



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη για εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυα LoRa

Βλάμης Θεόδωρος
Α.Μ. 4414

Επιβλέπων
Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων
Απόστολος Γκάμας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Μέλη Επιτροπής Αξιολόγησης
Καθηγητής, Γαροφαλάκης Ιωάννης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Βλάχος Κυριάκος

Περίληψη

Το “Διαδίκτυο των Πραγμάτων” (“Internet of Things” – IoT) είναι ένας από τους όρους που έχουν συγκεντρώσει την προσοχή τα τελευταία χρόνια. Αποτελεί την υλοποίηση μιας παγκόσμιας δομής μέσω τις οποίες διασυνδέονται συσκευές και υπηρεσίες. Βρίσκουμε όλο και περισσότερα «πράγματα» που συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα ή μπορούν να ελέγχονται από απόσταση, χρησιμοποιώντας το Διαδίκτυο. Η επικοινωνία Long Range (LoRa) προτείνεται για την υλοποίηση της σύνδεσης των προαναφερθεισών συσκευών. Προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής WAN χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας με εύρος αρκετών χιλιομέτρων, ενώ το Bluetooth Low Energy (BLE) επικοινωνεί μόνο σε μικρές αποστάσεις, αλλά καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ισχύ. Το LoRa δίνει στον πομπό ένα εύρος από μεταβλητές επικοινωνίας (κεντρική συχνότητα, συντελεστής διάδοσης, εύρος ζώνης και ρυθμούς κωδικοποίησης). Σε αυτή την εργασία, καθώς η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι το κύριο μέλημα, μελετάμε στοιχεία που έχουν αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας μαζί με αλγόριθμους εξοικονόμησης ενέργειας. Η προσομοίωση των δικτύων LoRa είναι εξέχουσας σημασίας, διότι παρέχει τη δυνατότητα να σχεδιαστεί και να αξιολογηθεί μια LoRa εφαρμογή, χωρίς τον κίνδυνο άσκοπων δαπανών για μη υλοποιήσιμες εφαρμογές ή πριν να προχωρήσουμε στην πραγματική υλοποίηση του συστήματος. Η κατανάλωση ενέργειας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατάλληλη παραμετροποίηση των συστημάτων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη βελτιστοποίησή της. Αφού παρουσιάσουμε διάφορους προσομοιωτές, που αναπτύχθηκαν για το σκοπό αυτό, εκτελούμε μια σειρά από σενάρια προσομοίωσης σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας.

Abstract

The Internet of Things (IoT) is one of the terms that have been given an increased focus during the last years. It outlines the concept of having a global structure with interconnected devices and services. We find more and more “things” that collect and exchange data or can be remotely controlled, using the Internet. Long Range (LoRa) communication has been proposed to implement the connection of the aforementioned devices. It offers the ability to build low-power, long-range WANs with a range of several kilometers, while Bluetooth Low Energy (BLE) only communicates over short distances, but consumes significantly less power. LoRa provides for this reason a range of communication options (center frequency, spreading factor, bandwidth, and coding rates) from which a transmitter can choose. In this dissertation, since low energy consumption is the main concern, we study components that have an impact on energy consumption alongside with energy saving algorithms. Why do we need to simulate LoRa networks? Through the simulations we could design and analyze the LoRa based application, without the risk of non-necessary, high-cost implementations. Energy consumption of the wireless devices is inextricably linked with the appropriate customization of the involved systems. . After presenting various simulators, developed for this purpose, we execute a number of simulation scenarios regarding energy consumption.

Περιεχόμενα

Μελέτη για εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυα LoRa	1
Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα.....	4
Συνομογραφίες.....	7
Κατάλογος Εικόνων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή	12
1.1. Σκοπός της εργασίας.....	12
1.2. Δομή της εργασίας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things)	15
2.1 Τι είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων	15
2.2 Η αρχή του Internet of Things (IoT)	17
2.3 Διαδικτυακά μοντέλα επικοινωνιών στο διαδίκτυο των πραγμάτων	20
2.3.1 Μοντέλο Επικοινωνίας συσκευής σε συσκευή (Device – to – Device).....	21
2.3.2 Μοντέλο Επικοινωνίας συσκευής - σε υπολογιστικό νέφος (Device-to-cloud)	22
2.3.3 Μοντέλο επικοινωνίας συσκευής σε πύλη (Device – to – Gateway)	24
2.3.4 Μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων.....	27
2.3.5 Μοντέλο επικοινωνίας συσκευής Back-end	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Τεχνολογίες Δικτύων του IOT	30
3.1 Τεχνολογίες μικρής εμβέλειας.....	30
3.1.1. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ WPAN–(Wireless Personal Area Networks).....	30
3.1.2. Τοπολογίες Δικτύων WPAN	31
3.1.3. Πρότυπα του WPAN.....	37
3.1.3.1 LR WPAN - WPAN χαμηλής ταχύτητας (IrDA, Bluetooth και ZigBee)	37
3.1.4. Η ομάδα IEEE 802.15 της Επιτροπής Προτύπων Δικτύου.....	38

3.2 Χαρακτηριστικά των δικτύων LPWAN	41
3.2.1. Ενεργειακή Απόδοση	41
3.2.2. Μεγάλη Εμβέλεια	41
3.2.3. Δυνατότητα Κλιμάκωσης	42
3.2.4. Χαμηλό κόστος.....	43
3.2.5. Διαχείριση Συγκρούσεων του Φάσματος.....	44
3.2.6. Ολοκλήρωση	44
3.3 Προτεινόμενες Τεχνολογίες των δικτύων LPWAN.....	45
3.3.1. NB-IoT.....	45
3.3.1.1 Πλεονεκτήματα	47
3.3.1.2 Μειονεκτήματα.....	47
3.3.2. Τεχνολογία LoRa.....	48
3.3.2.1 Πλεονεκτήματα	50
3.3.2.2 Μειονεκτήματα.....	50
3.3.2.3 LoRa Modules.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Αλγόριθμοι Εξοικονόμησης Ενέργειας.....	53
4.1 Η Ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας στο IoT	54
4.2 Εξοικονόμηση στη συσκευή.....	56
4.2.1 Μπαταρία κι απόδοση.....	56
4.2.2 Λύσεις προερχόμενες από την μπαταρία αυτούσια	56
4.2.3 Εξοικονόμηση στη συσκευή (Σύστημα Search and Rescue)	57
4.3 Ο ADR Μηχανισμός.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Επισκόπηση διαθέσιμων προσομοιωτών	61
5.1 Η ανάγκη για προσομοίωση	61
5.1.1 Συνοπτική ανάλυση των εξομοιωτών	63
5.1.1.1 PHY SIMULATOR.....	63
5.1.1.2 FLoRa.....	64
5.1.1.3 NS3	65
5.1.1.4 LoRaSim.....	67

5.1.2 Συνοπτική συγκριτική των εξομοιωτών	68
5.1.3 Μοντελοποίηση της προσομοίωσης.....	70
5.2 Δομή του εξομοιωτή LoRaSim	72
5.2.1 Χαρακτηριστικά LoRaSim	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Πειράματα	75
6.1 Περιγραφή του πειράματος.....	75
6.2 Σενάρια Εξομοίωσης	82
6.2.1 Σενάριο I.....	84
6.2.2 Σενάριο II.....	87
6.2.3 Σενάριο III.....	90
6.2.4 Σενάριο IV.....	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- Σύνοψη - Συμπεράσματα, Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	96
7.1 Σύνοψη - Συμπεράσματα	96
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	97
Παράρτημα: loraDir.py.....	100
Παράρτημα: NEC Δοκιμαστικό Πείραμα.plt	111
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	116

Συντομογραφίες

IoT	Internet of Things
BAN	Body Area Network
CCS	Chirp Spread Spectrum
DER	Data Extraction Rate
IAB	Internet Activities Board
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
LoRA	Long Range
LTE	Long-Term Evolution
LPWAN	low-power wide-area network
ADR	Adaptive Data Rate
M2M	Machine-to-Machine
NB-IoT	Narrow Band – Internet of Things
NEC	Network Energy Consumption
RFC	Request for Comments
RFID	Radio Frequency Identification
SAR	Search And Rescue
SF	Spreading Factor
TTN	The Internet of Things Network
UTMS	Universal Mobile Telecommunications System
VoLTE	Voice over LTE
UML	Unified Modeling Language
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Networks
FLoRa	Framework for LoRa

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τέλος της προπτυχιακής φοίτησης μου στο τμήμα των Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι **«Μελέτη για εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυα LoRa»**.

Πριν όμως τη παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας για το αντικείμενο που μελετήσαμε και των συμπερασμάτων στα οποία καταλήξαμε, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Μπούρα, καθηγητή του ΤΜΗΥΠ και Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου διπλωματική εργασία. Η καθοδήγησή του ήταν καθοριστική για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας και την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Συνακόλουθα, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον κ Γκάμα Απόστολο, , του οποίου οι πολύτιμες γνώσεις, συμβουλές, τα σχετικά σχόλια με βοήθησαν σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ επιθυμώ εγκάρδια να εκφράσω στον κ Κατσαμπίρη Σαλγάδο Σπυρίδων Ανισέτο, του οποίου η συμβολή και βοήθεια ήταν παραπάνω από σημαντική και κρίσιμη για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Τον ευχαριστώ για την υπομονή του και την ανιδιοτελή βοήθεια όποτε του ζητήθηκε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια, καθώς αν δεν είχα την συμβολή και την ουσιαστική στήριξή τους σε αυτή μου την προσπάθεια συνάμα με την υπομονή και κατανόησή

τους δε θα είχα φτάσει – έστω και καθυστερημένα – στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Πάτρα 2021,
Βλάμης Θεόδωρος

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1- Το ξεκίνημα του <i>Internet Of Things</i> (2008-2009)	18
Εικόνα 2- Μοντέλο επικοινωνίας <i>device-to-device</i>	21
Εικόνα 3 - Μοντέλο επικοινωνίας <i>Device-to-cloud</i>	23
Εικόνα 4 - Μοντέλο επικοινωνίας <i>Device-to-gateway</i>	25
Εικόνα 5 - Μοντέλο επικοινωνίας <i>Back-end data sharing</i>	29
Εικόνα 6 - Τοπολογίες δικτύων <i>WPAN</i>	32
Εικόνα 7- <i>IEEE 802.15 WPAN Working Group</i>	33
Εικόνα 8 - Εύρος τιμών έναντι μέγιστου ρυθμού δεδομένων των διαφόρων ασύρματων δικτύων	35
Εικόνα 9 - Πρότυπα <i>IEEE</i> για τα <i>WPANs</i>	36
Εικόνα 10 - Συγκριτική <i>LoRa</i> Και <i>IoT</i>	51
Εικόνα 11- <i>XRange SX1272 LoRa RF module</i>	53
Εικόνα 12 - Αναπαράσταση σεναρίου <i>Search and Rescue Network</i>	58
Εικόνα 13 - Παραδείγματα εξομοίωσης σε <i>Phy Simulator</i>	64
Εικόνα 14 - <i>Framework for LoRa (FLoRa)</i> γραφική διεπαφή	65
Εικόνα 15 - Μοντέλο <i>LoRaWAN</i> σε <i>UML</i>	66
Εικόνα 16 - Οπτικοποίηση εξομοίωσης <i>NS-3 module</i> μέσω του <i>animator NetAnim</i>	67
Εικόνα 17 - Παραγόμενη γραφική παράσταση από εξομοίωση σε <i>LoRaSim</i>	68
Εικόνα 18 – Διαδικασία εξομοίωσης	71
Εικόνα 19 – Εκτέλεση δοκιμαστικού σεναρίου.....	76
Εικόνα 20 - Παραγόμενη γραφική παράσταση από το δοκιμαστικό σενάριο σε <i>LoRaSim</i>	77

