



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου Υποσταθμού Με Χρήση Δικτύου LoRaWAN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΡΑΠΗ Σ. ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Άρης Ευάγγελος Δημέας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου Υποσταθμού Με Χρήση Δικτύου LoRaWAN

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΡΑΠΗ Σ. ΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Άρης Ευάγγελος Δημέας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22α Ιουνίου 2025.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Παναγιώτης Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γρηγόρης Καραγιώργος
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Γεώργιος Γεωργίου
Επιστ. Συνεργάτης

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.
Θεόδωρος Αράπης, 2025.

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.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....
Θεόδωρος Αράπης

22 Ιουνίου 2025

Περίληψη

Η ανάγκη για αποδοτική παρακολούθηση και διαχείριση των ενεργειακών εγκαταστάσεων καθιστά επιτακτική την ανάπτυξη έξυπνων και αυτόνομων συστημάτων παρακολούθησης υποσταθμών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης και ελέγχου ενός ηλεκτρικού υποσταθμού, βασισμένο στην τεχνολογία LoRaWAN.

Το σύστημα περιλαμβάνει δύο τριφασικούς μετρητές, ο καθένας από τους οποίους κατασκευάστηκε με τη χρήση της πλακέτας ανάπτυξης The Things Uno και τρεις αισθητήρες PZEM-004T, ένας ανά φάση, για την καταγραφή μονοφασικών ηλεκτρικών μεγεθών. Η συλλογή των δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω ενός LoRaWAN gateway, το οποίο έχει συναρμολογηθεί βασιζόμενο σε ένα Raspberry Pi 4B, μία μονάδα συγκέντρωσης iC880A-SPI και μία κεραία σχετικά χαμηλού κέρδους των 2dBi. Το λογισμικό περιλαμβάνει την εγκατάσταση της στοίβας ανοιχτού κώδικα The Things Stack και του LoRa Basics Station, ενώ τα δεδομένα αποθηκεύονται και προβάλλονται μέσω διαδικτυακής εφαρμογής υλοποιημένης αξιοποιώντας το web framework Spring Boot της JAVA και την βιβλιοθήκη React της JavaScript.

Σκοπός της εργασίας είναι η πρακτική διερεύνηση της αξιοπιστίας, της επεκτασιμότητας και της χρηστικότητας των LoRaWAN-βασισμένων συστημάτων σε κρίσιμες εφαρμογές εποπτείας και αυτοματισμού υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά

LoRaWAN, υποσταθμός, απομακρυσμένη παρακολούθηση, Raspberry Pi, The Things Stack, LoRa Basics Station, end-device, IoT, Spring Boot, React

Abstract

The need for efficient monitoring and management of energy installations necessitates the development of intelligent and autonomous substation monitoring systems. In this diploma thesis, a complete system for the remote monitoring and control of an electrical substation was designed and implemented, based on LoRaWAN technology.

The system includes two three-phase meters, each built using the The Things Uno development board and three PZEM-004T sensors—one per phase—for capturing single-phase electrical measurements. Data collection is achieved through a LoRaWAN gateway based on a Raspberry Pi 4B, an iC880A-SPI concentrator module, and a high-gain antenna. The software stack includes the installation of the open-source The Things Stack and the LoRa Basics Station, while data is stored and visualized via a web application developed using Java Spring Boot and React.

The purpose of this work is to practically evaluate the reliability, scalability, and usability of LoRaWAN-based systems in critical applications related to the supervision and automation of electrical substations.

Keywords

LoRaWAN, substation, remote monitoring, Raspberry Pi, The Things Stack, LoRa Basics Station, end-device, IoT, Spring Boot, React

στοὺς γονεῖς μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Τσανάκα για την εμπιστευτικότητα αυτής της διπλωματικής εργασίας και ιδιαίτερα τον καθηγητή κ. Άρη Δημέα για την επίβλεψη, την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Ιούνιος 2025

Θεόδωρος Αράπης

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	7
1 Εισαγωγή	17
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	18
1.2 Οργάνωση του τόμου	19
I Θεωρητικό Μέρος	21
2 Τεχνολογίες LPWAN και το Πρωτόκολλο LoRaWAN	23
2.1 Εισαγωγή στα LPWAN	23
2.2 Σύγκριση Τεχνολογιών LPWAN	24
2.3 Τεχνολογία LoRa	26
2.3.1 Γενική Επισκόπηση της Τεχνολογίας LoRa	26
2.3.2 Ραδιοφωνική Διάδοση	27
2.4 Το Πρωτόκολλο LoRaWAN	32
2.5 Ηλεκτρικοί Υποσταθμοί και Ανάγκες Εποπτείας	32
2.6 Συμπεράσματα	34
3 Περιγραφή θέματος	35
3.1 Σχετικές εργασίες	35
II Πρακτικό Μέρος	37
4 Ανάλυση και σχεδίαση	39
4.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής	39
4.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων	39
4.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων	39
5 Υλοποίηση	41
5.1 Λεπτομέρειες υλοποίησης	41
5.1.1 Αλγόριθμοι	41
5.2 Περιγραφή κλάσεων	41

5.2.1 public class FirstUi	41
6 Έλεγχος	43
6.1 Μεθοδολογία Ελέγχου	43
6.2 Αναλυτική παρουσίαση ελέγχου	43
7 Παράδειγμα Πίνακα	45
7.1 Συμπεράσματα	45
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	45
8 Παράδειγμα Μαθηματικών Σχέσεων – Εκφράσεων και Αλγορίθμων	47
8.1 Συμπεράσματα	47
8.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	48
III Επίλογος	51
9 Επίλογος	53
9.1 Συμπεράσματα	53
9.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	54
Παραρτήματα	55
A' Παράδειγμα Παραρτήματος	57
A'.1 Πρώτη ενότητα	57
A'.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις	57
B' Απόδειξη της σχέσης (8.1)	59
B'.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής	59
B'.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων	59
B'.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων	60
Γ' Παραδείγματα Βιβλιογραφικών Αναφορών	61
Δ' Δημιουργία Ευρετηρίου	63
Ε' Εισαγωγή Εικόνων	65
Βιβλιογραφία	68
Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια	69
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων	71

Κατάλογος Σχημάτων

4.1	Αρχιτεκτονική Απλού Κόμβου	40
B'.1	Προσομοίωση Πύλης NOR	59

Κατάλογος Εικόνων

2.1	Σύγκριση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας (LPWAN) ως προς τον ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια και το κόστος.	24
2.2	Μοντέλο OSI σε αντιστοίχιση με τα LoRa και LoRaWAN επίπεδα.	27
2.3	Σύγκριση ευαισθησίας LoRa και FSK.	29
2.4	Τεχνολογική στοίβα των LoRa και LoRaWAN.	32
2.5	Τυπική αρχιτεκτονική LoRaWAN δικτύου.	33
2.6	Αρχιτεκτονική LoRaWAN Network Server.	33
E'.1	Βάτραχος	65

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών NB-IoT, LTE-M και LoRa	25
7.1	Πίνακας αλήθειας της λογικής συνάρτησης F	46
A'.1	Πίνακας αλήθειας της λογικής συνάρτησης F	58

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σε μια εποχή σημαδεμένη από διαρκείς τεχνολογικές εξελίξεις, η ταχύτατη ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων Internet of Things - IoT ήταν αναμενόμενη, γεγονός που έχει φέρει στο προσκήνιο ένα πλήθος από νέες τεχνολογίες επικοινωνίας, ικανές να συνδέουν μία τεράστια ποικιλία απομακρυσμένων αισθητήρων και συσκευών, με μεγάλο εύρος λειτουργίας και χαμηλό ενεργειακό κόστος [1]. Μάλιστα, εκτιμάται ότι μέχρι το 2030 θα υπάρχουν περισσότερες από 30 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο παγκοσμίως [2]. Η εννόια Διαδίκτυο των Πραγμάτων περιγράφει ουσιαστικά το δίκτυο επικοινωνίας ενός πλήθους από συσκευές, εξοπλισμένα με αισθητήρες, οι οποίες μεταδίδουν, διαμοιράζουν και χρησιμοποιούν δεδομένα που λαμβάνουν από το φυσικό περιβάλλον, με σκόπο την παροχή υπηρεσιών.

Μία από τις πλέον πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες στον χώρο των ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (Low Power Wide Area Networks – LPWANs) είναι το LoRaWAN. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη δημιουργία ανθεκτικών και κλιμακούμενων υποδομών επικοινωνίας με ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπου η συνδεσιμότητα και η αυτονομία είναι υψηλή σημασίας.

Στον τομέα της ενέργειας και ειδικότερα στην παρακολούθηση και τον έλεγχο υποσταθμών μέσης και χαμηλής τάσης, η ανάγκη για απομακρυσμένη συλλογή μετρήσεων και δεδομένων, καθώς και του εξ αποσάσεως ελέγχου, είναι πιο επίκαιρη από ποτέ. Οι «έξυπνοι» μετρητές και τα συστήματα τηλεμετρίας επιτρέπουν την πρόβλεψη, την αποδοτικότερη κατανομή και απαραίτητη εποπτεία της κατανάλωσης, τη βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας και την έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων. Συνεπώς, η ενσωμάτωση αυτών των δυνατοτήτων με τεχνολογίες όπως το LoRaWAN αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την υλοποίηση και εφαρμογή των «έξυπνων» δικτύων ενέργειας (smart grids).

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου ηλεκτρικού υποσταθμού, με τη χρήση του LoRaWAN. Το σύστημα που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει:

- δύο τριφασικούς μετρητές, βασισμένους στην πλακέτα ανάπτυξης The Things Uno της The Things Industries και σε τρεις (ανά μετρητή) μονοφασικούς αισθητήρες PZEM-004T για την μέτρηση ακολούθηση ηλεκτρικών μεγεθών,
- έναν LoRaWAN gateway, κατασκευασμένο με ένα Raspberry Pi 4B και μία μονάδα συγκέντρωσης iC880A-SPI, στην οποία συνδέεται μία κεραία χαμηλού σχετικά κέρδους

των 2dBi,

- ανάπτυξη δυναμικής ιστοσελίδας με χρήση Java Spring Boot και React (TypeScript), με σκοπό την παρουσίαση των μετρήσεων που λαμβάνονται από τους μετρητές.

Η υλοποίηση αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρητική διερεύνηση του προαναφερόμενου συστήματος, αλλά αποσκοπεί, επιπλέον, στην πρακτική αξιολόγηση της τεχνολογίας LoRaWAN στο πεδίο ενός IoT συστήματος παρακολούθησης υποσταθμού, επιδιώκοντας να αναδείξει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της όταν εφαρμόζεται σε ένα πραγματικό περιβάλλον ενεργειακής υποδομής.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου, χαμηλού κόστους και ενεργειακά αποδοτικού συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης και ελέγχου ενός ηλεκτρικού υποσταθμού, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του πρωτοκόλλου LoRaWAN. Το σύστημα αυτό εντάσσεται στο πλαίσιο των έξυπνων ενεργειακών υποδομών και της τεχνολογίας Internet of Things (IoT) και έχει στόχο τη δημιουργία μιας επεκτάσιμης και παράλληλα αξιόπιστης αρχιτεκτονικής, η οποία να μπορεί να υιοθετηθεί και σε άλλα βιομηχανικά ή ενεργειακά περιβάλλοντα.

