρκώς στο Διαδίκτυο. Ο όρος αυτός αποτελείται από μια πληθώρα συσκευών, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές και μικροελεγκτές, οι οποίες αλληλεπιδρούν για να αυτοματοποιήσουν διάφορες καθημερινές λειτουργίες, προσφέροντας άνεση και αποτελεσματικότητα στη ζωή μας. Το IoT επιτρέπει επίσης τη χρήση τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση, για να καταστήσει τις διαδικασίες ανάλυσης και λήψης αποφάσεων πιο δυναμικές και αποτελεσματικές [15].

1.2.1 Δυνατότητες και Περιοχές εφαρμογών IoT

Τα συστήματα IoT διαθέτουν μια σειρά από δυνατότητες που τα καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλα για τις σύγχρονες συνθήκες ζωής και εργασίας. Ανάμεσα σε αυτές τις δυνατότητες περιλαμβάνονται:

- **Δυναμική και αυτό-προσαρμοστική λειτουργία:** Οι συσκευές και τα συστήματα IoT έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται δυναμικά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει των παραμέτρων λειτουργίας ή του περιβάλλοντός τους.
- **Αυτοδιαμορφωμένη δομή:** Οι συσκευές IoT μπορούν να διαμορφώνονται αυτόματα για να προσφέρουν ευελιξία στη λειτουργικότητά τους, μέσω αλληλεπίδρασης με άλλες συσκευές.
- **Διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας:** Οι συσκευές IoT υποστηρίζουν διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, επιτρέποντας την αλληλεπίδρασή τους με άλλες συσκευές και υποδομές ελέγχου.
- **Μοναδική ταυτότητα:** Κάθε συσκευή IoT διαθέτει μια μοναδική ταυτότητα, επιτρέποντας την αναγνώρισή της σε ένα δίκτυο και την επικοινωνία με άλλες συσκευές.
- **Ενσωμάτωση στο δίκτυο πληροφοριών:** Οι συσκευές IoT ενσωματώνονται σε ένα δίκτυο, επιτρέποντας τη συλλογή και ανάλυση πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων.
- **Αντίληψη του περιβάλλοντος:** Οι κόμβοι αισθητήρων αποκτούν γνώση για το περιβάλλον τους μέσω αισθητήρων και λαμβάνουν αποφάσεις με βάση αυτήν την πληροφορία.

- **Ευφυής ικανότητα λήψης αποφάσεων:** Οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να συνεργάζονται για τη λήψη συλλογικών αποφάσεων, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του δικτύου σε ενεργειακό επίπεδο.

Εργαλειοποιώντας τις παραπάνω δυνατότητες, οι συσκευές IoT βρίσκουν εφαρμογή τόσο στη βιομηχανία όσο και σε οικιακό περιβάλλον. Οι κυριότερες περιοχές που χρησιμοποιούνται σήμερα IoT συσκευές είναι οι ακόλουθες:

- **Υγεία:** Χρησιμοποιούνται στον τομέα της υγείας για τη βελτίωση της παροχής φροντίδας στους ασθενείς. Αυτές οι συσκευές μπορούν να παρακολουθούν τα ζωτικά σημεία των ασθενών, να επιτηρούν τη συμμόρφωσή τους με τις ιατρικές οδηγίες, και να συλλέγουν δεδομένα για την υγεία τους. Επίσης, χρησιμοποιούνται για την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών και την υποστήριξη κλινικής έρευνας [16] [15].
- **Βιομηχανία:** Στον τομέα της βιομηχανίας χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των γραμμών παραγωγής, την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων και τον έλεγχο της ροής των υλικών. Επίσης, βοηθούν στη συλλογή δεδομένων για την ποιότητα των προϊόντων και τη βελτίωση της ασφάλειας των εργαζομένων [17] [15].
- **Λιανικό εμπόριο:** Στον τομέα του λιανικού εμπορίου, οι συσκευές IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των αποθεμάτων, την εξατομίκευση των προγραμμάτων προς τους πελάτες, τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη συμπεριφορά των πελατών, και την παροχή εξατομικευμένων συστάσεων [18] [15].
- **Μεταφορές:** Στον τομέα των μεταφορών, για την παρακολούθηση της κατάστασης των οχημάτων, την παρακολούθηση της θέσης τους και τη βελτίωση της ασφάλειας των οδηγών. Επίσης, βοηθούν στην αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης μέσω της χρήσης GPS [19] [15].
- **Γεωργία:** Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της απόδοσης των καλλιεργειών και τη μείωση της κατανάλωσης νερού και λιπασμάτων. Ταυτόχρονα, παρέχουν δεδομένα που βοηθούν τους αγρότες να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την καλλιέργεια, την άρδευση και τη συντήρηση των φυτών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συλλογής δεδομένων από τις συσκευές IoT σχετικά με τις συνθήκες περιβάλλοντος και την υγεία των φυτών [20] [15].
- **Έξυπνα σπίτια:** Στα έξυπνα σπίτια οι συσκευές IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης του σπιτιού, όπως θερμοκρασία και υγρασία, τη παρακολούθηση της θέσης των μελών της οικογένειας μέσω κινητών συσκευών ή wearables. Επίσης μπορούν να ελέγχουν τη λειτουργία των οικιακών συσκευών από απόσταση, όπως ενεργοποίηση αφυγραντήρων ή κλιματιστικών ανάλογα με τις ανάγκες [15].
- **Αεροπορία:** Χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ασφάλειας των επιβατών και του πληρώματος, καθώς και για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των αεροπορικών

δρομολογιών. Τα δεδομένα από τις συσκευές IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών και για τη βελτίωση της ασφάλειας των πτήσεων. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των αεροσκαφών και την παρακολούθηση της θέσης τους, με στόχο τη μείωση των κόστων και τη βελτίωση της εξυπηρέτησης των επιβατών [15].

- **Ενέργεια:** Τέλος, στον ενεργειακό τομέα, οι συσκευές IoT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας, την παρακολούθηση της θέσης των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας και τον έλεγχο της ροής της ενέργειας [21] [15].

1.2.2 Πρωτόκολλα IoT

Για τη διασύνδεση των συσκευών IoT υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα τα οποία χρησιμοποιούνται ανάλογα της περιοχής εφαρμογής. Μερικά από αυτά είναι τα ακόλουθα :

- **WiFi:** Το Wireless Fidelity (WiFi) είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας που βασίζεται στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11 και χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα τοπικής επικοινωνίας για τη σύνδεση φορητών συσκευών και την πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η τρέχουσα έκδοση του προτύπου WiFi που είναι δημοφιλής είναι το 802.11n, το οποίο υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων εκατοντάδων Mbps. Ωστόσο, οι αρχικές εκδόσεις του προτύπου δεν είναι πάντα κατάλληλες για εφαρμογές Internet of Things (IoT) λόγω της σχετικά υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και του υψηλού κόστους μεταφοράς δεδομένων. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, δημιουργήθηκε η ομάδα εργασίας 802.11ah.[15]. Η έκδοση 802.11ah ή αλλιώς WiFi HaLow, αναπτύχθηκε για να παρέχει μεγαλύτερη κάλυψη και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Λειτουργεί σε συχνότητες κάτω του ενός GHz (sub-1 GHz) και μπορεί να φτάσει σε εμβέλεια μέχρι και 1 χλμ, με ρυθμούς μετάδοσης 150 kbps.[22]
- **ZigBee:** Το πρωτόκολλο ZigBee είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας που αναπτύχθηκε ειδικά για χρήση σε προσωπικά τοπικά δίκτυα (Personal Area Networks - PAN) με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί στις συχνότητες των 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz με εμβέλεια μέχρι και 100 μέτρα, η οποία εξαρτάται από την συχνότητα εκπομπής.[23] Το ZigBee υποστηρίζει διάφορες τοπολογίες δικτύου, όπως αστέρα, δένδρου και πλέγματος, και μπορεί να συνδέσει έως και 65.000 κόμβους σε ένα δίκτυο. Εφαρμόζεται ευρέως σε διάφορα περιβάλλοντα (IoT), με ένα εξαιρετικό παράδειγμα να είναι ο τομέας της υγειονομικής περίθαλψης. Χρησιμοποιείται για τη σύνδεση αισθητήρων, συντονιστών και άλλων συσκευών σε ένα δίκτυο που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της μη επεμβατικής υγειονομικής περίθαλψης. Το ZigBee Health Care Profile είναι ένα προφίλ που αναπτύχθηκε από τη ZigBee Alliance και σχεδιάστηκε ειδικά για να χρησιμοποιηθεί σε συσκευές υγειονομικής περίθαλψης. Βασίζεται στο πρότυπο ZigBee Pro και παρέχει ένα πλήρως λειτουργικό πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής για την ανταλλαγή δεδομένων σε περιβάλλοντα υγειονομικής περίθαλψης. Το πρότυπο IEEE 11073, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, υποστηρίζεται στο ZigBee

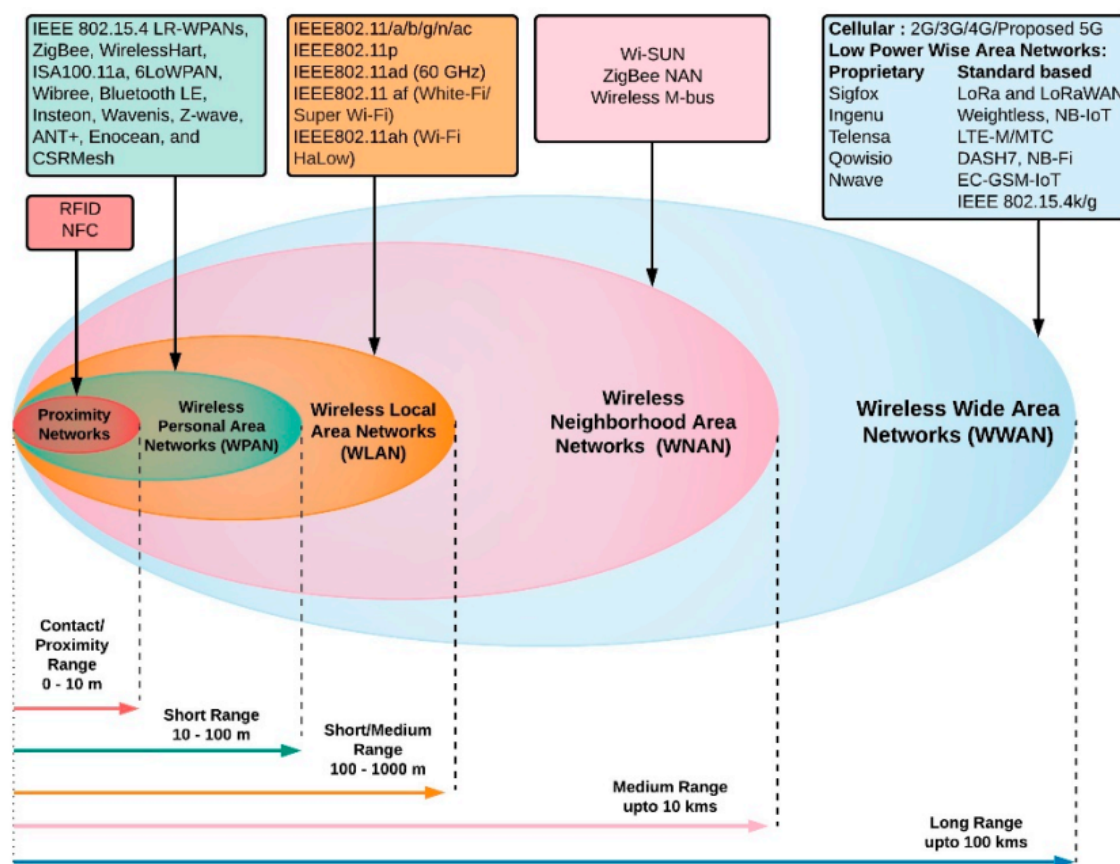
μέσω υπηρεσιών σήραγγας (tunneling), επιτρέποντας την αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών στο δίκτυο.

- **WIA-PA:** Το WIA-PA έχει προταθεί σαν αντικαταστάτης των προτύπων IEEE802.15.1, IEEE802.15.4 και IEEE802.11. Είναι κινέζικο πρότυπο που εφαρμόζεται κυρίως στον αυτοματισμό βιομηχανικών διεργασιών [15].
- **ISA 100.11a:** Η επιτροπή ISA100 έχει ως κύριο στόχο να αναπτύξει ένα σύνολο προτύπων που καλύπτουν τις ανάγκες ασύρματων δικτύων στη βιομηχανία. Αυτά τα πρότυπα στοχεύουν στο να καλύψουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των κατασκευαστικών διαδικασιών, περιλαμβανομένων των ελέγχων διεργασιών, της παρακολούθησης περιουσιακών στοιχείων, της σύγκλισης μέσω αναγνώρισης δικτύων και των εφαρμογών μεγάλων αποστάσεων. Το ISA-100.11a, το πρώτο πρότυπο στην οικογένεια, προτείνει μια τοπολογία δικτύου πλέγματος με σκοπό την παροχή ασφαλών ασύρματων επικοινωνιών για τον έλεγχο διαδικασιών στον τομέα της βιομηχανίας. Το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων του ISA-100.11a βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 [15].
- **6LoWPAN:** Το πρωτόκολλο 6LoWPAN αναπτύχθηκε από την Ομάδα Μηχανικών Διαδικτύου (Internet Engineering Task Force - IETF). Αυτό το ασύρματο πρωτόκολλο χαρακτηρίζεται από χαμηλό εύρος ζώνης, πακέτα περιορισμένου μεγέθους και ευρύ φάσμα διευθύνσεων. Χρησιμοποιείται κυρίως για να επιτρέπει στις συσκευές (IoT) να συνδεθούν σε δίκτυα IP, και είναι συμβατό με το IPv6. Η ομάδα 6LoWPAN έχει ορίσει μηχανισμούς ενθυλάκωσης και συμπίεσης κεφαλίδων που υποστηρίζουν τη μετάδοση τυπικών πακέτων IPv6 μέσω δικτύων που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Επιπλέον, υπάρχει μια επέκταση που αναπτύχθηκε από την ομάδα 6LoWPAN του IETF και χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Bluetooth Χαμηλής Ενέργειας (Bluetooth Low Energy) [15].
- **LoRaWAN:** Το LoRa (Long Range) είναι ένα πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου που αναπτύχθηκε από τη Semtech με στόχο την υποστήριξη δικτύων χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας περιοχής. Χρησιμοποιεί συχνότητες χωρίς άδεια που ποικίλλουν ανά περιοχή (π.χ. 868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και την Αυστραλία, και 923 MHz στην Ασία). Το LoRa μπορεί να υποστηρίξει μεταδόσεις μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής ισχύος, με εμβέλειες που μπορεί να ξεπερνούν τα 10 χιλιόμετρα σε αραιοκατοικημένες περιοχές. Δεδομένου ότι το LoRa καθορίζει το φυσικό επίπεδο, αναγκαία ήταν η ανάπτυξη πρωτοκόλλων ανώτερου επιπέδου για τον έλεγχο της επικοινωνίας. Ένα από αυτά είναι το LoRaWAN, το οποίο λειτουργεί κυρίως ως πρωτόκολλο επιπέδου MAC (Media Access Control), διαχειριζόμενο τη δρομολόγηση και την επικοινωνία μεταξύ πυλών και τελικών συσκευών. Το LoRaWAN εστιάζει σε εφαρμογές δικτύων ευρείας περιοχής (WAN) και έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει χαμηλού κόστους δίκτυα με χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την υποστήριξη χαμηλής κατανάλωσης, ασφαλούς επικοινωνίας σε διάφορες εφαρμογές όπως συσκευές IoT, M2M επικοινωνία, έξυπνες πόλεις και βιομηχανικές εφαρμογές. Το LoRaWAN είναι βελτιστοποιημένο για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μπορεί να υποστηρίξει μεγάλα

δίκτυα με εκατομμύρια συσκευές [15].

1.3 Δίκτυα LPWAN

Όπως είδαμε το Internet of Things (IoT) αντιπροσωπεύει μια σημαντική καινοτομία στον τομέα των επικοινωνιών, επιτρέποντας σε μεγάλο αριθμό συσκευών να συνδεθούν στο διαδίκτυο και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτές οι συσκευές, που είναι ενεργειακά αυτόνομες και χαμηλής ισχύος, διατηρούν μεγάλη διάρκεια ζωής και ανταλλάσσουν μικρό όγκο δεδομένων. Η ανάπτυξη των εφαρμογών IoT έχει συνοδευτεί από τη χρήση ποικίλων τεχνολογιών, από τα παραδοσιακά WLAN και WPAN ως τα κυψελωτά δίκτυα. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις είναι συχνά δαπανηρές, καταναλωτικές σε ενέργεια και πολύπλοκες.



Σχήμα 1.2: Γεωγραφική κάλυψη δικτύων [2]

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, αναπτύχθηκαν τα δίκτυα μεγάλης εμβέλειας χαμηλής ισχύος (LPWANs), τα οποία προσφέρουν μεγάλη ενεργειακή αυτονομία, μεγάλη περιοχή κάλυψης και χαμηλό κόστος. Οι τεχνολογίες LPWAN χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αδειοδοτημένες ζώνες και μη αδειοδοτημένες ζώνες. Στην πρώτη κατηγορία, οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν το LTE-M και το NB-IoT, ενώ στη δεύτερη περιλαμβάνονται τα LoRa-LoRaWAN, SigFox και Ingenu. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν ευέλικτη και αποτελεσματική λύση για τις ανάγκες των εφαρμογών IoT, καθιστώντας την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις πιο εφικτή και οικονομική.[3]

	LoRa	Sigfox	Ingenu	NB-IoT	LTE-M
Ιδιόκτητο/ανοιχτό	LoRa - Ανοιχτό	Ανοιχτό	Ιδιόκτητο	Ανοιχτό	Ανοιχτό
Αδειοδοτημένο φάσμα	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Συχνότητα	865MHz	865MHz	2.4GHz	τοπικό	2.4GHz
Ρυθμός μετάδοσης	30Kbps	300Kbps	634Kbps	250Kbps	1Mbps
Εύρος απόστασης	15 Km	30 Km	50 Km	15 Km	5 Km
Κινητικότητα	Ναι	Όχι	Όχι		
Ασφάλεια	Μεγάλη	Μεγάλη	Πολύ μεγάλη	Πολύ μεγάλη	Πολύ μεγάλη
Χρόνος ζωής μπαταρίας (χρόνια)	>10	>10	>10	>10	>10
Κόστος	Χαμηλό	Χαμηλό	Ψηλό	Διαμορφούμενο	Διαμορφούμενο

Σχήμα 1.3: Συγκριτικός πίνακας των πιο χαρακτηριστικών LPWAN τεχνολογιών [3]

Η τεχνολογία LoRa θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο, συνεπώς παρακάτω παρουσιάζονται οι υπόλοιπες τεχνολογίες των LPWAN δικτύων[2]:

- Sigfox:** Είναι ένα ultra-narrowband πρότυπο που ανήκει στις μη αδειοδοτημένες ζώνες και χρησιμοποιεί έναν αργό ρυθμό διαμόρφωσης για να επιτύχει μεγαλύτερη εμβέλεια. Αρχικά, το Sigfox υποστήριζε μόνο μονόδρομη επικοινωνία ανοδικής ζεύξης, δηλαδή μεταξύ των συσκευών αισθητήρων και του συγκεντρωτή με DBPSK διαμόρφωση. Οι νεότερες εκδόσεις υποστηρίζουν αμφίδρομη επικοινωνία με GFSK διαμόρφωση για ζεύξη καθόδου. Λόγω του ότι επιτρέπει στον δέκτη να ακούει μόνο μόνο σε μια πολύ στενή ζώνη του φάσματος ultra-narrowband, το φαινόμενο του θορύβου μετριάζεται αισθητά. Για να παρέχει αξιοπιστία, το Sigfox μεταδίδει το μήνυμα πολλαπλές φορές, με αποτέλεσμα υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Συνήθως υλοποιείται από παρόχους δικτύων όπου οι χρήστες πρέπει να πληρώσουν συνδρομή, σε σχέση με το LoRa που μπορεί να υλοποιηθεί από οποιονδήποτε χωρίς χρεώσεις. Η πύλη του Sigfox μπορεί να εξυπηρετήσει εκατομμύρια συνδεδεμένους κόμβους, με ακτίνα κάλυψης έως 30-50 Km για αγροτικές περιοχές και 3-10 km σε αστικό περιβάλλον [2] [24].
- Ingenu:** Βασίζεται στην τεχνολογία RPMA με πιο ευέλικτους κανονισμούς φάσματος, επιτρέποντας υψηλότερη ροή και χωρητικότητα. Χρησιμοποιεί τεχνική εξάπλωσης περιοχής με άμεση ακολουθία φάσης με κορυφαίο ρυθμό δεδομένων έως 80 kbps. Το Ingenu λειτουργεί στη ζώνη των 2,4 GHz, η οποία του δίνει μικρότερη εμβέλεια από το Sigfox και το LoRa, όπως επίσης και μεγαλύτερη απώλεια εξάπλωσης λόγω εμποδίων. Η ζώνη των 2,4 GHz χρησιμοποιείται ευρέως από πολλές άλλες τεχνολογίες όπως το WiFi, το Bluetooth και το ZigBee, με αποτέλεσμα αύξηση του επιπέδου παρεμβολών λόγω συμφόρησης. Προσφέρει επίσης χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαμηλό κόστος, ανθεκτική και διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία. Για να προσφέρει αξιοπιστία στη μετάδοση, παρέχει επιβεβαίωση μετάδοσης. Δεδομένου ότι έχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη από αυτήν του Sigfox και του LoRa [2].

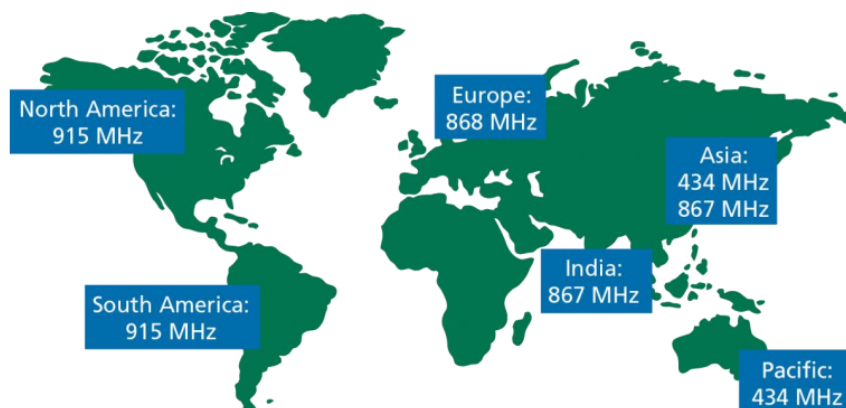
- **NB-IoT:** Πρότυπο LPWAN που αναπτύχθηκε από το 3GPP και αποτελεί μέρος του. Στοχεύει ειδικά στην εσωτερική κάλυψη, το χαμηλό κόστος, τη μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την υψηλή πυκνότητα σύνδεσης. Το NB-IoT επαναχρησιμοποιεί διάφορες αρχές και δομικές μονάδες του φυσικού στρώματος LTE και ανωτέρα στρώματα πρωτοκόλλου, περιορίζοντας όμως το εύρος ζώνης σε μια μόνο στενή ζώνη των 200KHz. Το NB-IoT κατασκευάζεται από τις υπάρχουσες λειτουργίες LTE, αλλά πολλά χαρακτηριστικά έχουν αφαιρεθεί προκειμένου να διατηρηθεί απλό και να μειωθούν το κόστος της συσκευής και η κατανάλωση μπαταρίας. Χρησιμοποιεί διαμορφώσεις QPSK και BPSK, σε συνδυασμό με OFDM για την κατερχόμενη ζεύξη και SC-FDMA για την ανερχόμενη ζεύξη. Σχεδιάστηκε για να προσφέρει εκτεταμένη κάλυψη και να βελτιώσει τη χωρητικότητα ανερχόμενης ζεύξης για χρήστες σε περιοχές κακής κάλυψης, και μπορεί να συνυπάρξει με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [2].
- **LTE-M:** Είναι μια τεχνολογία βασισμένη στο πρότυπο του 3GPP και λειτουργεί στο αδειοδοτημένο φάσμα LTE. Είναι συμβατό με τα δίκτυα LTE και παρέχει σύνδεση για (M2M) επικοινωνία. Το LTE-M επικεντρώνεται στην παροχή μεταβλητών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και υποστηρίζει πραγματικές και μη πραγματικές εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Υποστηρίζει εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης και καθυστερημένης κυκλοφορίας με καθυστερήσεις στο εύρος των μερικών δευτερολέπτων. Έχει χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας και υποστηρίζει λειτουργίες που κυμαίνονται από χαμηλό έως και υψηλό εύρος ζώνης έως 1 Mbps. Υποστηρίζει επίσης συσκευές με πολύ μεγάλο εύρος μεγεθών μηνυμάτων. Επειδή προέρχεται από το LTE ως βάση, υποστηρίζει κινητικότητα ως μέρος της κανονικής λειτουργίας του LTE, αλλά όχι σε περιπτώσεις επέκτασης κάλυψης. Είναι επίσης αναβαθμίσιμο από τα LTE λογισμικά και μπορεί να υποστηρίξει έως και 100.000+ συσκευές ανά βάση για εφαρμογές με πολύ χαμηλές απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων [2].

Κεφάλαιο 2

Πρωτόκολλο LoRa

Το πρωτόκολλο LoRa (Long Range) αποτελεί μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που έχει αναδειχθεί ως ένα ιδανικό εργαλείο για τη σύνδεση των συσκευών στο Δίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Semtech και είναι γνωστό για τη μεγάλη του εμβέλεια, τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και τη δυνατότητα σύνδεσης μεγάλου αριθμού συσκευών σε ένα δίκτυο. Η τεχνολογία LoRa παρέχει μια κάλυψη δικτύου της τάξης των 5χλμ σε αστικό περιβάλλον, ενώ μπορεί να φτάσει και τα 15χλμ σε αγροτικές περιοχές [5].

Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που το καθιστά ιδανική επιλογή για συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρία, με διάρκεια λειτουργίας έως και τα 10 χρόνια. Το LoRa λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ζώνη sub-1GHz από 433MHz έως 923MHz και μπορεί να επιτύχει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 0.3Kbps έως και 30Kbps [3]. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται οι συχνότητες λειτουργίας της διαμόρφωσης LoRa για κάθε ήπειρο.