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Γενικά χαρακτηριστικά ασυρμάτων δικτύων	34
Πίνακας 2 - Το πρότυπο IEEE 802.15 – TaskGroup (TG3).....	36
Πίνακας 3 - Παράμετροι της διαχείρισης ενέργειας.....	59
Πίνακας 4 - <i>Simulators URL</i>	63
Πίνακας 5 - Συγκριτική των εξομοιωτών.....	69
Πίνακας 6 – Παράμετροι πρώτου δοκιμαστικού σεναρίου	76
Πίνακας 7 – Αποτελέσματα πρώτου δοκιμαστικού σεναρίου	77
Πίνακας 8 - Παράμετροι δεύτερου δοκιμαστικού σεναρίου	78
Πίνακας 9 – Αποτελέσματα δεύτερου δοκιμαστικού σεναρίου	79
Πίνακας 10 – Παράμετροι δοκιμαστικών σεναρίων	79
Πίνακας 11– Προκαθορισμένοι παράμετροι πειραματικών σεναρίων	83
Πίνακας 12 – Τιμές παραμέτρων Σεναρίου I	84
Πίνακας 13 – DER Σενάριο I	85
Πίνακας 14 - Τιμές παραμέτρων Σεναρίου II	87
Πίνακας 15 – DER σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο II	87
Πίνακας 16 – NEC σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο II	88
Πίνακας 17 - Τιμές παραμέτρων Σεναρίου III	90
Πίνακας 18 - DER σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο III	90
Πίνακας 19 - NEC σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο III	91
Πίνακας 20 - Τιμές παραμέτρων Σεναρίου IV.....	93
Πίνακας 21 - <i>Data Extraction Rate</i> σε σχέση με το <i>payload</i> , Σενάριο IV.....	93
Πίνακας 22 - NEC σε σχέση με <i>payload</i> , Σενάριο IV.....	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

1.1. Σκοπός της εργασίας

Τα τελευταία χρόνια η χρήση το Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things – IoT), αποτελεί μια πραγματικότητα που συνεχώς αναπτύσσεται και εφαρμόζεται σε όλους τους χώρους. Ο όρος IoT περιλαμβάνει χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για να ορίσει τεχνολογίες και αντικείμενα που "μιλούν" μεταξύ τους. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων αποτελείται από συσκευές – όπως απλούς αισθητήρες έως smartphones, άλλες σταθερές ή φορητές συσκευές που συνδέονται μεταξύ τους. Συνδυάζοντας αυτές τις συνδεδεμένες συσκευές με αυτοματοποιημένα συστήματα, είναι δυνατό να συλλέγονται και να αναλύονται πληροφορίες και να υλοποιούνται εφαρμογές που να βοηθούν κάποιον άνθρωπο ή άλλη συσκευή ή το σύνολο ενός οργανισμού με μια συγκεκριμένη ή πολλαπλές εργασίες ή να παράγεται νέα γνώση που να οδηγεί σε συστήματα που σκέφτονται και λειτουργούν με πιο έξυπνο τρόπο. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα σύνολο συσκευών, δεδομένα και εφαρμογών.

Η τεχνολογίες των IoT οδηγούν σε πιο εξειδικευμένα δίκτυα με νέες απαιτήσεις όπως η χρήση συσκευών χαμηλής κατανάλωσης. Δίκτυα σαν τα LPWAN (Low Power Wide Area Network), γίνονται ιδιαίτερα ανταγωνιστικά και δημοφιλή Το LPWAN αποτελεί μια κατηγορία ασύρματου δικτύου. Σκοπός και βάση του δικτύου είναι η υλοποίηση επικοινωνιών σε μεγάλη εμβέλεια, βελτιστοποιώντας το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των συσκευών που συνδέονται μεταξύ τους. Η βασική διαφορά με ένα WAN, που έχει αναπτυχθεί προκειμένου να πραγματοποιούνται μεγαλύτερης κλίμακας συνδέσεις και υπηρεσίες, μεταφέροντας αντίστοιχα μεγαλύτερη ποσότητα δεδομένων και απαιτώντας μεγαλύτερη ισχύ, έγκειται στα εξής στοιχεία: η χαμηλή ισχύς, ο

χαμηλός ρυθμός μεταφοράς bit και η προβλεπόμενη χρήση. (Nelson Pinto, Dario Cruz, Jânio Monteiro, Cristiano Cabrita, 2019)

Η πρόκληση λοιπόν που αντιμετωπίζουμε για την ορθότερη λειτουργία των IoT είναι η διαχείριση της ενέργειας στο σύνολο του δικτύου αλλά και τις κινητές συσκευές που συνήθως λειτουργούν με μπαταρία. Σημαντική τεχνολογία είναι το LoRa, μέσω του οποίου μπορεί να γίνει μετάδοση δεδομένων σε μεγάλη απόσταση με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη απόδοσης δικτύων LoRa, η παρουσίαση της τρέχουσας κατάστασης, η παρουσίαση των διαθέσιμων αλγορίθμων αλλά και με χρήση πειραμάτων προτάσεις για βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός δικτύου LoRa καθώς και μελέτη της δυνατότητας για επεκτασιμότητα.

1.2. Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία συντελείται από επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση της έννοιας του IoT, των χαρακτηριστικών του, των μοντέλων επικοινωνίας, της αρχιτεκτονικής και των εφαρμογών του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μέσω μιας σύντομης "Ιστορικής" αναδρομής γίνεται αναφορά στην απαρχή του διαδικτύου των πραγμάτων. Δίνεται μια περιγραφή για το τι είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων, με παραδείγματα εφαρμογών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Συνακόλουθα, αναφέρονται και περιγράφονται τα διαδικτυακά μοντέλα επικοινωνιών στο διαδίκτυο των πραγμάτων.

Στο κεφάλαιο 3, θα γίνει αναφορά και περιγραφή των ασύρματων ασύρματες τεχνολογιών, από τις οποίες υποστηρίζεται το IoT. Ειδικότερα, θα παρουσιαστεί

συνοπτικά το σύνολο των διαθέσιμων τρόπων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η διασύνδεση αυτών των συσκευών. Γίνεται αναφορά σε πρωτόκολλα διασύνδεσης συσκευών μικρής εμβέλειας όπως WiFi, Bluetooth, για παράδειγμα, έως κι ευρύτερης εμβέλειας όπως τα κινητά δίκτυα. Θα παρουσιαστούν εκτενέστερα τα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (Low-power wide-area network, LPWAN). Θα γίνει επισκόπηση των επιμέρους χαρακτηριστικών τους και θα ακολουθήσει περιγραφή προτεινόμενων τεχνολογιών της εν λόγω κατηγορίας. Συνακόλουθα, θα μελετηθεί σε βάθος το πρωτόκολλο LoRa, σε ότι αφορά τον τρόπο λειτουργίας του, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζει και μια ενδεικτική αναφορά modules του εμπορίου, που έχουν υιοθετήσει την τεχνολογία φάσματος LoRa.

Στο κεφάλαιο 4 καταδεικνύεται και περιγράφεται η ανάγκη για εξοικονόμηση ενέργειας στο IoT. Στο μοτίβο αυτό αναφέρονται ενδεικτικές λύσεις που αφορούν τα δίκτυα LoRa. Γίνεται περιγραφή για το πώς επιτυγχάνεται εξοικονόμηση της ενέργειας με αλγόριθμους και λύσεις από την ίδια τη συσκευή. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται η παραμετροποίηση ενός SAR συστήματος, με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση ενέργειας και παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε ένα τέτοιο σύστημα. Συνακόλουθα, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του μηχανισμού ADR, ως ενός τρόπου για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας της συσκευής ένα δίκτυο LoRa.

Ακολουθεί, στο κεφάλαιο 5, μια σύντομη περιγραφή για τους εξομοιωτές δικτύων LoRa που υπάρχουν γενικά διαθέσιμοι. Θα γίνει ανάλυση της ανάγκης για εξομοίωση. Θα παρουσιαστεί το μοντέλο μιας εξομοίωσης, μια ενδεικτική σύγκριση των χαρακτηριστικών των αναφερόμενων εξομοιωτών και η δομή ενός από αυτούς, στον οποίο θα διεξάγουμε τα πειράματα.

Στο κεφάλαιο 6 θα γίνει η περιγραφή των σεναρίων εξομοίωσης, που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής, που θα περιλαμβάνει τα δεδομένα, τα εξαγόμενα αποτελέσματα καθώς και τη διαδικασία εκτέλεσής τους.

Εν κατακλείδι, στο κεφάλαιο 7, θα παρουσιαστεί μια σύνοψη της παρούσας εργασίας, θα παρατεθούν τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μέσα από την μελέτη αυτού του μεγάλου συγχρόνου κλάδου και θα γίνει μια παρουσίαση των ανοικτών ερευνητικών και πρακτικών θεμάτων τα οποία θα αποτελέσουν το αντικείμενο έρευνας και μελέτης στα επόμενα χρόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things)

2.1 Τι είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων

Στην ερώτηση τι είναι το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things – IoT) θα μπορούσαμε να απαντήσουμε ότι συνιστά ένα οικοσύστημα στο οποίο οι υφιστάμενες εφαρμογές κι υπηρεσίες κατευθύνονται από δεδομένα που συλλέγονται από συσκευές που αλληλοεπιδρούν με τον φυσικό κόσμο. Στο Διαδίκτυο των πραγμάτων, οι συσκευές και τα αντικείμενα έχουν άμεση επικοινωνία με το Διαδίκτυο είτε με μια ευρείας περιοχής δίκτυο, είτε με ένα τοπικό δίκτυο.

Η επικοινωνία των συσκευών μπορεί να είναι μόνο μεταξύ τους , με κεντρικό υπολογιστή ή και με άνθρωπο που δίνει εντολές ή ορίζει διαδικασίες που θα εκτελεστούν. Οι επικοινωνίες μεταξύ μηχανών – συσκευών ονομάζονται και Machine to Machine (M2M), οι οποίες χαρακτηρίζονται κυρίως από αυτόνομη επικοινωνία δεδομένων μεταξύ συσκευών με ελάχιστη ή καθόλου ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Σε αυτήν την περίπτωση, το M2M δεν απαιτεί την ανθρώπινη διαμεσολάβηση επειδή η νοημοσύνη είναι ενσωματωμένη στο σύστημα και υπάρχει αυτοματοποιημένη απόφαση και δράση.