Ο στόχος της εργασίας είναι διπτός:

1. **Πρακτική αξιοποίηση του LoRaWAN** ως βασικού μέσου επικοινωνίας για την αποστολή δεδομένων από απομακρυσμένες συσκευές μέτρησης προς ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υποστήριξη για μεγάλο αριθμό συσκευών, καθοτόντας την, επομένως, ιδανική για απαιτητικά περιβάλλοντα όπως οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί.
2. **Ανάπτυξη ολοκληρωμένης πλατφόρμας εποπτείας και διαχείρισης ενεργειακών μετρήσεων**, η οποία επιτρέπει τη οπτικοποίηση και αποθήκευση κρίσιμων ηλεκτρικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, όπως η τάση, το ρεύμα, η ισχύς και η κατανάλωση ενέργειας, ανά φάση. Η πλατφόρμα προσφέρει δυνατότητα επεκτασιμότητας και προσαρμοστικότητας, προκειμένου να μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά σημεία μέτρησης, καθώς και μελλοντική ενσωμάτωση επιπρόσθετων λειτουργιών, όπως ειδοποιήσεις ή αυτοματισμούς.

Η υλοποίηση βασίστηκε σε πλήρως παραμετροποιήσιμα εξαρτήματα ανοιχτού κώδικα και λογισμικού, όπως οι συσκευές The Things Uno, οι αισθητήρες PZEM-004T, ο συγκεντρωτής σήματος iC880A-SPI, το Raspberry Pi 4B, και η πλατφόρμα The Things Stack. Τα δεδομένα διαχειρίζονται και παρουσιάζονται μέσω διαδικτυακής εφαρμογής υλοποιημένης σε εργαλέια ανοιχτού κώδικα, όπως το JAVA Spring Boot framework και η front-end βιβλιοθήκη React της JavaScript.

Τέλος, η εργασία αυτή συμβάλλει στην αξιολόγηση των τεχνικών δυνατοτήτων του LoRaWAN, όταν αυτό χρησιμοποιείται σε κρίσιμες εφαρμογές παρακολούθησης, εντοπισμού

ανωμαλιών και ενεργειακής διαχείρισης, προσφέροντας έτσι ένα αξιόπιστο πρότυπο, το οποίο να μπορεί να αναπαραχθεί ή να εξελιχθεί περαιτέρω σε μεγαλύτερα δίκτυα ή άλλους τύπους βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών LPWAN, LoRa και LoRaWAN, καθώς και πληροφορίες για τα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου υποσταθμών.
- Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η τεχνολογική στοίβα που χρησιμοποιήθηκε, όπως το The Things Stack, το LoRa Basics Station, καθώς και η υποστήριξη από λογισμικά όπως το Docker.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναλυτική παρουσίαση του εξοπλισμού: gateway, συσκευές μέτρησης και υπολογιστική υποδομή.
- Στο Κεφάλαιο 5 καταγράφεται η υλοποίηση του συστήματος, η παραμετροποίηση του εξοπλισμού, καθώς και η ανάπτυξη της ιστοσελίδας.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές και αξιολογείται η απόδοση του συστήματος.
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις βελτίωσης και επέκτασης της εργασίας.

Μέρος I

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 2

Τεχνολογίες LPWAN και το Πρωτόκολλο LoRaWAN

2.1 Εισαγωγή στα LPWAN

Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για απομακρυσμένη και ταυτόχρονα αποδοτική, ως προς την ενέργεια, επικοινωνία μεταξύ έξυπνων συσκευών και αισθητήρων έχει οδηγήσει στην εμφάνιση και εξέλιξη μιας νέας γενιάς ασύρματων τεχνολογιών, γνωστών ως Low Power Wide Area Networks (LPWAN). Οι τεχνολογίες LPWAN επιτρέπουν την αποστολή μικρών σε ποσότητα δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τις ιδιαίτερες για εφαρμογές Internet of Things (IoT), όπου η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και η αξιοπιστία είναι κρίσιμοι παράγοντες.

Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες Wi-Fi ή Bluetooth, οι οποίες είναι σχεδιασμένες για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε μικρές αποστάσεις, τα LPWAN είναι προσανατολισμένα στην υποστήριξη ενός μεγάλου αριθμού συσκευών, με δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε αποστάσεις που υπερβαίνουν τα 10 χιλιόμετρα, σε ανοικτό πεδίο, και σε συχνότητες που βρίσκονται στο μη αδειοδοτημένο φάσμα (unlicensed spectrum). Το σημαντικότερο, μάλιστα, όφελος έναντι άλλων τεχνολογιών μετάδωσης πληροφορίας μεγάλου έυρους (όπως το φάσμα κινητής τηλεφωνίας 3G, 4G ή 5G), είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδοσία των αντίστοιχων συσκευών [3].

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες LPWAN είναι οι εξής:

- **NB-IoT (Narrowband Internet of Things)** – αποτελεί τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας και χαμηλής ισχύος, βασισμένη στο LTE (Long-Term Evolution), η οποία λειτουργεί στο αδειοδοτημένο φάσμα και προσφέρει αξιόπιστη κάλυψη εντός κτιρίων (deep indoor penetration). Αναπτύχθηκε από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) και υποστηρίζεται από το πρότυπο 3GPP Release 13. Έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές με ανάγκες μαζικής συνδεσιμότητας και μικρού όγκου δεδομένων, όπως μετρητές νερού ή αερίου. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία των συσκευών έχει ως αποτέλεσμα η διάρκεια λειτουργίας τους να φτάνει έως και 10 χρόνια, με την χρήση μιας μόνο μπαταρίας. [4]
- **LTE-M (LTE Cat-M1)** – επίσης βασίζεται στο LTE και προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από το NB-IoT (έως και 1 Mbps), διατηρώντας ωστόσο εξίσου

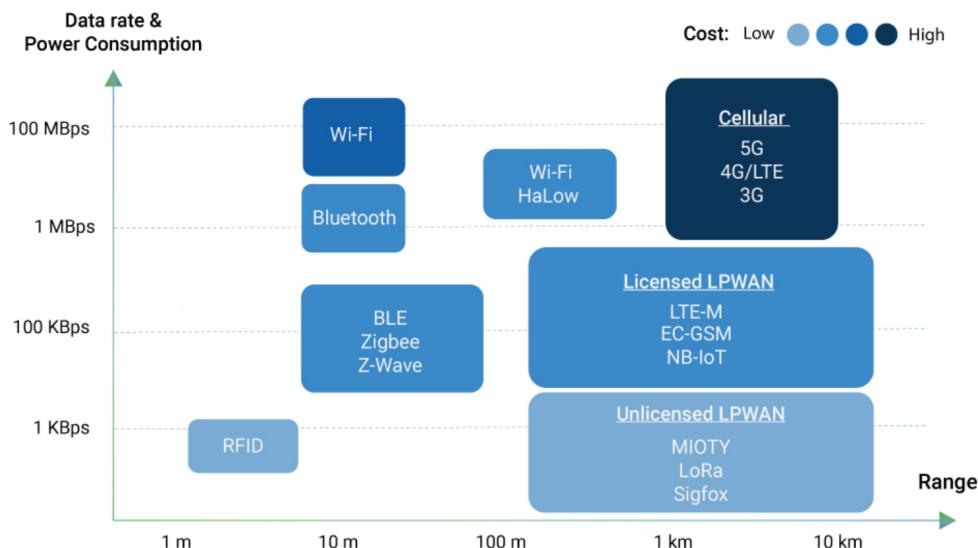
χαμηλή κατανάλωση [5]. Είναι κατάλληλο για φορητές εφαρμογές που απαιτούν αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, όπως η παρακολούθηση οχημάτων, οι φορητές ιατρικές συσκευές και οι φορητοί αισθητήρες. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του είναι η υποστήριξη κινητικότητας, επιτρέποντας την απρόσκοπη μετάβαση μεταξύ κυψελών, καθώς και η δυνατότητα φωνητικής επικοινωνίας μέσω VoLTE. [6]

- **LoRa και LoRaWAN** – πρόκειται για το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο σε μη-αδειοδοτημένο φάσμα (π.χ. 868 MHz στην Ευρώπη), με κύρια πλεονεκτήματα την ευκολία υλοποίησης, τη μεγάλη αυτονομία (έως και 10 έτη), τη χαμηλή κατανάλωση ισχύος και την υψηλή ευελιξία ανάπτυξης μέσω ιδιωτικών ή δημόσιων δικτύων. Η τεχνολογία LoRa αναπτύχθηκε αρχικά από τη γαλλική Cycleo και κατοχυρώθηκε από τη Semtech, ενώ το LoRaWAN αναπτύσσεται και προτυποποιείται από τη LoRa Alliance. [7]

Τα δίκτυα LPWAN ενσωματώνονται όλο και περισσότερο σε κρίσιμες υποδομές, όπως είναι τα συστήματα παρακολούθησης ενέργειας, γεωργίας ακριβείας, έχυπνων πόλεων και βιομηχανικής αυτοματοποίησης, προσφέροντας λύσεις υψηλής κάλυψης, ανθεκτικότητας και χαμηλού κόστους εγκατάστασης.

2.2 Σύγκριση Τεχνολογιών LPWAN

Παρακάτω γίνεται η σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών LPWAN:



Εικόνα 2.1: Σύγκριση τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας (LPWAN) ως προς τον ρυθμό μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια και το κόστος.