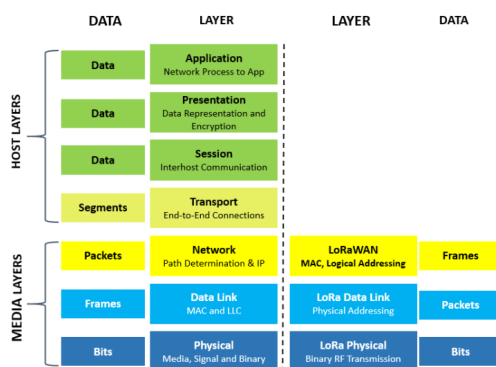
Σχήμα 2.1: Μη αδειοδοτημένες συχνότητες LoRa ανά ήπειρο [4]

2.1 Διαμόρφωση σημάτων στο LoRa

Το LoRa χρησιμοποιεί ένα σύστημα διαμόρφωσης σήματος που ονομάζεται Chirp Spread Spectrum (CSS) και προσφέρει έναν συμβιβασμό μεταξύ ευαισθησίας και ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, λειτουργώντας σε ένα κανάλι σταθερής πλάτους ζώνης 125 KHz ή 500 KHz για κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και σε ένα επίσης σταθερού πλάτους 500 KHz για ανερχόμε-

νη ζεύξη(uplink). Επιπλέον το LoRa χρησιμοποιεί ορθογώνιους παράγοντες διασποράς που επιτρέπει στο δίκτυο να διατηρήσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συνδεδεμένων τερματικών κόμβων κάνοντας προσαρμοστικές βελτιστοποιήσεις των επιπέδων ισχύος και ρυθμών δεδομένων ενός μεμονωμένου τερματικού κόμβου [5].

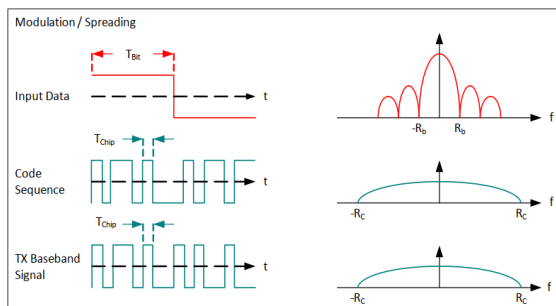
Με τον όρο LoRa ορίζεται το φυσικό στρώμα (PHY) ή αλλιώς υλοποίηση στρώματος "bits" όπως ορίζεται από το μοντέλο δικτύου των επτά στρωμάτων του OSI. Αντί για καλωδίωση, ο αέρας χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς ραδιοκυμάτων LoRa ανάμεσα σε πομπή ή δέκτη RF και μια συσκευή IoT.



Σχήμα 2.2: Μοντέλο δικτύου OSI επτά στρωμάτων [5]

2.1.1 Chirp Spread Spectrum (CSS)

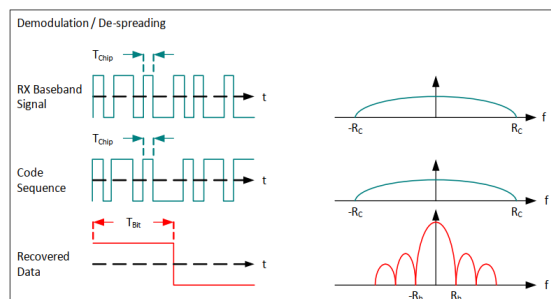
Στα παραδοσιακά συστήματα DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), η φάση του φέροντος σήματος του πομπού αλλάζει σύμφωνα με μια ακολουθία κώδικα, η οποία επιτρέπει την αναγνώριση και τη διάκριση του σήματος από το θόρυβο και τις παρεμβολές. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό του επιθυμητού σήματος δεδομένων με έναν κωδικό διάδοσης, γνωστό και ως ακολουθία chirp. Η ακολουθία chirp συμβαίνει σε πολύ μεγαλύτερο ρυθμό από το σήμα δεδομένων και έτσι εκτείνει το εύρος ζώνης του σήματος πέρα από το αρχικό εύρος ζώνης που καταλαμβάνεται μόνο από το αρχικό σήμα.



Σχήμα 2.3: Διαμόρφωση [6]

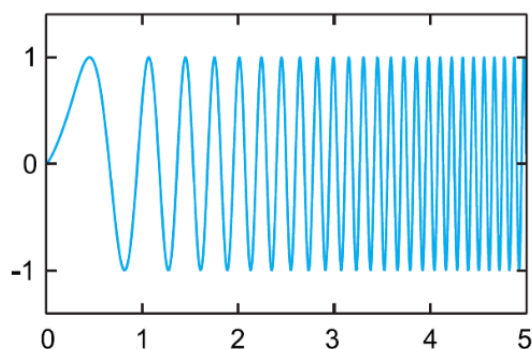
Στον δέκτη, το επιθυμητό σήμα δεδομένων ανακτάται με τον επαναπολλαπλασιασμό του με ένα τοπικά παραγόμενο αντίγραφο της ακολουθίας διάδοσης. Αυτή η διαδικασία πολλα-

πλασιασμού στον δέκτη συμπιέζει αποτελεσματικά το μεταδιδόμενο σήμα πίσω στο αρχικό του εύρος ζώνης. Για τη σωστή ανάκτηση των πληροφοριών, η ίδια ακολουθία chirp πρέπει να χρησιμοποιηθεί στον δέκτη όπως και στον πομπό. Αυτό διασφαλίζει ότι ο δέκτης μπορεί να ανακτήσει τις πληροφορίες αποδοτικά και αξιόπιστα από το μεταδιδόμενο σήμα [6].



Σχήμα 2.4: Αποδιαμόρφωση [6]

Ένα από τα μειονεκτήματα ενός συστήματος DSSS είναι η ανάγκη για ένα υψηλά ακριβές (και δαπανηρό) ρολόι αναφοράς. Η τεχνολογία Chirp Spread Spectrum (CSS) προσφέρει μια χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας ανθεκτική εναλλακτική λύση στο DSSS, που δεν απαιτεί ένα υψηλά ακριβές ρολόι αναφοράς. Στη διαμόρφωση LoRa, η διάδοση του φάσματος του σήματος επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός σήματος chirp που μεταβάλλει συνεχώς τη συχνότητά του, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα [5].



Σχήμα 2.5: LoRa Chirp Spread Spectrum [5]

Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι αποκλίσεις στο χρονισμό και στη συχνότητα μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ισοδύναμες, μειώνοντας σημαντικά την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του δέκτη. Το φάσμα συχνοτήτων του chirp είναι ισοδύναμο με το φασματικό εύρος του σήματος. Το σήμα δεδομένων που μεταφέρει τα δεδομένα από μια συσκευή προς μια πύλη προστατεύεται με υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και μετατρέπεται σε σήμα κουμπώματος στον φορέα chirp. Η διαμόρφωση LoRa περιλαμβάνει επίσης ένα μεταβλητό σχήμα διόρθωσης σφαλμάτων που βελτιώνει την ανθεκτικότητα του μεταδιδόμενου σήματος. Για κάθε τέσσερα bits πληροφοριών που αποστέλλονται, αποστέλλεται ένα πέμπτο bit πληροφοριών παραλείψεων.

2.2 Βασικές Παράμετροι LoRa

Συγκριτικά με προϋπάρχουσες τεχνολογίες, το CSS πάνω στο οποίο βασίζεται το LoRa της Semtech, προσφέρει αυξημένο link budget όπως επίσης και καλύτερη ανοσία ενάντια των παρεμβολών. Το LoRa χρησιμοποιεί ένα κλιμακωτό εύρος ζώνης 125kHz, 250kHz ή 500kHz. Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης έχουμε μεγαλύτερη αντίσταση στον θόρυβο, στο φαινόμενο doppler και στην εξασθένιση.

Επίσης το εξίσου θορυβώδες σήμα του εκπομπού, είναι ανθεκτικό στην εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών και στις εναλλαγές doppler όπως επίσης και στιβαρό ενάντια σε επιθέσεις παρεμβολών και απόπειρες υποκλοπών [7].

Οι κυριότερες παράμετροι που καθορίζουν τη διαμόρφωση LoRa είναι οι Code Rate (CR), Spreading Factor (SF) και Bandwidth (BW) [7]. Η επιλογή του φέροντος σήματος (ISM band) είναι προεπιλεγμένη και εξαρτάται από την ήπειρο που βρισκόμαστε. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, στην Ευρώπη χρησιμοποιούμε την συχνότητα των 868 MHz.

2.2.1 Code Rate (CR)

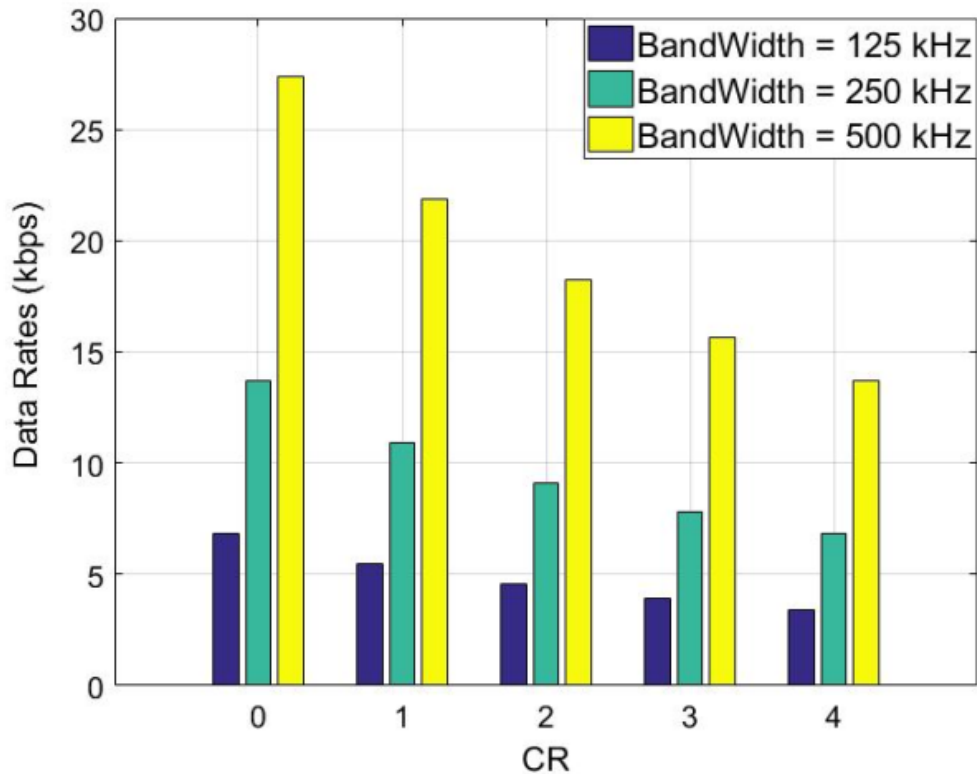
Η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί την τεχνική FEC (Forward Error Correction) για την περαιτέρω αύξηση της ευαισθησίας του δέκτη. Το CR προσδιορίζει την ποσότητα του FEC. Οι τιμές CR κυμαίνονται μεταξύ 0 και 4, όπου CR = 0 σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιείται FEC. Το LoRa χρησιμοποιεί coding rates 4/5, 2/3, 4/7 και 1/2 όπως φαίνονται και στο σχήμα 2.6. Αυτό σημαίνει ότι αν το code rate ορίζεται ως $k=n$, όπου k είναι η χρήσιμη πληροφορία και ο κωδικοποιητής παράγει n bits εξόδου, τότε $n - k$ θα είναι ο αριθμός των περιττών bits. Τα περιττά bits βοηθούν τον δέκτη να ανιχνεύει και πολλές φορές να διορθώνει λάθη στο μεταδιδόμενο μήνυμα, μειώνουν όμως τον αποτελεσματικό ρυθμό δεδομένων (effective data rate). Στο σχήμα 2.7 φαίνεται η αντιστοιχία του data rate σε κάθε CR για τρία διαφορετικά bandwidths. Όσο το CR αυξάνεται, το effective data rate μειώνεται.

CR value	1	2	3	4
no. of redundant bits	1	2	3	4
Coding rate	4/5	2/3	4/7	1/2

Σχήμα 2.6: Codes Rates [7]

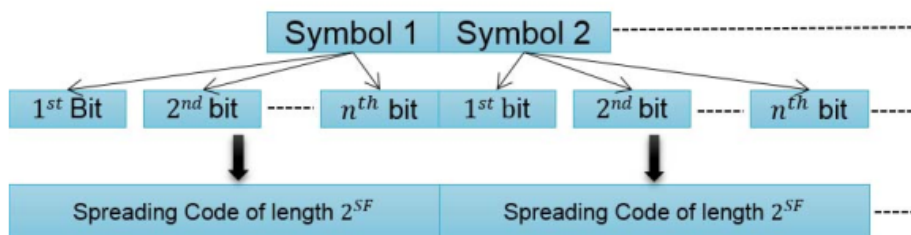
2.2.2 Spreading Factors (SF)

Στους όρους του LoRa, η ποσότητα κωδικοποίησης που εφαρμόζεται στο αρχικό σήμα δεδομένων ονομάζεται παράγοντας διασποράς (Spreading Factor(SF)) [5]. Η διαμόρφωση LoRa χρησιμοποιεί έξι ορθογώνιους παράγοντες διασποράς μεταξύ SF7 και SF12. Πρακτικά οι SF παρέχουν μια ανταλλαγή μεταξύ ρυθμού δεδομένων (data rate) και εμβέλειας. Δηλαδή μια επιλογή μεγαλύτερου SF οδηγεί σε αύξηση της εμβέλειας ενώ μειώνει το data rate και αντίστροφα. Κάθε σύμβολο διαδίδεται από έναν κωδικό διάδοσης(Spreading Code), μήκους



Σχήμα 2.7: Data rates για διαφορετικά code rates και bandwidth ($SF=7$) [7]

2^{SF} chips. Στον πομπό, ο κωδικός διάδοσης χωρίζεται σε υποκωδικούς μήκους $2^{SF}/SF$. Στη συνέχεια, κάθε bit του συμβόλου διαδίδεται χρησιμοποιώντας τον υποκωδικό όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8.

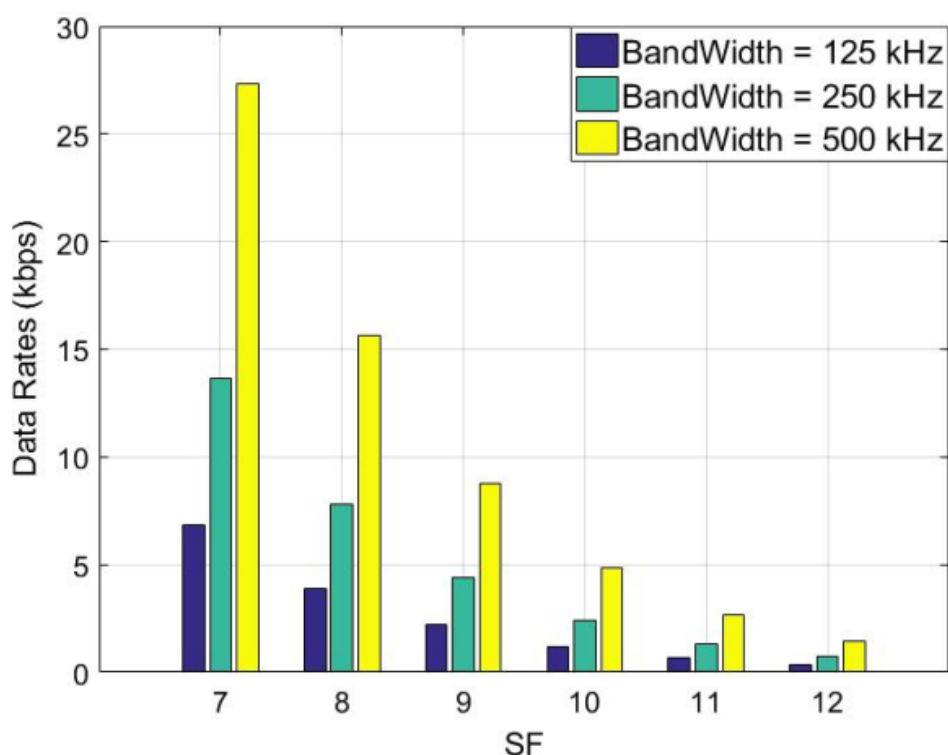


Σχήμα 2.8: Spreading in LoRa [7]

Συνεπώς, απαιτούνται 2^{SF} chips για τη διάδοση ενός συμβόλου ($SF \text{ bits} \times 2^{SF} = SF$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Αυτός ο κωδικός διάδοσης είναι επίσης γνωστός στον δέκτη. Η αντικατάσταση ενός συμβόλου με πολλαπλά chips πληροφοριών σημαίνει ότι ο παράγοντας διάδοσης επηρεάζει άμεσα το αποτελεσματικό ρυθμό δεδομένων. Η σχέση μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης και της επιλογής SF φαίνεται στο Σχήμα 2.10, για τρεις διαφορετικές ζώνες ζώνης

Spreading Factor (SF)	Chip Length 2^{SF}
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

Σχήμα 2.9: SF με τα αντίστοιχα μήκη chips [7]

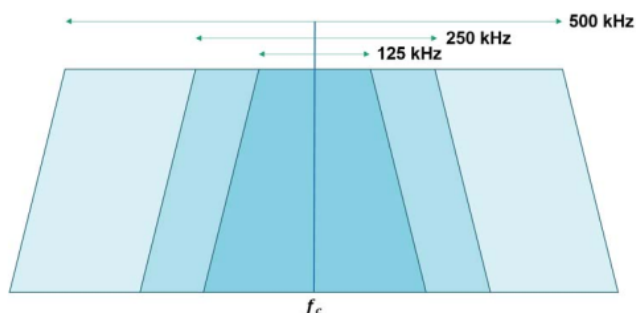


Σχήμα 2.10: Data rates για διαφορετικά SF και bandwidth (CR=0) [7]

Στον δέκτη, ο κωδικός διάδοσης πολλαπλασιάζεται με τα ληφθέντα bits για να αναγεννηθούν τα δεδομένα εισόδου. Ο μηχανισμός διάδοσης φαίνεται επίσης στο Σχήμα 2.8.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι παράγοντες διάδοσης της διαμόρφωσης LoRa είναι εγγενώς ορθογώνιοι. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα που έχουν διαμορφωθεί με διαφορετικούς παράγοντες διάδοσης και μεταδίδονται στο ίδιο κανάλι την ίδια στιγμή δεν προκαλούν παρεμβολές το ένα στο άλλο. Αντί αυτού, τα σήματα με διαφορετικούς παράγοντες διάδοσης απλώς φαίνονται σαν θόρυβος το ένα στο άλλο [5].

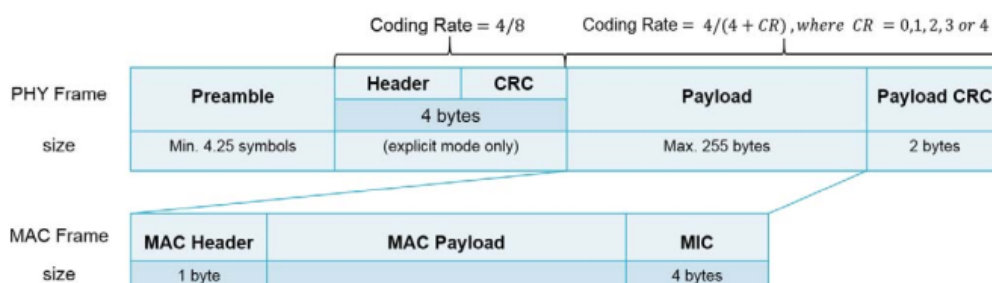
2.2.3 Bandwidth (BW)



Σχήμα 2.11: Το BW του LoRa αντιστοιχεί στο μεταδιδόμενο φάσμα διπλής ζώνης [7]

Το LoRa παρέχει τρεις κλιμακούμενες ρυθμίσεις εύρους ζώνης (BW), των 125kHz, 250kHz και 500kHz, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.11. Ο πομπός στέλνει τα δεδομένα με ρυθμό chip ίσο με το εύρος ζώνης του συστήματος σε chips ανά δευτερόλεπτο ανά Hertz. Έτσι, ένα BW LoRa των 125kHz αντιστοιχεί σε ένα ρυθμό chip 125kcps.

2.3 Δομή πακέτου LoRa



Σχήμα 2.12: Δομή πακέτου LoRa [7]

Το LoRa διαθέτει δύο τύπους πακέτου δεδομένων, την explicit δομή και την implicit. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο δομές είναι ότι μόνο η explicit δομή διαθέτει header πεδίο [25]. Το μέγιστο πακέτο δεδομένων που προσφέρει το LoRa είναι 256 bytes και η δομή του φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Η σύνθεση του πακέτου περιλαμβάνει τα ακόλουθα πεδία:

- **Preamble:** Χρησιμοποιείται για σκοπούς συγχρονισμού. Ο δέκτης συγχρονίζεται με την εισερχόμενη ροή δεδομένων.
- **Header:** Στην προεπιλεγμένη explicit δομή, ο αριθμός bytes στο πεδίο header (κεφαλίδα) καθορίζει τον ρυθμό κώδικα σφαλμάτων (FEC), το μήκος του φορτίου payload και την παρουσία του CRC στο πλαίσιο. Στην explicit δομή ο ρυθμός κωδικοποίησης

και το φορτίο σε ένα πλαίσιο είναι σταθερά. Συνεπώς σε αυτή τη λειτουργική κατάσταση, το πλαίσιο δεν περιέχει αυτό το πεδίο, πράγμα που μειώνει τον χρόνο μετάδοσης. Το πεδίο header περιλαμβάνει επίσης ένα πεδίο CRC των 2 bytes που επιτρέπει στον δέκτη να απορρίπτει πακέτα με μη έγκυρο header. Το πεδίο header μαζί με το CRC είναι 4 bytes και κωδικοποιείται με ρυθμό κωδικοποίησης 1/2, ενώ ο ρυθμός κωδικοποίησης για το υπόλοιπο του πλαισίου καθορίζεται στην κεφαλίδα του PHY. Το πρώτο byte του πεδίου header καθορίζει το μήκος του payload.

- **Payload:** Το μέγιστο μήκος φορτίου ποικίλλει από 2 έως 255 bytes. Αυτό το πεδίο περιλαμβάνει επιπλέον τα ακόλουθα:
 - **MAC header:** Καθορίζει τον τύπο του πεδίου (data ή acknowledgment), την έκδοση του πρωτοκόλλου και την κατεύθυνση (uplink ή downlink)
 - **MAC payload:** Περιεχει τα πραγματικά δεδομένα.
 - **MIC:** Χρησιμοποιείται ως ψηφιακή υπογραφή του payload
- **CRC:** Το CRC (Cyclic Redundancy Check) είναι προαιρετικό και αποτελείται από bytes ελέγχου ακολουθίας κυκλικής περιττότητας για την προστασία από σφάλματα του payload. Συνήθως αποτελείται από 2 bytes.

2.4 Time on Air (TOA)

Στο LoRa ο ακριβής χρόνος παραμονής ενός πακέτου δεδομένων στον αέρα, μπορεί να ορισθεί ως εξής:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (2.1)$$

όπου $T_{preamble}$ και $T_{payload}$ είναι η διάρκεια του preamble και payload αντίστοιχα. Το $T_{preamble}$ μπορεί να ορισθεί ως:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25)T_s \quad (2.2)$$

όπου $n_{preamble}$ είναι το μήκος του preamble ενώ το T_s δηλώνει τον χρόνο μετάδοσης ενός συμβόλου με

$$T_s = 1/R_s \quad (2.3)$$

με SF σαν παράγοντα διασποράς, το R_s είναι ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλου

$$R_s = BW/2^{SF} \quad (2.4)$$

Ο χρόνος του payload είναι:

$$T_{payload} = PLSymb \times T_s \quad (2.5)$$

$PLSymb = 8 + \max(\text{ceil}(\frac{8PL-4SF+28+16CRC-20H}{4(SF-2DE)})(CR+4), 0)$ με τις ακόλουθες επεξηγήσεις:

- PL : αριθμός bytes του payload.
- H : 0 όταν το header είναι ενεργοποιημένο και 1 όταν δεν υπάρχει header.

- DE : 1 για βελτιστοποίηση με ενεργοποιημένο χαμηλό ρυθμό δεδομένων (data rate) και 0 στην αντίθετη περίπτωση.
- CR : code rate.

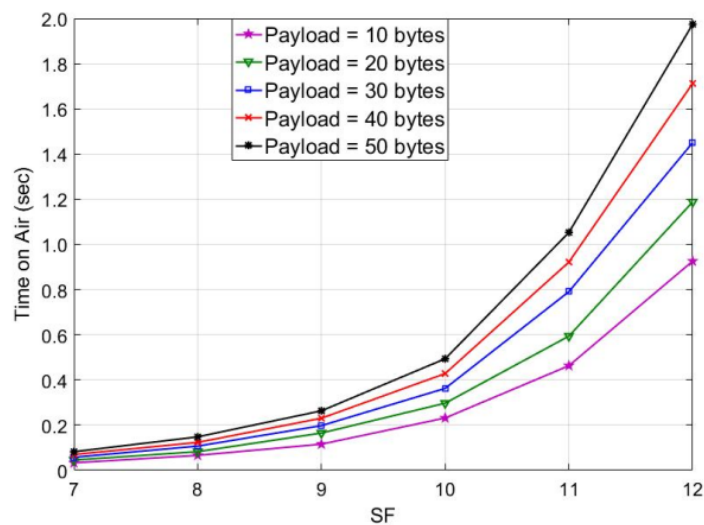
Από τις εξισώσεις 2.1, 2.2 και 2.5 προκύπτει ότι ο συνολικός χρόνος παραμονής τον αέρα μπορεί είναι:

$$T_{packet} = T_s(n_{preamble} + PLSymb + 4.25) \quad (2.6)$$

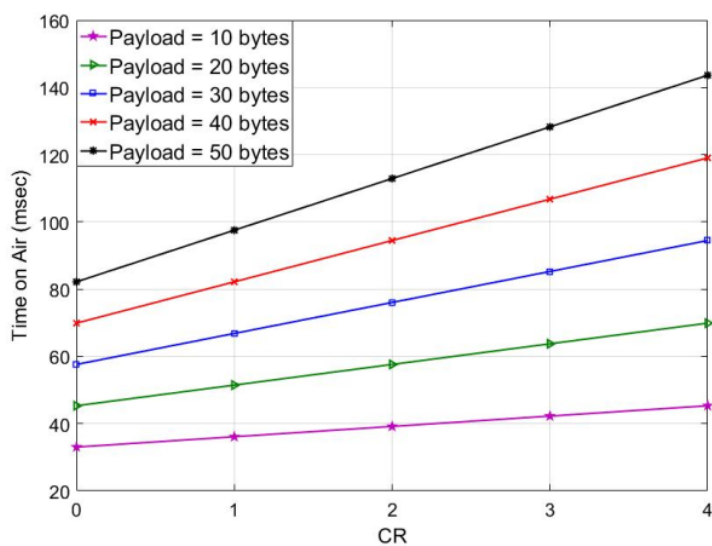
Από τους παραπάνω υπολογισμούς συμπεραίνουμε ότι ο παράγοντας διασποράς επηρεάζει το TOA του πακέτου δεδομένων του LoRa. Το Σχήμα 2.13 δείχνει την μεταβολή του TOA συναρτήσει του SF για διάφορα μεγέθη payload, έχοντας κρατήσει σταθερό το Bw και το CR=0. Ο TOA αυξάνεται με την αύξηση του SF όπως επίσης και με την αύξηση του payload. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και με την μεταβολή του code rate. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14 αύξηση του CR προκαλεί επίσης αύξηση του TOA.