Συστήματα ή συσκευές που χρησιμοποιούν πληροφορίες παρεχόμενες από αισθητήρες μπορούμε να πούμε ότι συντελούν το ευρύτερο κάδρο του IoT. Ο λόγος αυτός οδήγησε και στην εφαρμογή του όρου Internet of Everything. Ο όρος Internet of Everything είναι ίσως πιο ακριβής, καθώς οι αισθητήρες και οι άλλες συσκευές που συνδέονται στο Διαδίκτυο δεν συνδέονται μόνο με πράγματα, αλλά και παρακολουθούν την υγεία, τη θέση και τις δραστηριότητες ανθρώπων και ζώων, την κατάσταση στο φυσικό περιβάλλον, την ποιότητα των τροφίμων και πολλά άλλα που δεν θα θεωρούνται όλα «πράγματα».

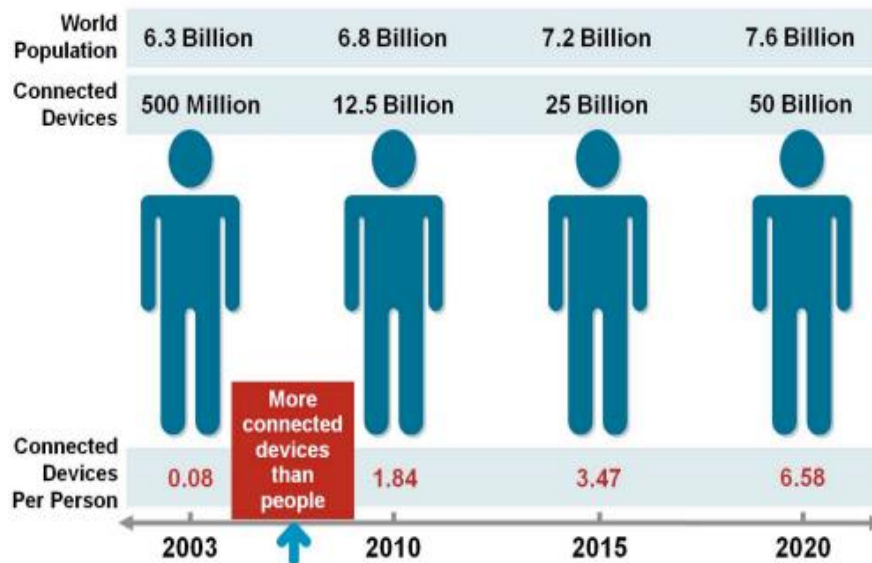
Το IoT υπάρχει ως μέρος ενός αναδυόμενου τεχνολογικού οικοσυστήματος που περιλαμβάνει cloud τεχνολογίες και ανάλυση δεδομένων και σε πολλές περιπτώσεις big data. Αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μεταξύ ατόμων και αντικειμένων σε περιβάλλοντα που υπάρχουν υπολογιστές ή κεντρική εξυπηρετητές και μπορούν να επωφεληθούν από νέες και καινοτόμες υπηρεσίες που παρέχονται μέσω του cloud. Οι υφιστάμενες διασυνδεδεμένες συσκευές παράγουν σημαντικές ποσότητες δεδομένων, τα οποία συλλέγονται κι αναλύονται μέσω ειδικών τεχνικών. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν στην καινοτομία, την έρευνα και το μάρκετινγκ, καθώς και να βελτιστοποιήσουν τις υπηρεσίες που το δημιούργησαν.

2.2 Η αρχή του Internet of Things (IoT)

Μετά από εξέταση δεδομένων δρομολόγησης στο διαδίκτυο, χωρισμένα σε κατηγορίες ανά 6 μήνες 12/2001-12/2006, τον Ιανουάριο του 2009 μια ομάδα Κινέζων επιστημόνων κατέληξαν στον συμπέρασμα ότι το μέγεθος του διαδικτύου διπλασιάζεται κάθε 5,3 χρόνια. Ο αριθμός αυτός συνυπολογιζόμενος και συνδυαζόμενος με τον πληθυσμό του πλανήτη και με το πλήθος των συνδεδεμένων στο διαδίκτυο συσκευών το 2003 (500 εκατομμύρια, όπως καθορίστηκε από τη Forrester Research), αποτέλεσε τη βάση στην οποία η Cisco IBSG στηρίχθηκε για να καταδείξει ανά άτομο πόσες συνδεδεμένες συσκευές αναλογούν (Evans, 2011).

Με την εκτενέστερη ανάλυση αυτών των δεδομένων, η Cisco IBSG τοποθετεί την απαρχή του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things- IoT) χρονιά μεταξύ του 2008 και του 2009 (εικόνα 1). Το IoT απρόσκοπτα συνεχίζει την εξέλιξη του με ραγδαίους ρυθμούς. (Chui et al., 2015).

Figure 1. The Internet of Things Was "Born" Between 2008 and 2009



Source: Cisco IBSG, April 2011

Εικόνα 1- Το ξεκίνημα του Internet Of Things (2008-2009)

Πηγή: Cisco IBSG (2011)

Η εξέλιξη κι ενσωμάτωση στην καθημερινότητα των IoT συσκευών, "γέννησε" την ανάγκη και κατ' επέκταση την πραγματοποίηση διεξαγωγής έρευνας, αναφορών, επιστημονικών συνεδρίων άρθρων τόσο για το αποτύπωμα της τεχνολογικής επανάστασης στην κοινωνία, στην οικονομία με τη δημιουργία νέων επιχειρηματικών ευκαιριών όσο και για τα θέματα ιδιωτικότητας κι ασφάλειας που σίγουρα εγείρει η λειτουργία των έξυπνων συσκευών.

Το Ίντερνετ των πραγμάτων (IoT) συνιστά πλέον μείζον ζήτημα στους τομείς της τεχνολογίας, της πολιτικής και των ερευνητικών κύκλων, καθώς συνδέεται άρρηκτα με ένα μεγάλο πλήθος δικτυωμένων αντικειμένων, συσκευών και αισθητήρων, στα οποία βρίσκει εφαρμογή η εξέλιξη στην υπολογιστική ισχύ, και μια δημιουργική εκμετάλλευση τη των δικτυακών διασυνδέσεων με στόχο την παροχή υπηρεσιών που προγενέστερα δεν είχαν καταστεί δυνατές.

Εξαρτήματα για οικιακούς αυτοματισμούς και οι συσκευές διαχείρισης ενέργειας, υλοποίησαν την ιδέα "του έξυπνου σπιτιού", παρέχοντας μεγαλύτερη σιγουριά σε θέματα ασφάλειας κι ενεργειακής κατανάλωσης.

Προσωπικές συσκευές IoT παρακολούθησης της υγείας (για παράδειγμα φορητές συσκευές ελέγχου διαβήτη) καθώς και τα διάφορα άλλα ιατρικά βοηθήματα που συνδέονται με το δίκτυο, αναβαθμίζουν τον τρόπο παροχής των υγειονομικών υπηρεσιών και κατ' επέκταση την ποιότητα ζωής των ασθενών. Το όραμα για την βελτίωση της ποιότητας ζωής ηλικιωμένων κι ανθρώπων με αναπηρίες, φαντάζει και είναι πιο βιώσιμο από ποτέ χωρίς να συνεπάγεται υπέρογκα κόστη.

Οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο, τα ευφυή συστήματα κυκλοφορίας, αισθητήρες διαμοιρασμένοι σε οδικά δίκτυα, αποτελούν την απαρχή των «έξυπνων πόλεων», με στόχο την αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας και φυσικά την αποσυμφόρηση. Γεωργική και βιομηχανική παραγωγή με πρόσβαση σε πλήθος πληροφοριών και τη χρήση αισθητήρων, δυνατότητες που προσφέρει με άλλα το για το IoT, μπορούν να βιώσουν τη δική τους πτυχή της "Επανάστασης της Πληροφορίας".

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, το IoT έχει εγείρει προκλήσεις και θέματα που χρήζουν έρευνας και γόνιμης διαχείρισης προκειμένου να μετουσιωθούν οι δυνατότητες σε οφέλη. Εταιρείες και ερευνητικοί φορείς παρουσίασαν ένα ευρύ

φάσμα δεδομένων σχετικά με τις εκτιμώμενες επιπτώσεις του IoT τόσο στο Internet και όσο και στην οικονομία, κατά τα επόμενα πέντε έως δέκα χρόνια.(Chi et al., 2015).

Η Cisco, για παράδειγμα, προβάλλει περισσότερα από 24 δισεκατομμύρια αντικείμενα συνδεδεμένα στο Internet μέχρι το 2019. Ωστόσο, η Morgan Stanley προβάλλει 75 δισεκατομμύρια δικτυακές συσκευές έως το 2020.³ Η Huawei κάνει λόγο για αύξηση των μεριδίων έως το 2025.⁴ Η McKinsey Global Institute προτείνει ότι οι οικονομικές επιπτώσεις της IoT στην παγκόσμια οικονομία μπορεί να φθάσουν τα \$ 3.9 σε 11,1 τρισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025,⁵ Ενώ η μεταβλητότητα των προβλέψεων καθιστά αμφίβολο έναν συγκεκριμένο αριθμό, συλλογικά ζωγραφίζουν μια εικόνα με σημαντική ανάπτυξη και επιρροή(Bradbury, 2015).

Μια άλλη οπτική για το IoT , είναι ως ένας τελεσφόρος, ευφυής κόσμος εξέλιξης κι ευκαιριών, με τη δυνατότητα διασύνδεσης και προσθήκης υπεραξιών σε όλες τις πτυχές της οικονομίας. Στον αντίποδα, κάποιοι το βλέπουν ως μέσο εποπτείας, παρείσφρησης στην ιδιωτικότητα και φαλκίδευσης των χρηστών (Danova et al., 2013).

Το IoT προκαλεί το ενδιαφέρον της Κοινωνίας του Ίντερνετ, από τη στιγμή που συνιστά ένα ραγδαία εξελισσόμενο μέσο αλληλοεπίδρασης οργανισμών και καταναλωτών-χρηστών, θίγοντας πτυχές της ιδιωτικότητας, της κοινωνίας και της οικονομίας. Αδιαμφισβήτητα, αυτή η ραγδαία εξελισσόμενη ανάπτυξη εφαρμογών διαδικτύου έχει αντίκτυπο στον τρόπο με τον οποί το Διαδίκτυο επηρεάζει τους χρήστες, εγείροντας ζητήματα και διαφορετικές πτυχές των υπαρχόντων προκλήσεων στις ανησυχίες των θεσμών, των φορέων, της τεχνολογίας, του κοινωνικοπολιτικού δικαίου. (Manyika et al., 2015).