[8]

Οι τεχνολογίες LPWAN αποτελούν βασικό πυλώνα για την υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών και μεγάλης εμβέλειας εφαρμογών IoT, με διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς το φάσμα λειτουργίας, την κατανάλωση ισχύος, την κινητικότητα και τη δυνατότητα υποστήρι-

ζης ποικίλων τύπων δεδομένων. Ακολούθως παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά για τις τρεις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες LPWAN:

Παράμετρος	NB-IoT	LTE-M	LoRa
Τυποποίηση	3GPP	3GPP	LoRa Alliance
Διαμόρφωση	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM	CSS (Chirp Spread Spectrum)
Φάσμα Συχνοτήτων	Licensed 3GPP (180 kHz)	Licensed 3GPP (1.4 MHz)	Unlicensed ISM (EU 868 MHz)
Κάλυψη (Link Budget)	151 dB	146 dB	154 dB
Μέγιστο Φορτίο	1600 bytes	1000 bytes	242 bytes
Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας	έως 10 έτη	έως 2 έτη	έως 10 έτη
Ταχύτητα Μετάδοσης	200 kbps	1 Mbps	50 kbps
Αμφίδρομη Επικοινωνία	Ναι	Ναι	Ναι
Ασφάλεια	3GPP (128-256 bit)	3GPP (128-256 bit)	AES (128 bit)
Κινητικότητα	<100 km/h	<300 km/h	Ναι
QoS	Ναι	Ναι	Όχι

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας τεχνολογιών NB-IoT, LTE-M και LoRa
[3], [9], [5], [7]

Η ανάλυση των επιμέρους χαρακτηριστικών των τριών τεχνολογιών δείχνει πως κάθε μία εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες, ανάλογα με το σενάριο χρήσης και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Ξεκινώντας από την κινητικότητα, το LTE-M υπερέχει με διαφορά, καθώς υποστηρίζει μετακινήσεις με ταχύτητες έως και 300 km/h και δυνατότητα handover μεταξύ κυψελών, κάτι που καθιστά εφικτή την αξιόπιστη σύνδεση σε περιπτώσεις όπως είναι η παρακολούθηση οχημάτων ή drones εν κινήσει. Από την άλλη μεριά, το NB-IoT παρέχει περιορισμένη κινητικότητα και είναι περισσότερο κατάλληλο για στατικές συσκευές, ενώ το LoRa μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κινητές εφαρμογές μόνο αν βρίσκεται εντός εμβέλειας ενός διαθέσιμου gateway, γεγονός που περιορίζει τη χρήση του σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Στο πεδίο της μετάδοσης δεδομένων, το LTE-M προσφέρει τους υψηλότερους ρυθμούς (1 Mbps), καθώς και υποστήριξη φωνητικής επικοινωνίας μέσω VoLTE, χαρακτηριστικά που απουσιάζουν από τις άλλες δύο τεχνολογίες. Αντίθετα, το LoRa περιορίζεται σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς (50 kbps) και είναι σχεδιασμένο κυρίως για απλές, σποραδικές μεταδόσεις.

Όσον αφορά το φάσμα λειτουργίας, τόσο το NB-IoT όσο και το LTE-M αξιοποιούν το αδειοδοτημένο φάσμα, γεγονός που προσφέρει πιο σταθερή σύνδεση, μικρότερο λανθάνοντα χρόνο και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα για εφαρμογές όπως POS terminals, όπου απαιτείται γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση συναλ-

λαγών. Από την άλλη, το LoRa λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, που αν και μειώνει το κόστος, υπόκειται σε περιορισμούς όπως το duty cycle και το fair access policy, μειώνοντας, έτσι, την αξιοπιστία σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει υψηλή κίνηση δεδομένων.

Σε όρους ενεργειακής απόδοσης, το LoRa και το NB-IoT είναι εμφανώς πιο αποτελεσματικά, υποστηρίζοντας διάρκεια μπαταρίας έως και 10 έτη. Το LTE-M, λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ισχύος, τείνει να έχει μικρότερη διάρκεια ζωής, συνήθως μεταξύ 1-2 ετών, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε εφαρμογές όπου η συντήρηση των κόμβων δεν είναι εύκολη.

Ως προς την εμπορική απήχηση, οι τεχνολογίες του 3GPP (NB-IoT και LTE-M) προωθούνται κυρίως μέσω παρόχων κινητής τηλεφωνίας και ενσωματώνονται σε λύσεις ευρείας κλίμακας από τη βιομηχανία [10]. Αντίθετα, το LoRaWAN, μέσω της LoRa Alliance, διατίθεται ευρύτερα για αποκεντρωμένες και ιδιωτικές αναπτύξεις, γεγονός που το έχει καταστήσει ιδιαίτερα δημοφιλές σε αγροτικές εφαρμογές, αισθητήρες έξυπνων κτιρίων και περιβαλλοντική παρακολούθηση [11].

Συνοψίζοντας, δεν υπάρχει μία «καλύτερη» τεχνολογία για κάθε περίπτωση. Η επιλογή εξαρτάται από το εκάστοτε έργο και τους στόχους του: αν προέχει η κινητικότητα και η χαμηλή καθυστέρηση, το LTE-M είναι πιο κατάλληλο· αν ζητούμενο είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος, το LoRa αποτελεί ιδανική επιλογή· ενώ το NB-IoT είναι ενδιάμεση λύση για στατικές εφαρμογές με αξιόπιστο σήμα και μεγάλη πυκνότητα κόμβων. Η τελική απόφαση λαμβάνει υπόψη τεχνικούς περιορισμούς, απαιτήσεις απόδοσης και το οικονομικό κόστος υλοποίησης.

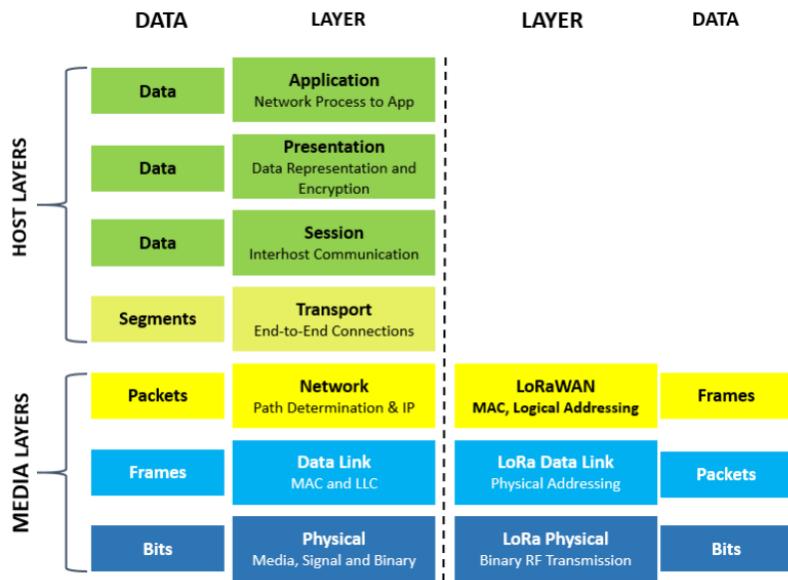
2.3 Τεχνολογία LoRa

2.3.1 Γενική Επισκόπηση της Τεχνολογίας LoRa

Ξεκινώντας με μία μικρή ιστορική αναδρομή, η τεχνολογία LoRa (Long Range) αναπτύχθηκε αρχικά το 2009 από δύο φίλους, τους Nicolas Sornin και Olivier Seller, όπου στην συνέχεια συμμετείχε στην ομάδα και ένας τρίτος συνεργάτης, o François Sforza και όλοι μαζί δημιούργησαν τη γαλλική εταιρεία Cycleo το 2010. Δύο χρόνια μετά (2012), η Cycleo εξαγοράστηκε από την αμερικανική εταιρεία Semtech [12]. Η τεχνολογία αυτή λειτουργεί αποκλειστικά στο φυσικό επίπεδο (Physical Layer, PHY) του μοντέλου αναφοράς OSI (Open Systems Interconnection model), και βασίζεται στη διαμόρφωση εξάπλωσης φάσματος τύπου Chirp Spread Spectrum (CSS), που επιτρέπει την αξιόπιστη και χαμηλής κατανάλωσης μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Χρησιμοποιεί το ελεύθερο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific and Medical), με κύρια μπάντα συχνοτήτων στην Ευρώπη τα 868 MHz [7].

Η τεχνολογία LoRa παρέχει σημαντική αντοχή σε παρεμβολές, μιας και χρησιμοποιεί προσαρμοστικό ρυθμό μετάδοσης (Adaptive Data Rate - ADR), ενώ παράλληλα παρουσιάζει και υψηλή ευαισθησία δεκτών, γεγονότα που επιτρέπουν την επικοινωνία ακόμα και σε συνθήκες με μεγάλο θόρυβο από το περιβάλλον. Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται (Bandwidth, BW) είναι συνήθως 125 kHz, 250 kHz ή 500 kHz, ανάλογα με τις ανάγκες της

εφαρμογής. Παράλληλα, η διαμόρφωση χρησιμοποιεί διαφορετικούς παράγοντες εξάπλωσης (Spreading Factors, SF) από 7 έως 12, που επηρεάζουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την εμβέλεια του σήματος [13].



Εικόνα 2.2: Μοντέλο OSI σε αντιστοίχιση με τα LoRa και LoRaWAN επίπεδα.

[7]

2.3.2 Ραδιοφωνική Διάδοση

Η τεχνολογία LoRa εκμεταλλεύεται το μη αδειοδοτημένο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων ISM (συνήθως τα 868 MHz στην Ευρώπη και 915 MHz στις ΗΠΑ), προσφέροντας πλεονεκτήματα στην εμβέλεια και την αξιοπιστία του σήματος λόγω της χαμηλής συχνότητας μετάδοσης. Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μικρότερη είναι η απόσταση και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητα διεύδυνσης σε εμπόδια, όπως κτίρια ή βλάστηση [14].

Η εξασθένηση του σήματος στον ελεύθερο χώρο μπορεί να μοντελοποιηθεί με την εξίσωση διάδοσης Friis:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

όπου P_r είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, P_t η ισχύς εκπομπής, G_t , G_r τα κέρδη των κεραιών εκπομπού και δέκτη αντίστοιχα, d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, και λ το μήκος κύματος. Σε μορφή δεκαδικών λογαρίθμων (dB), η απώλεια διάδοσης (Path Loss, PL) δίνεται ως:

$$PL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.45 \quad (2.2)$$

όπου f η συχνότητα σε MHz και d η απόσταση σε χιλιόμετρα [14]. Από την παραπάνω εξίσωση είναι εμφανές ότι μεγαλύτερες αποστάσεις και υψηλότερες συχνότητες επιφέρουν σημαντική αύξηση απωλειών.

Στο πραγματικό περιβάλλον, πρόσθετα φαινόμενα όπως αποσβέσεις λόγω τοίχων, διάθλαση και σκέδαση επηρεάζουν τη στάθμη του σήματος. Παρά ταύτα, τα σήματα LoRa παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα στη διάλειψη πολλαπλών διαδρομών (multipath

fading). Αυτό οφείλεται τόσο στο μεγαλύτερο μήκος κύματος (π.χ. περίπου 34 cm στα 868 MHz) που μπορεί να διαπεράσει εμπόδια, όσο και στην ίδια τη διαμόρφωση ευρέως φάσματος που «εξομαλύνει» τις διακυμάνσεις πολλαπλών διαδρομών. Ως αποτέλεσμα, ένα δίκτυο LoRa μπορεί να καλύψει μεγάλες αποστάσεις συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες παρόμοιας ισχύος. Για παράδειγμα, υπό συνθήκες οπτικής επαφής έχουν αναφερθεί αποστάσεις άνω των 10–15 km για συνδέσμους LoRaWAN, ενώ σε ακραίο πείραμα κατορθώθηκε επικοινωνία σε εύρος 832 km με ισχύ μόλις 25 mW σε υψηλό υψόμετρο, ενώ πρόσφατα καταρίφθηκε αυτό το ρεκόρ απόστασης από νέο πείραμα, όπου επιτεύχθηκε επικοινωνία σε απόσταση 1336 km [15]. Φυσικά, σε πυκνό αστικό περιβάλλον η εμβέλεια μειώνεται (π.χ. τυπικά 2–5 km), όμως ακόμη και τότε το LoRa παρουσιάζει αξιόπιστη κάλυψη χάρη στο υψηλό ισοζύγιο ζεύξης του.