Αν εξετάσουμε την τρίτη παράμετρο της διαμόρφωσης LoRa, θα παρατηρήσουμε ότι ο TOA σε αντίθεση με τα παραπάνω, μειώνεται με την αύξηση του bandwidth. Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται η μεταβολή του TOA συναρτήσει του BW, έχοντας κρατήσει σταθερά CR και SF.

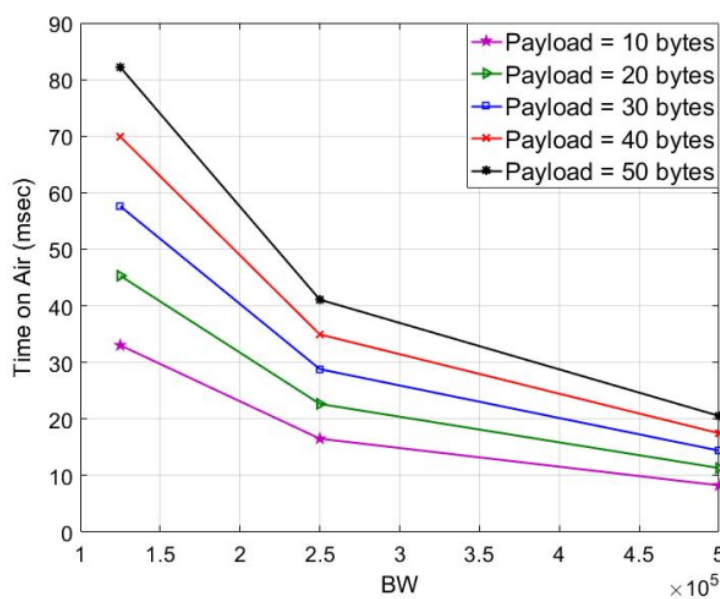
Τέλος στο Σχήμα 2.16 μπορούμε να παρατηρήσουμε τέσσερις διαφορετικούς παράγοντες διάδοσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για (Uplink) μηνύματα σε ένα κανάλι 125 KHz. Φαίνεται ο ισοδύναμος ρυθμός bit καθώς και η εκτιμώμενη εμβέλεια (η οποία εξαρτάται από το έδαφος - μεγαλύτερες αποστάσεις επιτυγχάνονται σε αγροτικό περιβάλλον σε σύγκριση με αστικό περιβάλλον). Επίσης, παρουσιάζεται ο χρόνος παραμονής στον αέρα, (Time on Air(TOA)), για ένα φορτίο 11-byte για κάθε έναν από τους τέσσερις παράγοντες διάδοσης.



Σχήμα 2.13: TOA πακέτου LoRa με $BW = 125\text{KHz}$ και $CR = 0$ [7]



Σχήμα 2.14: TOA πακέτου LoRa με $BW = 125\text{KHz}$ και $SF = 0$ [7]



Σχήμα 2.15: TOA πακέτου LoRa με $CR = 0$ και $SF = 7$ [7]

Spreading Factor (For UL at 125 KHz)	Bit Rate	Range (Depends on Terrain)	Time on Air for an 11-byte payload
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

Σχήμα 2.16: Spreading Factors για κανάλι 125KHz (UL) [5]

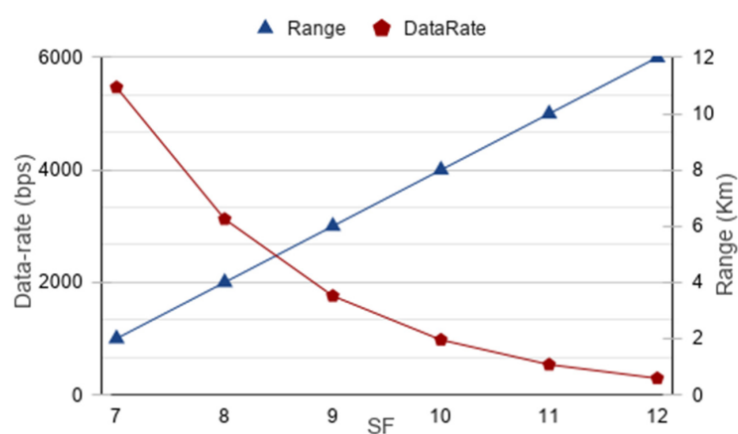
2.5 Εμβέλεια LoRa

Η εμβέλεια του πρωτοκόλλου LoRa εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η διαμόρφωση του φυσικού στρώματος (PHY layer), η ισχύς της κεραίας και οι συνθήκες του

περιβάλλοντος όπως η θερμοκρασία και η μορφολογία του εδάφους.

2.5.1 Διαμόρφωση PHY

Η διαμόρφωση του φυσικού στρώματος γίνεται με την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων που αναλύθηκαν στην ενότητα 2.2. Η εμβέλεια της μετάδοσης είναι ανάλογη με τον χρόνο παραμονής στον αέρα (TOA). Συνεπώς από τα σχήματα 2.13, 2.15 και 2.14 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για να έχουμε αυξημένη εμβέλεια μετάδοσης πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερο Spreading Factor και Code Rate ενώ χρειαζόμαστε μικρότερο Bandwidth. Παραδείγματα συσχέτισης της εμβέλειας με την επιλογή του SF φαίνονται στα σχήματα 2.16 και 2.17.



Σχήμα 2.17: Εμβέλεια σε σχέση με Spreading factor και data rate [8]

Τέλος, όπως σε όλες τις ασύρματες μεταδόσεις, μια επιπλέον παράμετρος που παίζει ρόλο στην εμβέλεια είναι η ισχύς της μετάδοσης. Στους πομποδέκτες LoRa, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της ισχύος μετάδοσης η οποία επηρεάζει δραστικά την ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου αλλά και την εμβέλεια του, η οποία μεγαλώνει ανάλογα και με το κέρδος της κεραιάς που χρησιμοποιείται.

Setting	Values	Effects
Bandwidth	125 ... 500 kHz	Higher bandwidths allow for transmitting packets at higher data rates (1 kHz = 1 kcps), but reduce receiver sensitivity and communication range.
Spreading Factor	$2^6 \dots 2^{12} \frac{\text{chips}}{\text{symbol}}$	Bigger spreading factors increase the signal-to-noise ratio and hence radio sensitivity, augmenting the communication range at the cost of longer packets and hence a higher energy expenditure.
Coding Rate	4/5 ... 4/8	Larger coding rates increase the resilience to interference bursts and decoding errors at the cost of longer packets and a higher energy expenditure.
Transmission Power	-4 ... 20 dBm	Higher transmission powers reduce the signal-to-noise ratio at the cost of an increase in the energy consumption of the transmitter.

Σχήμα 2.18: Συγκεντρωτικός πίνακας με την επίδραση των παραμέτρων LoRa στην εμβέλεια μετάδοσης [9]

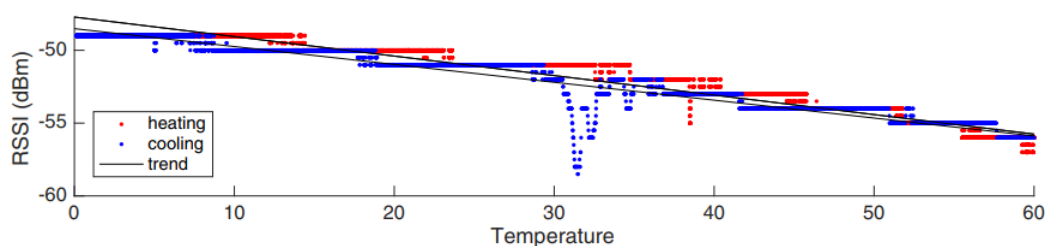
2.5.2 Παράγοντας περιβάλλον

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν μια άμεση και έντονη επίδραση στην απόδοση των επικοινωνιών LoRa, κυρίως μέσω της επιρροής τους στην ισχύ του ληφθέντος σήματος (Received Signal Strength Indicator - RSSI) και στο ποσοστό αποδοχής πακέτων (packet reception rate, PRR). Πρέπει να επισημάνουμε ότι ο δείκτης RSSI εκφράζεται σε dBm και παίρνει αρνητικές τιμές. Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι οι τιμές τόσο πιο ισχυρό σήμα λαμβάνουμε.

Σύμφωνα με το άρθρο [9], μετά από πειραματικές δοκιμές, η επίδραση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των φυσικών εμποδίων απεδείχθη ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην εμβέλεια της μετάδοσης.

Θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει βρεθεί να μειώνει σημαντικά τον δείκτη RSSI. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, το σήμα που λαμβάνεται από τον δέκτη είναι πιο αδύναμο, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη απώλεια πακέτων, ειδικά σε συνδέσεις που βρίσκονται στα όρια της εμβέλειάς τους. Συνεπώς αυτή η επίδραση μπορεί να καταστήσει μια διαφορετικά λειτουργική σύνδεση, πλήρως αναποτελεσματική σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.19: Δείκτης RSSI σε σχέση με τη θερμοκρασία [9]

Υγρασία

Η αύξηση της υγρασίας μπορεί να απορροφήσει τα ραδιοκύματα, μειώνοντας την εμβέλεια του σήματος και να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση του δικτύου.

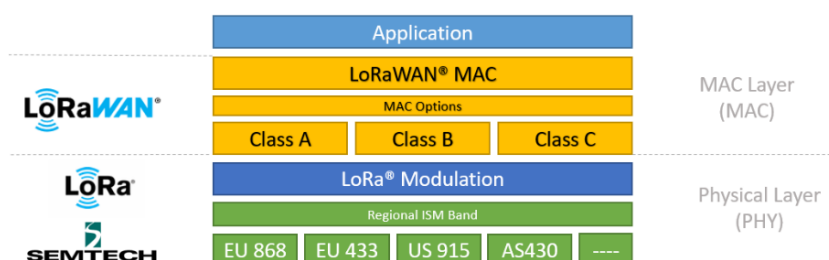
Φυσικά Εμπόδια

Τα φυσικά εμπόδια όπως τα κτίρια και η βλάστηση μπορούν να απορροφήσουν ή να ανακλάσουν τα ραδιοκύματα. Αυτό μειώνει την ισχύ του σήματος που φτάνει στον δέκτη και, ως αποτέλεσμα, μπορεί να μειώσει την επικοινωνιακή εμβέλεια. Ως εκ τούτου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εμπόδια και η μορφολογία του εδάφους κατά την επιλογή των τοποθεσιών για την τοποθέτηση δικτυακών κόμβων.

2.6 LoRaWAN

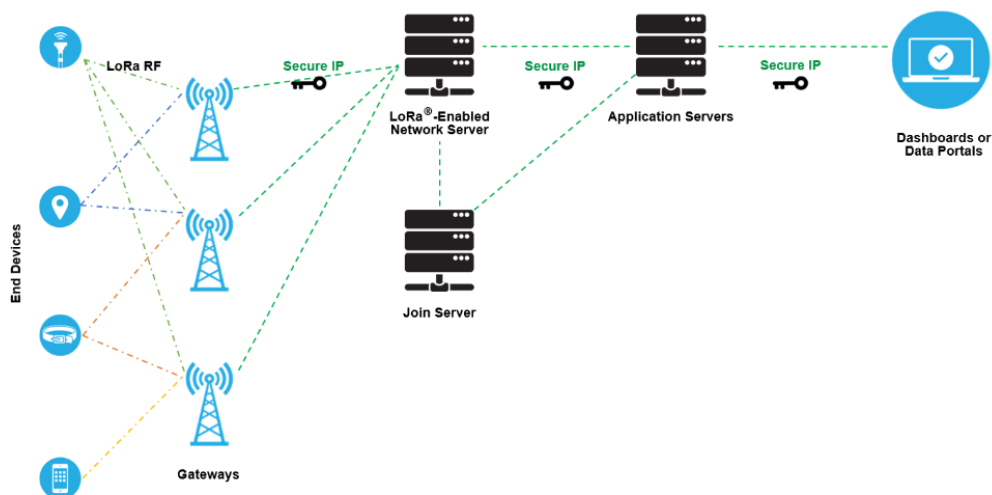
Το LoRaWAN είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο δικτύου που παρέχει ασφαλή διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία, κινητικότητα και υπηρεσίες τοποθεσίας. Αυτό το πρωτόκολλο είναι

τυποποιημένο και διατηρείται από τη LoRa Alliance [5]. Η συμμαχία LoRa (LoRa Alliance) είναι ένας οργανισμός μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα, που αποτελεί τον βασικό φορέα ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Το LoRaWAN έχει σχεδιαστεί με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των LPWAN στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τη χωρητικότητα το εύρος, αλλά και το κόστος [3]. Όπως έχουμε αναφέρει με τον όρο LoRa ορίζεται το φυσικό στρώμα (PHY), ενώ με τον όρο LoRaWAN ορίζεται το MAC στρώμα.



Σχήμα 2.20: Δομή LoRaWAN [5]

2.6.1 Αρχιτεκτονική LoRaWAN



Σχήμα 2.21: Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN [5]

Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.21, το δίκτυο LoRaWAN αποτελείται από:

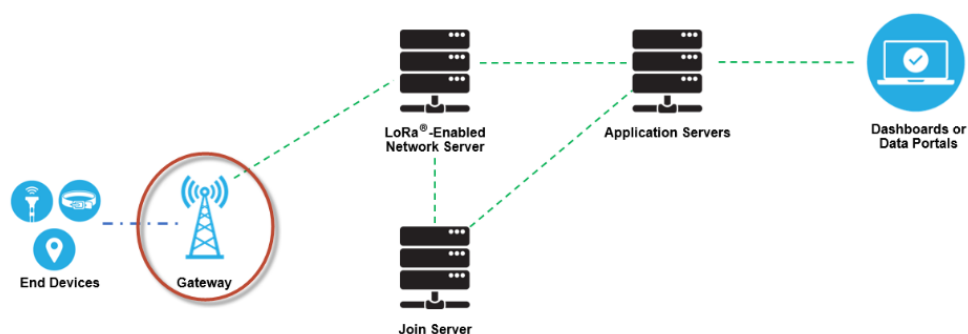
- End devices (τερματικούς κόμβους)
- Gateways (πύλες)
- Network Server (διακομιστής δικτύου)
- Application Servers
- Join Server

Τερματικοί κόμβοι LoRa

Στους τερματικούς κόμβους LoRa συνδέονται συσκευές όπως αισθητήρες ή διακόπτες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες ασύρματα σ ένα δίκτυο LoRaWAN μέσω πυλών χρησιμοποιώντας τη διαμόρφωση LoRa. Στην πλειονότητα των εφαρμογών ένας τερματικός κόμβος αποτελείται από έναν αισθητήρα, ο οποίος συχνά τροφοδοτείται με μπαταρία και συλλέγει δεδομένα από το περιβάλλον.

Κατά την κατασκευή τους, στις συσκευές που προορίζονται για χρήση σε LoRa, αντιστοιχίζεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό. Αυτά τα αναγνωριστικά χρησιμοποιούνται για την ασφαλή ενεργοποίηση και διαχείριση της συσκευής, για την εξασφάλιση της ασφαλούς μεταφοράς πακέτων σε ένα ιδιωτικό ή δημόσιο δίκτυο και για την παράδοση κρυπτογραφημένων δεδομένων στο Νέφος (Cloud).

Πύλες LoRaWAN



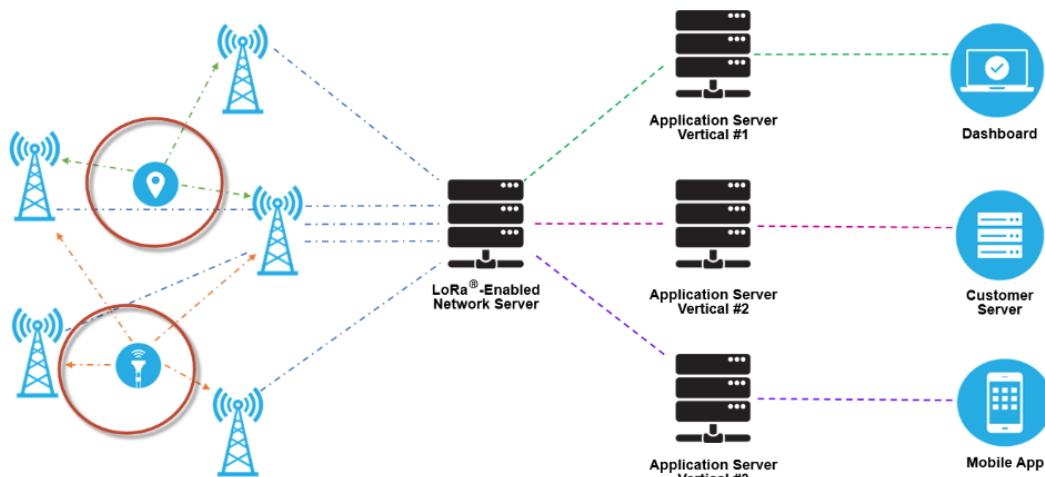
Σχήμα 2.22: Πύλες ενός τυπικού δικτύου LoRaWAN [5]

Μια πύλη (Gateway) LoRaWAN λαμβάνει μηνύματα στη διαμόρφωση LoRa από οποιοδήποτε τερματικό κόμβο που βρίσκεται εντός εμβέλειας και προωθεί αυτά τα μηνύματα δεδομένων στον διακομιστή LoRaWAN (LNS), ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω ενός IP πρωτοκόλλου. Δεν υπάρχει σταθερή συσχέτιση μεταξύ ενός τερματικού κόμβου και μιας συγκεκριμένης πύλης. Αντ' αυτού, ο ίδιος κόμβος μπορεί να εξυπηρετείται από πολλές πύλες στην περιοχή.

Με το LoRaWAN, κάθε πακέτο δεδομένων που στέλνεται από τον κόμβο προς την πύλη θα ληφθεί από όλες τις πύλες που βρίσκονται εντός εμβέλειας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.22. Αυτός ο τρόπος οργάνωσης μειώνει σημαντικά το ποσοστό σφαλμάτων (δεδομένου ότι οι πιθανότητες να λάβει το μήνυμα τουλάχιστον μια πύλη είναι πολύ υψηλές), μειώνει σημαντικά την επιβάρυνση της μπαταρίας για κινητούς αισθητήρες και επιτρέπει χαμηλούς κόστους γεωεντοπισμό.

Η επικοινωνία από μια πύλη προς το διακομιστή δικτύου μπορεί να δρομολογείται μέσω Wi-Fi, καλωδίου Ethernet ή μέσω κυψελωτής σύνδεσης (Cellular Connection). Οι πύλες LoRaWAN λειτουργούν εξ ολοκλήρου στο φυσικό επίπεδο (PHY) και κατ' ουσίαν αποτελούν απλούς διανομείς μηνυμάτων LoRa. Ελέγχουν μόνο την ακεραιότητα των δεδομένων κάθε εισερχόμενου μηνύματος. Εάν δηλαδή το CRC είναι εσφαλμένο, το μήνυμα θα απορριφθεί.

Εάν είναι σωστό, η πύλη θα το προωθήσει στο LNS, μαζί με μερικά metadata που περιλαμβάνουν το επίπεδο λήψης του μηνύματος RSSI καθώς και προαιρετικά μια χρονοσφραγίδα timestamp.



Σχήμα 2.23: Gateways: Αποστολή και λήψη μηνυμάτων από τερματικούς κόμβους [5]

Για τα downlink μηνύματα, μια πύλη εκτελεί τα αιτήματα μετάδοσης που προέρχονται από το LNS χωρίς καμία ερμηνεία του payload (φορτίου). Δεδομένου ότι πολλές πύλες μπορούν να λάβουν το ίδιο μήνυμα από έναν τερματικό κόμβο, το LNS εκτελεί αφαίρεση δεδομένων και διαγράφει όλα τα αντίγραφα. Βασιζόμενος στα επίπεδα RSSI των ίδιων μηνυμάτων, ο διακομιστής δικτύου συνήθως επιλέγει την πύλη που έλαβε το μήνυμα με το καλύτερο επίπεδο RSSI, διότι αυτή η πύλη είναι η πιο κοντινή στον τερματικό κόμβο.

Network Server

Ο διακομιστής δικτύου LoRaWAN (LNS) διαχειρίζεται ολόκληρο το δίκτυο, ελέγχοντας δυναμικά τις παραμέτρους του δικτύου για να προσαρμοστεί στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες. Διαμορφώνει ασφαλείς συνδέσεις 128-bit AES για τη μεταφορά τόσο των δεδομένων end-to-end (από τον τερματικό κόμβο έως την εφαρμογή των τελικών χρηστών στο cloud) όσο και για τον έλεγχο της κυκλοφορίας από και προς τον LNS. Ο διακομιστής δικτύου εξασφαλίζει την πιστοποίηση κάθε αισθητήρα στο δίκτυο και την ακεραιότητα κάθε μηνύματος. Παράλληλα όμως, ο διακομιστής δικτύου δεν μπορεί να δει ή να έχει πρόσβαση στα δεδομένα της εφαρμογής (Dashboard or Data Portals).

Application Servers

Οι διακομιστές εφαρμογών είναι υπεύθυνοι για την ασφαλή διαχείριση και ερμηνεία των δεδομένων από τους αισθητήρες. Επίσης, δημιουργούν payloads επιπέδου εφαρμογής, για downlink μηνύματα προς τους τερματικούς κόμβους.

Join Server

Διαχειρίζεται τη διαδικασία ενεργοποίησης μέσω του αέρα (over-the-air) για τους τερματικούς κόμβους που προσθέτονται στο δίκτυο. Ο Join Server περιέχει τις πληροφορίες που απαιτούνται για την επεξεργασία uplink αιτημάτων ένταξης και τη δημιουργία downlink μηνυμάτων αποδοχής. Ενημερώνει το διακομιστή δικτύου για το ποιος διακομιστής εφαρμογής θα πρέπει να συνδεθεί με τερματικό κόμβο και εκτελεί συνεδρία δικτύου-εφαρμογής για τη δημιουργία κλειδιού κρυπτογράφησης.

Ο Join Server πρέπει να διαθέτει τις εξής πληροφορίες για τερματικό κόμβο :

- DevEUI (μοναδικό αναγνωριστικό τερματικού κόμβου)
- AppKey (κλειδί κρυπτογράφησης εφαρμογής)
- NwkKey (κλειδί κρυπτογράφησης δικτύου)
- Αναγνωριστικό Application Server
- Service Profile τερματικού κόμβου

2.6.2 Κλάσεις συσκευών δικτύου LoRaWAN

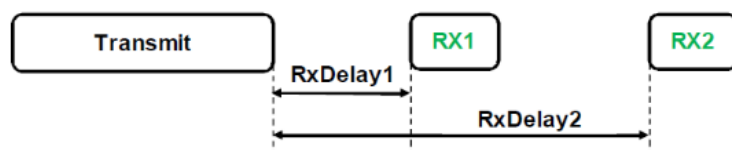
Υπάρχουν τρεις κλάσεις τερματικών συσκευών, A, B και C που απευθύνονται σε διάφορες ανάγκες εφαρμογών.[26] Οι κλάσεις A και B συνήθως λειτουργούν με μπαταρία, ενώ η κλάση C είναι τροφοδοτούμενη από δίκτυο. Από προεπιλογή, μια συσκευή LoRaWAN είναι συσκευή κλάσης A με δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας, εκτός εάν ρυθμιστεί ειδικά σε λειτουργία κλάσης B ή C. Η βασική διαφορά στις τρεις λειτουργικές κλάσεις είναι στη λήψη πακέτων (δηλαδή στα δεδομένα που στέλνονται από την πύλη προς τη συσκευή) [10].

Κλάση A

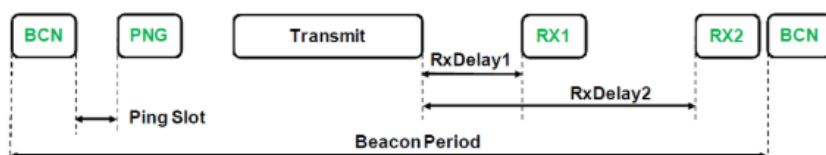
Οι συσκευές κλάσης A είναι αμφίδρομης επικοινωνίας και μπορούν να προγραμματίσουν μια μετάδοση uplink με βάση τις δικές τους ανάγκες, με ένα μικρό "τρέμουλο" (jitter - τυχαία διακύμανση πριν τη μετάδοση). Κάθε μετάδοση uplink ακολουθείται από δύο σύντομα downlink παράθυρα λήψης. Μετά τα παράθυρα λήψης, η συσκευή μπαίνει σε κατάσταση αδράνειας για να εξοικονομήσει ενέργεια. Downlink μετάδοση από τον Server σε οποιοδήποτε άλλο χρόνο πρέπει να περιμένει μέχρι την επόμενη uplink μετάδοση. Οι συσκευές κλάσης A έχουν τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, αλλά προσφέρουν επίσης λιγότερη ευελιξία στις μεταδόσεις downlink.

Κλάση B

Οι συσκευές κλάσης B είναι επίσης αμφίδρομης επικοινωνίας με επιπλέον προγραμματισμένα παράθυρα λήψης. Ένα συγχρονισμένο σήμα (beacon) από την πύλη είναι απαραίτητο, ώστε ο διακομιστής δικτύου να μπορεί να γνωρίζει πότε η συσκευή είναι σε λειτουργία λήψης.



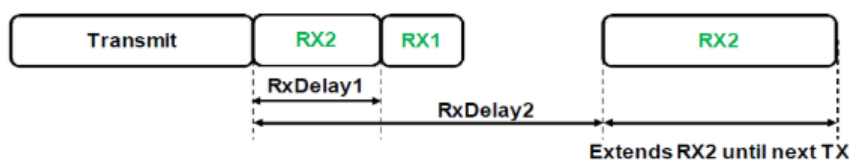
Σχήμα 2.24: Παράθυρα λήψης κλάσης A [10]



Σχήμα 2.25: Παράθυρα λήψης κλάσης B [10]

Κλάση C

Οι συσκευές κλάσης C (αμφίδρομης επικοινωνίας) έχουν σχεδόν συνεχή παράθυρα λήψης, μπορούν δηλαδή να διατηρούνται συνεχώς σε κατάσταση λήψης (εκτός αν μεταδίδουν οι ίδιες), επιτρέποντας έτσι την άμεση μετάδοση δεδομένων προς μια συσκευή χωρίς να χρειάζεται να περιμένουμε για το άνοιγμα ενός παραθύρου λήψης. Συνεπώς έχουν μέγιστη κατανάλωση ενέργειας.