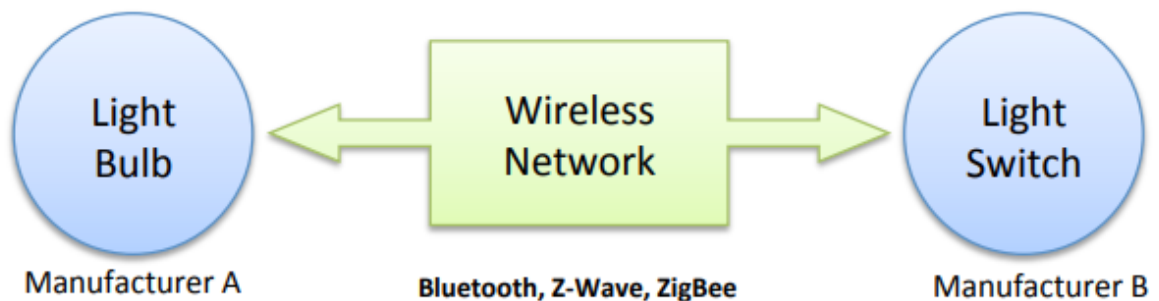
2.3 Διαδικτυακά μοντέλα επικοινωνιών στο διαδίκτυο των πραγμάτων

Από επιχειρησιακή σκοπιά, είναι χρήσιμο να σκεφτούμε πώς οι συσκευές IoT συνδέονται και επικοινωνούν από την άποψη των τεχνικών μοντέλων επικοινωνίας

τους. Τον Μάρτιο του 2015, το Συμβούλιο Αρχιτεκτονικής Διαδικτύου (IAB) εξέδωσε μια έγγραφη αναπαράσταση για τη δικτύωση έξυπνων αντικειμένων (RFC 7452), με σκοπό την περιγραφή ενός πλαισίου τεσσάρων κοινών μοντέλων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από συσκευές IoT. Στις επόμενους παραγράφους θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε διαθέσιμου μοντέλου επικοινωνίας στο πλαίσιο αυτό (Thierer et al., 2015).

2.3.1 Μοντέλο Επικοινωνίας συσκευής σε συσκευή (Device – to – Device)

Το μοντέλο επικοινωνίας συσκευής αποτελεί την περίπτωση όπου απουσιάζει η χρήση διακομιστή εφαρμογών. Οι συσκευές επικοινωνούν άμεσα, μεταξύ τους. Αυτό το πετυχαίνουν με τη χρήση διάφορων τύπων δικτύων. Σύνηθες σε αυτή την περίπτωση είναι και η χρήση πρωτοκόλλων. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν Bluetooth, Z-Wave, ή ZigBee4.



Εικόνα 2- Μοντέλο επικοινωνίας device-to-device

Πηγή: (Marsan, 2015)

Προκειμένου να λειτουργήσουν τα δίκτυα αυτά, χρησιμοποιούν κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας μέσω του οποίου καθιστούν ικανές τις συσκευές να αποστέλλουν εκατέρωθεν μηνύματα. Οι συσκευές και οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στα «έξυπνα σπίτια», κάμερες, αισθητήρες συναγερμών, «έξυπνοι»

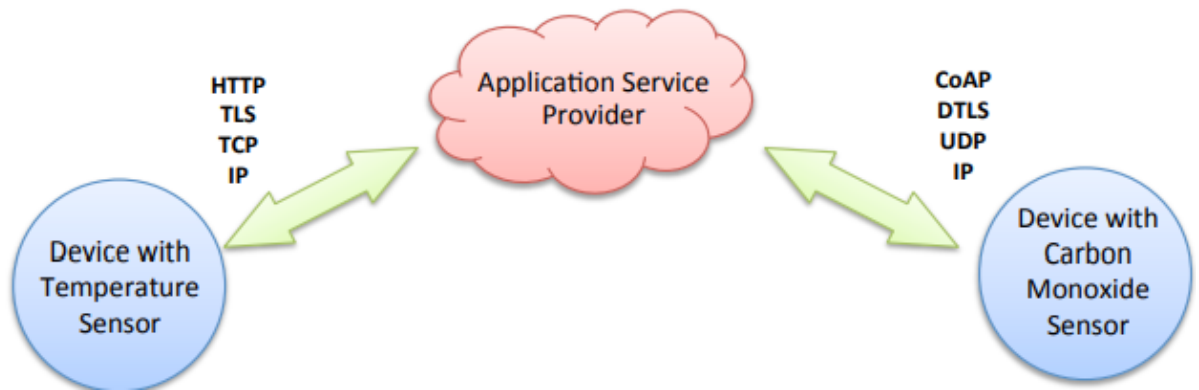
λαμπτήρες, αυτόματοι διακόπτες ρολών αποτελούν μια εφαρμογή του μοντέλου συσκευή-σε-συσκευή. Μικρή ποσότητα πληροφορίας, σε ότι αφορά τον όγκο των δεδομένων και σχετικά χαμηλές απαιτήσεις ταχύτητας.

Αυτή η προσέγγιση επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή αποτυπώνει πολλές από τις προκλήσεις διαλειτουργικότητας που εξετάζονται στη συνέχεια σε αυτή την εργασία. Όπως εξηγεί το άρθρο του περιοδικού IETF, "αυτές οι συσκευές έχουν συχνά άμεση σχέση, συνήθως διαθέτουν ενσωματωμένους μηχανισμούς ασφάλειας και εμπιστοσύνης, αλλά χρησιμοποιούν επίσης και μοντέλα δεδομένων συγκεκριμένων συσκευών που απαιτούν περιττές προσπάθειες ανάπτυξης από κατασκευαστές συσκευών". Πώς θα μπορούσε να ερμηνευτεί σε διαφορετικό επίπεδο; Ως η ανάγκη για επένδυση σε μεθόδους που αφορούν δεδομένα εξειδικευμένα, προσανατολισμένα στη συσκευή, σε αντιδιαστολή με άλλου τύπου προσεγγίσεις που συνεπάγονται συμβατικές μορφές. Το ζήτημα που επιλύεται με αυτή την προσέγγιση είναι η ενδεχόμενη ασυμβατότητα στην επικοινωνία, που μπορεί να παρουσιάσουν συσκευές που χρησιμοποιούν τα υφιστάμενα πρωτόκολλα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η ασυμβατότητα μεταξύ συσκευών Z-Wave και ZigBee, γεγονός που αναγκάζει τον τελικό χρήστη να επιλέξει αποκλειστικά συσκευές της μιας ή της άλλης κατηγορίας, θέτοντας έτσι έναν περιορισμό στις εναλλακτικές του. (Centenaro et al., 2016).

2.3.2 Μοντέλο Επικοινωνίας συσκευή - σε υπολογιστικό νέφος (Device-to-cloud)

Σε ένα μοντέλο επικοινωνίας «συσκευή - σε υπολογιστικό νέφος (Device-to-cloud)», πραγματοποιείται απευθείας σύνδεση μιας υπηρεσίας νέφους στο Internet, όπως ένας πάροχος υπηρεσιών εφαρμογών, για την ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου και την κυκλοφορία δεδομένων διαχείρισης, με μια συσκευή IoT. Αυτή η προσέγγιση

εκμεταλλεύεται συχνά τους υπάρχοντες μηχανισμούς επικοινωνίας όπως οι παραδοσιακές ενσύρματες συνδέσεις Ethernet ή Wi-Fi για να δημιουργήσει μια σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του δικτύου IP, η οποία τελικά συνδέεται με την υπηρεσία cloud. Ένα τέτοιο μοντέλο παρουσιάζεται στην εικόνα 3:



Εικόνα 3 - Μοντέλο επικοινωνίας *Device-to-cloud*

Πηγή: (Marsan, 2015)

Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται από ορισμένες δημοφιλείς συσκευές IoT για καταναλωτές όπως το Nest Labs Learning Thermostat και στις τηλεοράσεις της Samsung SmartTV. Στην περίπτωση του Nest Learning Thermostat, η συσκευή μεταδίδει δεδομένα σε μια βάση δεδομένων cloud όπου τα δεδομένα μπορούν να υποστούν επεξεργασία για την ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας στο σπίτι. Επιπλέον, αυτή η σύνδεση υπολογιστικού νέφους επιτρέπει στο χρήστη να αποκτά απομακρυσμένη πρόσβαση στο θερμοστάτη μέσω ενός smartphone ή διεπαφής Web και υποστηρίζει επίσης ενημερώσεις λογισμικού στον θερμοστάτη.

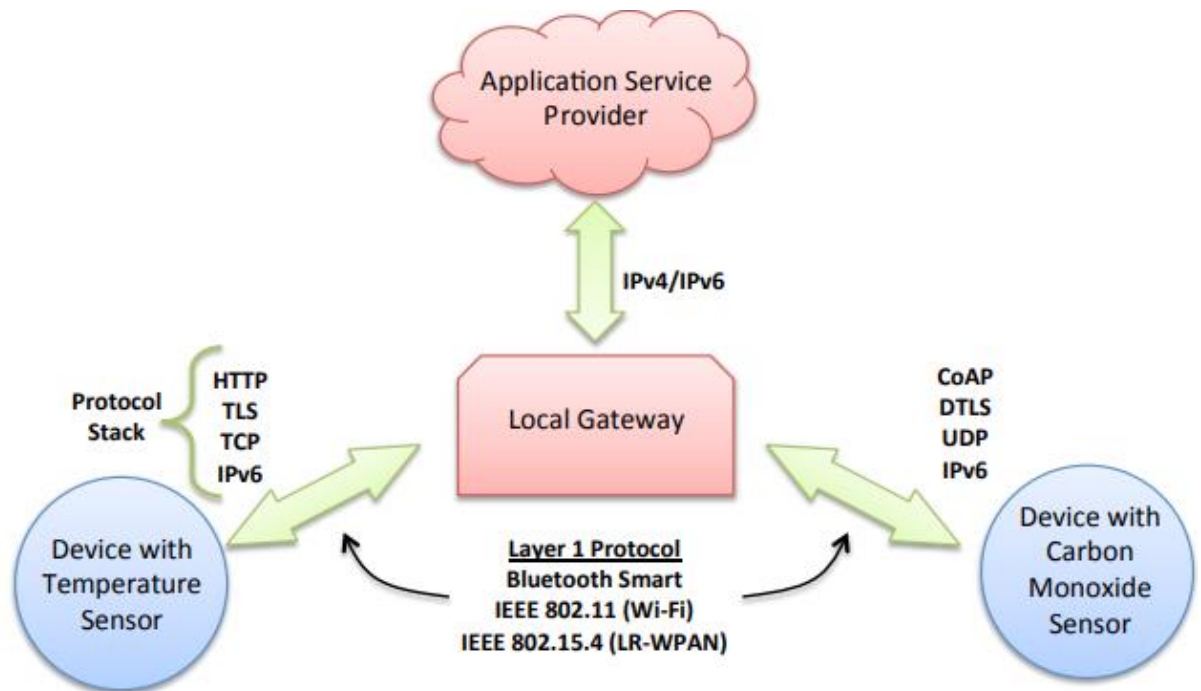
Ομοίως με την τεχνολογία Samsung SmartTV, η «έξυπνη» τηλεόραση χρησιμοποιεί μια σύνδεση στο Διαδίκτυο για τη μετάδοση πληροφοριών προβολής από τον χρήστη στην Samsung για ανάλυση και για την ενεργοποίηση των διαδραστικών λειτουργιών αναγνώρισης φωνής της τηλεόρασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μοντέλο συσκευής σε σύννεφο παράγει υπεραξία για τον τελικό χρήστη, επεκτείνοντας τις δυνατότητες της συσκευής πέρα από τις εγγενείς λειτουργίες του. Ωστόσο, ορισμένες προκλήσεις διαλειτουργικότητας μπορούν να προκύψουν κατά την προσπάθεια ενσωμάτωσης συσκευών κατασκευασμένων από διαφορετικούς κατασκευαστές (Domingo, 2012).