Ισοζύγιο Ζεύξης

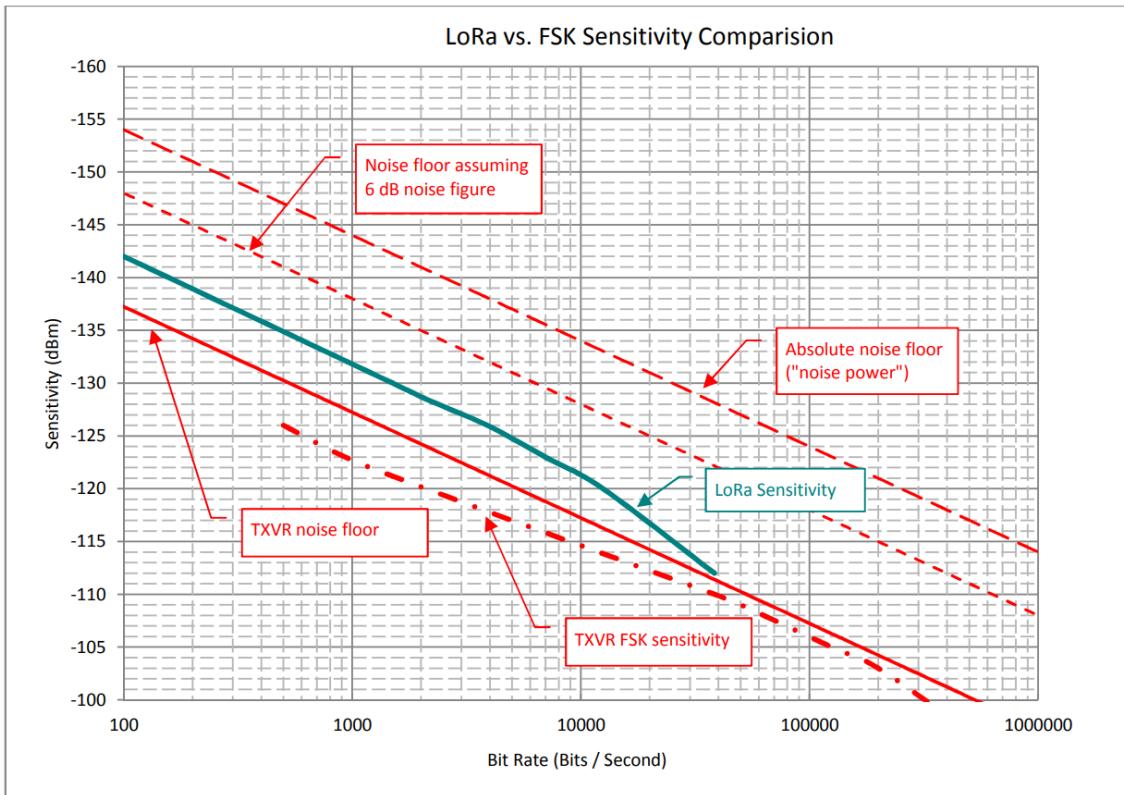
Το ισοζύγιο ζεύξης (Link Budget) είναι μία θεμελιώδης παράμετρος αξιολόγησης της απόδοσης ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Εκφράζει ουσιαστικά τη διαφορά, σε δεσιβελ (dB), ανάμεσα στην ισχύ του σήματος που εκπέμπεται από τον πομπό και την ελάχιστη ισχύ που απαιτείται για να φτάσει στον δέκτη, ώστε να πραγματοποιηθεί αξιόπιστη επικοινωνία. Με απλά λόγια, είναι το άθροισμα όλων των κερδών (π.χ. ισχύς εκπομπής, κέρδος κεραίας) αφαιρουμένου του συνόλου των απώλειών (π.χ. απόσβεση διαδρομής, ατμοσφαιρικές απώλειες, κλπ.) στην πορεία του σήματος από τον πομπό στον δέκτη.

$$\text{Link Budget (dB)} = P_{TX}(dBm) + G_{TX}(dBi) + G_{RX}(dBi) - \text{Sensitivity}_{RX}(dBm) - \text{Losses}_{misc}(dB) \quad (2.3)$$

όπου P_{TX} είναι η ισχύς εκπομπής, G_{TX}, G_{RX} είναι τα κέρδη κεραίας, Sensitivity_{RX} είναι η ευαισθησία του δέκτη, Losses_{misc} είναι οι λοιπές απώλειες.

Το ισοζύγιο ζεύξης ενός συστήματος LoRa είναι ιδιαίτερα υψηλό (τυπικά μπορεί να φτάσει έως και 154 dB, ανάλογα με τις παραμέτρους της διαμόρφωσης) επιτρέποντας την ανίχνευση σημάτων πολύ χαμηλής στάθμης στο δέκτη. Αυτό προκύπτει από τη συνδυαστική συμβολή: (α) της χρήσης χαμηλού ρυθμού μετάδοσης (διάχυση σήματος σε μεγάλο χρόνο), που παρέχει κέρδος επεξεργασίας έναντι του θορύβου, και (β) της ευαισθησίας των δεκτών LoRa, η οποία είναι από τις μεγαλύτερες συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες LPWAN. Για δεδομένη ισχύ εκπομπής και ρυθμό, το LoRa επιτυγχάνει θεωρητικά έως και 4 φορές μεγαλύτερη εμβέλεια σε σχέση με τη παραδοσιακή διαμόρφωση FSK (Frequency Shift Keying) αντίστοιχης κατηγορίας.

Χαρακτηριστικά, το LoRa μπορεί να διατηρήσει αξιόπιστη επικοινωνία ακόμη και με λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) αρνητικό, δηλαδή με το σήμα θαμμένο κάτω από το φάσμα του θορύβου. Αυτό το πλεονέκτημα οφείλεται στη διαμόρφωση ευρέως φάσματος και στη μεγάλη διάρκεια συμβόλου που επιτρέπει στο δέκτη να συνδύσει ενέργεια σήματος σε χρόνο και συχνότητα. Συνεπώς, στο επίπεδο διάδοσης, το LoRa αξιοποιεί τις φυσικές ιδιότητες των συχνοτήτων sub-GHz και την ανθεκτική διαμόρφωσή του για να μεγιστοποιήσει την ακτίνα κάλυψης και την αξιόπιστία επικοινωνίας ακόμη και σε αντίξοες συνθήκες μετάδοσης [14].



Εικόνα 2.3: Σύγκριση ευαισθησίας LoRa και FSK.

[14]

Ευαισθησία δεκτών, αντοχή σε παρεμβολές

Η υψηλή ευαισθησία του δέκτη είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό των συστημάτων LoRa. Η θεωρητική ευαισθησία ορίζεται από το θερμικό όριο θορύβου και το εύρος ζώνης λήψης. Για έναν δέκτη με συντελεστή θορύβου NF (σε dB) και απαιτούμενο SNR κατώφλι SNR_{min} για τη διαμόρφωση, η ελάχιστη ισχύς σήματος που μπορεί να ανιχνευθεί δίνεται προσεγγιστικά (σε dBm) από:

$$S_{min} \approx -174 + 10 \log_{10}(BW) + NF + SNR_{min}, \quad (2.4)$$

όπου -174 dBm/Hz είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος του θερμικού θορύβου σε θερμοκρασία δωματίου. Για τους τυπικούς δέκτες LoRa (π.χ. chip SX1276) το NF είναι περίπου 6 dB [14].

Λαμβάνοντας $BW = 125$ kHz και $NF = 6$ dB, η ευαισθησία εξαρτάται κυρίως από το απαιτούμενο SNR_{min} του εκάστοτε Spreading Factor. Πειραματικά και από προσομοιώσεις έχει βρεθεί ότι το SF7 απαιτεί περίπου $SNR_{min} \approx -7.5$ dB για αξιόπιστη ανίχνευση, ενώ το SF12 απαιτεί $SNR_{min} \approx -20$ dB [14]. Υπό αυτές τις συνθήκες, προκύπτει ευαισθησία δέκτη περίπου $S_{min} \approx -125$ dBm για SF7 και μέχρι $S_{min} \approx -137$ dBm για SF12 στο κανάλι (125 kHz). Αυτές οι τιμές είναι εξαιρετικά χαμηλές, εξηγώντας την δυνατότητα του LoRa να λαμβάνει σήματα σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Για σύγκριση, ένα τυπικό δίκτυο Wi-Fi απαιτεί σήματα ισχύος άνω των -90 dBm, ενώ το LoRa μπορεί να λειτουργήσει με σήματα χιλιάδες φορές πιο ασθενή.

Η αντοχή του LoRa σε παρεμβολές είναι επίσης αξιοσημείωτη. Ως διαμόρφωση ευρέος

φάσματος, παρουσιάζει εγγενή ανοχή σε στενής ζώνης παρεμβολές: ένα παρεμβάλλον σήμα περιορισμένου εύρους (π.χ. θόρυβος σε μια στενή συχνότητα) Θα επηρεάσει μόνο ένα μικρό μέρος του chirp, επιτρέποντας στο υπόλοιπο φάσμα του συμβόλου να συνεισφέρει στην ορθή αποκωδικοποίηση. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου $T_{\text{σψμ}}$, το LoRa δίνει δυνατότητα χρονικής ολοκλήρωσης της ισχύος σήματος, γεγονός που βελτιώνει τον αντι-παρεμβολικό λόγο. Μελέτες έχουν δείξει ότι το LoRa διατηρεί αξιόπιστη επικοινωνία ακόμα και υπό έντονο περιβάλλον θορύβου και πολλαπλών διαδρομών, όπου άλλες τεχνολογίες αποτυγχάνουν [16]. Οι δοκιμές του Kamil Staniec κ.ά. (2018) έδειξαν ότι σε παρουσία ισχυρών παρεμβολών, το LoRa εμφανίζει μεν αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων, αλλά παραμένει λειτουργικό σε SNR όπου ένα σύστημα χωρίς διασπορά θα είχε καταρρεύσει πλήρως [16]. Αυτό αποδίδεται τόσο στο κέρδος επεξεργασίας που προσφέρει η διαμόρφωση CSS, όσο και στον διορθωτικό κώδικα που διορθώνει μεμονωμένα σφάλματα βίτς λόγω παρεμβολών.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η παρεμβολή μεταξύ συσκευών LoRa του ίδιου δικτύου είναι δυνατή σε σενάρια υψηλής πυκνότητας: αν πολλοί κόμβοι μεταδίδουν ταυτόχρονα στον ίδιο δίαυλο και με ίδιο SF, οι συγκρούσεις πλαισίων θα οδηγήσουν σε απώλειες πακέτων (λόγω του ALOHA-based πρωτοκόλλου πρόσθασης του LoRaWAN). Η χρήση διαφορετικών καναλιών συχνοτήτων και η ορθογωνιότητα των SF μετριάζουν αυτό το πρόβλημα, όπως αναφέρθηκε, αλλά δεν το εξαλείφουν πλήρως. Συνεπώς, η ανθεκτικότητα του LoRa σε παρεμβολές είναι υψηλή συγκριτικά με στενόζωνες διαμορφώσεις, όμως η πραγματική απόδοση εξαρτάται και από τον προσεκτικό σχεδιασμό του δικτύου (κατανομή καναλιών, SF, χρόνου εκπομπής ανά κόμβο κ.λπ.)