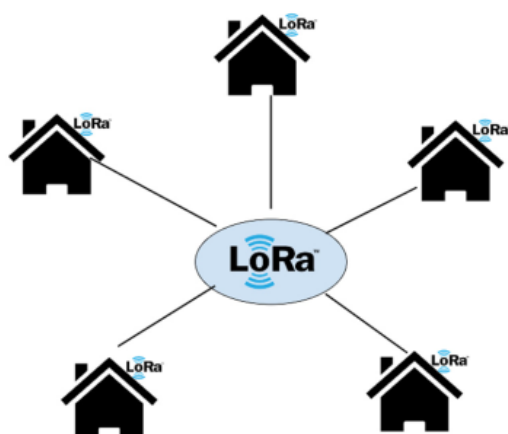


Σχήμα 2.26: Παράθυρα λήψης κλάσης C [10]

2.7 Τοπολογία δικτύου LoRaWAN

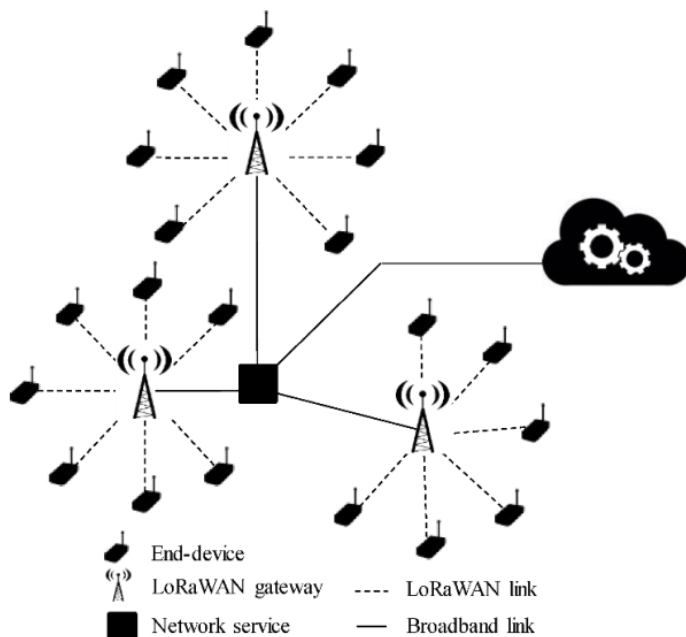
Μια συσκευή LoRa επικοινωνεί απευθείας με τη πύλη προκειμένου να μεταφέρει δεδομένα στο σύννεφο (ή κατ' επέκταση σε μια βάση δεδομένων). Κάθε μια τέτοια συσκευή θα πρέπει να βρίσκεται εντός της εμβέλειας της πύλης, σχηματίζοντας έτσι μια τοπολογία αστέρα (star topology). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.27, στην τοπολογία αστέρα κάθε κόμβος μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω της πύλης.

Χρησιμοποιώντας διαδοχικές τοπολογίες αστέρα μπορούμε να δημιουργήσουμε τη τοπολογία αστέρα σε αστέρα (stars-of-stars topology), που είναι και η πιο διαδεδομένη [8]. Οι πύλες τοποθετούνται σε κατάλληλο μέρος έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν όλοι οι κόμβοι. Τα δεδομένα προωθούνται από του τερματικούς κόμβους μέσω των πυλών στον διακομιστή δικτύου. Η τοπολογία αστέρα και κατ' επέκταση η τοπολογία stars-of-stars μπορεί να λειτουργήσει πολύ καλά σε περιπτώσεις που η τοποθέτηση πολλαπλών πυλών είναι εφικτή.



Σχήμα 2.27: Τοπολογία αστέρα LoRaWAN [8]

Σε περιπτώσεις όμως όπου δεν υπάρχει κάλυψη δικτύου όπως οι αγροτικές περιοχές, η συγκεκριμένη τοπολογία δεν μπορεί να λειτουργήσει επιτυχώς. Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνεται με την υλοποίηση δικτύων Mesh, τα οποία θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο, όπου κάθε κόμβος μπορεί να λειτουργήσει σαν αναμεταδότης, μεταφέροντας έτσι τα δεδομένα σε μεγαλύτερη απόσταση.



Σχήμα 2.28: Τοπολογία stars-of-stars [8]

Κεφάλαιο **3**

Δίκτυα Πλέγματος (Mesh)

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται το δίκτυο Mesh. Είναι ένας τύπος αρχιτεκτονικής δικτύου όπου κάθε κόμβος (συσκευή) στο δίκτυο μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με κάθε άλλο κόμβο, δημιουργώντας πολλαπλά μονοπάτια για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η αποκεντρωμένη προσέγγιση επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και ανθεκτικότητα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κεντρικά δίκτυα. Τα δίκτυα Mesh χρησιμοποιούνται συχνά σε καταστάσεις όπου η παραδοσιακή υποδομή δικτύωσης είναι ανέφικτη, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές, σενάρια ανάκαμψης από καταστροφές ή σε υλοποιήσεις IoT (Διαδίκτυο των Πραγμάτων) όπου οι συσκευές χρειάζεται να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς να βασίζονται σε ένα κεντρικό κέντρο.

3.1 Εισαγωγή στα Δίκτυα Mesh

Στα ασύρματα δίκτυα Mesh ή αλλιώς WMNs (Wireless Mesh Networks), κάθε κόμβος αποτελείται από δρομολογητές πλέγματος και πελάτες πλέγματος. Κάθε κόμβος λειτουργεί όχι μόνο ως οικοδεσπότης αλλά και ως δρομολογητής, προωθώντας πακέτα εξ ονόματος άλλων κόμβων που ενδεχομένως να μην βρίσκονται εντός άμεσου ασύρματου εύρους μετάδοσης των προορισμών τους. Ένα WMN είναι δυναμικά αυτοοργανωμένο και αυτοδιαμορφωμένο, με τους κόμβους στο δίκτυο να καθιστούν αυτόματα επικοινωνία και να διατηρούν τη συνδεσιμότητα πλέγματος μεταξύ τους (δημιουργώντας, ουσιαστικά, ένα δίκτυο αυτόματης δημιουργίας). Αυτό το χαρακτηριστικό φέρνει πολλά πλεονεκτήματα στα WMNs, όπως χαμηλό κόστος εκκίνησης, εύκολη συντήρηση του δικτύου, ανθεκτικότητα και αξιόπιστη κάλυψη υπηρεσιών [11].

Συμβατικοί κόμβοι όπως επιτραπέζιοι υπολογιστές, φορητοί υπολογιστές, τηλέφωνα κ.λπ. εξοπλισμένοι με ασύρματες κάρτες δικτύου (NICs) μπορούν να συνδεθούν απευθείας σε ασύρματους δρομολογητές πλέγματος. Οι πελάτες χωρίς ασύρματες NICs μπορούν να έχουν πρόσβαση σε WMNs συνδέοντας στους ασύρματους δρομολογητές πλέγματος μέσω, για παράδειγμα, Ethernet. Έτσι, τα WMNs βοηθούν σημαντικά τους χρήστες να είναι πάντα σε σύνδεση οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Επιπλέον, οι λειτουργίες πύλης/γέφυρας στους δρομολογητές πλέγματος επιτρέπουν την ενσωμάτωση των WMNs με διάφορα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα όπως κυψελωτά (cellular), Wi-Fi κ.λπ. Ως εκ τούτου, μέσω ενός ενοποιημένου WMN, οι χρήστες των υπάρχοντων δικτύων μπορούν να λάβουν υπηρεσίες αυτών των δικτύων που αλλιώς θα ήταν αδύνατο. Επίσης με τη δυνατότητα αυτοοργάνωσης και αυτοδιαμόρ-

φωσης, τα WMNs μπορούν να αναπτυχθούν σταδιακά, ένας κόμβος κάθε φορά, και καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται αντίστοιχα και η αξιοπιστία και η συνδεσιμότητα του δικτύου.

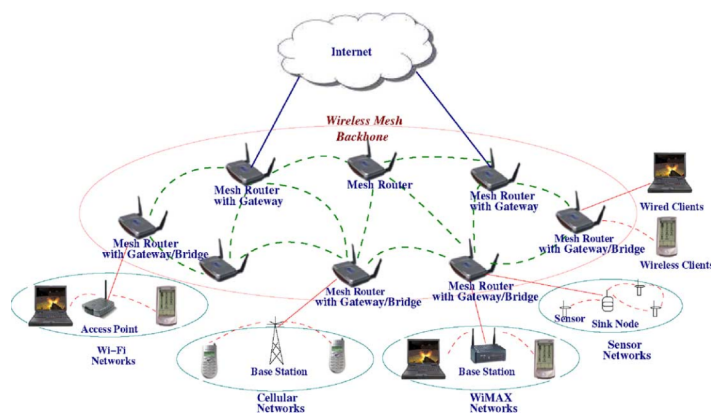
3.1.1 Αρχιτεκτονική WMNs

Όπως έχουμε αναφέρει, τα WMNs αποτελούνται από δύο τύπους κόμβων: δρομολογητές πλέγματος και πελάτες πλέγματος. Εκτός από τη δυνατότητα δρομολόγησης για λειτουργίες πύλης/επαναλήπτη (repeater) όπως σε έναν συμβατικό ασύρματο δρομολογητή, ένας ασύρματος δρομολογητής πλέγματος περιέχει επιπλέον λειτουργίες δρομολόγησης για την υποστήριξη δικτύωσης πλέγματος. Για να βελτιωθεί περαιτέρω η ευελιξία της δικτύωσης πλέγματος, ένας δρομολογητής πλέγματος είναι συνήθως εξοπλισμένος με πολλαπλές ασύρματες διεπαφές που βασίζονται είτε στις ίδιες είτε σε διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης στο ασύρματο δίκτυο. Σε σύγκριση με έναν συμβατικό ασύρματο δρομολογητή, ένας ασύρματος δρομολογητής πλέγματος μπορεί να επιτύχει την ίδια κάλυψη με πολύ χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης μέσω αναπηδήσεων επικοινωνιών (multi-hop communication). Προαιρετικά, το πρωτόκολλο MAC σε έναν δρομολογητή πλέγματος βελτιώνεται με καλύτερη κλιμακούμενη ικανότητα σε ένα multi-hop περιβάλλον πλέγματος.

Η αρχιτεκτονική των WMNs διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες βάσει της λειτουργικότητας των κόμβων:

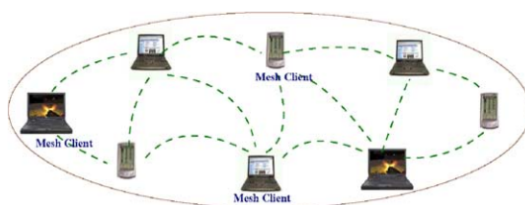
- Υποδομή/Στήριγμα (Infrastructure/Backbone WMNs):** Η αρχιτεκτονική απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, όπου οι παύλες και οι συνεχείς γραμμές υποδηλώνουν ασύρματους και ενσύρματους συνδέσμους, αντίστοιχα. Αυτός ο τύπος WMNs περιλαμβάνει δρομολογητές πλέγματος που δημιουργούν μια υποδομή για πελάτες που συνδέονται μαζί τους. Πέραν του ευρέως χρησιμοποιούμενου προτύπου IEEE 802.11, το εν λόγω WMN μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους ραδιοτεχνολογιών. Οι δρομολογητές πλέγματος δημιουργούν ένα πλέγμα αυτοδιαμορφούμενων, αυτοεπουλωτικών συνδέσμων μεταξύ τους. Με λειτουργία πύλης, οι δρομολογητές πλέγματος μπορούν να συνδεθούν στο Διαδίκτυο. Αυτή η προσέγγιση, επίσης αναφερόμενη ως υποδομή πλέγματος (infrastructure meshing), παρέχει το στήριγμα για τους συμβατικούς πελάτες και επιτρέπει την ολοκλήρωση των WMNs με τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα, μέσω των λειτουργιών πύλης/γέφυρας στους δρομολογητές πλέγματος. Οι συμβατικοί πελάτες με διεπαφή Ethernet μπορούν να συνδεθούν στους δρομολογητές πλέγματος μέσω συνδέσμων Ethernet. Για συμβατικούς πελάτες με τις ίδιες ραδιοτεχνολογίες όπως οι δρομολογητές πλέγματος, μπορούν να επικοινωνούν απευθείας με τους δρομολογητές πλέγματος. Εάν χρησιμοποιούνται διαφορετικές ραδιοτεχνολογίες, οι πελάτες πρέπει να επικοινωνούν με τους σταθμούς που έχουν συνδέσεις Ethernet στους δρομολογητές πλέγματος. Τα Infrastructure/Backbone WMNs είναι ο πιο κοινός τύπος. Για παράδειγμα, δίκτυα σε κοινότητες και γειτονιές μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας το υποδομή πλέγματος. Οι δρομολογητές πλέγματος τοποθετούνται στην οροφή των σπιτιών σε μια γειτονιά, οι οποίοι λειτουργούν ως σημεία πρόσβασης για τους χρήστες μέσα στα σπίτια και κατά μήκος των δρόμων. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο τύποι ραδιοτεχνολογιών στους δρομολογητές, δηλαδή

για την επικοινωνία υποδομής και για την επικοινωνία χρήστη, αντίστοιχα. Η επικοινωνία υποδομής πλέγματος μπορεί να διατεθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές επικοινωνίας μεγάλου εύρους, συμπεριλαμβανομένων των κατευθυντικών κεραιών.



Σχήμα 3.1: *Infrastructure/backbone WMNs* [11]

- Client WMNs:** Το πλέγμα πελατών παρέχει ένα peer-to-peer δίκτυο μεταξύ συσκευών πελατών. Σε αυτόν τον τύπο αρχιτεκτονικής, οι κόμβοι πελατών αποτελούν το πραγματικό δίκτυο για την εκτέλεση λειτουργιών δρομολόγησης και διαμόρφωσης καθώς και για την παροχή εφαρμογών στους πελάτες. Επομένως, ένας δρομολογητής πλέγματος δεν είναι απαραίτητος για αυτούς τους τύπους δικτύων. Η βασική αρχιτεκτονική φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Στα Client WMNs ένα πακέτο που προορίζεται για έναν κόμβο στο δίκτυο περνά μέσω πολλαπλών κόμβων για να φτάσει στον προορισμό του. Τα Client WMNs συνήθως δημιουργούνται χρησιμοποιώντας έναν τύπο ραδιοτεχνολογίας στις συσκευές. Επιπλέον, οι απαιτήσεις στις συσκευές τέλους χρήστη αυξάνονται σε σύγκριση με την υποδομή πλέγματος, αφού στα Client WMNs, οι τελικοί χρήστες πρέπει να εκτελούν επιπλέον λειτουργίες όπως η δρομολόγηση και η αυτόματη διαμόρφωση.



Σχήμα 3.2: *Client WMNs*
[11]

- Hybrid WMNs:** Αυτή η υβριδική αρχιτεκτονική είναι ο συνδυασμός υποδομής και πελατών πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Οι πελάτες πλέγματος μπορούν να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο μέσω των δρομολογητών πλέγματος καθώς και να συνδεθούν απευθείας με άλλους πελάτες πλέγματος. Ενώ η υποδομή πλέγματος παρέχει συνδεσιμότητα με άλλα δίκτυα όπως το Internet, το Wi-Fi, το WiMAX, τα κυψελωτά



Σχήμα 3.3: Hybrid WMNs [11]

δίκτυα κ.α, οι δυνατότητες δρομολόγησης των πελατών παρέχουν βελτιωμένη συνδεσιμότητα και κάλυψη μέσα στο WMN.

3.1.2 Χαρακτηριστικά WMNs

Οι αρχές πάνω τις οποίες υλοποιούνται τα WMNs είναι οι ακόλουθες :

- **Multi-hop ασύρματο δίκτυο:** Με τη πολλαπλή αναπήδηση τα Mesh δίκτυα επιτυγχάνουν μεγαλύτερη εμβέλεια χωρίς να θυσιάζεται η χωρητικότητα του καναλιού. Επίσης μπορούμε να επιτύχουμε υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης χωρίς να θυσιάζεται η εμβέλεια μέσω μικρότερων αποστάσεων συνδέσεων, λιγότερων παρεμβολών μεταξύ των κόμβων και πιο αποδοτικής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων.
- **Υποστήριξη δικτύωσης ad hoc:** Τα WMNs βελτιώνουν την απόδοση του δικτύου λόγω της ευέλικτης αρχιτεκτονικής του δικτύου, της εύκολης ανάπτυξης και διαμόρφωσης, της ανοχής σε σφάλματα και της σύνδεσης πλέγματος, δηλαδή της επικοινωνίας multipoint-to-multipoint. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, τα WMNs έχουν χαμηλές αρχικές απαιτήσεις επενδυτικού κόστους και το δίκτυο μπορεί να αναπτυχθεί σταδιακά σύμφωνα με τις υπάρχουσες ανάγκες.
- **Εξάρτηση κινητικότητας από το είδος των κόμβων:** Οι δρομολογητές πλέγματος (Mesh routers) συνήθως έχουν ελάχιστη κινητικότητα ενώ οι δρομολογητές πελάτες (Mesh clients) μπορούν να είναι στάσιμοι κόμβοι ή κινητοί.
- **Πολλαπλοί τρόποι πρόσβασης στο δίκτυο:** Στα WMNs υποστηρίζονται τόσο η πρόσβαση στο Internet μέσω backhaul όσο και οι peer-to-peer (P2P) επικοινωνίες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των WMNs με άλλα ασύρματα δίκτυα και η παροχή υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες αυτών των δικτύων μπορεί να επιτευχθεί μέσω των WMNs.
- **Εξάρτηση κατανάλωσης ισχύος από τον τύπο των κόμβων πλέγματος:** Οι δρομολογητές πλέγματος συνήθως δεν έχουν αυστηρούς περιορισμούς στην κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, οι πελάτες πλέγματος ενδέχεται να απαιτούν ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας με δυνατότητα πλέγματος απαιτεί τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του να είναι ενεργειακά αποδοτικά. Έτσι, τα πρωτόκολλα MAC ή δρομολόγησης που είναι βελτιστοποιημένα για δρομολογητές πλέγματος

μπορεί να μην είναι κατάλληλα για πελάτες πλέγματος όπως οι αισθητήρες, καθώς η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι η κύρια ανησυχία για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

- **Συμβατότητα και η διαλειτουργικότητα με τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα:** Για παράδειγμα, τα WMNs που βασίζονται στις τεχνολογίες IEEE 802.11 πρέπει να είναι συμβατά με τα πρότυπα IEEE 802.11 με την έννοια της υποστήριξης τόσο πελατών με δυνατότητα πλέγματος όσο και συμβατικών πελατών Wi-Fi. Τέτοια WMNs χρειάζεται επίσης να είναι διαλειτουργικά με άλλα ασύρματα δίκτυα όπως το WiMAX, το ZigBee και τα κυψελωτά δίκτυα.

Τα WMNs θεωρούνται ως τύπος ad-hoc δικτύων λόγω της έλλειψης ενσύρματης υποδομής, όπως οι σταθμοί βάσης ή τα σημεία πρόσβασης στα κυψελωτά ή Wi-Fi δίκτυα. Ωστόσο τα WMNs απαιτούν πιο εξελιγμένους αλγόριθμους και σχεδιαστικές αρχές. Αντί να είναι απλώς ένας τύπος ad-hoc δικτύωσης, τα WMNs στοχεύουν να διαφοροποιήσουν και να επεκτείνουν τις δυνατότητες των ad hoc δικτύων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως υποσύνολό τους. Οι διαφορές μεταξύ WMNs και ad hoc δικτύων είναι σημαντικές, ιδιαίτερα στην υβριδική αρχιτεκτονική που εκμεταλλεύεται όλα τα πλεονεκτήματα των WMNs.

Η ασύρματη υποδομή των WMNs με δρομολογητές πλέγματος προσφέρει μεγάλη κάλυψη, συνδεσιμότητα και ανθεκτικότητα. Αντίθετα, η συνδεσιμότητα στα ad hoc δίκτυα εξαρτάται από τις ατομικές συνεισφορές των τελικών χρηστών, οι οποίες μπορεί να είναι μη αξιόπιστες.

Τα WMNs υποστηρίζουν συμβατικούς πελάτες με τις ίδιες ραδιοτεχνολογίες μέσω της λειτουργίας δρομολόγησης στους δρομολογητές πλέγματος και επιτρέπουν την ενσωμάτωση διαφόρων δικτύων όπως Wi-Fi, Internet, κυψελωτά και αισθητήρια δίκτυα. Έτσι, οι χρήστες ενός δικτύου μπορούν να έχουν πρόσβαση σε υπηρεσίες άλλων δικτύων. Αυτή η ενσωμάτωση κάνει την τοποθεσία των κόμβων λιγότερο σημαντική από την χωρητικότητα και την τοπολογία του δικτύου, παρόμοια με την αρχή του Internet.

Στα WMNs, οι δρομολογητές πλέγματος αναλαμβάνουν τις λειτουργίες δρομολόγησης και διαμόρφωσης, μειώνοντας το φορτίο στις συσκευές τελικών χρηστών. Σε αντίθεση με τα ad hoc δίκτυα όπου κάθε τελικός κόμβος εκτελεί τις παραπάνω λειτουργίες. Αυτό οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και αυξημένες δυνατότητες εφαρμογών για κινητούς και ενεργειακά περιορισμένους χρήστες. Επίσης, οι περιορισμένες απαιτήσεις των τελικών χρηστών μειώνουν το κόστος των συσκευών που χρησιμοποιούνται στα WMNs.

Οι δρομολογητές πλέγματος στα WMNs μπορούν να διαθέτουν πολλαπλούς πομποδέκτες για δρομολόγηση και πρόσβαση, επιτρέποντας το διαχωρισμό της κυκλοφορίας και βελτιώνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου. Αντίθετα, στα ad hoc δίκτυα, αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται στο ίδιο κανάλι, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης.

Στα ad hoc δίκτυα, η δρομολόγηση εξαρτάται από τις συσκευές των τελικών χρηστών, κάνοντας την τοπολογία και τη συνδεσιμότητα του δικτύου να επηρεάζονται από την κίνηση των χρηστών. Αυτό δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης και τη διαμόρφωση του δικτύου.

Συνοψίζοντας, έχοντας αναλύσει τις δυνατότητες και τις κύριες διαφορές των WMNs από τα απλά δίκτυα ad hoc, καταλήγουμε στα κύρια χαρακτηριστικά που κάνουν τη δικτύωση πλέγματος να διαφέρει [12]:

1. **Ευελιξία:** Τα δίκτυα πλέγματος είναι ευέλικτα και αυτοοργανώνονται, επιτρέποντας στους κόμβους να προσαρμόζονται δυναμικά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες χωρίς προκαθορισμένη ιεραρχία.
2. **Ικανότητα Αυτοοργάνωσης:** Δεν απαιτούν κεντρική υποδομή. Οι κόμβοι αυτοοργανώνονται και αυτορυθμίζονται, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως μειωμένο κόστος ανάπτυξης και συντήρησης, δυναμική κατανομή φορτίου, καλύτερη αντίδραση σε αποτυχίες κόμβων και εύκολη τροποποίηση της τοπολογίας του δικτύου.
3. **Επικοινωνία Πολλά-προς-Πολλά (many-to-many):** Επιτρέπουν πολλές-προς-πολλές επικοινωνίες, διευκολύνοντας τη δρομολόγηση δεδομένων από μια πηγή σε έναν προορισμό μέσω συνεργασίας των κόμβων.
4. **Δυνατότητες Δρομολόγησης:** Κάθε κόμβος μπορεί να λειτουργεί τόσο ως οικοδεσπότης όσο και ως δρομολογητής, προωθώντας πακέτα που αποστέλλονται από άλλους κόμβους όταν ο προορισμός δεν είναι εντός εμβέλειας του αποστολέα.
5. **Χωρίς Προκαθορισμένη Ιεραρχία:** Λειτουργούν με μη ιεραρχικό τρόπο, με τους κόμβους να συνδέονται άμεσα και δυναμικά μεταξύ τους.
6. **Προσαρμοστικότητα σε Δυναμικές Συνθήκες Συνδέσεων:** Μπορούν να προσαρμόζονται γρήγορα σε δυναμικές συνθήκες συνδέσεων, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση με συσκευές χαμηλής επεξεργαστικής ισχύος και μειώνοντας την εκμετάλλευση του δικτύου και την επιβάρυνση μνήμης.

3.2 Πρωτόκολλα

Τα δίκτυα πλέγματος, ενσύρματα και ασύρματα, χαρακτηρίζονται από ευελιξία και αυτοοργάνωση. Για να καθορίσουν την τοπολογία τους και να δημιουργήσουν διαδρομές πολλαπλών αναπηδήσεων (multi-hop), χρειάζονται πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο μπορεί να προέρχεται από ad hoc δίκτυα και να είναι προληπτικό ή αντιδραστικό. Τα προληπτικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, όπως το Destination Sequence Distance Vector (DSDV), διατηρούν συνεχώς ενημερωμένους πίνακες δρομολόγησης για την τοπολογία του δικτύου και χρησιμοποιούνται κυρίως σε δίκτυα με μικρό αριθμό κόμβων.

Τα αντιδραστικά πρωτόκολλα δρομολόγησης δημιουργούν διαδρομές μόνο κατόπιν αιτήματος, μειώνοντας το φορτίο δικτύου. Περιλαμβάνουν φάσεις ανακάλυψης και συντήρησης διαδρομής, και μια μέθοδο αναζήτησης για τον περιορισμό των συνδέσεων. Τα πρωτόκολλα όπως το DSR και το AODV είναι παραδείγματα, όπου οι διαδρομές διατηρούνται μόνο όσο χρειάζονται, και οι κόμβοι που δεν συμμετέχουν ενεργά δεν παράγουν πληροφορίες δρομολόγησης [12].