Συχνά, η συσκευή και η υπηρεσία cloud προέρχονται από τον ίδιο τον πάροχο. Εάν χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα δεδομένων ιδιοκτησίας μεταξύ της συσκευής και της υπηρεσίας σύννεφο, ο κάτοχος ή ο χρήστης της συσκευής μπορεί να συνδέεται με συγκεκριμένη υπηρεσία σύννεφο, περιορίζοντας ή παρεμποδίζοντας τη χρήση εναλλακτικών υπηρεσιών από παρόχους υπηρεσιών. Ταυτόχρονα, οι χρήστες μπορούν γενικά να έχουν εμπιστοσύνη ότι μπορούν να ενσωματωθούν συσκευές σχεδιασμένες για τη συγκεκριμένη πλατφόρμα (Riahi et al, 2014).

2.3.3 Μοντέλο επικοινωνίας συσκευής σε πύλη (Device – to – Gateway)

Στο μοντέλο της συσκευής σε πύλη, η πρόσβαση της IoT συσκευής σε υπηρεσία υπολογιστικού νέφους, πραγματοποιείται μέσω μιας υπηρεσίας ALG, η οποία λειτουργεί σαν αρτηρία για το σκοπό αυτό. Με απλούστερους όρους, αυτό σημαίνει ότι υπάρχει λογισμικό εφαρμογών που λειτουργεί σε μια τοπική συσκευή πύλης, η οποία ενεργεί ως ενδιάμεσος μεταξύ της συσκευής και της υπηρεσίας cloud και

παρέχει ασφάλεια και άλλες λειτουργίες, όπως δεδομένα ή μετάφραση πρωτοκόλλου. Το μοντέλο αυτό, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4 - Μοντέλο επικοινωνίας Device-to-gateway

Πηγή: (Marsan, 2015)

Πολλές μορφές αυτού του μοντέλου βρίσκονται σε συσκευές που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στην καθημερινή ζωή του. Σε πολλές περιπτώσεις, η συσκευή τοπικής πύλης είναι ένα smartphone με εφαρμογή που επικοινωνεί με μια συσκευή και μεταδίδει δεδομένα σε μια υπηρεσία υπολογιστικού νέφους(cloud). Αυτό είναι συχνά το μοντέλο που χρησιμοποιείται με δημοφιλή καταναλωτικά αντικείμενα όπως οι προσωπικοί ιχνηλάτες καταλληλότητας. Αυτές οι συσκευές δεν έχουν τη δυνατότητα

να συνδεθούν απευθείας με μια υπηρεσία cloud, έτσι ώστε συχνά να βασίζονται στο λογισμικό εφαρμογών smartphone για να χρησιμεύσουν ως ενδιάμεση πύλη για τη σύνδεση της συσκευής γυμναστικής με το cloud(Riahi et al., 2014).

Η άλλη μορφή αυτού του μοντέλου συσκευής-πύλης είναι η εμφάνιση συσκευών "διανομέα" στις εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού. Αυτές είναι συσκευές που χρησιμεύουν ως τοπική πύλη μεταξύ μεμονωμένων συσκευών IoT και υπηρεσίας υπολογιστικού νέφους, αλλά μπορούν επίσης να γεφυρώσουν το χάσμα διαλειτουργικότητας μεταξύ των ίδιων των συσκευών. Για παράδειγμα, ο διανομέας SmartThings είναι μια αυτόνομη συσκευή πύλης που έχει εγκατεστημένους πομποδέκτες Z-Wave και Zigbee για να επικοινωνεί με τις δύο οικογένειες συσκευών. Στη συνέχεια συνδέεται με την υπηρεσία cloud SmartThings, επιτρέποντας στον χρήστη να αποκτήσει πρόσβαση στις συσκευές χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή smartphone και μια σύνδεση στο Internet. Από μια ευρύτερη τεχνική προοπτική, το άρθρο του περιοδικού IETF εξηγεί το όφελος της προσέγγισης μεταξύ συσκευής προς πύλη: Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται σε καταστάσεις όπου τα έξυπνα αντικείμενα απαιτούν διαλειτουργικότητα με μη-IP [πρωτόκολλο Internet] συσκευές(Manjika et al, 2015).

Μερικές φορές υιοθετείται αυτή η προσέγγιση για την ενσωμάτωση συσκευών μόνο με IPv6, πράγμα που σημαίνει ότι μια πύλη είναι απαραίτητη για συσκευές και υπηρεσίες παλαιού τύπου IPv4. Με άλλα λόγια, αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται συχνά για την ενσωμάτωση νέων έξυπνων συσκευών σε ένα παλαιό σύστημα με συσκευές που δεν είναι εγγενώς διαλειτουργικές μαζί τους.

Η ανάπτυξη επιπρόσθετου λογισμικού και συστήματος πύλης εφαρμογών-στρώματος προσθέτει πολυπλοκότητα και κόστος στο συνολικό σύστημα, κάτι που αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα της προσέγγισης αυτής. Το έγγραφο RFC7452 της IAB υποδεικνύει τις προοπτικές για αυτό το μοντέλο: Αναμένεται ότι στο μέλλον, οι

γενικότερες πύλες θα χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν το κόστος και την πολυπλοκότητα των υποδομών για τους τελικούς καταναλωτές, τις επιχειρήσεις και το βιομηχανικό περιβάλλον. Αυτές οι γενικές πύλες είναι πιο πιθανό να υπάρχουν αν τα σχέδια της συσκευής IoT χρησιμοποιούν γενικά πρωτόκολλα Internet και δεν απαιτούν πύλες στρώματος εφαρμογών που μεταφράζουν ένα πρωτόκολλο εφαρμογής στρώματος σε άλλο. Η χρήση των πυλών εφαρμογών-στρώματος θα οδηγήσει, γενικά, σε μια πιο εύθραυστη ανάπτυξη, όπως παρατηρήθηκε στο παρελθόν . Η εξέλιξη των συστημάτων που χρησιμοποιούν το μοντέλο επικοινωνίας μεταξύ συσκευής-πύλης θέτει ορισμένες προκλήσεις διαλειτουργικότητα (Al-Sarawi et al., 2017).

2.3.4 Μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων

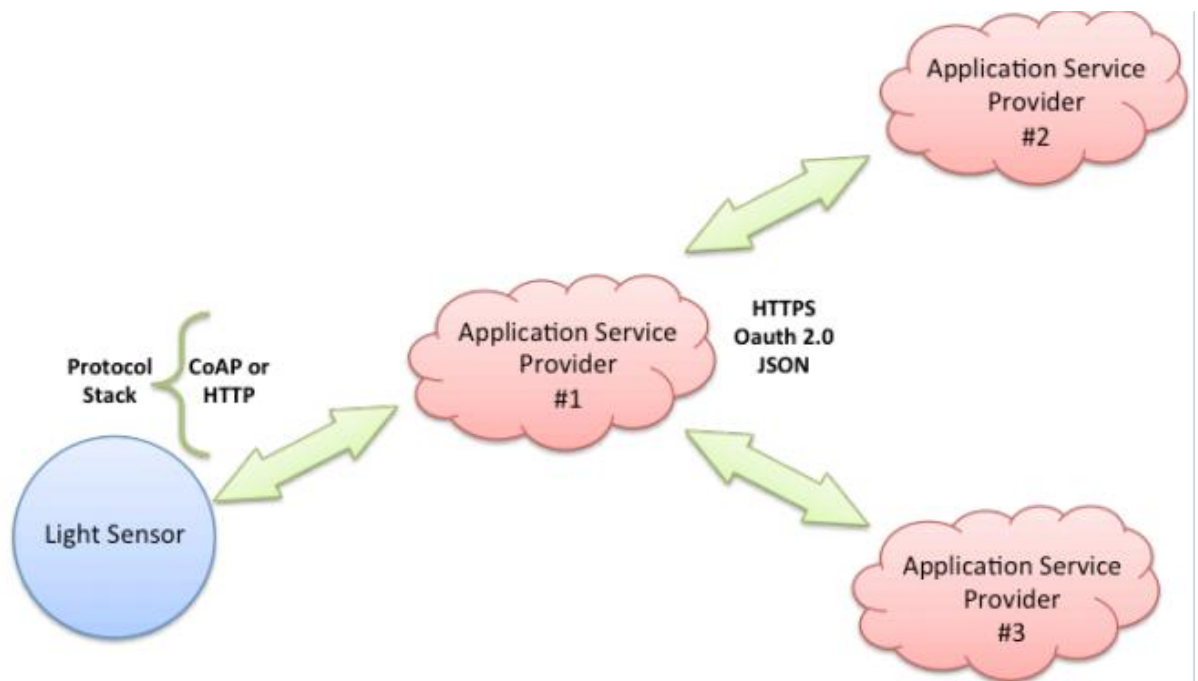
Το μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων αναφέρεται σε μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας που επιτρέπει στους χρήστες να εξαγάγουν και να αναλύουν δεδομένα έξυπνων αντικειμένων από μια υπηρεσία υπολογιστικού νέφους σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλες πηγές. Αυτή η αρχιτεκτονική υποστηρίζει την επιθυμία του χρήστη να παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα τρίτων που έχουν μεταφορτωθεί . Αυτή η προσέγγιση αποτελεί επέκταση του ενιαίου μοντέλου επικοινωνίας συσκευής σε σύννεφο, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σιλό δεδομένων όπου" μεταφορτώνουν συσκευές IoT δεδομένα μόνο σε έναν ενιαίο πάροχο υπηρεσιών εφαρμογών.

Μια αρχιτεκτονική κοινής χρήσης που καθιστά δυνατή την ομαδοποίηση και ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από τις ροές δεδομένων μιας συσκευής IoT. Για παράδειγμα, ένας εταιρικός χρήστης που είναι υπεύθυνος για ένα συγκρότημα γραφείων θα στόχευε στο να ενοποιήσει και να εξετάσει τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας και υπηρεσιών κοινής ωφέλειας που παράγονται από όλους τους αισθητήρες IoT στις διαθέσιμες εγκαταστάσεις (Manyika et al, 2015).