Zώνη Fresnel

Η ζώνη Fresnel αποτελεί μια ελλειψοειδή περιοχή γύρω από την ευθεία γραμμή μεταξύ πομπού και δέκτη, όπου η παρουσία εμποδίων μπορεί να προκαλέσει διάθλαση και συμβολή των ραδιοκυμάτων, επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα της επικοινωνίας. Η ακτίνα της πρώτης ζώνης Fresnel (F_1) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_1 = \sqrt{\frac{\pi d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.5)$$

όπου d_1, d_2 είναι οι αποστάσεις από το σημείο παρεμβολής στον πομπό και τον δέκτη αντίστοιχα, και π το μήκος κύματος. Για αξιόπιστη επικοινωνία, θεωρείται ιδανικό να είναι τουλάχιστον το 60% της πρώτης ζώνης Fresnel ελεύθερο από εμπόδια [;].

Για παράδειγμα, στα 868 MHz ($\lambda \approx 0.345m$), σε μια απόσταση 5 km με εμπόδιο στη μέση της απόστασης (2.5 km από κάθε πλευρά), η πρώτη ζώνη Fresnel έχει ακτίνα περίπου:

$$F_1 = \sqrt{\frac{0.345 \times 2500 \times 2500}{5000}} \approx 20.8 m \quad (2.6)$$

Η ύπαρξη εμποδίων εντός της ζώνης αυτής μειώνει δραματικά την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος λόγω καταστροφικής συμβολής μεταξύ απευθείας και ανακλώμενων κυμάτων.

Πολλαπλές διαδρομές (Multipath Propagation)

Η διάδοση των ραδιοκυμάτων συνήθως δεν γίνεται μέσω μίας μόνο διαδρομής, αλλά μέσω πολλαπλών διαδρομών λόγω ανακλάσεων, διάθλασης και διάχυσης. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε διάλειψη σήματος (fading), δηλαδή έντονες διακυμάνσεις στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος. Τα σήματα LoRa, χάρη στην τεχνική διάδοσης φάσματος (Chirp Spread Spectrum), είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε αυτό το φαινόμενο, καθώς η ενέργεια του σήματος είναι απλωμένη σε μεγάλη περιοχή του φάσματος και χρόνου, επιτρέποντας στον δέκτη να συνδυάζει αποτελεσματικά την ενέργεια των διαφορετικών διαδρομών και να ανακτά τα δεδομένα [16].

Φαινόμενο Δοππλερ (Doppler Effect)

Το φαινόμενο Δοππλερ αναφέρεται στη μεταβολή της συχνότητας ενός σήματος όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η μετατόπιση Δοππλερ (Δf) για ένα σήμα που μεταδίδεται από κινούμενο πομπό προς σταθερό δέκτη δίνεται από:

$$\Delta f = f_c \frac{v}{c} \quad (2.7)$$

όπου f_c η φέρουσα συχνότητα, v η σχετική ταχύτητα μεταξύ πομπού και δέκτη, και c η ταχύτητα του φωτός ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Η διαμόρφωση LoRa παρουσιάζει ιδιαίτερη αντοχή στο φαινόμενο Δοππλερ λόγω της ευρέως φάσματος φύσης των σημάτων στηριπ. Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί το LoRa (τυπικά 125 κΗζ ή περισσότερο) και η χρήση στηριπ που καλύπτουν όλο το εύρος συχνοτήτων παρέχουν ανθεκτικότητα στις μικρές μετατοπίσεις συχνότητας. Για παράδειγμα, με $f_c = 868 \text{ MHz}$ και ταχύτητα $v = 100 \text{ km/h} \approx 27.8 \text{ m/s}$:

$$\Delta f = 868 \times 10^6 \cdot \frac{27.8}{3 \times 10^8} \approx 80 \text{ Hz}$$

Αυτή η μετατόπιση είναι αμελητέα σε σχέση με το εύρος ζώνης των 125 κΗζ, καθιστώντας το LoRa ιδανικό ακόμη και σε εφαρμογές κινητών συσκευών (π.χ. αισθητήρες οχημάτων) [14].

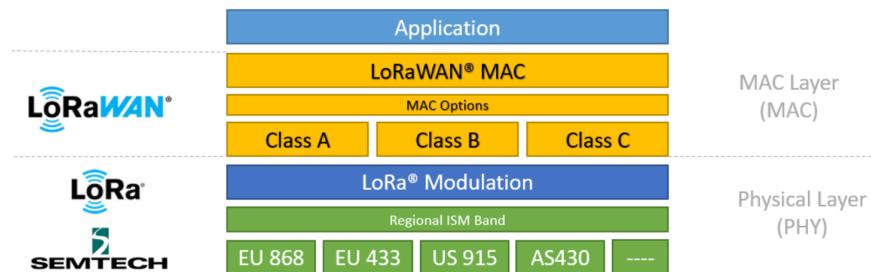
Ατμοσφαιρικά και περιβαλλοντικά φαινόμενα

Τέλος, στην διάδοση των ραδιοκυμάτων σημαντική είναι και η επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως οι μεταβολές στην ατμοσφαιρική υγρασία, βροχή, ή και θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, που μπορεί να οδηγήσουν σε πρόσθετες απώλειες (όπως το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής απορρόφησης). Ωστόσο, σε συχνοτήτες συθ-ΓΗζ (868 MHz), αυτές οι επιδράσεις είναι σχετικά μικρές και δεν επηρεάζουν σημαντικά την αξιοπιστία του σήματος.

Συνοψίζοντας, η επιλογή των συχνοτήτων του LoRa, η τεχνική διαμόρφωσης και η υψηλή ευαισθησία των δεκτών καθιστούν την τεχνολογία αυτή ιδιαίτερα ανθεκτική σε προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάδοση των ραδιοκυμάτων, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής ισχύος.

2.4 Το Πρωτόκολλο LoRaWAN

Το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας επιπέδου MAC (Media Access Control), σχεδιασμένο για να επεκτείνει τη φυσική διαστρωμάτωση της τεχνολογίας LoRa, επιτρέποντας την αξιόπιστη και ασφαλή μετάδοση δεδομένων σε δίκτυα ευρείας περιοχής με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [7].



Εικόνα 2.4: Τεχνολογική στοιβα των LoRa και LoRaWAN.

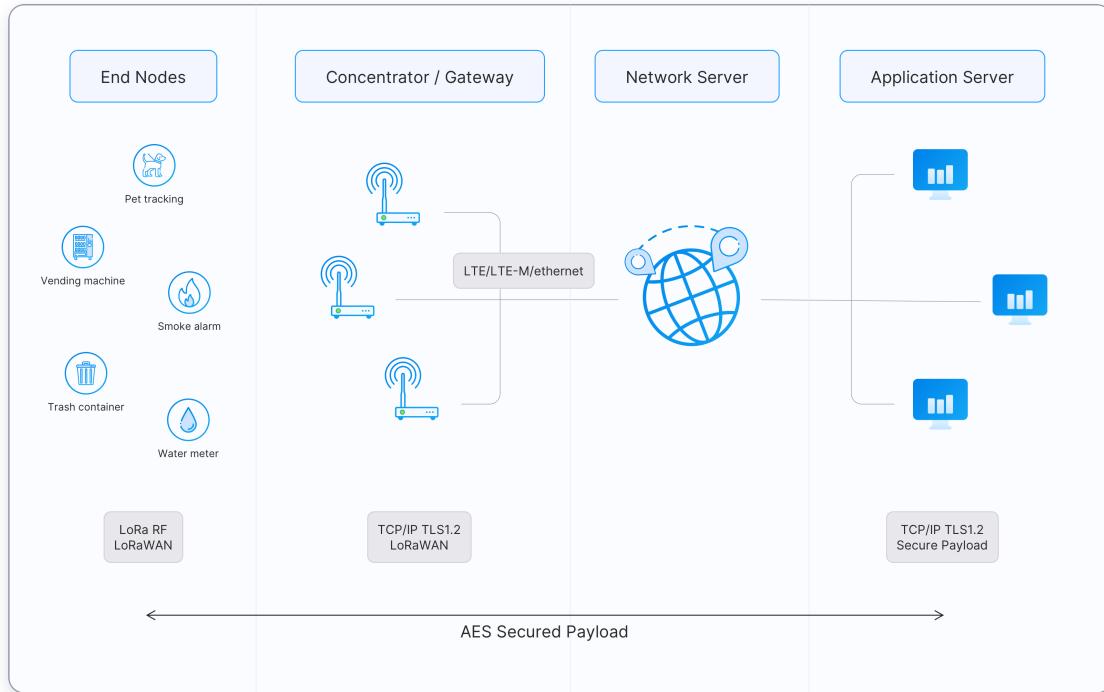
[7]

Το πρωτόκολλο αναπτύχθηκε και διαχειρίζεται από τον οργανισμό LoRa Alliance, ο οποίος προωθεί τη συμβατότητα και την τυποποίηση μεταξύ κατασκευαστών. Το LoRaWAN καθορίζει τη δικτυακή αρχιτεκτονική, τα επίπεδα ασφαλείας, και τους τρόπους πρόσβασης στο δίκτυο. Η αρχιτεκτονική του LoRaWAN βασίζεται σε μια τοπολογία τύπου αστέρα-από-αστέρες (star-of-stars), η οποία περιλαμβάνει τα εξής βασικά στοιχεία [13]:

- **Τερματικές Συσκευές (End Devices):** Αισθητήρες ή ενεργοποιητές που συλλέγουν δεδομένα και τα αποστέλλουν μέσω του πρωτοκόλλου LoRa.
- **Πύλες (Gateways):** Δέχονται τα ασύρματα σήματα από τις τερματικές συσκευές και τα προωθούν στον Διακομιστή Δικτύου (Network Server) μέσω ενσύρματων ή ασύρματων συνδέσεων, όπως Ethernet, Wi-Fi ή κινητά δίκτυα.
- **Διακομιστής Δικτύου (Network Server):** Διαχειρίζεται τη ροή των δεδομένων, εξαλείφει τα διπλότυπα μηνύματα, εφαρμόζει πολιτικές ασφαλείας και προωθεί τα δεδομένα στους Διακομιστές Εφαρμογών (Application Servers).
- **Διακομιστής Εφαρμογών (Application Server):** Επεξεργάζεται τα δεδομένα σύμφωνα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