Τα κυριότερα πρωτόκολλα ad hoc δικτύων πάνω στα οποία βασίζονται τα δίκτυα πλέγματος είναι τα ακόλουθα :

- **Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol:** Το AODV είναι ένα αντιδραστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης που υποστηρίζει μονοσήμαντες, πολυσήμαντες και ευρυζωνικές επικοινωνίες. Κατά την ανακάλυψη διαδρομής, εκπέμπει πακέτα RREQ (Route REQuest) και λαμβάνει απαντήσεις RREP για την κατασκευή του πίνακα δρομολόγησης. Διαθέτει μηχανισμούς για την αποφυγή βρόχων δρομολόγησης και την ανίχνευση αποσυνδέσεων, προσαρμόζεται γρήγορα σε δυναμικές συνθήκες και είναι κατάλληλο για συσκευές χαμηλής επεξεργαστικής ισχύος.
- **Optimized Link State Routing Protocol:** Το OLSR είναι ένα προληπτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο για μεγάλα και πυκνά MANETs (Mobile Ad-Hoc NETWORKs), το οποίο χρησιμοποιεί στρατηγική αναπήδησης για βελτιστοποίηση της απόδοσης. Τα MPRs (MultiPoint Relays) μειώνουν τις περιττές αναμεταδόσεις και διαχειρίζονται τα πακέτα ελέγχου. Το OLSR χρησιμοποιεί UDP datagrams (user datagram protocol) και ενιαία μορφή πακέτων για εύκολη επεκτασιμότητα και συμβατότητα.
- **Dynamic Source Routing Protocol:** Το DSR είναι ένα αντιδραστικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για ασύρματα ad hoc δίκτυα που δεν χρησιμοποιεί περιοδικά μηνύματα δρομολόγησης, μειώνοντας τα μηνύματα ελέγχου. Χρησιμοποιεί ανακάλυψη και συντήρηση διαδρομής, επιτρέποντας στους κόμβους να αποθηκεύουν διαδρομές και να αντιδρούν γρήγορα σε αλλαγές τοπολογίας, μειώνοντας περαιτέρω τα μηνύματα ελέγχου στο δίκτυο.

3.3 Ενσωμάτωση με άλλα δίκτυα

3.3.1 Πρότυπο IEEE 802.11 (WiFi)

Την τελευταία δεκαετία, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα δίκτυα πλέγματος, τόσο από ακαδημαϊκούς όσο και από βιομηχανικούς φορείς, οδήγησε στον ορισμό μιας τροποποίησης του προτύπου IEEE 802.11, γνωστής ως IEEE 802.11s. Τα φυσικά επίπεδα των IEEE 802.11s και IEEE 802.11 είναι ίδια, αλλά το IEEE 802.11s εισάγει νέες διαδικασίες δρομολόγησης που εκτελούνται στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) και όχι στο επίπεδο δικτύου.

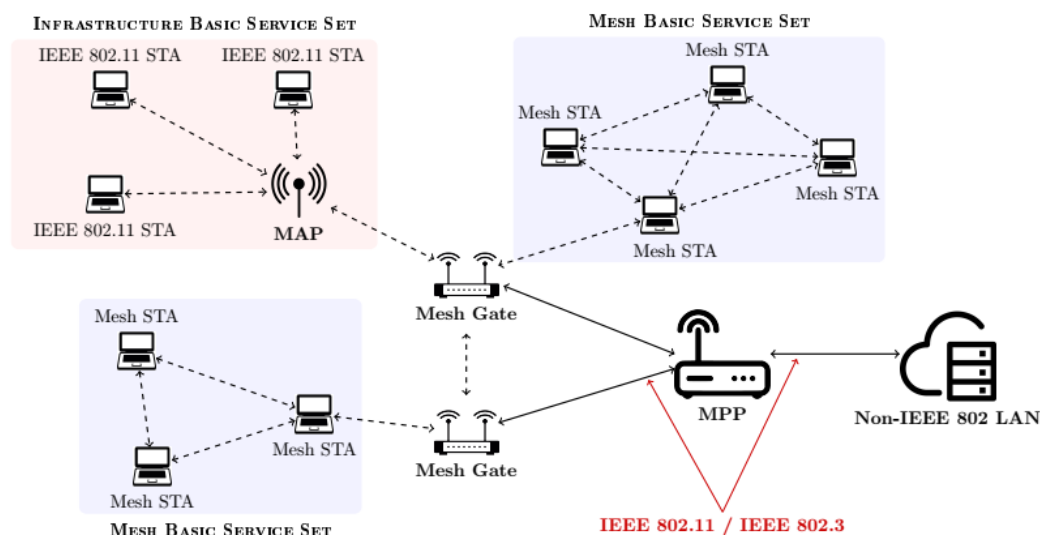
Σε ένα δίκτυο πλέγματος IEEE 802.11s, γνωστό ως Mesh Basic Service Set (MBSS), οι κύριες λογικές συνιστώσες είναι οι σταθμοί πλέγματος (mesh stations - mesh STAs), που συμμετέχουν στη δημιουργία του MBSS, χωρίς ιεραρχική δομή. Οι mesh STAs συμμετέχουν στην επιλογή διαδρομών και την προώθηση, οδηγώντας σε ένα απλό αυτοοργανωμένο δίκτυο.

Για την ενσωμάτωση με άλλα δίκτυα, όπως τα παραδοσιακά δίκτυα υποδομής IEEE 802.11 ή για πρόσβαση σε εξωτερικά δίκτυα, απαιτούνται άλλες λογικές συνιστώσες. Οι Mesh APs (MAPs) επιτρέπουν την πρόσβαση στο δίκτυο πλέγματος για παραδοσιακούς σταθμούς IEEE 802.11, ενώ οι Mesh Gate επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ σταθμών πλέγματος και

μη πλέγματος. Για την επικοινωνία μεταξύ του πλέγματος και των μη-IEEE 802.11 τοπικών δικτύων (LANs), χρησιμοποιούνται Mesh Portal Points (MPPs).

Τα πλεονεκτήματα ενός MBSS είναι η γρήγορη και χαμηλού κόστους ανάπτυξη back-haul, η κάλυψη σε περιοχές δύσκολες για καλωδίωση, η αυτοοργάνωση και επεκτασιμότητα και τέλος η μεγαλύτερη κάλυψη μέσω multi-hop προώθησης. Στον αντίποδα, τα μειονεκτήματα που μπορεί να έχει ένα δίκτυο MBSS είναι ότι ο ρυθμός δεδομένων μειώνεται με τον αριθμό των αναπηδήσεων και επίσης το ασύρματο μέσω είναι γενικά λιγότερο αξιόπιστο από το ενσύρματο.

Τοπολογία Δικτύου



Σχήμα 3.4: Δίκτυο βάσει του προτύπου IEEE 802.11s [12]

Η διαμόρφωση τοπολογίας σε δίκτυα IEEE 802.11s βασίζεται στη μετάδοση μηνυμάτων beacon για την ανακάλυψη και συντήρηση του δικτύου. Οι γείτονες των mesh STAs αναγνωρίζουν την παρουσία άλλων κόμβων μέσω παθητικής ή ενεργής σάρωσης. Η σύνδεση διατηρείται μέσω του πρωτοκόλλου MPM (Mesh Peer (Link) Management), όσο οι σταθμοί είναι σε οπτική επαφή και μοιράζονται κοινό προφίλ, χρησιμοποιώντας το Mesh ID για την αναγνώριση του δικτύου.

3.3.2 Δίκτυα Bluetooth/BLE

Το Bluetooth Low Energy (BLE) είναι μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου Bluetooth που χαρακτηρίζεται από χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό κόστος. Είναι ιδανικό για δίκτυα με μεγάλο αριθμό κόμβων και έχει γίνει μια από τις κύριες τεχνολογίες για το IoT και βιομηχανικά σενάρια, λόγω της ευρείας ενσωμάτωσής του σε σύγχρονες συσκευές. Το 2021, το Bluetooth Special Interest Group (SIG) δημοσίευσε τις ανανεωμένες επίσημες προδιαγραφές για τη δικτύωση mesh με BLE [27], προωθώντας την τεχνολογία ως λύση για επικοινωνία πολλών-προς-πολλούς.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του BLE είναι:

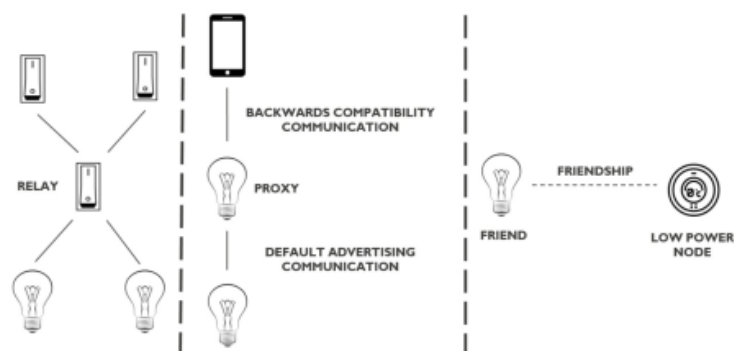
1. **Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:** Οι συσκευές BLE χρησιμοποιούν χαμηλή ισχύ και είναι συνήθως τροφοδοτούμενες από μπαταρίες που διαρκούν αρκετά χρόνια.
2. **Συχνότητα λειτουργίας:** Χρησιμοποιεί συχνότητες 2402-2480 MHz, με 40 κανάλια διαχωρισμένα κατά 2 MHz.
3. **Δύο τρόποι επικοινωνίας:** Advertising mode όπου μεταδίδονται πακέτα δεδομένων σε όλους τους γειτονικούς κόμβους εντός εμβέλειας. Connection-oriented mode όπου μεταδίδονται πακέτα δεδομένων μόνο μεταξύ κόμβων που βρίσκονται σε σύζευξη.

Η SIG επέλεξε advertising mode ως τη βασική μέθοδο για το πρότυπο δικτύου BLE mesh. Στο πρότυπο BLE, οι κόμβοι του δικτύου mesh ονομάζονται "κόμβοι" ενώ οι υπόλοιπες συσκευές ονομάζονται "unprovisioned devices". Η διαδικασία μετατροπής μιας μη προμηθευμένης συσκευής σε κόμβο ονομάζεται "provisioning" και περιλαμβάνει την απόκτηση κλειδιών κρυπτογράφησης, όπως το NetKey, κάνοντας τη συσκευή μέλος του δικτύου. Κάποιοι κόμβοι BLE μπορεί να έχουν πολλαπλά μέρη που μπορούν να ελέγχονται ανεξάρτητα, γνωστά ως elements. Για παράδειγμα, ένα προϊόν φωτισμού LED μπορεί να σχηματίσει έναν κόμβο με τρία elements, ένα για κάθε LED φως.

Η επικοινωνία στο δίκτυο Bluetooth Mesh βασίζεται σε μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων, τα οποία μπορεί να είναι αναγνωρισμένα ή μη αναγνωρισμένα. Οι διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τις unicast, group και virtual διευθύνσεις. Το πρότυπο ακολουθεί το μοντέλο δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe), όπου οι εκδότες στέλνουν δεδομένα και οι συνδρομητές ακούνε τα θέματα ενδιαφέροντος. Αυτή η τοπολογία επιτρέπει την εύκολη προσθήκη, αφαίρεση ή αντικατάσταση κόμβων χωρίς ανάγκη επαναδιαμόρφωσης των άλλων κόμβων στο δίκτυο.

Για την υλοποίηση της επικοινωνίας, το πρότυπο BLE παρέχει δύο είδη διαδικασιών τις διαδικασίες "διαφήμισης" (advertising) και "σάρωσης" (scanning). Επίσης, "πλημμύρα" ονομάζεται ο μηχανισμός μέσω του οποίου ανταλλάσσονται μηνύματα σε ένα δίκτυο BLE mesh, διασφαλίζοντας ότι κάθε ενδιαμέσος κόμβος μπορεί να προωθήσει τα εισερχόμενα μηνύματα μέχρι τον τελικό κόμβο. Οι κόμβοι mesh BLE διαφέρουν από τους κόμβους "διαφήμισης" BLE στο ότι δεν λαμβάνουν υπόψη το διάστημα "διαφήμισης" για την αποστολή των πακέτων τους, αλλά τα αποστέλλουν απευθείας μετά από έναν τυχαία παραγόμενο χρόνο καθυστέρησης. Επιπλέον, οι κόμβοι mesh έχουν κύκλο λειτουργίας 100% για τη σάρωση εισερχόμενων πακέτων στα κανάλια "διαφήμισης", πράγμα που σημαίνει ότι σαρώνουν συνεχώς όταν δεν στέλνουν πακέτο. Η "διαφήμιση" στο πρότυπο διαχειρίζεται μέσω ενός νέου τύπου πακέτου BLE, το οποίο υποστηρίζεται μόνο από συσκευές που μπορούν να λειτουργούν και με τα δύο πρωτόκολλα BLE και Bluetooth Mesh. Για να διατηρηθεί ένα αποδεκτό επίπεδο διαλειτουργικότητας, το πρότυπο περιλαμβάνει μια δυνατότητα συμβατότητας προς τα πίσω, επιτρέποντας σε όλες τις συσκευές BLE που δεν υποστηρίζουν Bluetooth Mesh να ενταχθούν σε ένα δίκτυο Bluetooth mesh.

Σε ένα δίκτυο mesh, κάθε κόμβος μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει μηνύματα, αλλά το πρότυπο περιλαμβάνει διάφορες προαιρετικές λειτουργίες που ένας κόμβος mesh μπορεί



Σχήμα 3.5: Λειτουργίες Bluetooth Mesh [12]

να υλοποιήσει για τη διαχείριση και τη βελτίωση της επικοινωνίας. Οι κύριες πρόσθετες λειτουργίες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Λειτουργία Αναμετάδοσης (Relay):** Δεδομένου ότι η κλιμάκωση και η ανθεκτικότητα του δικτύου μπορεί να μειωθούν αν δεν διαχειριστούν σωστά από τον μηχανισμό “πλημμύρας”, η λειτουργία αναμετάδοσης απαιτεί μόνο οι κόμβοι με δυνατότητα αναμετάδοσης στο δίκτυο να προωθούν τα λαμβανόμενα μηνύματα περαιτέρω. Άλλες πρόσθετες λειτουργίες είναι η κρυφή μνήμη μηνυμάτων και το πεδίο Time-To-Live (TTL), που εξασφαλίζουν ότι ένα μήνυμα M θα αναμεταδοθεί από μια συσκευή N μόνο μία φορά. Συγκεκριμένα, η συσκευή N αναμεταδίδει το M μόνο αν: (i) το M δεν είναι ήδη αποθηκευμένο στη μνήμη cache της συσκευής N και (ii) η τιμή TTL του μηνύματος M είναι μεγαλύτερη από 1. Επιπλέον, κάθε φορά που το M αναμεταδίδεται περαιτέρω στο δίκτυο, η τιμή του πεδίου TTL μειώνεται κατά 1.
- Λειτουργία Proxy:** Αυτή η λειτουργία έχει οριστεί με στόχο τη διατήρηση της συμβατότητας με όλες τις συσκευές BLE που δεν υποστηρίζουν Bluetooth Mesh. Ένας κόμβος N με ενεργοποιημένη τη λειτουργία proxy μπορεί να πραγματοποιήσει επικοινωνία με δύο τρόπους: (i) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο “διαφήμισης” BLE mesh και (ii) χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα συμβατότητας προς τα πίσω που βασίζεται σε παραδοσιακές συνδέσεις BLE.
- Λειτουργία Φιλίας και Χαμηλής Κατανάλωσης Ενέργειας (Friendship and Low-Power):** Δεδομένου ότι το πρότυπο αναγκάζει τους κόμβους να σαρώνουν τα κανάλια “διαφήμισης” με κύκλο λειτουργίας 100%, αυτό επηρεάζει σημαντικά την πτυχή χαμηλής ενέργειας της “διαφήμισης” BLE, αποκλείοντας τη χρήση της δικτύωσης mesh σε όλες τις εφαρμογές με περιορισμένη ενέργεια. Η λειτουργία φιλίας έχει εισαχθεί για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, επιτρέποντας σε μια συσκευή με περιορισμένη ενέργεια P να ενταχθεί στο δίκτυο mesh χωρίς τον κύκλο λειτουργίας 100%. Ένας άλλος, μη περιορισμένος, κόμβος N μπορεί να καθιερώσει μια σχέση φιλίας με το P και να γίνει φίλος του. Στο δίκτυο mesh, οι φίλοι κόμβοι είναι υπεύθυνοι για την αποθήκευση και την περαιτέρω αναμετάδοση όλων των εισερχόμενων μηνυμάτων. Στη

συνέχεια, η συσκευή χαμηλής ενέργειας P μπορεί να ζητήσει από τον N νέα μηνύματα με ρυθμό συμβατό με τον μειωμένο κύκλο λειτουργίας της, περιορίζοντας την κατανάλωση ενέργειας της.

Στο σχήμα 3.5 φαίνονται παραδείγματα από τις προαναφερθείσες λειτουργίες του δικτύου Bluetooth Mesh.

3.3.3 ZigBee Pro & ZigBee 3.0

Ένα σημαντικό παράδειγμα πρωτοκόλλου δικτύου mesh που βασίζεται στο IEEE 802.15.4 είναι το ZigBee Pro (και ο διάδοχός του, ZigBee 3.0). Το ZigBee Pro είναι ένα πολύ χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, πολυζωνικό (2.4 GHz, 868 MHz, 915 MHz) και αμφίδρομο ασύρματο πρότυπο που μπορεί να ενσωματωθεί σε διάφορα σενάρια, από οικιακές συσκευές έως συστήματα ασφαλείας, περιβαλλοντικό έλεγχο, αυτοματοποιημένη μέτρηση, βιομηχανικό αυτοματισμό και ιατρικές εφαρμογές. Το ZigBee Pro μπορεί να θεωρηθεί ως το πρότυπο υποδομής δικτύου για δίκτυα που βασίζονται σε προϊόντα ZigBee, ενώ χρησιμοποιείται επίσης για ισχυρές ιδιότητες υλοποιήσεις IoT και ενισχύει το πρότυπο IEEE 802.15.4 προσθέτοντας χαρακτηριστικά δικτύου mesh και ασφάλειας μαζί με ένα πλαίσιο εφαρμογής.

Οι ζώνες εκπομπής του είναι:

- 2.4 GHz με ταχύτητα δεδομένων 250 kbps σε 16 κανάλια
- 915 MHz με ταχύτητα δεδομένων 10 kbps σε 27 κανάλια
- 868 MHz με ταχύτητα δεδομένων 100 kbps σε 63 κανάλια

Ενώ οι αποστάσεις μετάδοσης είναι 10 έως 100 μέτρα στη ζώνη των 2.4 GHz, ανάλογα με την ισχύ εξόδου και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, φτάνοντας το 1 χλμ για τις ζώνες της τάξης των MHz.

Στους μηχανισμούς αξιοπιστίας του Zigbee, συγκαταλέγεται το πρωτόκολλο CSMA/CA το οποίο μειώνει τη πιθανότητα παρεμβολών και εξασφαλίζει τη σταθερότητα του δικτύου μέσω αυτόματης επαναμετάδοσης δεδομένων. Επίσης διαθέτει τις ακόλουθες τεχνικές οι οποίες διασφαλίζουν τη μετάδοση των δεδομένων:

- **Κωδικοποίηση δεδομένων:** Χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK και μετατροπή συμβόλων 4-bit σε ακολουθίες chip 32-bit.
- **Αναμονή πριν από την αποστολή:** Καθυστερεί την αποστολή δεδομένων για τυχαίο χρόνο πριν ακούσει ξανά αν υπάρχει δραστηριότητα στο επιλεγμένο κανάλι.
- **end-to-end επιβεβαιώσεις:** Μεταξύ του προορισμού και των πηγαίων κόμβων.
- **Επιβεβαιώσεις επόμενου άλματος:** Όταν ένα μήνυμα δρομολογείται μέσω ενδιάμεσου κόμβου.

- **Ευκινησία συχνοτήτων:** Επιτρέπει στο δίκτυο να μετακινείται σε διαφορετικό ραδιοφωνικό κανάλι σε περίπτωση υπερβολικού θορύβου στο χρησιμοποιούμενο κανάλι.
- **Επιδιόρθωση διαδρομής:** Ανακαλύπτει εναλλακτικές διαδρομές για μηνύματα όταν η προεπιλεγμένη διαδρομή σε έναν κόμβο προορισμού έχει διακοπεί.

Αυτές οι δυνατότητες αξιοπιστίας επιτρέπουν σε ένα δίκτυο ZigBee να λειτουργεί ακόμα και παρουσία γειτονικών δικτύων ZigBee που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα ή βασίζονται σε άλλα πρότυπα (π.χ. Bluetooth και Wi-Fi).

Ένα δίκτυο βασισμένο στο ZigBee περιλαμβάνει τρεις τύπους κόμβων:

1. **Coordinator:** Κάθε δίκτυο ZigBee Pro μπορεί να περιέχει μόνο έναν coordinator, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία του δικτύου, την επιλογή του καναλιού συχνότητας και τη διαχείριση των λειτουργιών ένταξης νέων κόμβων. Μετά την ίδρυση του δικτύου, εκτελεί δραστηριότητες δρομολόγησης, προωθώντας και λαμβάνοντας μηνύματα μεταξύ των κόμβων.
2. **Router:** Κόμβος με δυνατότητες δρομολόγησης που στέλνει και λαμβάνει δεδομένα και επιτρέπει σε άλλους κόμβους να ενταχθούν στο δίκτυο mesh. Ένα δίκτυο ZigBee μπορεί να περιέχει πολλούς δρομολογητές που πρέπει να είναι πάντα διαθέσιμοι για τη διατήρηση της δρομολόγησης μεταξύ των κόμβων.
3. **End device:** Κόμβος που απλά στέλνει ή λαμβάνει δεδομένα από τον γονικό του κόμβο χωρίς δυνατότητα δρομολόγησης. Επειδή μπορεί να είναι τροφοδοτούμενο από μπαταρία, όταν δεν μεταδίδει ή λαμβάνει δεδομένα, μπορεί να κοιμάται για να διατηρήσει την ενέργεια. Μηνύματα που απευθύνονται σε έναν κοιμισμένο end device θα αποθηκευτούν από τον γονικό κόμβο μέχρι να ξυπνήσει.

Οι κόμβοι coordinator ή router μπορούν να ενεργοποιηθούν με χρονικό διάστημα κατά το οποίο επιτρέπεται η ένταξη νέων κόμβων. Επίσης, το ZigBee Pro επιτρέπει σε έναν ορφανό κόμβο να επανενταχθεί στο δίκτυο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση "joining permit" του γονικού κόμβου.

Στο κομμάτι της ασφάλειας το ZigBee Pro ενσωματώνει χαρακτηριστικά για την αποτροπή εισβολής αγνώστων ή επικίνδυνων οντοτήτων από γειτονικά δίκτυα ZigBee και διασφαλίζει την ιδιωτικότητα στις επικοινωνίες μεταξύ κόμβων του ίδιου δικτύου. Οι πιο σημαντικές λειτουργίες ασφάλειας περιλαμβάνουν:

- **Λίστες Ελέγχου Πρόσβασης (ACLs):** Επιτρέπουν μόνο προκαθορισμένους "φιλικούς" κόμβους να ενταχθούν στο δίκτυο.
- **Καταμετρητές πλαισίων:** Αποτρέπουν την αποστολή του ίδιου μηνύματος δύο φορές και τις επιθέσεις επανάληψης.
- **Κρυπτογράφηση με βάση κλειδιά:** Βασισμένη στο συμμετρικό σχήμα AES-128, με προδιαμορφωμένα κλειδιά κατά την εγκατάσταση του συστήματος ή μέσω ενός κεντρικού κόμβου "Trust Centre".

Το ZigBee επιτρέπει στους κόμβους να ανακαλύπτουν λεπτομέρειες για τις δυνατότητες άλλων κόμβων του δικτύου μέσω τριών ειδών ανακαλύψεων:

1. **Ανακάλυψη Συσκευών:** Επιτρέπει τις διευθύνσεις των κόμβων του δικτύου στον αιτούντα κόμβο.
2. **Ανακάλυψη Υπηρεσιών:** Επιτρέπει σε έναν κόμβο να γνωρίζει τις δυνατότητες ενός απομακρυσμένου κόμβου.
3. **Ανακάλυψη Διαδρομής:** Επιτρέπει την εύρεση της καλύτερης διαθέσιμης διαδρομής για ένα εξερχόμενο μήνυμα από έναν πηγαίο κόμβο προς τον κόμβο προορισμού. Αν δεν υπάρχει διαδρομή, ο κόμβος ξεκινά τη διαδικασία ανακάλυψης διαδρομής.

Αυτές οι δυνατότητες καθιστούν το ZigBee Pro ένα αξιόπιστο και ασφαλές πρωτόκολλο για διάφορες εφαρμογές, από οικιακές μέχρι βιομηχανικές.

3.3.4 Thread

Το πρωτόκολλο Thread έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις του IoT, όπως η διαλειτουργικότητα, η αρχιτεκτονική και η ασφάλεια. Είναι ένα ανοιχτό, βασισμένο σε πρότυπα χαμηλής κατανάλωσης και λειτουργίας με μπαταρία ασύρματο πρωτόκολλο δικτύου mesh, που βασίζεται στο IP (IPv4 και IPv6), επιτρέποντας στις συσκευές να επικοινωνούν με άλλους κόμβους IoT και απευθείας με το Cloud. Μπορεί να συνδέσει αξιόπιστα έναν μεγάλο αριθμό προϊόντων βασισμένων στο IEEE 802.15.4 (πάνω από 250) και περιλαμβάνει υποχρεωτικά χαρακτηριστικά ασφαλείας, εξαλείφοντας τα μονοσήμαντα σημεία αποτυχίας.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του Thread είναι:

- **Ενδιάμεσος κόμβος (border router):** Το Thread μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλούς border routers, καθιστώντας το δίκτυο αυτοθεραπευόμενο και επαναδιαμορφούμενο όταν προστίθεται ή αφαιρείται μια συσκευή.
- **Αυθεντικοποίηση και ασφάλεια:** Οι κόμβοι Thread είναι αυθεντικοποιημένοι και χρησιμοποιούν κρυπτογράφηση MAC πριν ενταχθούν στο δίκτυο, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια στο επίπεδο του δικτύου.
- **Ενσωμάτωση IP:** Το πρωτόκολλο βασίζεται σε IP, επιτρέποντας τη σύνδεση με διαφορετικές τεχνολογίες και την εκτέλεση διαφόρων εφαρμογών όπως Weave, OWA LWM2M, Dotdot και OCF.
- **Ενσωματωμένη διασύνδεση:** Δεν απαιτούνται ιδιόκτητες πύλες, proxies ή μεταφραστές μεταξύ παρόμοιων συσκευών, μειώνοντας τις ανάγκες υποδομής και συντήρησης.

Συνοψίζοντας την αναφορά μας για το πρωτόκολλο επικοινωνίας Thread, αξίζει να αναφερθούμε στα πλεονεκτήματα που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία:

- **Μικρό αποτύπωμα και χαμηλή κατανάλωση:** Το Thread είναι διαλειτουργικό, επεκτάσιμο έως μεγάλο αριθμό συσκευών, αξιόπιστο και ασφαλές, αποφεύγοντας τα μονοσήμαντα σημεία συμφόρησης και αποτυχίας.
- **Ευέλικτη ενδιάμεση στρώση:** Επιτρέπει την επικοινωνία συσκευής-με-συσκευή μέσω όλων των δικτύων.
- **Ασφάλεια:** Παρέχει ασφάλεια μέσω ενσωματωμένων πολιτικών εξουσιοδότησης στο επίπεδο του συνδέσμου και κρυπτογράφησης της κυκλοφορίας.
- **Επέκταση δικτύου:** Επεκτείνει το ελεγχόμενο δίκτυο σε εξωτερικά δίκτυα ή στο Διαδίκτυο μέσω border routers.
- **Υποστήριξη συσκευών με μπαταρία:** Επιτρέπει τη συμμετοχή συσκευών με μπαταρία στο δίκτυο, αποφεύγοντας συχνές αλλαγές μπαταρίας, όπως θερμοστάτες και ελεγκτές φωτισμού.