Συχνά στο μοντέλο μιας συσκευής σε ένα υπολογιστικό νέφος, τα δεδομένα που εξάγονται από κάθε αισθητήρα ή από το σύστημα IoT τοποθετούνται σε ένα αυτόνομο «δοχείο» δεδομένων. Διευκόλυνση πρόσβασης στην υποδομή κι ανάλυσης των δεδομένων που δημιουργούνται από όλες τις συνδεδεμένες συσκευές του κτηρίου, αποτελούν τα συστατικά μιας αποδοτικής αρχιτεκτονικής κοινής χρήσης δεδομένων.. Επίσης, αυτό το είδος αρχιτεκτονικής διευκολύνει τις ανάγκες φορητότητας δεδομένων.

2.3.5 Μοντέλο επικοινωνίας συσκευής Back-end

Οι αποτελεσματικές αρχιτεκτονικές data sharing back-end επιτρέπουν στους χρήστες να μεταφέρουν τα δεδομένα τους όταν μετακινούνται μεταξύ των υπηρεσιών Διαδικτύου, διασπώντας τα παραδοσιακά δεδομένα των σιλο-φραγμών. Το μοντέλο ανταλλαγής δεδομένων back-end υποδηλώνει ότι απαιτείται μια καθολική προσέγγιση υπηρεσιών cloud ή διεπαφές προγραμματιστή εφαρμογών cloud (API) για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας των δεδομένων έξυπνων συσκευών που φιλοξενούνται στο cloud. Μια γραφική αναπαράσταση αυτού του παραπάνω σχεδιασμού παραβάλλεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5 - Μοντέλο επικοινωνίας *Back-end data sharing*

Πηγή: (Marsan, 2015)

Αυτό το μοντέλο αρχιτεκτονικής αποτελεί μια προσέγγιση για την επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ αυτών των συστημάτων back-end. Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας είναι εξίσου αποτελεσματικό με τα υπάρχοντα συστήματα IoT. Οι αρχιτεκτονικές ανταλλαγής δεδομένων από το πίσω μέρος δεν μπορούν να ξεπεράσουν πλήρως τα σχέδια των κλειστών συστημάτων(Alfred, 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Τεχνολογίες Δικτύων του ΙΟΤ

3.1 Τεχνολογίες μικρής εμβέλειας

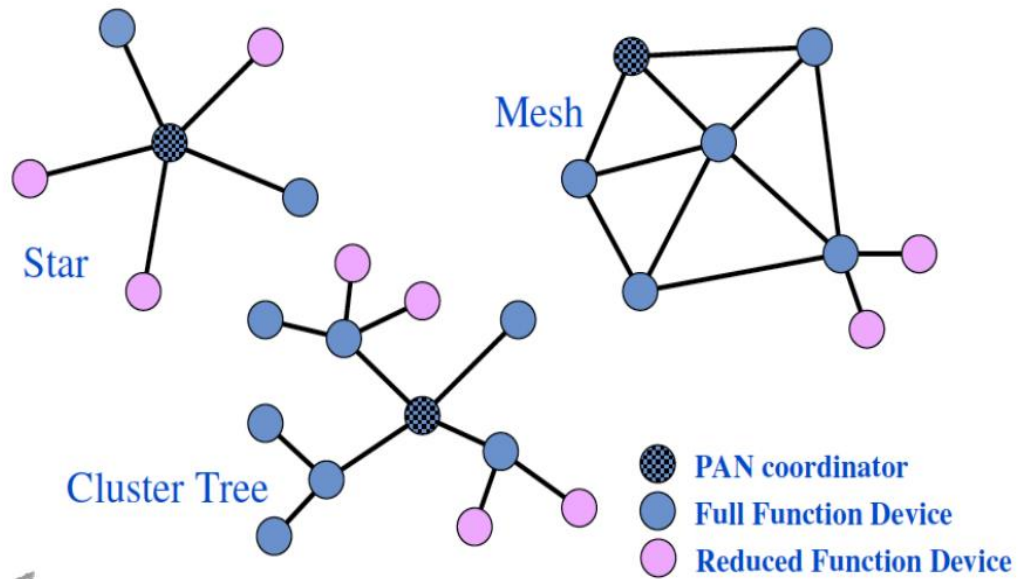
3.1.1. ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ WPAN–(Wireless Personal Area Networks)

Τα WPANs (ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Networks) χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ μικρών αποστάσεων και χρησιμοποιούνται συνήθως για την επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων σε μικρές συσκευές. Σε αντίθεση με τα WLAN (Wireless Local Area Networks) τοπικά δίκτυα), μία σύνδεση σε ένα ασύρματο προσωπικό δίκτυο απαιτεί μικρή ή και πολλές φορές καμία συνδεσιμότητα με την κεντρική υποδομή του δικτύου. Συνεπώς, το γεγονός αυτό τα καθιστά ως μια φθηνή λύση από άποψη τεχνολογικού εξοπλισμού αλλά και κατανάλωσης ενέργειας (Al-Sarawi et al., 2017).

Η τεχνολογία των WPANs, έχει σχεδιαστεί για την πραγματοποίηση των επικοινωνιών μικρής κλίμακας και εξαλείφει την ανάγκη καλωδίων για τη διασύνδεση πολλών συσκευών. Όπως υποδηλώνει το όνομα "Wireless Personal Area Network", ένα τέτοιο δίκτυο είναι χρήσιμο μόνο για περιορισμένη απόσταση , δηλαδή μέχρι 10 μέτρα (30 πόδια). Η σύνδεση δεδομένων IrDA (Infrared Data Association, Bluetooth και Zigbee είναι οι κύριες ασύρματες τεχνολογίες των WPAN και υπάρχουν στο φυσικό στρώμα. Οι συσκευές που επωφελούνται από ένα WPAN περιλαμβάνουν συσκευές όπως τα PDAs(Personal Digital assistants), εκτυπωτές, κάμερες, κινητά τηλέφωνα, σημεία πρόσβασης κλπ. Συνήθως, οι συσκευές WPAN χρησιμοποιούν πολύ λίγη ενέργεια και η μικρή εμβέλεια βοηθά στη διατήρηση της ασφάλειας και της ιδιωτικής ζωής των

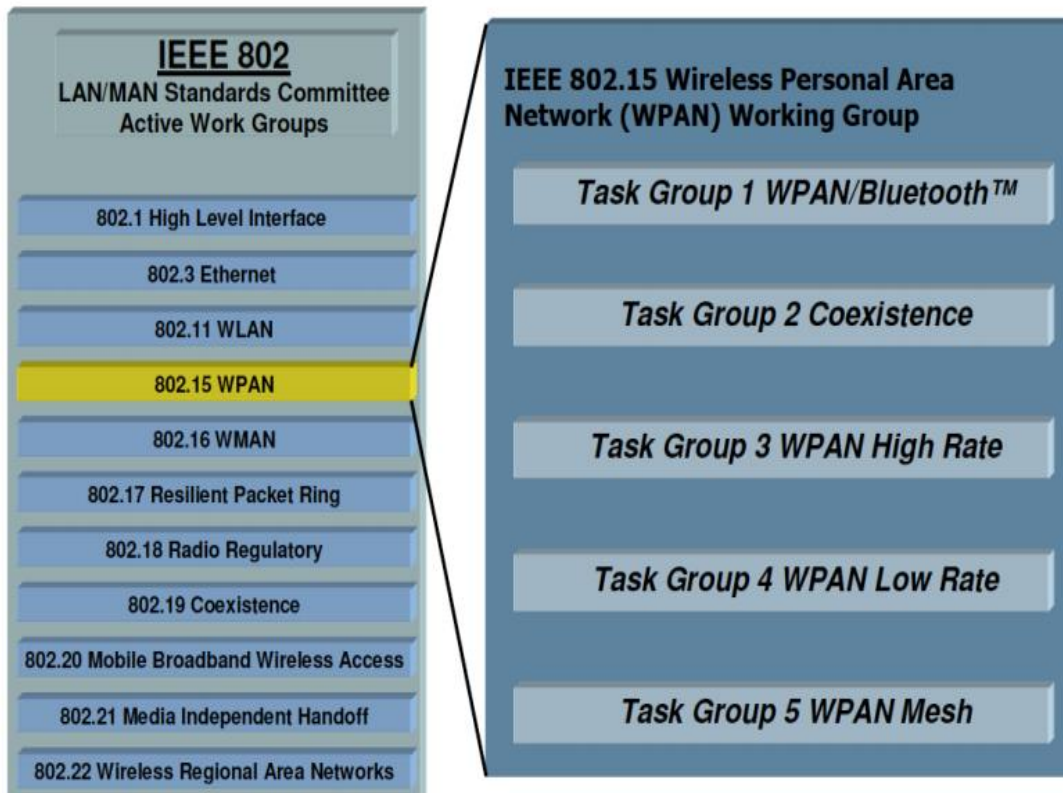
χρηστών. Για παράδειγμα, ένας φορητός υπολογιστής μπορεί να συνδεθεί στο Διαδίκτυο ασύρματα δημιουργώντας ένα Bluetooth WPAN με κινητό τηλέφωνο. Η σύνδεση στο Διαδίκτυο General Packet Radio Service (GPRS) του κινητού τηλεφώνου μπορεί να κοινοποιηθεί στον φορητό υπολογιστή και όλα τα πακέτα δεδομένων από και προς τον φορητό υπολογιστή αποστέλλονται μέσω του WPAN που υποστηρίζεται από Bluetooth.