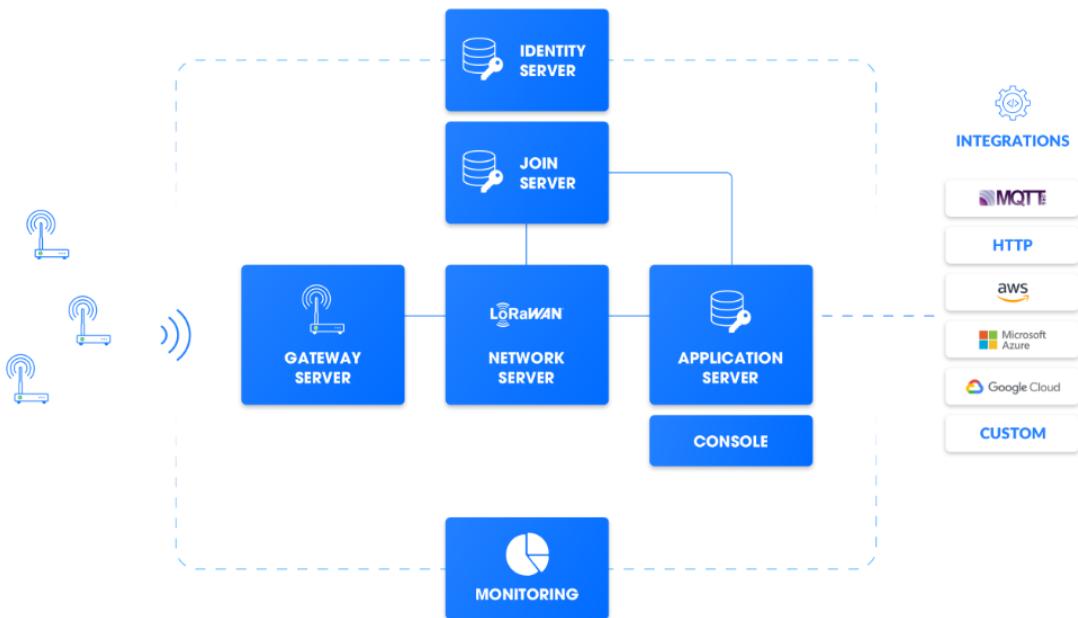
2.5 Ηλεκτρικοί Υποσταθμοί και Ανάγκες Εποπτείας

Οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί αποτελούν κρίσιμα σημεία του ηλεκτρικού συστήματος μεταφοράς και διανομής ενέργειας. Ο ρόλος τους είναι η μετατροπή της τάσης από υψηλά επίπεδα μεταφοράς σε χαμηλότερα επίπεδα που είναι κατάλληλα για διανομή και τελική κατανάλωση. Οι υποσταθμοί μπορούν να είναι είτε πρωτεύοντες (μεταφοράς), είτε δευτερεύοντες (διανομής).



Εικόνα 2.5: Τυπική αρχιτεκτονική LoRaWAN δικτύου.

[13]



Εικόνα 2.6: Αρχιτεκτονική LoRaWAN Network Server.

[17]

Η εποπτεία και διαχείριση των υποσταθμών περιλαμβάνει:

- παρακολούθηση ηλεκτρικών παραμέτρων όπως ρεύμα, τάση, ισχύς και συχνότητα ανά φάση,
- ανίχνευση βλαβών ή ανομαλιών (π.χ. υπερφόρτιση, βυθίσεις τάσης),

- έλεγχο λειτουργικών μονάδων όπως διακόπτες ισχύος και προστατευτικά ρελέ,
- λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο για την εξασφάλιση της αδιάλειπτης παροχής και της ασφάλειας του εξοπλισμού.

Παραδοσιακά, τέτοια εποπτεία γινόταν με ενσύρματες ή SCADA λύσεις υψηλού κόστους. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως το LoRaWAN επιτρέπει τη δημιουργία αποκεντρωμένων, χαμηλού κόστους και επεκτάσιμων λύσεων, κατάλληλων ακόμη και για μικρούς ή απομακρυσμένους υποσταθμούς.

2.6 Συμπεράσματα

Οι τεχνολογίες LPWAN και ιδιαίτερα το LoRaWAN παρέχουν μια αποτελεσματική λύση για τηλεμετρικές εφαρμογές σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται χαμηλή κατανάλωση ισχύος και μεγάλη απόσταση μετάδοσης. Το Θεωρητικό αυτό υπόβαθρο θεμελιώνει την επιλογή του LoRaWAN ως βασική τεχνολογία επικοινωνίας στο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου υποσταθμού που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιγραφή θέματος

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται μια περιγραφή των συστημάτων ομότιμων κόμβων που είναι βασισμένα σε σχήματα (schema-based peer-to-peer systems). Στη συνέχεια περιγράφονται τρία βασικά συστήματα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, καθώς και ένα σύστημα για τη διαχείρηση RDF σχημάτων, και τέλος αναλύεται ο στόχος της παρούσας εργασίας.

3.1 Σχετικές εργασίες

Οι βάσεις δεδομένων εισήγαγαν ένα τρόπο αποθήκευσης και ανάκτησης των δεδομένων που βασιζόταν στο σχήμα [18]. Τα πρώτα συστήματα ομότιμων κόμβων που περιγράψαμε στην Υποενότητα 2.1.2 έδιναν μεγάλη σημασία στην αρχιτεκτονική του συστήματος και την δρομολόγηση των ερωτήσεων και λιγότερη στον τρόπο αναπαράστασης και τις δυνατότητες αναζήτησης. Η αναζήτηση σε αυτά τα συστήματα ομότιμων κόμβων γίνεται με βάση προκαθορισμένα χαρακτηριστικά - δείκτες, ή με προσπάθεια αντιστοίχισης μιας λέξης κλειδί.

Η ανάγκη λοιπόν για πιο εκφραστικές λειτουργίες οδήγησε στα συστήματα ομότιμων κόμβων τα οποία είναι βασισμένα σε σχήματα (schema based peer-to-peer systems). Πρόκειται για ομότιμες υποδομές διαχείρισης δεδομένων που όμως διατηρούν όλα τα χαρακτηριστικά των συστημάτων ομότιμων κόμβων.

Μέρος II

Πρακτικό Μέρος

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση και σχεδίαση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε για την υλοποίηση του συστήματος. Αρχικά περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος και γίνεται ο διαχωρισμός του στα επιμέρους υποσυστήματα, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι εφαρμογές του συστήματος.

4.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του συστήματος και ο χωρισμός του σε υποσυστήματα όσον αφορά την αρχιτεκτονική.

4.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων

Το σύστημα αποτελείται από τους απλούς κόμβους και ένα κόμβο διαχειριστή. Στο σημείο αυτό αναλύουμε το σύστημα ενός απλού κόμβου, το οποίο αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος.
- Υποσύστημα ενσωμάτωσης δεδομένων στο σχήμα.
- Υποσύστημα επικοινωνίας κόμβου.

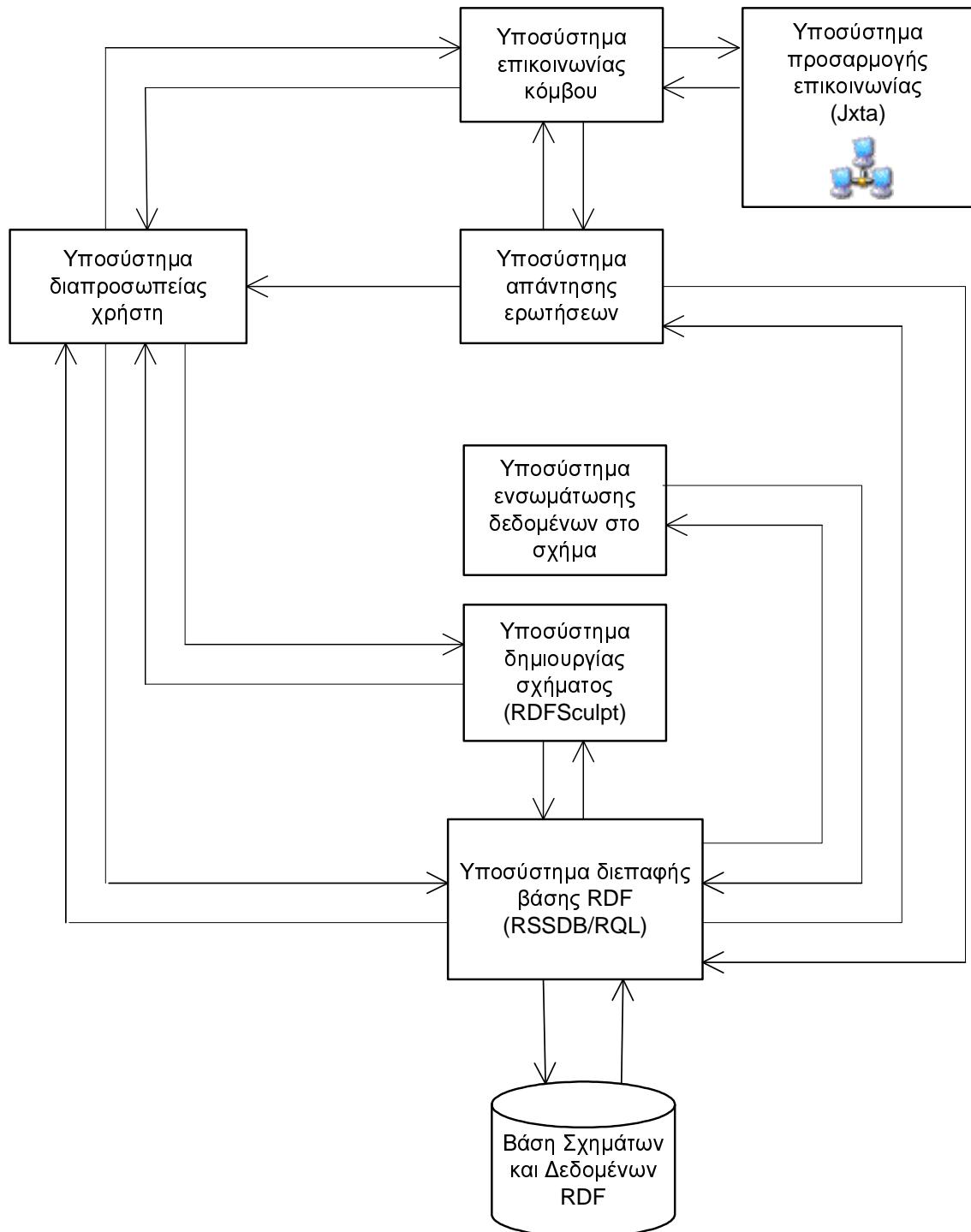
Το Σχήμα 4.1 απεικονίζει

4.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων

Παρακάτω δίνεται λεπτομερής περιγραφή για καθένα από τα συστήματα που αναφέραμε. Η περιγραφή αυτή γίνεται με βάση τα διαγράμματα ροής δεδομένων.

Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος

Το υποσύστημα αυτό



Σχήμα 4.1: Αρχιτεκτονική Απλού Κόμβου

Κεφάλαιο 5

Υλοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος, με βάση τη μελέτη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζεται η πλατφόρμα και τα προγραμματιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια δίνονται οι λεπτομέρειες υλοποίησης για τους βασικούς αλγόριθμους του συστήματος καθώς και η δομή του κώδικα.

5.1 Λεπτομέρειες υλοποίησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικοί αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν καθώς και λεπτομέρειες σχετικά με την υλοποίηση της επικοινωνίας των κόμβων.