3.3.5 Lightweight Mesh (LWMesh)

Το Lightweight Mesh (LWMesh), της εταιρίας Atmel, πρωτόκολλο είναι ένα μικρού αποτυπώματος, χαμηλής κατανάλωσης πρωτόκολλο δικτύου mesh που βασίζεται στις προδιαγραφές IEEE 802.15.4. Σχεδιάστηκε για να στοχεύει σε διάφορες εφαρμογές, όπως οικιακός και βιομηχανικός αυτοματισμός, αυτόματη μέτρηση κατανάλωσης, απομακρυσμένος έλεγχος κλπ., και είναι κατάλληλο για μεγάλο αριθμό SoCs (System on Chips) βασισμένων στο IEEE 802.15.4.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι ότι δεν απαιτείται ειδικός κόμβος για την εκκίνηση του δικτύου και επίσης δεν απαιτείται διαδικασία ένταξης πριν τη σύνδεση σε ένα δίκτυο LWMesh. Έχουμε απουσία σχέσεων φύλλων-ριζών (όπως έχουμε σε μια δενδροειδή δομή) μεταξύ των συσκευών στην τοπολογία LWMesh, ενώ η ανακάλυψη διαδρομών γίνεται αυτόματα αν η διαδρομή προς τον στόχο είναι άγνωστη, με τους πίνακες δρομολόγησης να ενημερώνονται αυτόματα βάσει των δεδομένων στα πλαίσια. Τέλος υπάρχει υποστήριξη πολυεκπομπών (multicast) και το πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV. Οι τύποι των κόμβων σ' ένα LWMesh είναι δύο:

1. **Routing nodes:** Κόμβοι με δεκαεξαδική διεύθυνση MAC < 0x8000, που σχηματίζουν τον πυρήνα του δικτύου και αναμένεται να είναι συνεχώς ενεργοποιημένοι.
2. **Non-routing nodes:** Κόμβοι με διεύθυνση δικτύου \geq 0x8000, που μπορούν να προωθούν πληροφορίες όσο η ραδιοεπικοινωνία τους είναι ενεργή και βρίσκονται εντός της εμβέλειας κάλυψης.

Οι εφαρμογές που εκτελούν το πρωτόκολλο LWMesh είναι υπεύθυνες για βασικές και προχωρημένες λειτουργίες διαχείρισης δικτύου και υπηρεσιών, επαναμετάδοση πληροφοριών σε περίπτωση αποτυχίας, ορισμό μορφής πακέτων και ασφάλειας, διαχείριση ενέργειας MCU και αλληλεπίδραση με εξωτερικά περιφερειακά υλικού.

Η δομή της σιόβας LWMesh περιλαμβάνει:

1. **Hardware Abstraction Layer (HAL):** Περιλαμβάνει λειτουργίες εξαρτώμενες από το υλικό.
2. **Radio Physical Layer (PHY):** Περιέχει λειτουργίες για τη χρήση του ραδιομετατροπέα για τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογών.
3. **Network Layer:** Διαχειρίζεται τις δικτυακές λειτουργίες.
4. **System Functions:** Περιλαμβάνει λειτουργίες απαραίτητες για την κανονική επεξεργασία, όπως χρονόμετρα λογισμικού και πολιτικές ασφάλειας.
5. **Application Policies:** Περιλαμβάνει πολιτικές όπως αναβαθμίσεις Over-The-Air (OTA).

Το πρωτόκολλο LWMesh υποστηρίζει δύο αλγόριθμους δρομολόγησης:

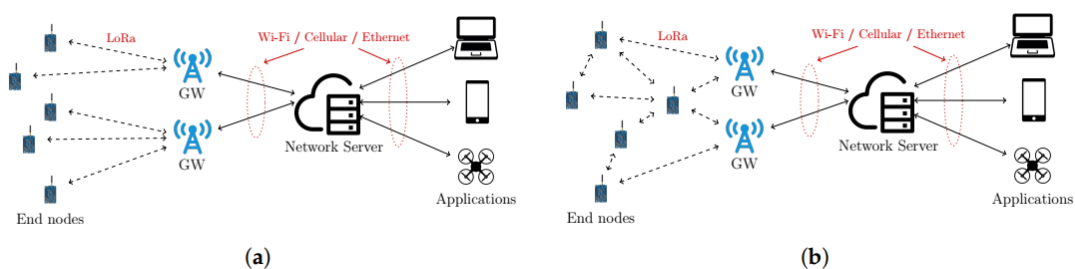
1. **Native Routing:** Ανακαλύπτει διαδρομές χωρίς επιπλέον δομή, αλλά δεν εγγυάται τη βέλτιστη ανακάλυψη διαδρομών.
2. **AODV Routing:** Ένας τυπικός αλγόριθμος δρομολόγησης, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2, που χρησιμοποιεί επιπλέον εντολές για την ανακάλυψη διαδρομών, εγγυάται τη βέλτιστη ανακάλυψη διαδρομών και την αντιμετώπιση ομάδων κόμβων.

Η προσέγγιση φυσικής δρομολόγησης (native routing) του LWMesh πραγματοποιεί ανακάλυψη διαδρομών κατά την κανονική παράδοση της κυκλοφορίας, διατηρώντας χαμηλό φόρτο, παρόμοιο με αυτόν της μετάδοσης ενός κανονικού πλαισίου broadcast. Οι καταχωρήσεις διαδρομών που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για επόμενες μεταδόσεις χωρίς πρόσθετη ανακάλυψη διαδρομής. Αν κάθε κόμβος διαθέτει επαρκή μνήμη για αποθήκευση του πίνακα δρομολόγησης, όλοι οι κόμβοι μπορούν να ανακαλύψουν όλες τις δυνατές (ενεργές) διαδρομές στο δίκτυο, με τη δυνατότητα διατήρησης πολλαπλών επιλογών για τους ίδιους προορισμούς.

3.4 Δίκτυο LoRa Mesh

Μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για εφαρμογές IoT είναι η LoRa (Long Range) (και το επίπεδο MAC της, γνωστό ως LoRaWAN). Αυτή η τεχνολογία, όπως έχουμε αναλύσει και στο κεφάλαιο 2, επιτρέπει μακράς εμβέλειας επικοινωνίες, φτάνοντας (σε βέλτιστες συνθήκες διάδοσης) δεκάδες χιλιόμετρα απόσταση. Η κλασική τοπολογία ενός δικτύου LoRaWAN είναι μια τοπολογία αστέρα μονής αναπήδησης, όπου οι πύλες (gateways) μεταφέρουν μηνύματα μεταξύ των τελικών συσκευών και ενός διακομιστή δικτύου. Οι πύλες είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο με οποιονδήποτε διαθέσιμο τρόπο (π.χ., μέσω Wi-Fi, κυψελωτών ή Ethernet συνδέσεων).

Παρά τη μακράς εμβέλειας δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των τελικών κόμβων και των πυλών, μπορεί να υπάρξει ανάγκη για υποστήριξη πολλαπλών αναπηδήσεων (multi-hop), για παράδειγμα αν θέλει κανείς να φτάσει σε πολύ απομακρυσμένες περιοχές, αποφεύγοντας την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού πυλών που είναι ακριβές για ανάπτυξη και συντήρηση. Σε αυτή την περίπτωση, η τοπολογία ενός δικτύου LoRaWAN αλλάζει σε ένα δίκτυο mesh, σχήμα 3.6, παρέχοντας έτσι ευέλικτες λύσεις για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων και τη σύνδεση απομακρυσμένων περιοχών.



Σχήμα 3.6: (a) Τοπολογία star-of-star σε LoRaWAN δίκτυο (b) Τοπολογία Mesh σε LoRaWAN δίκτυο [12]

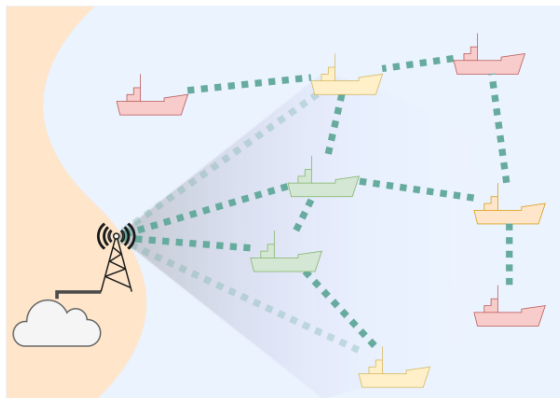
3.4.1 Ανάγκη αναβάθμισης LoRaWAN σε Mesh

Στις αναπτύξεις LoRaWAN με τοπολογία star-of-stars, οι πύλες (gateways) καθορίζουν την περιοχή κάλυψης του δικτύου, δημιουργώντας μια ανισοβαρή διαδρομή απόδοσης δεδομένων (κόμβοι → πύλη → cloud). Αυτή η αρχιτεκτονική δεν ταιριάζει απόλυτα σε όλες τις περιπτώσεις χρήσης και ορισμένες εφαρμογές θα επωφελούνταν από πιο ευέλικτες τοπολογίες δικτύου. Μερικές εφαρμογές θα μπορούσαν να αναπτυχθούν με χαμηλότερο κόστος υιοθετώντας μοντέλα δικτύου που επιτρέπουν τη μετάδοση πακέτων multi-hop μεταξύ των κόμβων. Αυτό θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από συστήματα IoT χωρίς υποδομή και αποκεντρωμένα, που χρειάζονται να διανέμουν δεδομένα μεταξύ κόμβων διασκορπισμένων σε μεγάλες περιοχές, συνδεδεμένων μέσω ενός δικτύου mesh χαμηλής κατανάλωσης, για να εκτελούν υπολογισμούς στο άκρο του δικτύου. Για να γίνει πιο κατανοητή η ανάγκη χρησιμοποίησης δικτύων Mesh, στο άρθρο [13] οι συγγραφείς προχωρούν σε μια κατηγοριοποίηση των εφαρμογών που επωφελούνται από τέτοιου είδους δίκτυα.

Κάλυψη πέραν της εμβέλειας υποδομής

Παρόλο που οι μεταδόσεις LoRa μπορούν να καλύψουν μεγάλες αποστάσεις, είναι δύσκολο να παρέχεται κάλυψη LoRaWAN για κινούμενα στοιχεία (π.χ., στόλοι οχημάτων) που κυκλοφορούν σε μεγάλες περιοχές (π.χ., ανοιχτή θάλασσα). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ανάπτυξη πυλών (gateways) μπορεί να είναι οικονομικά ή τεχνικά δύσκολη. Εκεί, η μετάδοση πακέτων multi-hop μεταξύ των τελικών κόμβων μπορεί να διευκολύνει την επικοινωνία με πύλες πέρα από την κάλυψή τους.

Η εικόνα 3.7 απεικονίζει μια πραγματική περίπτωση χρήσης όπου ένας στόλος πλοίων από μια αλιευτική ένωση πρέπει να παρακολουθείται πέρα από την κάλυψη μιας πύλης στην ξηρά. Παρόλο που είναι τεχνικά δυνατό, η ανάπτυξη επιπλέον πυλών δεν είναι μια εφικτή επιλογή για την ένωση. Ωστόσο, ο συνδυασμός της μετάδοσης μηνυμάτων multi-hop και του Δικτύου Ανθεκτικότητας Καθυστερήσης (Delay-Tolerant Network - DTN) μπορεί να μετριάσει την επίδραση των περιοχών χωρίς κάλυψη και να αυξήσει την εμβέλεια λειτουργίας του δικτύου. Με την αξιοποίηση των συναντήσεων των κινούμενων στοιχείων και των νέων διαδρομών μετάδοσης που δημιουργούν, τα πλοία κοντά στην ακτή μπορούν να συμβάλουν στην επέκταση της κάλυψης της πύλης περαιτέρω προς τα ανοικτά.

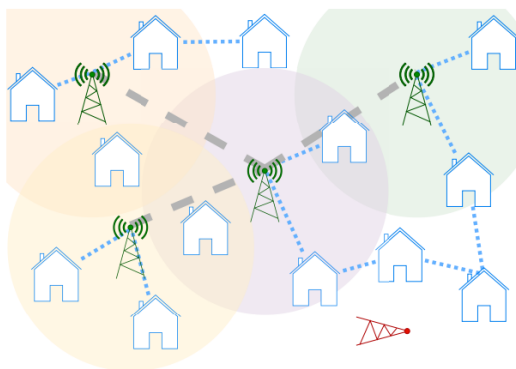


Σχήμα 3.7: *Επέκταση εμβέλειας πύλης. Τα κόκκινα και πορτοκαλί πλοία βρίσκονται εκτός εμβέλειας αλλά το μήνυμα μεταδίδεται μέσω των πράσινων πλοίων. Επιπλέον τα κίτρινα πλοία συνεισφέρουν για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης [13]*

Ανθεκτικότητα υποδομής

Μετά από φυσικές καταστροφές, τα συστήματα επικοινωνίας συχνά αντιμετωπίζουν περιόδους διακοπής λόγω ζημιών στην υποδομή (π.χ., σταθμοί βάσης) στην πληγείσα περιοχή. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι πύλες (gateways) σε ένα δίκτυο IoT (ειδικά LoRaWAN) μπορούν να γίνουν σημεία αποτυχίας και να καταστήσουν ένα μέρος ή ακόμη και ολόκληρο το δίκτυο ανενεργό αν σταματήσουν να λειτουργούν. Για να παρακαμφθεί αυτή η αδυναμία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεση επικοινωνία μεταξύ των τελικών κόμβων.

Μετά από έναν σεισμό, οι άνθρωποι διαθέτουν στα σπίτια και στους χώρους εργασίας τους πομποδέκτες LoRa εξοπλισμένους με μπαταρίες. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, μπορούν να χρησιμοποιούν αυτές τις συσκευές για να αναφέρουν την κατάστασή τους στις ομάδες διάσωσης ή να στείλουν σύντομα μηνύματα στους συγγενείς τους. Οι πύλες που είναι διασκορπισμένες στην πόλη λαμβάνουν τα μηνύματα και τα προωθούν στο συντονιστικό έργο της έκτακτης ανάγκης. Αν οι πύλες LoRaWAN απομονωθούν ή καταστούν ανενεργές λόγω δυσμενών συνθηκών, οι κόμβοι των χρηστών μπορούν να παίξουν έναν ενεργό ρόλο στο σύστημα και να βοηθήσουν στη δρομολόγηση πακέτων προς και από τους κόμβους που επηρεάζονται από αποτυχίες υποδομής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.8. Αυτό το σενάριο υπογραμμίζει



Σχήμα 3.8: *Μετά από καταστροφή τελικοί κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν με το δίκτυο και να προωθούν μηνύματα. [13]*

τη σημασία της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ των τελικών κόμβων και της ενεργούς συμμετοχής των κόμβων των χρηστών στη δρομολόγηση πακέτων σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, εξασφαλίζοντας έτσι την επικοινωνία ακόμα και όταν η υποδομή αποτυγχάνει.

Συστήματα χωρίς υποδομή

Η λήψη δεδομένων μέτρησης από το πεδίο είναι μια αργή, επίπονη και δαπανηρή διαδικασία. Πολλές πόλεις παγκοσμίως, και ακόμη και ολόκληρες χώρες, έχουν ψηφιοποιήσει τις μετρήσεις από δημόσιες υπηρεσίες χρησιμοποιώντας ασύρματες ή Power Line Communications (PLC). Το LoRa μπορεί να διευκολύνει αυτή τη διαδικασία σε υποεξυπηρετούμενες περιοχές αν οι πομποδέκτες ενσωματωθούν στις συσκευές μέτρησης. Οι εφαρμογές σε αυτόν τον τομέα θα μπορούσαν επίσης να υιοθετήσουν τοπολογίες mesh αντί για το μοντέλο που επικεντρώνεται στις πύλες (gateways). Οι κόμβοι θα μπορούσαν να προωθούν μηνύματα από μια συσκευή μέτρησης σε άλλη μέχρι να φτάσουν σε ένα data sink και επίσης προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα κόμβων, όπου ένας χαμηλός λόγος κόμβων/πύλη μπορεί να είναι οικονομικά ανέφικτος.

Μια εταιρεία ύδρευσης σε μια απομακρυσμένη ορεινή περιοχή απαιτεί χειροκίνητη παρέμβαση για την καταγραφή της ποιότητας του νερού σε διάφορους οικισμούς. Η ανεπαρκής τηλεπικοινωνιακή υποδομή καθιστά τη λήψη και την αναφορά των δεδομένων χρονοβόρα και δαπανηρή. Οι μετρήσεις αυτοματοποιούνται για τη βελτίωση της διαχείρισης, αλλά τα όργανα μέτρησης πρέπει να συνδέονται σε ένα σύστημα επικοινωνίας που μπορεί να αναφέρει δεδομένα σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις. Η αρχιτεκτονική LoRaWAN δεν ταιριάζει σε αυτό το σενάριο, καθώς το μέγεθος της ανάπτυξης και η γεωγραφία του εδάφους θα απαιτούσαν μεγάλο αριθμό πυλών. Επειδή οι περισσότεροι κόμβοι βρίσκονται σε οπτική επαφή με άλλους κόμβους, μια λύση multi-hop όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, προωθώντας πακέτα μεταξύ των διαφόρων οικισμών μέχρι να φτάσουν στις διαχειριστικές εγκαταστάσεις. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αυτόματη συλλογή και αναφορά δεδομένων σε απομακρυσμένες και δύσβατες περιοχές, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το κόστος.



Σχήμα 3.9: Ανάπτυξη δικτύου Mesh χωρίς υποδομή LoRaWAN [13]

Κεφάλαιο 4

Υλοποίηση δικτύου LoRa Mesh

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του δικτύου LoRa Mesh που προτείνεται στη παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, πέραν από το κομμάτι του hardware, θα παρουσιασθεί και η γραφική απεικόνιση (web-based dashboard) που αναπτύχθηκε για την παρουσίαση των μετρήσεων των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο.

4.1 Εξοπλισμός

Για την υλοποίηση του δικτύου LoRa χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά που αναφέρονται στο Παράρτημα Β', για τα οποία θα ακολουθήσει μια σύντομη παρουσίαση και περιγραφή:

TTGO LORA32 868/915Mhz SX1276 ESP32 Oled-display Bluetooth WIFI Lora



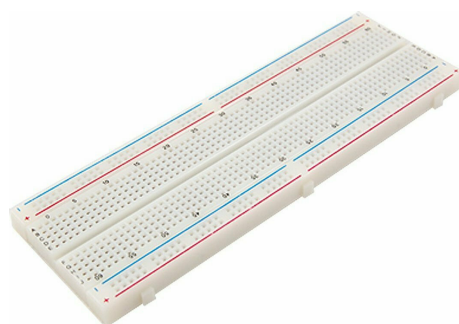
Σχήμα 4.1: *TTGO LORA32 868/915MHz SX1276 ESP32 Oled-display Bluetooth WIFI Lora*

Η ESP32 πλακέτα ανάπτυξης TTGO LoRa32 SX1276 OLED έχει ενσωματωμένο τον πομποδέκτη SX1276 της εταιρείας SEMTECH, ο οποίος διαθέτει το modem μακράς εμβέλειας LoRa®, το οποίο προσφέρει επικοινωνία με εξαιρετικά μεγάλη εμβέλεια και υψηλή αντοχή σε παρεμβολές, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ρεύματος. Οι πομποδέκτες SX1276/77/78/79 μπορούν να επιτύχουν ευαισθησία άνω των -148dBm χρησιμοποιώντας

ένα χαμηλού κόστους κρύσταλλο. Η υψηλή ευαισθησία σε συνδυασμό με τον ενσωματωμένο ενισχυτή ισχύος +20dBm προσφέρει κορυφαία απόδοση, καθιστώντας τους πομποδέκτες ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν εμβέλεια ή ανθεκτικότητα. Επίσης η πλακέτα διαθέτει την οθόνη 0.96 inch SSD1306, μνήμη flash 32MB και υποστηρίζει επικοινωνία WiFi.

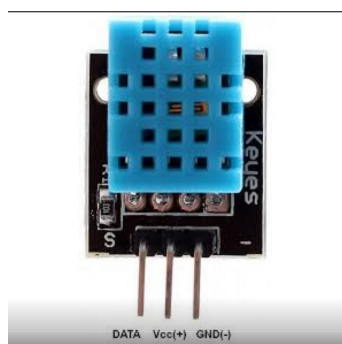
Breadboards

Οι πλακέτες δοκιμών (breadboards) είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή και τον έλεγχο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Επιτρέπει τη σύνδεση και αποσύνδεση εξαρτημάτων εύκολα χωρίς συγκόλληση, καθιστώντας την ιδανική για πρωτότυπα και πειραματισμούς. Η πλακέτα διαθέτει σειρά από τρύπες στις οποίες μπορούν να εισαχθούν τα καλώδια και τα εξαρτήματα για τη δημιουργία του κυκλώματος.



Σχήμα 4.2: Breadboard

Αισθητήρας DHT11

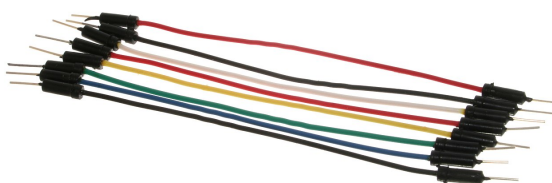


Σχήμα 4.3: Αισθητήρας DHT11

Ο DHT11 είναι ένας σύνθετος αισθητήρας για υγρασία και θερμοκρασία με βαθμονομημένη ψηφιακή έξοδο σήματος. Παρέχει πολύ ακριβείς τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας, εξασφαλίζοντας υψηλή αξιοπιστία και μακροχρόνια σταθερότητα. Διαθέτει αντίσταση μέτρησης υγρασίας και εξάρτημα μέτρησης θερμοκρασίας τύπου NTC με ενσωματωμένο μικροελεγκτή 8-bit, προσφέροντας γρήγορη απόκριση και οικονομική λύση. Λειτουργεί με σειριακή επικοινωνία μίας γραμμής, καθιστώντας την ενσωμάτωση στο σύστημα γρήγορη και εύκολη. Ο αισθητήρας DHT11 είναι κατάλληλος για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των πιο απαιτητικών, χάρη στην ακριβή μέτρηση, την εύκολη ενσωμάτωση και

την αξιόπιστη απόδοση [28].

Jump wires



Σχήμα 4.4: *Jump wires*

Τα καλώδια γεφύρωσης (jump wires) είναι βασικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και τον έλεγχο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Είναι ευέλικτα καλώδια με ακροδέκτες στις άκρες τους, που επιτρέπουν τη σύνδεση διάφορων σημείων σε μια πλακέτα δοκιμών (breadboard) ή σε άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα χωρίς την ανάγκη συγκόλλησης. Διατίθενται σε διάφορα μήκη και χρώματα για ευκολότερη οργάνωση και αναγνώριση των συνδέσεων στο κύκλωμα. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε πρωτότυπα και εκπαιδευτικά έργα για τη δοκιμή και την τροποποίηση κυκλωμάτων με ταχύτητα και ευκολία.

4.2 Περιγραφή Λειτουργίας

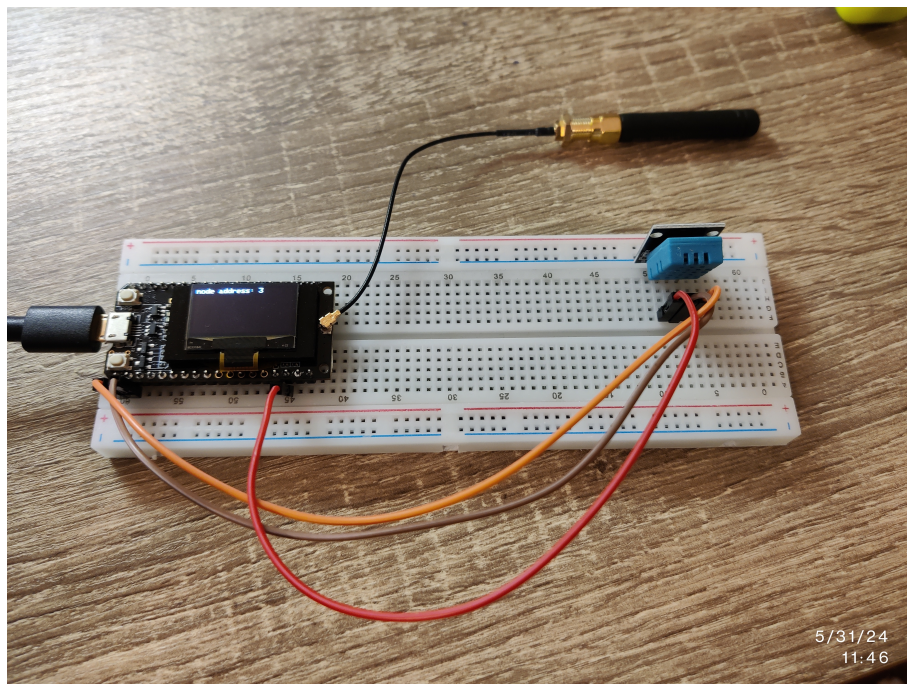
Το δίκτυο αποτελείται από τρεις κόμβους (nodes) οι οποίοι υλοποιούν ένα δίκτυο Mesh και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω της τεχνολογίας LoRa. Ο κάθε κόμβος αποτελείται από ένα board TTGO LORA32, όπως περιγράφεται και στην ενότητα 4.1. Οι κόμβοι 2 και 3 στέλνουν τις μετρήσεις στον κόμβο 1 και αυτός με τη σειρά του μέσω MQTT μηνυμάτων στέλνει τα δεδομένα σ'ένα broker. Από εκεί και πέρα οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων και ταυτόχρονα απεικονίζονται σε dashboard υλοποιημένο με JavaScript.

Έχοντας κατανοήσει τη γενική λειτουργία του δικτύου, στις επόμενες ενότητες θα περιγράψουμε αναλυτικά τα στάδια που μεσολαβούν από τη μέτρηση του αισθητήρα μέχρι την παρουσίαση των δεδομένων στο dashboard.