3.1.2. Τοπολογίες Δικτύων WPAN



Εικόνα 6 - Τοπολογίες δικτύων WPAN

Πηγή: http://www.cs.nccu.edu.tw/~jang/teaching/IntroWirelessComm_files/WPAN.pdf



Εικόνα 7- IEEE 802.15 WPAN Working Group

Πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-the-IEEE-802.15.4a-ultra-wideband-layer-Alberts/70a347d93960f103cbd59c9646a8c3f5b20865c6/figure/2>

Σύμφωνα με την εμβέλεια επικοινωνίας, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να ταξινομηθούν σε:

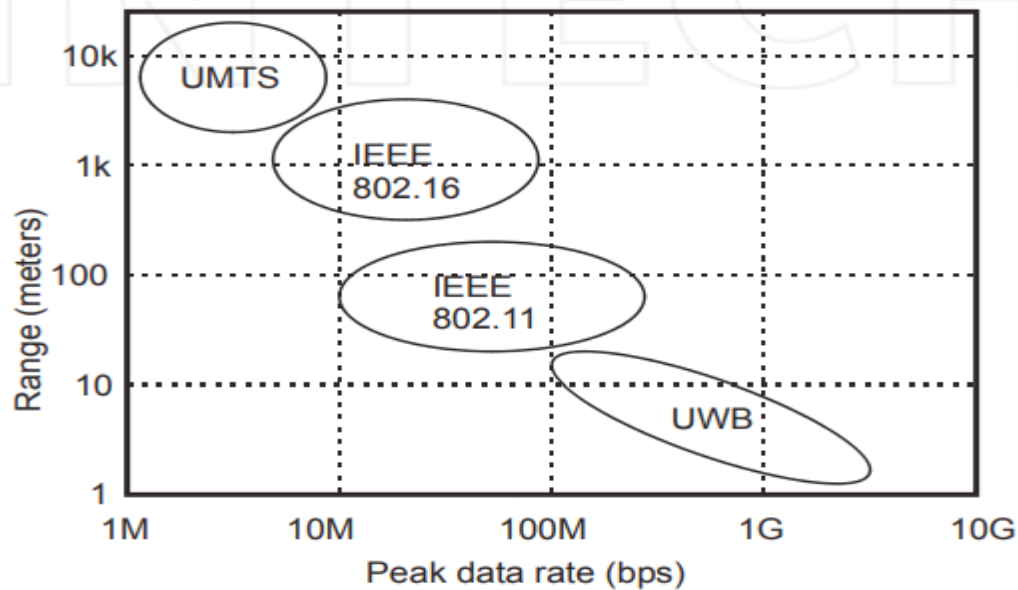
α) Δίκτυα WWAN (Wireless wide area network), όπου ανήκουν τα δίκτυα GSM(Global System for Mobile communications) και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

β) WMAN (π.χ. IEEE 802.16), WLAN (π.χ. IEEE 802.11a / b / g / n), WPAN (IEEE 802.15 TG1) WBAN (π.χ. IEEE 802.15 TG6). Μεταξύ αυτών των δικτύων, τα δίκτυα WLAN έχουν λάβει μεγάλη προσοχή και έχουν καταφέρει να γίνουν δημοφιλή τα τελευταία χρόνια. Το πρότυπο IEEE 802.11a / b / g / n είναι πλέον το πιο δημοφιλές ασύρματο πρότυπο για την οικιακή δικτύωση, τα μικρά γραφεία και γενικότερα για την πρόσβαση στο Internet σε μικρούς χώρους με περιορισμένους χρήστες. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά και στην εικόνα 13 το εύρος τιμών έναντι του μέγιστου ρυθμού δεδομένων διαφόρων ασύρματων δικτύων.

Πίνακας 1 - Γενικά χαρακτηριστικά ασυρμάτων δικτύων

Πηγή: Lau(2011)

Classification	Communication range	Exmples	Current major applications
WWAN	> 10km	GSM,UMTS	Moblile Internet access
WMAN	< 10km	IEEE 802.16	Broadband Internet access
WLAN	<100m	IEEE 802.11a/b/g/n	Internet aces, file sharing
WPAN	< 10m	IEEE 802.15 TG1	File sharing, headset
WBAN	< 1m	IEEE 802.15 TG6	Boby senor network



Εικόνα 8 - Εύρος τιμών έναντι μέγιστου ρυθμού δεδομένων των διαφόρων ασύρματων δικτύων

Πηγή: Lau(2011)

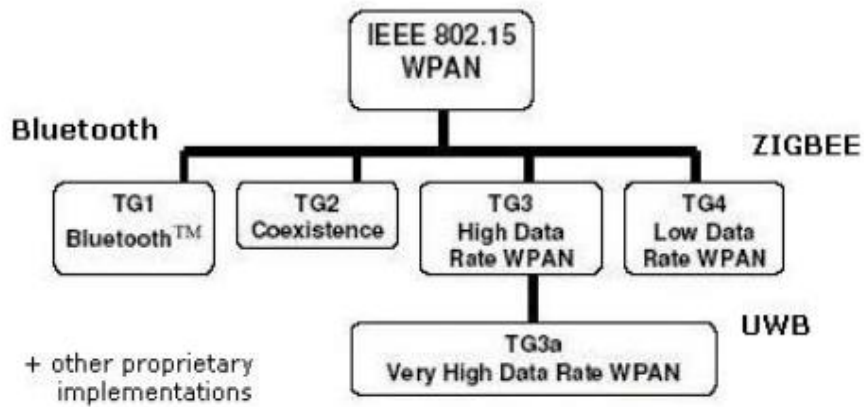
Μέσα στο πρότυπο IEEE 802.15.3 (TG3), το IEEE 802.15.3a (TG3a) είναι υπεύθυνο για το WPAN High Rate Alternative PHY. Δυστυχώς, λόγω του αδιεξόδου μεταξύ των δύο διαθέσιμων τεχνολογιών UWB (συγκεκριμένα UWB άμεσης ακολουθίας (DSUWB) και πολυπλεξίας UWB πολλαπλής ζώνης πολλαπλών συχνοτήτων (MB-OFDMUWB), το IEEE 802.15.3a (TG3a) αποσύρθηκε επισήμως το 2006. Το IEEE 802.15.3b (TG3b) αποσκοπούσε στην παροχή τροποποιήσεων και μικρών βελτιστοποιήσεων. Το IEEE 802.15.3c (TG3c) ανέπτυξε εναλλακτική PHY με βάση το χιλιοστό κύμα υψηλής ταχύτητας (με μήκος κύματος 57-64 GHz) για το IEEE 802.15.3. Οι πληροφορίες για το IEEE 802.15.3 TG3 συνοψίζονται στον Πίνακα 3 (IEEE 2011a).

Πίνακας 2 - Το πρότυπο IEEE 802.15 – TaskGroup (TG3)

Πηγή: Lau(2011)

Task group 3	Functions/Descriptions
Task group 3	High Rate WPAN
Task group 3a	WPAN High Rate Alternative PHY (disbanded in 2006)
Task group 3b	MAC Amendmet
Task group 3c	WPAN Millimeter Wave Alternative PHY

IEEE standards for Wireless Personal Area networking technologies:



Εικόνα 9 - Πρότυπα IEEE για τα WPANs

Πηγή: Alberts (2011) ¹

¹ <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-the-IEEE-802.15.4a-ultra-wideband-layer-Alberts/70a347d93960f103cbd59c9646a8c3f5b20865c6/figure/2>

3.1.3. Πρότυπα του WPAN

Τα πιο δημοφιλή πρότυπα του WPAN είναι τα εξής:

- Bluetooth IEEE 802.15.1
- ZigBee IEEE 802.15.4
- UWB (Ultra Wide Band) IEEE 802.15.3a
- Proprietary standards based on Embedded Wireless Chips
(Sula, Ardiana, Evjola Spaho, Keita Matsuo, Leonard Barolli, Fatos Xhafa, Rozeta Miho, 2013)

3.1.3.1 LR WPAN - WPAN χαμηλής ταχύτητας (IrDA, Bluetooth και ZigBee)

Η υποστήριξη του IrDA (Wireless Infrared Data Association) επιτρέπει σε ένα χρήστη να μεταφέρει δεδομένα μεταξύ ενός υπολογιστή και άλλης συσκευής με δυνατότητα υπέρυθρης τεχνολογίας δεδομένων (IrDA) για το συγχρονισμό δεδομένων, τη μεταφορά αρχείων ή τον έλεγχο συσκευής. Η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να προσφέρει το IrDA φτάνει τα 4 Mbps και η δυνατή απόσταση της επικοινωνίας των δεδομένων είναι μικρότερη των 10 μέτρων (30 πόδια) με την προϋπόθεση να μην υπάρχει κανένα εμπόδιο μεταξύ των συσκευών.

Το Bluetooth (IEEE 802.15.1) χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τη μετάδοση δεδομένων και ως εκ τούτου δεν έχει τους περιορισμούς της γραμμής ορατότητας του IrDA. Το Bluetooth υποστηρίζει επίσης υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 11 Mbps και χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης ISM 2,4 GHz.

ZigBee (IEEE 802.15.4) συνδεσιμότητα απλών σταθερών και κινητών συσκευών με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και απόσταση περίπου 50 μέτρα και των ρυθμών μετάδοσης 20 - 250 Kbps. Η προδιαγραφή ZigBee βασίζεται σε απαιτήσεις

επιδόσεων χαμηλού επιπέδου και αισθητήρων, συστήματα ελέγχου και συσκευές σχεδιασμένες να παραμένουν αδρανείς για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τα κιβώτια ZigBee που έχουν σχεδιαστεί για μικρής εμβέλειας και μερικές συσκευές μπορούν να δρομολογήσουν πακέτα σε άλλες συσκευές. Οι εφαρμογές για την τεχνολογία LowRate WPAN περιλαμβάνουν:

- Συγχρονισμός PDAs
- απλά Κινητά και Smartphones
- Συστήματα οικιακού ελέγχου (smart home)
- Ασύρματα τηλέφωνα, ανταλλαγή φορητών συσκευών
- Βιομηχανικά συστήματα ελέγχου
- Συσκευές εντοπισμού τοποθεσίας - έξυπνες ετικέτες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ατόμων στο σπίτι ή στο γραφείο Συστήματα ασφαλείας,
- Διαδραστικά παιχνίδια και παρακολούθηση αποθέματος

3.1.4. Η ομάδα IEEE 802.15 της Επιτροπής Προτύπων Δικτύου

Τον Μάρτιο του 1999, η Επιτροπή Προτύπων Δικτύου Τοπικής και Μητροπολιτικής Περιοχής «IEEE 802» συγκρότησε μια νέα Ομάδα Εργασίας, με σκοπό την ανάπτυξη προτύπων επικοινωνίας για τα Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα, για τις φορητές και κινητές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα, μίνι υπολογιστές, pda και άλλα. Οι φορητές και κινητές υπολογιστικές συσκευές ορίζονται ως μη διακριτικές υπολογιστικές συσκευές, συσκευές δικτύωσης, με λογισμικό και περιφερειακά που

μεταφέρονται με εύκολο τρόπο από τους χρήστες για να βελτιώσουν την ικανότητά τους να εκτελούν παραγωγικές εργασίες καθώς και να παρέχουν ψυχαγωγία.

Η νέα αυτή ομάδα ονομάζεται πλέον «Ομάδα εργασίας 802.15» και είναι υπεύθυνη για τοπικά ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (WPAN). Τα πρότυπα που δημιουργήθηκαν από την ομάδα P802.15, έχουν ως πρόκληση την αντιμετώπιση των απαιτήσεων της ασύρματης προσωπικής δικτύωσης, μιας νέας κατηγορίας υπολογιστικών συσκευών. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει, υπολογιστές φορητούς και σταθερούς, PDAs, περιφερειακά, κινητά τηλέφωνα, συσκευές τηλεϊδιοποίησης και ψηφιακά καταναλωτικά ηλεκτρονικά, με τη δυνατότητα εκατέρωθεν επικοινωνίας και συνεργασίας (Kokakkottil et al., 2014).