5.1.1 Αλγόριθμοι

Αλγόριθμος εισαγωγής δεδομένων

Όταν ένας κόμβος εισέρχεται για πρώτη φορά στο σύστημα, αρχικά δημιουργεί το σχήμα που θέλει χρησιμοποιώντας το RDFSculpt. Στη συνέχεια.....

Παράδειγμα

Έστω ότι ο κόμβος έχει επιλέξει να συμμετέχει στο σύστημα με το RDF σχήμα που φαίνεται στο Σχήμα. Έστω επίσης ότι από το SQL ερώτημα που έχει κάνει στη σχεσιακή βάση, έχει προκύψει η όψη που φαίνεται στον Πίνακα. Για τις ανάγκες του παραδείγματος θεωρούμε ότι η όψη αυτή περιέχει μόνο μία εγγραφή.

.....

5.2 Περιγραφή κλάσεων

Στην ενότητα αυτή δίνεται μια σύντομη περιγραφή των κλάσεων, των πεδίων και των μεθόδων που τις απαρτίζουν.

5.2.1 public class FirstUi

Η κλάση αυτή κατασκευάζει την οθόνη εισαγωγής του χρήστη στο σύστημα.

Πεδία

- `private GridBagConstraints con`
To layout για όλα τα Panel.
- `private GridBagConstraints con`
Ta constraints για το layout.
- `private Icon arrowR`
Εικονίδιο για το κουμπί Next.

Μέθοδοι

- `public FirstUi()`
Ο κατασκευαστής της κλάσης ο οποίος καλεί την `createEntryFrame()`.
- `private void createEntryFrame()`
Μέθοδος που κατασκευάζει το ενφραμε.

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος

Σ το κεφάλαιο αυτό γίνεται ο έλεγχος καλής λειτουργίας του συστήματος.

6.1 Μεθοδολογία Ελέγχου

Ο έλεγχος του συστήματος αυτού πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ενός σεναρίου λειτουργίας. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό θεωρούμε ότι στο σύστημα υπάρχουν τρεις κόμβοι (peer1, peer2, peer3). Θεωρούμε επίσης ότι οι κόμβοι peer2 και peer3 έχουν ήδη σχήμα και δεδομένα. Το σχήμα του peer2 φαίνεται στο Σχήμα.

Επίσης η τοπολογία του συστήματος έχει ως εξής: ο peer2 είναι γείτονας του peer1 και ο peer3 γείτονας του peer2.

Αρχικά λοιπόν θα δημιουργήσουμε σχήμα για τον κόμβο peer1 και στη συνέχεια θα εισάγουμε σε αυτό δεδομένα εξετάζοντας έτσι την καλή λειτουργία του υποσυστήματος δημιουργίας σχήματος και του υποσυστήματος εισαγωγής δεδομένων. Στη συνέχεια από τον κόμβο αυτό στέλνουμε ερωτήσεις στους υπόλοιπους για τον έλεγχο του υποσυστήματος απάντησης ερωτήσεων και επικοινωνίας κόμβων.

6.2 Αναλυτική παρουσίαση ελέγχου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε αναλυτικά τον έλεγχο του συστήματος σύμφωνα με το σενάριο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Παράδειγμα Πίνακα

7.1 Συμπεράσματα

Τα συστήματα οιμότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα οιμότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα οιμότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυνατή την αναζήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα :

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Έτσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

Πίνακας 7.1: Πίνακας αλήθειας της λογικής συνάρτησης F

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Παράδειγμα Μαθηματικών Σχέσεων – Εκφράσεων και Αλγορίθμων

8.1 Συμπεράσματα

Τα συστήματα ομότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα ομότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Στα συστήματα αυτά κάθε $y = \int_0^1 f(x)dx$ $y = \int_0^1 f(x)dx$ κόμβος χρησιμοποιεί ένα σχήμα για την $\sum_{i=0}^{100} a_i$ αναπαράσταση των δεδομένων του. Όμως σε ένα σύστημα ομότιμων κόμβων, κάθε κόμβος έχει διαφορετικές απαιτήσεις αναπαράστασης δεδομένων. Επομένως πρέπει να υπάρχει ευελιξία στην επιλογή $\frac{1}{1+x^2}$ σχήματος. Τα συστήματα που έχουν προταθεί μέχρι τώρα και παρέχουν αυτή την ευελιξία, για να είναι δυνατή η αναζήτηση πληροφορίας, απαιτούν την ύπαρξη κανόνων αντιστοίχισης μεταξύ των σχημάτων με βάση τους οποίους να μετασχηματίζονται οι ερωτήσεις. Όμως δεν υποστηρίζεται ακόμα αυτόματη δημιουργία και δυναμική ανανέωση των κανόνων, που είναι απαραίτητα για τα συστήματα ομότιμων κόμβων.

$$y = \int_0^1 f(x)dx \quad (8.1)$$

Η συνεισφορά της (8.1) παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά τη δημιουργία ενός πλήρους συστήματος ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα RDF το οποίο παρέχει: (α) την υποδομή για την επικοινωνία των κόμβων, (β) μηχανισμό δημιουργίας σχήματος, (γ) μηχανισμό ενσωμάτωσης σχεσιακών δεδομένων στο σχήμα με τη χρήση αντιστοίχισεων που δημιουργεί ο χρήστης με τη βοήθεια ειδικής διαπροσωπείας, (δ) ευέλικτη διαπροσωπεία χρήστη για τη διατύπωση ερωτημάτων και (ε) μηχανισμό απάντησης και επεξεργασίας ερωτήσεων.

Το δεύτερο σκέλος αφορά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει μια σχετική ευελιξία ως προς την επιλογή του σχήματος από τον κάθε κόμβο, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα μετασχηματισμού ερωτήσεων χωρίς τη χρήση κανόνων αντιστοίχισης. Συγκεκριμένα, τα σχήματα των κόμβων αποτελούν υποσύνολα-όψεις (views) ενός βασικού σχήματος

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 8.1: Μετατροπή δεκαδικού αριθμού σε δυαδικό, με τη μέθοδο των διαδοχικών διαιρέσεων με το 2

Είσοδος: $X_{(10)}$ (ο δεκαδικός αριθμός προς μετατροπή)

Έξοδος: $X_{(2)}$ (η δυαδική αναπαράσταση του X)

Θέσε $\Delta = X_{(10)}$ ($\Delta = \text{διαιρετέος}$)

Θέσε $\Pi = 1$ ($\Pi = \text{πηλίκο}$)

Θέσε $X_{(2)} = \text{""}$ ("" ο κενός χαρακτήρας)

while $\Pi \neq 0$ **do**

Διαίρεσε το Δ με το 2 και βρες το πηλίκο Π , και το υπόλοιπο u .

$X_{(2)} = u + X_{(2)}$ (Τοποθέτησε το υπόλοιπο u στα αριστερά του $X_{(2)}$)

Θέσε $\Delta = \Pi$ (Το πηλίκο Π τίθεται ως διαιρετέος για την επόμενη διαίρεση)

end while

που ονομάζεται καθολικό σχήμα. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν το γεγονός ότι τα σχήματα αυτά είναι συμβατά μεταξύ τους, έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου της ικανοποιησιμότητας μιας ερώτησης και μετατροπής της όπου χρειάζεται, χρησιμοποιώντας τόσο το σχήμα του κόμβου όσο και το καθολικό σχήμα.

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυνατή την αναζήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

8.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα :

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Ετσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 8.2: *Κάποιος αλγόριθμος ...*

```
#include <stdio.h>
#define N 10
/* Block
 * comment */

int main()
{
    int i;

    // Line comment.
    puts("Hello world!");

    for (i = 0; i < N; i++)
    {
        puts("LaTeX is also great for programmers!");
    }

    return 0;
}
```

Μέρος **III**

Επίλογος

Επίλογος

9.1 Συμπεράσματα

Τα συστήματα ομότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα ομότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Στα συστήματα αυτά κάθε κόμβος χρησιμοποιεί ένα σχήμα για την αναπαράσταση των δεδομένων του. Όμως σε ένα σύστημα ομότιμων κόμβων, κάθε κόμβος έχει διαφορετικές απαιτήσεις αναπαράστασης δεδομένων. Επομένως πρέπει να υπάρχει ευελιξία στην επιλογή σχήματος. Τα συστήματα που έχουν προταθεί μέχρι τώρα και παρέχουν αυτή την ευελιξία, για να είναι δυνατή η αναζήτηση πληροφορίας, απαιτούν την ύπαρξη κανόνων αντιστοίχισης μεταξύ των σχημάτων με βάση τους οποίους να μετασχηματίζονται οι ερωτήσεις. Όμως δεν υποστηρίζεται ακόμα αυτόματη δημιουργία και δυναμική ανανέωση των κανόνων, που είναι απαραίτητα για τα συστήματα ομότιμων κόμβων.

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά τη δημιουργία ενός πλήρους συστήματος ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα RDF το οποίο παρέχει: (α) την υποδομή για την επικοινωνία των κόμβων, (β) μηχανισμό δημιουργίας σχήματος, (γ) μηχανισμό ενσωμάτωσης σχεσιακών δεδομένων στο σχήμα με τη χρήση αντιστοιχίσεων που δημιουργεί ο χρήστης με τη βοήθεια ειδικής διαπροσωπείας, (δ) ευέλικτη διαπροσωπεία χρήστη για τη διατύπωση ερωτημάτων και (ε) μηχανισμό απάντησης και επεξεργασίας ερωτήσεων.

Το δεύτερο σκέλος αφορά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα προσφέρει μια σχετική ευελιξία ως προς την επιλογή του σχήματος από τον κάθε κόμβο, ενώ ταυτόχρονα δίνει τη δυνατότητα μετασχηματισμού ερωτήσεων χωρίς τη χρήση κανόνων αντιστοίχισης. Συγκεκριμένα, τα σχήματα των κόμβων αποτελούν υποσύνολα-όψεις(views) ενός βασικού σχήματος που ονομάζεται καθολικό σχήμα. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν το γεγονός ότι τα σχήματα αυτά είναι συμβατά μεταξύ τους, έχουμε τη δυνατότητα ελέγχου της ικανοποιησιμότητας μιας ερωτησης και μετατροπής της όπου χρειάζεται, χρησιμοποιώντας τόσο το σχήμα του κόμβου όσο και το καθολικό σχήμα.

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα ομότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυ-

νατή την αναδρήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

9.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Έτσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

Παρατήματα

Παράρτημα Α'

Παράδειγμα Παραρτήματος

A'.1 Πρώτη ενότητα

Τα συστήματα οιμότιμων κόμβων, προκειμένου να υποστηρίζουν πιο εκφραστικές λειτουργίες αναπαράστασης και αναζήτησης δεδομένων, εξελίχθηκαν στα συστήματα οιμότιμων κόμβων τα οποία βασίζονται στις τεχνολογίες του Σημασιολογικού Ιστού για την αναπαράσταση των δεδομένων μέσω σχημάτων που τα περιγράφουν (Schema-based peer-to-peer systems).