4.2.1 Συλλογή Δεδομένων

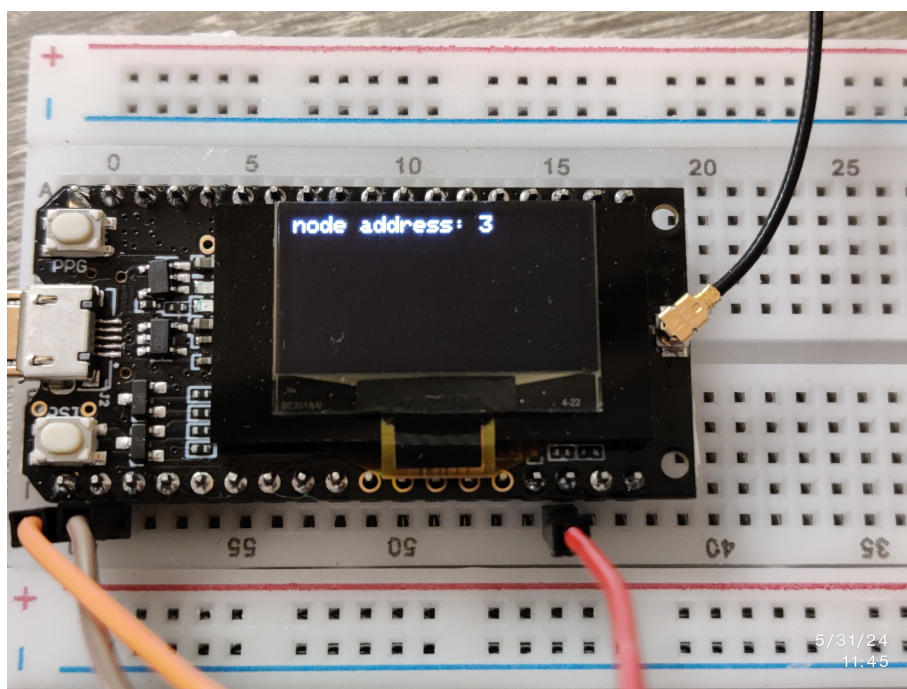
Όπως έχουμε αναφέρει το δίκτυο αποτελείται από τρεις κόμβους. Οι κόμβοι 2 και 3 έχουν συνδεδεμένο τον αισθητήρα DHT11 (σχήμα 4.5) και μπορούν να εκτελούν μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας. Στην οθόνη του κάθε board εμφανίζεται η διεύθυνση του κόμβου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6. Κάθε μέτρηση θερμοκρασίας ακολουθείται και από μέτρηση υγρασίας. Οι τιμές αυτές καθώς και η διεύθυνση του κόμβου ομαδοποιούνται σ' ένα JSON αρχείο το οποίο στέλνεται στον κόμβο 1. Η διαδρομή που θα ακολουθήσει

το πακέτο δεδομένων εξαρτάται από την τοπολογία του δικτύου Mesh. Αυτή η διαδικασία γίνεται τοπικά σε κάθε κόμβο.



Σχήμα 4.5: Ο κόμβος 3 με αισθητήρα DHT11 πάνω σε breadboard

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν μόνο τρεις κόμβοι για την υλοποίηση του δικτύου. Για την εισαγωγή περισσότερων κόμβων, το μόνο που χρειάζεται να ορίσουμε είναι διευθύνσεις και το δίκτυο θα αναδιοργανωθεί μόνο του. Αυτό είναι εξάλλου και ένα από τα πλεονεκτήματα των δικτύων Mesh.



Σχήμα 4.6: Διεύθυνση κόμβου 3

4.2.2 Μεταφορά Δεδομένων

Ο κόμβος 1 δεν έχει συνδεδεμένο αισθητήρα. Ο σκοπός του δεν είναι να παίρνει μετρήσεις αλλά να στέλνει τα πακέτα δεδομένων μέσω MQTT μηνυμάτων στον broker. Γι αυτό το λόγο ο κόμβος 1 ή αλλιώς bridge, πρέπει να έχει πρόσβαση στο Internet μέσω WiFi. Στη συνέχεια κάνει εγγραφή σε προκαθορισμένο topic του MQTT broker για να μπορέσει να στείλει τις μετρήσεις σε μορφή JSON (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Πακέτα δεδομένων στον broker

Οι κόμβοι που αποτελούν το στάδιο της συλλογής δεδομένων αλλά και η γέφυρα, προγραμματίστηκαν σε γλώσσα C++ χρησιμοποιώντας το Arduino IDE. Το περιβάλλον του Arduino IDE έχει ενσωματωμένο terminal που είναι πολύ χρήσιμο για την εκτύπωση μηνυμάτων κατά την διάρκεια της λειτουργίας του δικτύου, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα.

4.2.3 Επεξεργασία και Αποθήκευση Δεδομένων (Backend)

Σ' αυτό το στάδιο η επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων γίνεται σε επίπεδο cloud χρησιμοποιώντας JavaScript και συγκεκριμένα το περιβάλλον του node.js.

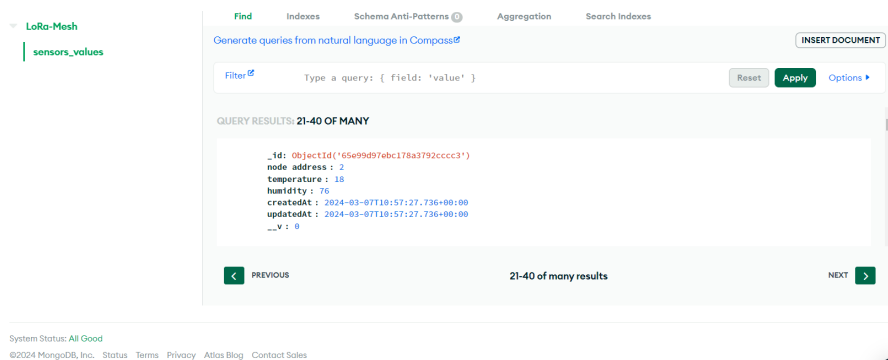
Για να μπορέσουμε να έχουμε πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα, όσον αφορά τις μετρήσεις των αισθητήρων, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μια βάση δεδομένων για την αποθήκευση αυτών των μετρήσεων. Για λόγους απλότητας χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων MongoDB καθώς δεν απαιτεί γνώση SQL.

Τα δεδομένα αντλούνται από το topic του broker και αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Στη περίπτωση μας το topic που χρησιμοποιούμε είναι το ntua_temp, το οποίο φαίνεται και στο σχήμα 4.7. Σ' αυτό το σημείο, με την αποθήκευση δηλαδή του πακέτου δεδομένων στη βάση, εισάγεται και μια χρονοσφραγίδα (timestamp) έτσι ώστε να μπορούμε αργότερα να απεικονίσουμε τα δεδομένα χρονολογικά στο dashboard. Πρέπει να επισημάνουμε ότι αυτή η διαδικασία γίνεται αυτόματα, δηλαδή κάθε μήνυμα που λαμβάνει ο broker αμέσως αποθηκεύεται και στην βάση δεδομένων. Συνεπώς για διαστήματα μετρήσεων της τάξης των λεπτών η διαφορά μεταξύ πραγματικής μέτρησης και χρονοσφραγίδας είναι αμελητέα.

Συγχρόνως με την αποθήκευση των μετρήσεων στη βάση δεδομένων, οι τελευταίες κάθε φορά μετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας για κάθε κόμβο, εγγράφονται σε δύο text αρχε-

ία. Αυτά τα αρχεία χρησιμοποιούνται, όπως θα δούμε στη συνέχεια, από το dashboard για την παρουσίαση θερμοκρασίας - υγρασίας σε πραγματικό χρόνο.

Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται το περιβάλλον της βάσης δεδομένων MongoDB. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι στο πακέτο δεδομένων πέραν από το πεδίο id, που είναι ένας μοναδικός κωδικός για κάθε εγγραφή και δημιουργείται αυτόματα, έχει προστεθεί και το πεδίο createdAt το οποίο περιλαμβάνει τη χρονοσφραγίδα σε μορφή ISO 8601.



Σχήμα 4.8: Βάση δεδομένων MongoDB

4.2.4 Παρουσίαση Δεδομένων (Frontend)

Για την ανάπτυξη του dashboard χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες Highcharts [29] βασισμένες σε JavaScript. Σε αντίθεση με το στάδιο της επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων, για την υλοποίηση του dashboard αναπτύχθηκε αρχείο HTML και ενσωματώθηκε το script της JavaScript. Το dashboard όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.9, αποτελείται από τέσσερις μετρητές τύπου gauges όπου εμφανίζουν τη θερμοκρασία και υγρασία για κάθε κόμβο σε πραγματικό χρόνο και δυο διαγράμματα με το ιστορικό των μετρήσεων.



Σχήμα 4.9: Dashboard

4.3 Ανάλυση Επιπρόσθετων Εννοιών

Για την εις βάθος κατανόηση του δικτύου θεωρείται σκόπιμη η περιγραφή των εννοιών που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2. Συνεπώς θα γίνει μια ανάλυση του πρωτοκόλλου MQTT, της βάσης δεδομένων MongoDB και των βιβλιοθηκών Highcharts.

4.3.1 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

Το MQTT είναι ένα τυποποιημένο πρωτόκολλο δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe) το οποίο κυκλοφόρησε από την IBM το 1999. Το MQTT σχεδιάστηκε για να μεταφέρει δεδομένα με ακρίβεια υπό συνθήκες μεγάλης δικτυακού καθυστέρησης και χαμηλού εύρους ζώνης [14]. Η αρχιτεκτονική του MQTT επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες δικτύου, κάνοντάς το ιδανικό για εφαρμογές IoT που απαιτούν αξιοπιστία και αποδοτικότητα.

Κύρια στοιχεία του MQTT είναι τα ακόλουθα:

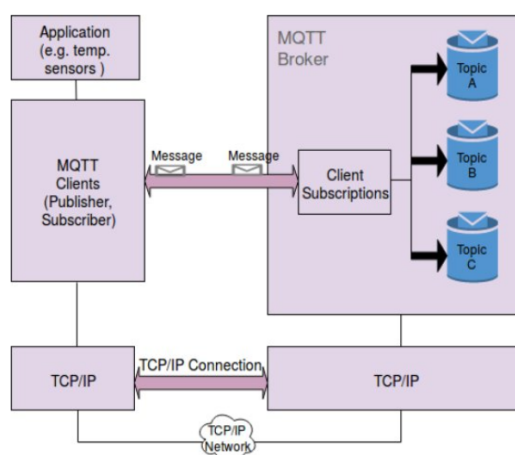
- **Publish/subscribe:** Το πρωτόκολλο MQTT χρησιμοποιεί το μοντέλο δημοσίευσης/εγγραφής (Publish/Subscribe). Σε αυτό το μοντέλο, ο εκδότης δημοσιεύει μηνύματα και οι χρήστες εγγράφονται σε θέματα (topics) που τους ενδιαφέρουν. Ο συνδρομητής εγγράφεται σε συγκεκριμένα θέματα και λαμβάνει όλα τα μηνύματα που δημοσιεύονται σε αυτά τα θέματα. Από την άλλη πλευρά, οι πελάτες μπορούν να δημοσιεύουν μηνύματα σε θέματα, επιτρέποντας έτσι σε όλους τους συνδρομητές να έχουν πρόσβαση στα μηνύματα αυτών των θεμάτων.
- **Topics and subscriptions:** Στο MQTT, οι εκδότες δημοσιεύουν μηνύματα σε topics που μπορούν να θεωρηθούν ως θέματα μηνυμάτων. Οι συνδρομητές εγγράφονται σε topics για να λαμβάνουν συγκεκριμένα μηνύματα. Οι εγγραφές στα topics μπορούν να εκφράζονται με τρόπο που περιορίζει τα δεδομένα που συλλέγονται σε συγκεκριμένα topics.
- **Quality of service levels:** Το πρωτόκολλο MQTT περιγράφει τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) που αντιπροσωπεύουν τη συμφωνία μεταξύ δύο μερών σχετικά με την εξασφάλιση της διανομής δεδομένων. Υποστηρίζει τρία επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών:
 1. *QoS0 (At most once):* Το μήνυμα αποστέλλεται το πολύ μία φορά χωρίς εγγύηση παράδοσης.
 2. *QoS1 (At least once):* Το μήνυμα αποστέλλεται τουλάχιστον μία φορά και μπορεί να παραδοθεί περισσότερες από μία φορές, με τη ρύθμιση της τιμής της σημαίας διπλότυπου σε 1.
 3. *QoS2 (Exactly once):* Το μήνυμα αποστέλλεται ακριβώς μία φορά χρησιμοποιώντας μηχανισμό 4-way handshaking.

Η επιλογή του επιπέδου QoS εξαρτάται από τις ανάγκες του συστήματος. Για παράδειγμα, αν ένα σύστημα χρειάζεται συνεχή παράδοση δεδομένων, υιοθετεί το QoS2 για τη μετάδοση δεδομένων, ακόμα και αν υπάρχει καθυστέρηση.

- **Retained messages:** Στο πρωτόκολλο MQTT, τα μηνύματα διατηρούνται στον broker μετά τη διανομή τους σε όλους τους παρόντες πελάτες. Όταν λαμβάνεται μια νέα εγγραφή για το ίδιο topic, τα διατηρημένα μηνύματα αυτών των θεμάτων μεταδίδονται στον νέο πελάτη.
- **Clean sessions and reliable connections:** Όταν ένας συνδρομητής συνδέεται με τον broker, η σύνδεση θεωρείται μόνιμη εάν η τιμή της σημαίας "clean session" είναι false. Σε αυτή την περίπτωση, τα διαδοχικά μηνύματα που μεταφέρουν την υψηλότερη ανάθεση QoS διατηρούνται για παράδοση όταν η σύνδεση επαναληφθεί. Η χρήση αυτής της σημαίας είναι προαιρετική.
- **Wills:** Ένας πελάτης (client) μπορεί να ενημερώσει τον broker ότι περιέχει μια "διαθήκη" (μήνυμα) που πρέπει να διανεμηθεί σε ένα συγκεκριμένο topic ή topics σε περίπτωση απρόσμενης αποσύνδεσης. Αυτή η "διαθήκη" (will) είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε συστήματα όπως οι ρυθμίσεις ασφαλείας ή συναγερμού, όπου οι διαχειριστές ειδοποιούνται άμεσα όταν ένας αισθητήρας χάσει τη σύνδεσή του με το σύστημα.

Αρχιτεκτονική MQTT

Η τυπική αρχιτεκτονική MQTT μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, στον client και στον broker, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Αρχιτεκτονική MQTT [14]

Ο client μπορεί να είναι publisher ή subscriber και πρέπει πάντα να συνδέεται στον broker, δηλαδή στον διακομιστή δικτύου. Κατόπιν ο client μπορεί να εκτελεί τις ακόλουθες ενέργειες:

- Να κάνει publish μηνύματα στους ενδιαφερόμενους χρήστες.

- **Βάση Δεδομένων (Database):** Αποτελείται από συλλογές και έχει το δικό της σύνολο αρχείων στο σύστημα αρχείων, επιτρέποντας την απομονωμένη αποθήκευση για διαφορετικές βάσεις δεδομένων.
- **Συλλογή (Collection):** Είναι ένα σύνολο εγγράφων του MongoDB. Στις συλλογές δεν επιβάλλεται ένα σταθερό σχήμα, επιτρέποντας την αποθήκευση εγγράφων με διαφορετικά πεδία και δομές.
- **Έγγραφο (Document):** Τα έγγραφα στο MongoDB αποτελούνται από ζευγάρια κλειδιού-τιμής και διαθέτουν δυναμικό σχήμα, που σημαίνει ότι τα έγγραφα σε μια συλλογή δεν χρειάζεται να έχουν το ίδιο σύνολο πεδίων ή δομή. Κοινά πεδία σε έγγραφα μιας συλλογής μπορούν να περιέχουν διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Παράδειγμα δομής εγγράφου MongoDB φαίνεται και στο σχήμα 4.8.

4.3.3 Βιβλιοθήκες Highcharts

Το Highcharts είναι μια βιβλιοθήκη διαγραμμάτων JavaScript που βασίζεται στο SVG (Scalable Vector Graphics), η οποία επιτρέπει στους προγραμματιστές να δημιουργούν εύκολα ανταποκρινόμενα, διαδραστικά και προσβάσιμα διαγράμματα. Η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει όλους τους τυπικούς τύπους διαγραμμάτων από απλά γραφήματα περιοχής έως x-range. Η δομή των επιλογών της είναι απλή και επιτρέπει βαθιά προσαρμοστικότητα, ενώ η εμφάνιση των διαγραμμάτων μπορεί να διαμορφωθεί μέσω JavaScript ή CSS.

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά της βιβλιοθήκης είναι τα ακόλουθα :

- Υποστηρίζει πολλούς φυλλομετρητές (browsers) και πλατφόρμες.
- Τα διαγράμματα είναι διαδραστικά και ανταποκρίνονται σε ενέργειες χρηστών όπως οι κινήσεις του ποντικιού, κλικ και αφή.
- Προσφέρει εκτεταμένες επιλογές προσαρμογής, επιτρέποντας στους προγραμματιστές να ρυθμίσουν σχεδόν κάθε πτυχή της εμφάνισης και της συμπεριφοράς ενός διαγράμματος.
- Εστιάζει στην προσβασιμότητα, διασφαλίζοντας ότι τα διαγράμματα είναι χρήσιμα για ανθρώπους με αναπηρίες.
- Μπορεί να διαχειριστεί ζωντανά δεδομένα και τα διαγράμματα μπορούν να ενημερώνονται δυναμικά μετά την αρχική τους απεικόνιση, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

4.4 Δοκιμή Λειτουργίας και Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Σε αυτή την ενότητα θα δοκιμάσουμε την αποτελεσματικότητα του δικτύου, ανιχνεύοντας τη ροή των δεδομένων από την διαδικασία της μέτρησης από τους αισθητήρες μέχρι και την παρουσίαση τους στο dashboard. Επίσης σε κάθε στάδιο θα παρουσιάζονται και τα μηνύματα που εμφανίζονται, μετά την ολοκλήρωση της κάθε διαδικασίας και τα οποία μας δίνουν πολύτιμες πληροφορίες για την ύπαρξη ή όχι τυχών σφαλμάτων.

Όπως έχουμε αναφέρει το δίκτυο αποτελείται από τρεις κόμβους εκ των οποίων οι δύο έχουν συνδεδεμένο αισθητήρα. Συνεπώς θα παίρνουμε δύο μετρήσεις θερμοκρασίας και δύο μετρήσεις υγρασίας.

Έχοντας αναπτύξει το δίκτυο το πρώτο πράγμα που μπορούμε να ελέγξουμε μέσα από το περιβάλλον του Arduino IDE είναι αν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σωστά και αν στέλνονται στη γέφυρα.

Σχήμα 4.12: Πληροφορίες από το terminal για κόμβο με αισθητήρα

Στο σχήμα 4.12 βλέπουμε ότι ο κόμβος 3 δεν εμφανίζει κάποια σφάλμα και στέλνει κανονικά τα δεδομένα του στο κόμβο γέφυρα. Ενώ στο σχήμα 4.13 βλέπουμε ότι στο terminal εμφανίζονται οι μετρήσεις και από τους δύο κόμβους. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε ότι τις περισσότερες πληροφορίες μέχρι το στάδιο του LoRa Mesh δικτύου τις εμφανίζει η γέφυρα. Οι κόμβοι συνήθως θα είναι τοποθετημένοι σε πιο απομακρυσμένα σημεία χωρίς να υπάρχει πάντα εύκολη πρόσβαση. Ενώ ο κόμβος γέφυρα, δεδομένου ότι χρειάζεται και σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω WiFi, θα είναι πιο προσβάσιμος.

Σχήμα 4.13: Πληροφορίες από το terminal για τον κόμβο γέφυρα

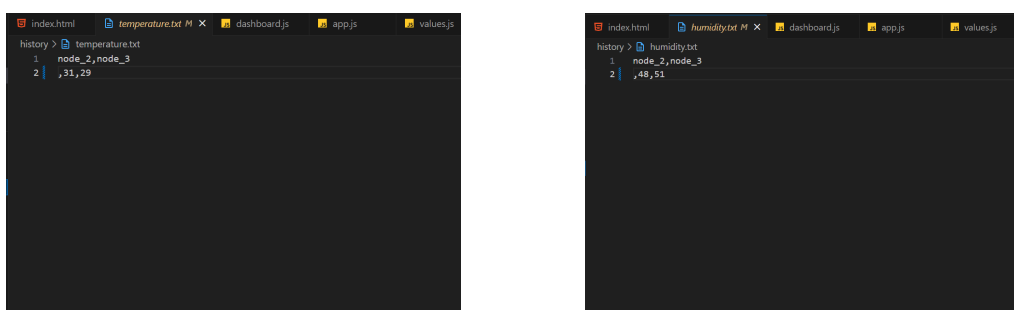
Το terminal του κόμβου γέφυρα, πέρα από τις μετρήσεις των κόμβων, μας δίνει και τη πληροφορία ότι τα δεδομένα έχουν αποσταλεί στον broker επιτυχώς με το μήνυμα "Publishing packet ID: 1". Στη συνέχεια μπορούμε να δούμε τα μηνύματα κατευθείαν στο topic του broker που έχουμε κάνει subscribe, σχήμα 4.7, η μέσα από το κομμάτι του backend πλέον. Στη παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε το VS Code για την ανάπτυξη του Backend αλλά και του Frontend σταδίου του project. Στο σχήμα 4.14 μπορούμε να δούμε πάλι τις με-

τρήσεις των κόμβων, όπως επίσης και το μήνυμα "values saevd" που μας ενημερώνει ότι οι τιμές έχουν αποθηκευτεί επιτυχώς στη βάση δεδομένων.

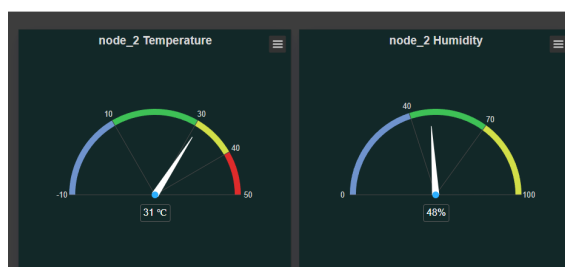


Σχήμα 4.14: Οι μετρήσεις των κόμβων στο terminal του VS Code

Ταυτόχρονα δημιουργούνται τα αρχεία temperature.txt και humidity.txt, των οποίων η δομή φαίνεται στο σχήμα 4.15. Τα εν λόγω αρχεία χρησιμοποιούνται στους μετρητές του dashboard για την απεικόνιση της θερμοκρασίας και υγρασίας των κόμβων σε πραγματικό χρόνο (σχήμα 4.16).

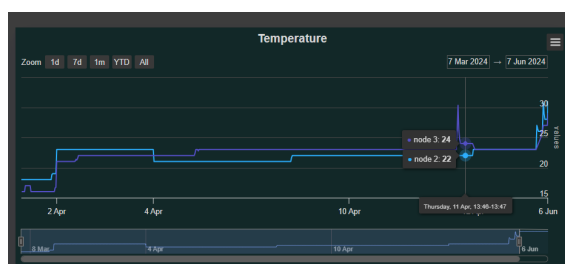


Σχήμα 4.15: Αρχεία text θερμοκρασίας και υγρασίας



Σχήμα 4.16: Μετρητές τύπου gauges για τις τιμές θερμοκρασίας/υγρασίας σε πραγματικό χρόνο του κόμβου 2

Τέλος τα ιστορικά στοιχεία αντλούνται από τη βάση δεδομένων MongoDB και παρουσιάζονται στο dashboard μέσω των διαγραμμάτων, όπως στο σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα με τις θερμοκρασίες των κόμβων

4.5 Μελλοντικές Αναβαθμίσεις

Το κυρίως μέρος του έξυπνου δικτύου υλοποιείται όπως περιγράφεται στις ενότητες 4.2 και 4.4. Για την μελλοντική αναβάθμιση του project έχουν δοκιμαστεί και ενσωματωθεί δύο νέες δυνατότητες οι οποίες περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες.

4.5.1 Απομακρυσμένος Έλεγχος Κόμβου

Ο απομακρυσμένος έλεγχος κόμβου επιτυγχάνεται μέσω MQTT μηνυμάτων. Συγκεκριμένα ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να στείλει εντολές σε topic, στο οποίο έχει κάνει subscribe και η γέφυρα. Οι εντολές, που είναι σε μορφή JSON, διοχετεύονται στη συνέχεια στον αντίστοιχο κόμβο μέσω του δικτύου Mesh. Με αυτό το τρόπο μπορούμε να παρέμβουμε στις παραμέτρους του κάθε κόμβου χωρίς να χρειάζεται να έχουμε πρόσβαση τοπικά.

Για να γίνει κατανοητή η όλη διαδικασία θα αυξήσουμε τον ενδιάμεσο χρόνο μεταξύ των μετρήσεων στον κόμβο 3, σε 20s. Στο παράδειγμα μας, οι εντολές στέλνονται στο topic ntua12. Σ' αυτό το topic μπορεί να κάνει publish μόνο ο διαχειριστής του δικτύου, έτσι ώστε η γέφυρα να μπορέσει να λάβει τις εντολές.

Η JSON εντολή, σχήμα 4.18, πρέπει να αποτελείται υποχρεωτικά από τα πεδία "node address", όπου καθορίζουμε ποιόν κόμβο θέλουμε να παραμετροποιήσουμε και "time" όπου ορίζουμε τον ενδιάμεσο χρόνο μέτρησης. Ο χρόνος δίνεται σε ms συνεπώς τα 20000 ms είναι 20s.

Στη συνέχεια η γέφυρα λαμβάνει την εντολή και τη στέλνει στον αντίστοιχο κόμβο σύμφωνα με το πεδίο "node address", αφού τυπώσει στο terminal ότι έλαβε πακέτο από το topic ntua12. Με τη σειρά του ο κόμβος 3 εκτελεί την αλλαγή του χρόνου και τυπώνει στο terminal την επιβεβαίωση. Τα μηνύματα που τυπώνονται στο terminal φαίνονται στο σχήμα 4.19



Σχήμα 4.18: JSON εντολή για κόμβο 3

```
Publish received.
topic: ntua12
qos: 2
Message send to node n.3
```

(α) Η γέφυρα γνωστοποιεί ότι έλαβε πακέτο

```
message from node n.1: {
  "node address": 3,
  "time": 20000
}{ rssi: -77
interval time updated to 20000 ms
```

(β) Ο κόμβος 3 επιβεβαιώνει την εντολή

Σχήμα 4.19: Πορεία εντολής στο δίκτυο mesh

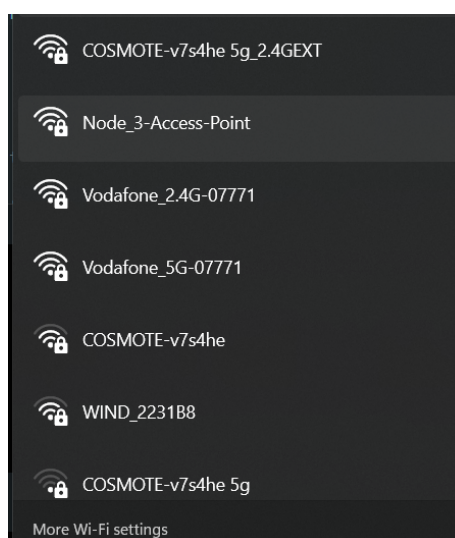
Πέραν από τον χρόνο μέτρησης μπορούμε να επεμβούμε και σε άλλες παραμέτρους του κόμβου, όπως η μέτρηση της θερμοκρασίας σε Fahrenheit. Μπορούμε επίσης να αλλάξουμε ακόμα τις παραμέτρους LoRa όπως bandwidth, code rate και spreading factor. Το μεγάλο

πλεονέκτημα που μας δίνει ο απομακρυσμένος έλεγχος των κόμβων είναι ότι δεν χρειάζεται να έχουμε πρόσβαση σε κανέναν κόμβο, ούτε καν στη γέφυρα, τοπικά. Όλες οι εντολές μπορούν να σταλούν από οποιοδήποτε MQTT client, στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο MQTTX, αρκεί να γνωρίζουμε τα στοιχεία broker και σε ποια topic πρέπει να κάνουμε εγγραφή.

4.5.2 Δημιουργία WiFi Access Point

Η συγκεκριμένη αναβάθμιση είναι ιδιαίτερα σημαντική και χρήσιμη, κυρίως στις περιπτώσεις που έχουμε υλοποίηση του δικτύου σε αγροτικές περιοχές όπου δεν υπάρχει εύκολη πρόσβαση στο διαδίκτυο ή καλή κάλυψη κυψελωτών δικτύων. Μπορούμε να αναπτύξουμε ένα μικρό τοπικό δίκτυο WiFi μέσω των κόμβων.

Συγκεκριμένα στον κόμβο 3 έχουμε δημιουργήσει ένα WiFi access point (σχήμα 4.20) όπου κάθε συσκευή που διαθέτει WiFi να μπορεί να συνδεθεί σε αυτό. Με αυτό τον τρόπο, έχουμε πρόσβαση στη συγκεκριμένη συσκευή μέσω του δικτύου Mesh. Με την εν λόγω λειτουργία μπορούμε να αναβαθμίσουμε το έξυπνο δίκτυο ώστε να υποστηρίζει μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Για παράδειγμα υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης μια έξυπνης πρίζας, που διαθέτει WiFi, έτσι ώστε να έχουμε τον έλεγχο για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση οποιαδήποτε συσκευής απομακρυσμένα. Επίσης μπορούμε ακόμα να υλοποιήσουμε μέτρηση κατανάλωσης (smart metering), με την σύνδεση ενός έξυπνου μετρητή στο WiFi access point.



Σχήμα 4.20: WiFi access point κόμβου 3

Κεφάλαιο **5**

Πεδία εφαρμογών και Υλοποίηση στον Πραγματικό Κόσμο

Σε αυτό το κεφάλαιο, έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση και περιγραφή του έξυπνου δικτύου LoRa Mesh, θα δούμε περιπτώσεις όπου η πρόταση του εν λόγω δικτύου μπορεί να εφαρμοστεί. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ένα δίκτυο LoRa Mesh, όπως η μεγάλη εμβέλεια, η αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος, το καθιστούν άριστη επιλογή στο πλαίσιο της υλοποίησης της έξυπνης πόλης. Τα δίκτυα τύπου Mesh μπορούν εύκολα να παρακάμψουν τα εμπόδια που δημιουργούνται στο πυκνό αστικό περιβάλλον όπως για παράδειγμα τοίχους ή παρεμβολές από άλλα δίκτυα.

5.1 Υλοποίηση μέσα στην έξυπνη πόλη

Το δίκτυο LoRa Mesh προσφέρει μια ευέλικτη και αποδοτική λύση για τη συλλογή και διαχείριση δεδομένων από αισθητήρες σε περιβάλλοντα έξυπνης πόλης. Παρακάτω θα παραθέσουμε μερικές περιπτώσεις χρήσης του πώς τα δίκτυα LoRa Mesh μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργικότητα και τη βιωσιμότητα των αστικών περιβαλλόντων με καινοτόμους και αποδοτικούς τρόπους.

Έξυπνη Διαχείριση Αποβλήτων

Σε μια πόλη, οι κάδοι απορριμμάτων μπορούν να εξοπλιστούν με αισθητήρες που μετρούν το επίπεδο των σκουπιδιών σε κάθε κάδο και στέλνουν τις πληροφορίες αυτές σε ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης μέσω του δικτύου LoRa Mesh. Αυτό επιτρέπει στις δημοτικές υπηρεσίες να οργανώσουν πιο αποδοτικά τις δρομολογήσεις των απορριμματοφόρων, προσαρμόζοντας τις συχνότητες αποκομιδής ανάλογα με την πραγματική ανάγκη, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.

Έλεγχος Φωτισμού Δρόμων

Το δίκτυο LoRa Mesh μπορεί να υποστηρίξει τον έξυπνο φωτισμό, όπου οι λάμπες του δρόμου είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες κίνησης και φωτός. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ρυθμίζουν την ένταση του φωτός ανάλογα με την παρουσία πεζών ή οχημάτων, εξοικονομώντας ενέργεια και βελτιώνοντας την ασφάλεια. Τα δεδομένα μπορούν επίσης να

χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της κατάστασης των φωτιστικών σωμάτων και τον προγραμματισμό συντηρήσεων.

Μέτρηση Ποιότητας Αέρα

Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα είναι κρίσιμη για τη δημόσια υγεία. Αισθητήρες ποιότητας αέρα μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία της πόλης για τη μέτρηση ρύπων όπως το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), και αιωρούμενα σωματίδια. Τα δεδομένα μπορούν να συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο και να χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των πολιτών και τη λήψη αποφάσεων από τις αρχές.

Παρακολούθηση Θορύβου

Σε πολλές πόλεις, η ηχορύπανση είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που επηρεάζει την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Οι αισθητήρες θορύβου που είναι συνδεδεμένοι σε ένα δίκτυο LoRa Mesh μπορούν να παρακολουθούν τα επίπεδα θορύβου σε διάφορες περιοχές της πόλης. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να βοηθήσουν τις αρχές να εντοπίσουν πηγές ηχορύπανσης και να λάβουν μέτρα για τον περιορισμό τους.

Παρακολούθηση και Διαχείριση Υδάτων

Ένα ακόμη σημαντικό πεδίο εφαρμογής είναι η παρακολούθηση και η διαχείριση των υδάτων. Οι αισθητήρες σε δεξαμενές νερού, ποτάμια και συστήματα αποχέτευσης μπορούν να παρακολουθούν τη στάθμη του νερού, την ποιότητα και τη ροή. Τα δεδομένα μπορούν να βοηθήσουν στην πρόληψη πλημμυρών, στη βελτίωση της διαχείρισης των υδάτινων πόρων και στη διασφάλιση της ποιότητας του πόσιμου νερού.

Έξυπνη Στάθμευση

Η ανεύρεση θέσης στάθμευσης είναι ένα συχνό πρόβλημα στις αστικές περιοχές. Οι αισθητήρες στάθμευσης συνδεδεμένοι σε δίκτυο LoRa Mesh μπορούν να ενημερώνουν σε πραγματικό χρόνο για τις διαθέσιμες θέσεις στάθμευσης. Αυτό μπορεί να μειώσει την κίνηση που προκαλείται από την αναζήτηση θέσης στάθμευσης, να εξοικονομήσει καύσιμα και να βελτιώσει την εμπειρία των οδηγών.

Έξυπνη Γεωργία

Η γεωργία θα μπορούσε να επωφεληθεί σημαντικά από την εφαρμογή των δικτύων LoRa Mesh. Οι αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν τις συνθήκες εδάφους, την υγρασία, την έκθεση στο φως και την ανάπτυξη των φυτών, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση της καλλιέργειας. Με αυτά τα δεδομένα, οι φάρμες μπορούν να αυξήσουν την απόδοσή τους και να παρέχουν πιο φρέσκα και τοπικά παραγόμενα προϊόντα στους κατοίκους.

5.2 Μελλοντικές Εφαρμογές

Το δίκτυο LoRa Mesh προσφέρει ήδη πολλές δυνατότητες για τη συλλογή και διαχείριση δεδομένων σε αστικά περιβάλλοντα, ωστόσο σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε μερικές από τις μελλοντικές εφαρμογές που μπορεί να αναδειχθούν με τη συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής, βελτιώνοντας περαιτέρω τη λειτουργία και την ποιότητα ζωής στις έξυπνες πόλεις.

Προηγμένη Διαχείριση Ενέργειας

Στο μέλλον, τα έξυπνα δίκτυα LoRa Mesh θα μπορούσαν να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στη διαχείριση της ενέργειας στις πόλεις. Με τη χρήση αισθητήρων και αναλυτικών εργαλείων, θα είναι δυνατή η παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο και η βελτιστοποίηση της χρήσης της. Οι έξυπνοι μετρητές ενέργειας θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του δικτύου, επιτρέποντας πιο ακριβή και αποδοτική κατανομή των ενεργειακών πόρων.

Έξυπνες Μεταφορές και Διαχείριση Κίνησης

Οι έξυπνες πόλεις του μέλλοντος θα χρειάζονται πιο εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης των μεταφορών. Το δίκτυο LoRa Mesh μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη αισθητήρων που παρακολουθούν την κίνηση στους δρόμους, τις δημόσιες συγκοινωνίες και τις υποδομές μεταφορών. Διοχετεύοντας αυτά τα δεδομένα σε μοντέλα μηχανικής μάθησης, οι πόλεις θα μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη ροή της κίνησης, να μειώσουν τις καθυστερήσεις και να ενισχύσουν την ασφάλεια των μεταφορών.

Ευφυή Συστήματα Υγείας

Η ενσωμάτωση αισθητήρων υγείας σε ένα δίκτυο LoRa Mesh θα μπορούσε να φέρει επανάσταση στην παροχή υγειονομικών υπηρεσιών. Οι αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν βασικές παραμέτρους υγείας των πολιτών, όπως η καρδιακή συχνότητα, η πίεση και τα επίπεδα γλυκόζης, και να στέλνουν δεδομένα σε κέντρα υγείας. Αυτό θα επιτρέψει την έγκαιρη διάγνωση και παρέμβαση σε περιπτώσεις ανάγκης, καθώς και την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών.

Κεφάλαιο 6

Συμπέρασμα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μπορούμε να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα που υποστηρίζουν την υλοποίηση ενός δικτύου LoRa Mesh ως μετασχηματιστικού εργαλείου για την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες της τεχνολογίας LoRa σε μια διαμόρφωση δικτύου Mesh, αντιμετωπίσαμε σημαντικές προκλήσεις όπως η εμβέλεια μετάδοσης δεδομένων, η αξιοπιστία του δικτύου και η ενεργειακή απόδοση, οι οποίες είναι κρίσιμες στα αστικά περιβάλλοντα.

Η επιτυχής ανάπτυξη δυναμικών κόμβων εξοπλισμένων με αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας σε ένα προσομοιωμένο αστικό περιβάλλον έχει αποδείξει τη δυνατότητα του δικτύου να συλλέγει και να μεταδίδει αξιόπιστα περιβαλλοντικά δεδομένα. Αυτά τα δεδομένα αποτελούν τον κορμό των πρωτοβουλιών για έξυπνες πόλεις, επιτρέποντας την παρακολούθηση και τη διαχείριση των αστικών κλιμάτων σε πραγματικό χρόνο, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικές αντιδράσεις σε περιβαλλοντικές αλλαγές και καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Επιπλέον, το web-based dashboard που αναπτύχθηκε ως μέρος αυτής της εργασίας παρέχει μια φιλική προς τον χρήστη διεπαφή για την οπτικοποίηση και την αλληλεπίδραση με τα συλλεχθέντα δεδομένα. Αυτό το εργαλείο όχι μόνο ενισχύει την προσβασιμότητα των δεδομένων για τους διαχειριστές της πόλης και τους κατοίκους, αλλά επίσης ενθαρρύνει μια διαδικασία λήψης αποφάσεων που βασίζεται στην ενημέρωση και μπορεί να οδηγήσει σε πιο προληπτική και βιώσιμη αστική διαχείριση.

Οι μελλοντικές βελτιώσεις μπορούν να περιλαμβάνουν την ένταξη επιπλέον τύπων αισθητήρων, όπως αισθητήρες ποιότητας αέρα ή ηχορύπανσης, για να παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της υγείας του αστικού περιβάλλοντος. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να επιτρέψει την προγνωστική ανάλυση, προσφέροντας προβλέψεις και αυτόματες ειδοποιήσεις σχετικά με πιθανούς περιβαλλοντικούς κινδύνους, ενισχύοντας έτσι την ικανότητα της πόλης να προετοιμαστεί και να αντιμετωπίσει αρνητικές συνθήκες.

Η επέκταση του δικτύου ώστε να καλύπτει μεγαλύτερες αστικές περιοχές με διαφορετικές τοπογραφίες και υποδομές μπορεί να δοκιμάσει την κλιμάκωση και την προσαρμοστικότητα του δικτύου LoRa Mesh. Αυτή η επέκταση δεν είναι μόνο τεχνική αλλά περιλαμβάνει επίσης νομοθετικές και πολιτικές σκέψεις, ιδιαίτερα σχετικά με την κατανομή ραδιοσυχνοτήτων και τη συμμόρφωση με τοπικά και διεθνή πρότυπα επικοινωνίας.

Εν κατακλείδι, η διπλωματική εργασία έχει θέσει μια στέρεη βάση για την κατανόηση και

την ενίσχυση της εφαρμογής τεχνολογιών IoT στην αστική ανάπτυξη. Η έρευνα έχει δείξει ότι με στρατηγική υλοποίηση και συνεχή βελτίωση, τα συστήματα IoT όπως το δίκτυο LoRa Mesh μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη δημιουργία πιο έξυπνων, πιο βιώσιμων και πιο ανταποκρινόμενων πόλεων. Καθώς οι αστικές περιοχές συνεχίζουν να μεγαλώνουν και να εξελίσσονται, η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών θα είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση ότι οι πόλεις δεν είναι μόνο κατοικήσιμες αλλά ευδοκιμούν ως ζωντανές, αποδοτικές και βιώσιμες κοινότητες.

Παραρτήματα

Παράρτημα **A'**

Ανάλυση Πηγαίου Κώδικα

Στο παρόν παράρτημα θα παραθέσουμε τα σημεία του πηγαίου κώδικα που χρειάζονται για την ρύθμιση των παραμέτρων του φυσικού στρώματος (PHY) του LoRa. Για την υλοποίηση του δικτύου Lora Mesh χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη RadioHead, version 1.122.1.

```
199 //LoRa initialization
200 SPI.begin(LoRa_SCK,LoRa_MISO,LoRa_MOSI,LoRa_CS);
201 if (!manager.init())
202   {Serial.println(" init failed");}
203 else
204   {Serial.println(" done");} // Defaults after init are 434.0MHz, 0.05MHz AFC pull-in, modulation FSK_Rb2_4Fd36
205
206 rf95.setTxPower(2, false); // with false output is on PA_BOOST, power from 2 to 20 dBm, use this setting for high power demos/real usage
207 //rf95.setTxPower(1, true); // true output is on RFO, power from 0 to 15 dBm, use this setting for low power demos ( does not work on lilygo lora32 )
208 rf95.setFrequency(868.0);
209 rf95.setCATimeout(500);
```

Σχήμα A.1: Αρχικοποίηση LoRa

Στο τμήμα κώδικα του σχήματος A.1 κάνουμε την αρχικοποίηση του LoRa ρυθμίζοντας την ισχύ εκπομπής στα 2 dBm και την ISM band στα 868 MHz

```
211 // long range configuration requires for on-air time
212 boolean longRange = false;
213 if (longRange)
214   {
215     // custom configuration
216     RH_RF95::ModemConfig modem_config = {
217       0x78, // Reg 0x1D: BW=125kHz, Coding=4/8, Header=explicit
218       0xC4, // Reg 0x1E: Spread=4096chips/symbol, CRC=enable
219       0x08 // Reg 0x26: LowDataRate=On, Agc=Off. 0x0C is LowDataRate=ON, ACG=ON
220     };
221     rf95.setModemRegisters(&modem_config);
222   }
223 else
224   {
225     // Predefined configurations( bandwidth, coding rate, spread factor ):
226     // Bw125Cr45Sf128   Bw = 125 kHz, Cr = 4/5, Sf = 128chips/symbol, CRC on. Default medium range
227     // Bw500Cr45Sf128   Bw = 500 kHz, Cr = 4/5, Sf = 128chips/symbol, CRC on. Fast+short range
228     // Bw31_25Cr48Sf512 Bw = 31.25 kHz, Cr = 4/8, Sf = 512chips/symbol, CRC on. Slow+long range
229     // Bw125Cr48Sf4096 Bw = 125 kHz, Cr = 4/8, Sf = 4096chips/symbol, low data rate, CRC on. Slow+long range
230     // Bw125Cr45Sf2048 Bw = 125 kHz, Cr = 4/5, Sf = 2048chips/symbol, CRC on. Slow+long range
231     if (!rf95.setModemConfig(RH_RF95::Bw125Cr45Sf128))
232       {Serial.println(F("set config failed"));}
233   }
```

Σχήμα A.2: Ρύθμιση παραμέτρων PHY

Με τον κώδικα του σχήματος A.2 καθορίζουμε τις παραμέτρους του PHY. Συγκεκριμένα ορίζουμε το προκαθορισμένο σύνολο ρυθμίσεων Bw125Cr45Sf128, δηλαδή bandwidth = 125kHz, code rate = 4/5 και spreading factor = $\log_2 128 = 7$.

Η βιβλιοθήκη RadioHead μας δίνει τη δυνατότητα, για εκπαιδευτικούς σκοπούς να καθορίσουμε την τοπολογία του δικτύου Mesh. Για να το πετύχουμε αυτό πρέπει να τροποποιήσουμε το αρχείο RHRouter.h το οποίο βρίσκεται μέσα στα αρχεία της βιβλιοθήκης.

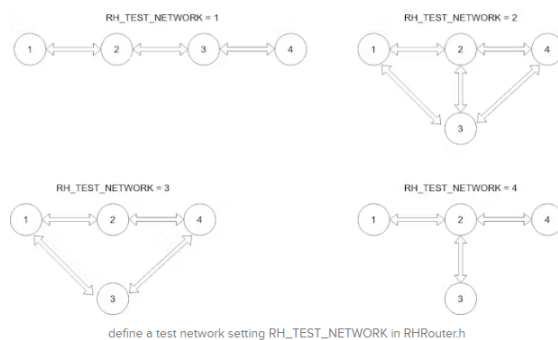
```

31 // These allow us to define a simulated network topology for testing purposes
32 // See RHRouter.cpp for details
33 // #define RH_TEST_NETWORK 1
34 // #define RH_TEST_NETWORK 2
35 // #define RH_TEST_NETWORK 3
36 // #define RH_TEST_NETWORK 4
37

```

Σχήμα Α.3: Αρχείο RHRouter.h

Συγκεκριμένα πρέπει να κάνουμε uncomment μια από τις τρεις επιλογές #define στις γραμμές 33 έως 36 (σχήμα Α.3), για να έχουμε ένα από τα αντίστοιχα δίκτυα που φαίνονται στο σχήμα Α.4.



Σχήμα Α.4: Δοκιμαστικά δίκτυα Mesh

Το ολοκληρωμένο project με ολόκληρο τον πηγαίο κώδικα σε C++ για το δίκτυο LoRa Mesh αλλά και σε JavaScript για το web-based dashboard, βρίσκεται στο GitHub στον σύνδεσμο <https://github.com/evanpers/LoRa-Mesh>. Εκεί υπάρχουν αναλυτικές οδηγίες για την υλοποίηση του δικτύου και για τις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.

Παράρτημα **B'**

Πίνακας Υλικών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του δικτύου LoRa Mesh:

Περιγραφή	Ποσότητα
TTGO LORA32 868/915Mhz SX1276 ESP32 Oled-display Bluetooth WIFI Lora	3
Breadboards	2
Αισθητήρας θερμοκρασίας/υγρασίας DHT11	2
Jump wires	9

Βιβλιογραφία

- [1] Renata Dameri. *Searching for Smart City definition: a comprehensive proposal. International Journal of Computers and Technology*, 11:2544, 2013.
- [2] Bharat S. Chaudhari, Marco Zennaro και Suresh Borkar. *LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. Future Internet*, 12(3), 2020.
- [3] Τσουκάτος Κ, Χατζούλης Δ. *Ασύρματες Επικοινωνίες[προπτυχιακό Εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Αθήνα, 2023.
- [4] Mukhriddin Arabboev. *LORA BASED HEALTH MONITORING AND EMERGENCY ALARM DEVICE*. 7:106–111, 2021.
- [5] *What are LoRa and LoRaWAN*. <https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>. Ημερομηνία πρόσβασης: 05-04-2024.
- [6] Semtech. *AN1200.22, LoRa Modulation Basics, Application note*, 2015.
- [7] Umber Noreen, Ahcène Bounceur και Laurent Clavier. *A study of LoRa low power and wide area network technology*. σελίδες 1–6, 2017.
- [8] Anup Marahatta, Yaju Rajbhandari, Ashish Shrestha, Ajay Singh, Anup Thapa, Francisco Gonzalez-Longatt, Petr Korba και Seokjoo Shin. *Evaluation of a LoRa Mesh Network for Smart Metering in Rural Locations. Electronics*, 10(6), 2021.
- [9] Marco Cattani, Carlo Alberto Boano και Kay Römer. *An Experimental Evaluation of the Reliability of LoRa Long-Range Low-Power Wireless Communication. Journal of Sensor and Actuator Networks*, 6(2), 2017.
- [10] Phui San Cheong, Johan Bergs, Chris Hawinkel και Jeroen Famaey. *Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption*. σελίδες 1–6, 2017.
- [11] Ian F Akyildiz, Xudong Wang και Weilin Wang. *Wireless mesh networks: a survey. Computer networks*, 47(4):445–487, 2005.
- [12] Antonio Cilfone, Luca Davoli, Laura Belli και Gianluigi Ferrari. *Wireless Mesh Networking: An IoT-Oriented Perspective Survey on Relevant Technologies. Future Internet*, 11(4), 2019.
- [13] Roger Pueyo Centelles, Felix Freitag, Roc Meseguer και Leandro Navarro. *Beyond the star of stars: An introduction to multihop and mesh for LoRa and LoRaWAN. IEEE Pervasive Computing*, 20(2):63–72, 2021.

- [14] Dipa Soni και Ashwin Makwana. *A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot)*. 20:173–177, 2017.
- [15] Σ. Μητρόπουλος, Χ. Δουληγέρης. *Καταμεμημένα Πληροφοριακά Συστήματα και Διαχείριση τους*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Αθήνα, 2023.
- [16] Bikash Pradhan, Saugat Bhattacharyya και Kunal Pal. *IoT-based applications in healthcare devices*. *Journal of healthcare engineering*, 2021(1):6632599, 2021.
- [17] Tejasvi Alladi, Vinay Chamola, Reza M. Parizi και Kim Kwang Raymond Choo. *Blockchain Applications for Industry 4.0 and Industrial IoT: A Review*. *IEEE Access*, 7:176935–176951, 2019.
- [18] Santosh H Kalange, Dipti A Kadam, Asmita B Mokal και Avinash A Patil. *Smart retailing using IOT*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(11):263–268, 2017.
- [19] H Varun Chand και J Karthikeyan. *Survey on the role of IoT in intelligent transportation system*. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 11(3):936–941, 2018.
- [20] Vu Khanh Quy, Nguyen Van Hau, Dang Van Anh, Nguyen Minh Quy, Nguyen Tien Ban, Stefania Lanza, Giovanni Randazzo και Anselme Muzirafuti. *IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges*. *Applied Sciences*, 12(7), 2022.
- [21] Naser Hossein Motlagh, Mahsa Mohammadrezaei, Julian Hunt και Behnam Zakeri. *Internet of Things (IoT) and the energy sector*. *Energies*, 13(2):494, 2020.
- [22] Sébastien Maudet, Guillaume Andrieux, Romain Chevillon και Jean François Diouris. *Practical evaluation of Wi-Fi HaLow performance*. *Internet of Things*, 24:100957, 2023.
- [23] Ayanle I. Ali, Sibel Zorlu Partal, Salih Kepke και Hakan P. Partal. *ZigBee and LoRa based Wireless Sensors for Smart Environment and IoT Applications*. σελίδες 19–23, 2019.
- [24] Eric Pierre Simon Guillaume Ferré. *An introduction to Sigfox and LoRa PHY and MAC layers*. 2018.
- [25] Semtech. *LoRa SX1267/77/78/79, DATASHEET, Rev 7*. <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276#documentation>, 2020. Ημερομηνία πρόσβασης: 19-04-2024.
- [26] Aloïs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen και William Mark Townsley. *A Study of LoRa: Long Range and Low Power Networks for the Internet of Things*. *Sensors*, 16(9), 2016.
- [27] Carles Gomez, Seyed Mahdi Darroudi, Teemu Savolainen και Michael Spoerk. *I-Pv6 Mesh over BLUETOOTH(R) Low Energy Using the Internet Protocol Support Profile (IPSP)*. RFC 9159, 2021.

- [28] Deeksha Srivastava, Awanish Kesarwani και Shivani Dubey. *Measurement of Temperature and Humidity by using Arduino Tool and DHT11. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(12):876–878, 2018.
- [29] Highcharts® Dashboards. <https://www.highcharts.com/products/dashboards/>.
- [30] Anjali Chauhan. *A review on various aspects of mongodb databases. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(05):90–92, 2019.

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

3GPP	3rd Generation Partnership Project
6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
BPF	Band Pass Filter
BT	Bandwidth Time Product
BW	Bandwidth
CR	Code Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DSR	Dynamic Source Routing Protocol
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FEC	Forward Error Correction
FSK	Frequencu Shift Keying
GFSK	Gaussian Frequency-Shift Keying
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPv6	Internet Protocol version 6
Kbps	Kilobits per second
LNS	LoRaWAN network server
LoRa	Long Range
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad-Hoc NETworks
Mbps	Megabits per second
MBSS	Mesh Basic Service Set
MPM	Mesh Peer (Link) Management
MPPs	Mesh Portal Points
MPR	MultiPoint Relays

NIC	Network Interface Card
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
OSI	Open Systems Interconnection
Pan	Personal Area Networks
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RPMA	Random Phase Multiple Access
RREQ	Route REQuest
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SF	Spreading Factor
SNR	Signal to Noise Ratio
SoC	System on Chip
TOA	Time on Air
UDP	User Datagram Protocol
WAN	Wide Area Network
WiFi	Wireless Fidelity
WiMax	Worldwide Inter-operability for Microwave Access
WMN	Wireless Mesh Network