Συμπερασματικά το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι ένα πλήρες σύστημα οιμότιμων κόμβων βασισμένο σε σχήματα, το οποίο καθιστά δυνατή την αναζήτηση της πληροφορίας με ένα διαφορετικό τρόπο απ' ότι τα προϋπάρχοντα συστήματα.

A'.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση διαδικασίας επιλογής σχήματος με βάση το οποίο ο κόμβος θα συμμετέχει στο σύστημα. Έτσι όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα, κάθε κόμβος έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει πολλά σχήματα και να αποθηκεύσει δεδομένα σε περισσότερα από ένα. Ως σχήμα του κόμβου (με βάση το οποίο απαντάει τις ερωτήσεις), θεωρείται το τελευταίο στο οποίο αποθήκευσε δεδομένα. Η δυνατότητα επιλογής θα του παρείχε περισσότερη ευελιξία.
- Δυνατότητα αντιστοίχισης δεδομένων τα οποία να μην είναι αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων αλλά σε αρχεία. Η αποδέσμευση από τη βάση δεδομένων θα έκανε το σύστημα πιο εύκολο στην εγκατάσταση και τη χρήση.
- Αξιολόγηση του συστήματος ως προς τη συμπεριφορά του αν συμμετέχει σε αυτό μεγάλος αριθμός κόμβων (scalability testing) και αν χρησιμοποιηθεί ένα πολύ μεγάλο καθολικό σχήμα. Η αξιολόγηση αυτή αφορά την ταχύτητα με την οποία ένας κόμβος παίρνει απαντήσεις σε μια ερώτηση καθώς και την ποιότητα των απαντήσεων.

Πίνακας Α'.1: Πίνακας αληθειας της λογικής συνάρτησης F

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

Παράρτημα **B'**

Απόδειξη της σχέσης (8.1)

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη που έγινε για την υλοποίηση του συστήματος. Αρχικά περιγράφεται η αρχιτεκτονική του συστήματος και γίνεται ο διαχωρισμός του στα επιμέρους υποσυστήματα, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι εφαρμογές του συστήματος. Ελένη

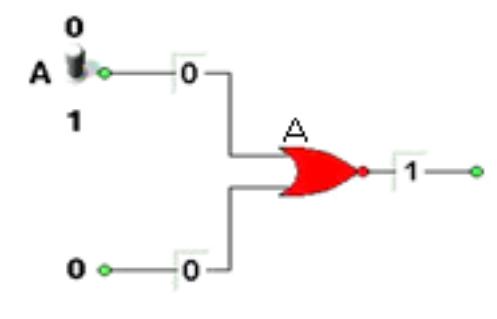
B'.1 Ανάλυση - περιγραφή αρχιτεκτονικής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση του συστήματος και ο χωρισμός του σε υποσυστήματα όσον αφορά την αρχιτεκτονική.

B'.1.1 Διαχωρισμός υποσυστημάτων

Το σύστημα αποτελείται από τους απλούς κόμβους και ένα κόμβο διαχειριστή. Στο σημείο αυτό αναλύουμε το σύστημα ενός απλού κόμβου, το οποίο αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος.
- Υποσύστημα ενσωμάτωσης δεδομένων στο σχήμα.
- Υποσύστημα επικοινωνίας κόμβου.



Σχήμα B'.1: Προσομοίωση Πύλης NOR

Το Σχήμα B'.1 απεικονίζει

B'.1.2 Περιγραφή υποσυστημάτων

Παρακάτω δίνεται λεπτομερής περιγραφή για καθένα από τα συστήματα που αναφέραμε. Η περιγραφή αυτή γίνεται με βάση τα διαγράμματα ροής δεδομένων.

Υποσύστημα δημιουργίας σχήματος

Το υποσύστημα αυτό

Παράρτημα Γ'

Παραδείγματα Βιβλιογραφικών Αναφορών

Τύπος βιβλιογραφικής πηγής	Αριθμός αναφοράς
Βιβλίο ξενόγλωσσο	[19]
Βιβλίο ελληνικό	[20]
Άρθρο σε επιστημονικό περιοδικό	[;]
Παρουσίαση σε επιστημονικό συνέδριο	[21]
Ιστοσελίδα	[;]
Διπλωματική εργασία	[22]
Πτυχιακή εργασία	[18]
Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία	[23]
Διδακτορική διατριβή	[24]
Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (πατέντα)	[25]
Τεχνική αναφορά	[;]

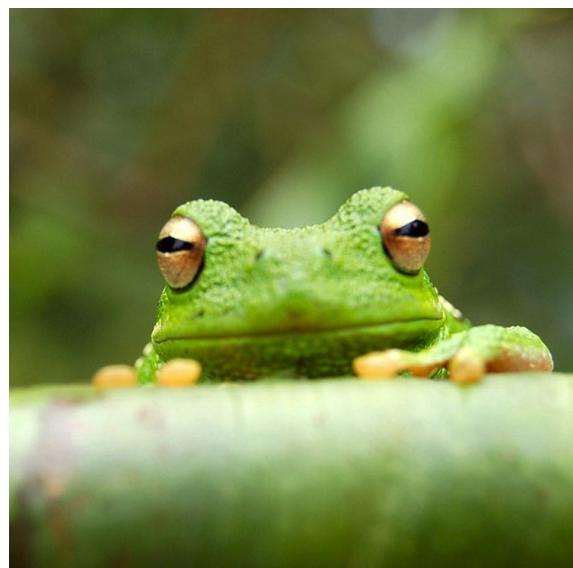
Παράρτημα **Δ'**

Δημιουργία Ευρετηρίου

Δείτε το περιεχόμενο του αρχείου appD.tex για τρόπους ορισμού ελληνικών και ξενόγλωσσων όρων ευρετηρίου.

Εισαγωγή Εικόνων

Δείτε το περιεχόμενο του αρχείου appE.tex για τον τρόπο εισαγωγής εικόνων.



Εικόνα E.1: Βάτραχος

Βιβλιογραφία

- [1] *A Rapid Increase in IoT Adoption - Manufacturing IoT in 2023.* <https://ubisense.com/a-rapid-increase-in-iot-adoption-manufacturing-iot-in-2023/>.
- [2] *Internet of Things (IoT) Statistics and Facts for 2024.* <https://www.demandsage.com/internet-of-things-statistics/>.
- [3] Frederic Chaxel Kais Mekki, Eddy Bajic και Fernand Meyer. *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment.* *ICT Express*, 5(1):11–7, 2019.
- [4] Anna Ukovich. *NB-IoT Explained: What Is It, and How Does It Work?* <https://www.telit.com/blog/nb-iot-new-cellular-standard-means-business/>, 2019.
- [5] Zipit Wireless. *LTE Cat-M1 Explained: Pros and Cons of LTE-M for IoT Devices.* <https://www.zipitwireless.com/blog/lte-cat-m1-explained-pros-and-cons-of-lte-m-for-iot-devices>, 2023.
- [6] Gurudutt Hosangadi, Dandan Wang και Anil Rao. *System Design Considerations For Internet Of Things (IoT) With Category-M Devices In LTE Networks.* *arXiv preprint arXiv:1902.00408*, 2019.
- [7] Semtech Corporation. *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview.* <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>, 2021.
- [8] Saft Batteries. *The impact of communication technology protocol on your IoT application's power consumption.* <https://saft.com/en/energizing-iot/impact-communication-technology-protocol-your-iot-application%E2%80%99s-power-consumption>, 2023.
- [9] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melià-Seguí και Thomas Watteyne. *Understanding the Limits of LoRaWAN.* *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [10] GSMA. *Mobile IoT Deployment Guide.* <https://www.gsma.com/smartmobility/wp-content/uploads/2022/10/Mobile-IOT-Deployment-Guide-October-2022-1-1.pdf>, 2022.
- [11] LoRa Alliance. *LoRa Alliance Issues 2023 Annual Report Highlighting LoRaWAN Maturity, Robust Adoption, and Diversity of End-to-End Solutions.* <https://lora-alliance.org/lora-alliance-press-release/lora-alliance-issues-2023-annual-report-highlighting-lorawan-maturity-robust-adoption-and-diversity-of-end-to-end-solutions/>, 2023.

- [12] Semtech Corporation. *A Brief History of LoRa®: Three Inventors Share Their Personal Story at The Things Conference*. <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference>, 2020.
- [13] The Things Network. *Spreading Factors*. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.
- [14] Semtech Corporation. *AN1200.22 LoRa Modulation Basics*. Τεχνική Αναφορά με αριθμό, Semtech Corporation, 2015.
- [15] The Things Network. *New LoRa World Record: 1336 km! (830 mi)*. <https://www.thethingsnetwork.org/article/new-lora-world-record-1336-km-830-mi>, 2023.
- [16] Kamil Staniec και Michał Kowal. *LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions*. *Wireless Communications and Mobile Computing*, σελίδες 1-10, 2018.
- [17] The Things Industries. *The Things Industries - Empowering Global IoT Connectivity*. <https://www.thethingsindustries.com/>, 2025.
- [18] Ε. Ανδρουλάκη. *Υδηποίηση Ενεργού Μηχανισμού σε Σύστημα Ομότιμων Βάσεων*. Πτυχιακή εργασία, KDBS Lab, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2005.
- [19] M. Goossens, F. Mittelbach και A. Samarin. *The LaTeX Companion*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 9η έκδοση, 1993.
- [20] I. Κάβουρας. *Συστήματα Υπολογιστών*. Κλειδάριθμος, Αθήνα, 3η έκδοση, 1991.
- [21] I. Liaperdos, L. Dermentzoglou, A. Arapoyanni και Y. Tsiatouhas. *Fault Detection in RF Mixers Combining Defect-Oriented and Alternate Test Strategies*. *26th Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, San Sebastian, Spain, 2011.
- [22] Z. Καούδη. *Πρότυπο Σύστημα Αποδήκευσης και Διαχείρισης Σχημάτων RDFS*. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.
- [23] Z. Λάσκαρη. *Κοινωνική Ανάλυση των Ταινιών της Finos Films*. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
- [24] Z. Κουρούκλη. *Κατανεμημένα Συστήματα*. Διδακτορική Διατριβή, ΤΕΙ Πελοποννήσου, 2013.
- [25] P. Viswanathan, G. Winner και P. Vyas. *Convenient Provisioning of Embedded Devices with WiFi Capability*. Δίπλωμα Ευρεσιτεχνίας US Patent 8,665,744, 2014.

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια

βλπ	βλέπε
κ.λπ.	και λοιπά
κ.ο.κ	και ούτω καθεξής
ΤΕΙ	Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
BPF	Band Pass Filter

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

Απόδοση

αδερφός
αμεταβλητότητα
ανάκτηση πληροφορίας
αντιμεταθετικότητα
απόγονος
απορρόφηση
βάση δεδομένων
γνώρισμα
διαπροσωπεία
διαφορά
δικτυακός κατάλογος
δικτυωτή δομή
δομικές επερωτήσεις
δομικές σχέσεις
δομικό σχήμα
εγκυρότητα
ένωση

Ξενόγλωσσος όρος

sibling
idempotency
information retrieval
commutativity
descendant
absorption
database
attribute
interface
difference
portal catalog
lattice
structural queries
structural relationships
schema
validity
union