Κατά τους πρώτους εννέα μήνες της ύπαρξής της, η Ομάδα Εργασίας 802.15 καθιέρωσε στενές σχέσεις εργασίας με εταιρίες-ομάδες ειδικών συμφερόντων όπως η Bluetooth™ και με βιομηχανικές κοινοπραξίες, όπως η HomeRF™. Η ομάδα εργασίας να εισάγει, γενικά, τις απαιτήσεις της αγοράς και τις τεχνικές λύσεις για WPANs με εύρος 0 έως 10 μέτρων. Λαμβάνεται υπόψη μια ποικιλία ρυθμών δεδομένων από σημαντικά μικρότερη από 1 Mbit / s έως πάνω από 20 Mbits / s. Η διατήρηση της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, του μικρού μεγέθους (λιγότερο από 0,5 κυβικά εκατοστά) και του χαμηλού κόστους σε σχέση με τη συσκευή προορισμού είναι πρωταρχικές εκτιμήσεις. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα πρότυπο ή μια σειρά προτύπων που έχουν ευρεία εφαρμοσιμότητα στην αγορά και ασχολούνται με τα ζητήματα συνύπαρξης και διαλειτουργικότητας (Kokakkottil et al., 2014).

Η ομάδα 802.15 έχει τέσσερις δραστηριότητες σε εξέλιξη. Η πρώτη στην ομάδα εργασίας 1 συντάσσει ένα πρότυπο βασισμένο στην προδιαγραφή Bluetooth™ Version 1.0. Η ομάδα εργασίας θα αναπτύξει μια συνιστώμενη πρακτική συνύπαρξης. Η τρίτη δραστηριότητα είναι μια νέα Ομάδα Μελέτης με αντικείμενο τον προσδιορισμό

της ανάγκης της αγοράς και την εκπόνηση αιτήματος Εξουσιοδότησης Έργου (PAR) για πρότυπο WPAN Υψηλού Επιπέδου που ξεπερνά τα 20 Mbits / s και προορίζεται για εφαρμογές Ψηφιακής Απεικόνισης και Πολυμέσων. Η τέταρτη δραστηριότητα είναι μια προσπάθεια μάρκετινγκ που στοχεύει στην προώθηση της κατανόησης των θεμάτων και των δραστηριοτήτων του P802.15(Massouri et al., 2014).

Η ομάδα των ερευνητών της επιτροπής IEEE 802.15 έχει αναλάβει το δύσκολο έργο για να δημιουργήσει τα κατάλληλα πρότυπα των νέων και ανερχόμενων τεχνολογιών των τοπικών ασυρμάτων δικτύων(WPAN). Τα πρότυπα αυτά είναι:

- A) Bluetooth(IEEE 802.15.1)
- B) Wi-Media (IEEE 802.15.3)
- Γ) ZigBee
- Δ) AeroScout
- E) WirelessHART (IEEE 802.15.4)

3.2 Χαρακτηριστικά των δικτύων LPWAN

3.2.1. Ενεργειακή Απόδοση

Σε πολλές εφαρμογές, οι συσκευές IoT πρέπει να αναπτυχθούν σε απρόσιτες ή νομαδικές τοποθεσίες. Κατά συνέπεια, οι περισσότερες συσκευές τροφοδοτούνται με μπαταρία και είναι απίθανο να έχουν πρόσβαση σε μια σταθερή πηγή ενέργειας. Η αντικατάσταση των μπαταριών καταναλώνει τόσο χρόνο όσο και πόρους, και όταν εφαρμόζεται σε μεγάλα δίκτυα παρουσιάζει ένα μη ρεαλιστικό κόστος.

Οι Lanvic και Pora (2017), μέτρησαν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ενός κόμβου σε δεκαετίες, ενώ μετρήθηκε επίσης ως «10 χρόνια ή περισσότερο» σε μια συντηρητική εκτίμηση. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις δηλώσεις, αυτό το έγγραφο θεωρεί 10 χρόνια τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας-στόχου για κόμβους.

3.2.2. Μεγάλη Εμβέλεια

Ως δίκτυα ευρείας περιοχής, τα LPWAN πρέπει να επικοινωνούν σε μεγάλες αποστάσεις. Το εύρος στόχων για LPWAN συμφωνείται γενικά ως λίγα χιλιόμετρα σε αστικές περιοχές και δεκάδες χιλιόμετρα σε αγροτικές περιοχές (Raza et al., 2017). Οι Mekki et al.(2019), παρείχαν πιο συγκεκριμένα σημεία αναφοράς, αναμένοντας 1-5 χλμ. σε αστικές περιοχές και 10-40 χλμ. σε αγροτικά περιβάλλοντα. Όταν αναπτύσσεται σε αστικά περιβάλλοντα, τα σήματα LPWAN αντιμετωπίζουν απώλεια διαδρομής, σκίαση, ξεθώριασμα πολλαπλών διαδρομών και άλλους τύπους φθοράς σήματος από εμπόδια, υποδομές, κινούμενα αντικείμενα κ.λπ. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω

δηλώσεις, αυτό το έγγραφο θεωρεί τα 5 χλμ. ως στόχο αστικής περιοχής για LPWAN και 10 χλμ. για αγροτικές περιοχές.

3.2.3. Δυνατότητα Κλιμάκωσης

Η ευελιξία μπορεί γενικά να οριστεί ως η ικανότητα ενός συστήματος να διατηρεί την ποιότητα των υπηρεσιών καθώς μεγαλώνει. Ο Bondi (2000), αναφέρεται περαιτέρω στην έννοια της επεκτασιμότητας σε διάφορους υπο-τύπους ανάλογα με τη φύση αυτής της ανάπτυξης - για παράδειγμα, ο αριθμός των τελικών συσκευών που αναπτύσσονται διαφέρει σημαντικά από την αύξηση του traffic σε αυτές τις συσκευές. Ενώ οι ορισμοί του περιγράφουν ένα σχετικά γενικό σύστημα πληροφοριών, μπορούμε εύκολα να τους εφαρμόσουμε σε ένα LPWAN. Η δομική επεκτασιμότητα, καθορίζει πόσες τελικές συσκευές μπορεί να υποστηρίξει ένα δίκτυο LPWAN. Αυτό καθορίζεται και από τις δύο συσκευές ανά σταθμό βάσης και από σταθμούς βάσης ανά δίκτυο ή γεωγραφική περιοχή. Η επεκτασιμότητα φορτίου είναι πιο περίπλοκη και αναφέρεται στην ποσότητα κυκλοφορίας που μπορεί να χειριστεί κάθε συσκευή σε ένα LPWAN χωρίς να αντιμετωπίσει απαράδεκτη καθυστέρηση, ανεπάρκεια πόρων ή διαφωνίες. Αυτό συχνά επηρεάζεται από τα ρυθμιστικά όρια που τίθενται σε LPWAN (BUURMAN, et al., 2020).

Η επεκτασιμότητα μπορεί επίσης να ταξινομηθεί ως οριζόντια ή κάθετη, έννοιες που συζητήθηκαν για το IoT από τους Gupta et al. (2015). Η οριζόντια επεκτασιμότητα είναι στενά ισοδύναμη με τη δομική επεκτασιμότητα, καθορίζοντας πόσες οντότητες υλικού ή λογισμικού μπορεί να υποστηρίξει ένα σύστημα. Η κατακόρυφη επεκτασιμότητα είναι ένα υπερσύνολο κλιμάκωσης φορτίου,

λαμβάνοντας υπόψη τους πόρους που διατίθενται σε κάθε στοιχείο δικτύου. Ενώ η επεκτασιμότητα φορτίου αφορά την πρόσβαση στο δίκτυο και τη διαθεσιμότητα ως πόρο, η κάθετη επεκτασιμότητα εξετάζει ευρύτερα άλλους πόρους, όπως κύκλους CPU, μνήμη και αποθήκευση.

3.2.4. Χαμηλό κόστος

Ακόμα κι αν τα LPWAN υποστηρίζουν πολλούς κόμβους, δεν θα είναι πρακτικό να τα αναπτύξετε εάν οι κόμβοι είναι ακριβοί στην κατασκευή και συντήρηση. Καθώς όλοι οι οργανισμοί έχουν περιορισμένο προϋπολογισμό, οι φθηνότεροι κόμβοι οδηγούν πάντα σε ένα μεγαλύτερο δυνατό σύστημα. Εάν ένα LPWAN παρέχεται από ένα δημόσιο δίκτυο, κάθε κόμβος είναι πιθανό να επιφέρει ετήσια τέλη συνδρομής. Αντίθετα, εάν ένας οργανισμός έχει το δικό του ιδιωτικό LPWAN, το ετήσιο κόστος θα επιβαρυνθεί με συνεχή συντήρηση και υποστήριξη.

Ορισμένες μελέτες (Raza et al., 2017; Ismail et al., 2018) πρότειναν ότι οι συσκευές θα πρέπει να κοστίζουν λιγότερο από 5 US \$ και να επιβαρύνονται με ετήσια συνδρομή τόσο χαμηλά όσο 1 US \$, ενώ άλλες μελέτες, όπως αυτή των Mekki et al. (2019), υποστηρίζουν ότι οι προτεινόμενες συσκευές θα πρέπει να κοστίζουν λιγότερο από 2 ευρώ και να επιβαρύνονται με ετήσια συνδρομή 1Euro τέλη. Σε αυτό το άρθρο, θεωρούμε ότι το τυπικό κόστος ανά κόμβο δεν υπερβαίνει τα 20 \$, επιτυγχάνοντας στόχο 5 \$.

3.2.5. Διαχείριση Συγκρούσεων του Φάσματος

Λόγω του υψηλού κόστους της αδειοδότησης μιας ζώνης συχνοτήτων, πολλά LPWAN χρησιμοποιούν το άδειο βιομηχανικό, επιστημονικό και ιατρικό (ISM) φάσμα. Ενώ μειώνετε το πιθανό κόστος, η χρήση της ζώνης ISM μπορεί να εμποδίσει την απόδοση και την αξιοπιστία. Οι παρεμβολές σε LPWAN μπορούν να ταξινομηθούν ως εσωτερικές ή εξωτερικές. Οι εσωτερικές παρεμβολές προκαλούνται από κόμβους σε αυτό το δίκτυο που μεταδίδουν ταυτόχρονα σε μια κοινόχρηστη ή αλληλεπικαλυπτόμενη ζώνη συχνοτήτων. Αυτό μετριάζεται συχνά μέσω προγραμμάτων πρόσβασης καναλιών και αλληλεπικαλύπτεται με τον στόχο σχεδιασμού κλιμάκωσης. Οι εξωτερικές παρεμβολές είναι ένα σημαντικό ζήτημα κατά τη χρήση της ζώνης ISM καθώς οι συχνότητες δεν μπορούν να δεσμευτούν. Η ζώνη ISM θα γίνει ολοένα και πιο κορεσμένη καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ασύρματων δικτύων. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, τα LPWAN που λειτουργούν σε φάσματα ISM θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στον θόρυβο. Αν και δεν μπορεί να τοποθετηθεί ποσοτικός αριθμός σε αυτόν τον στόχο, υποθέτουμε ότι πρέπει να δημιουργηθεί ένα δίκτυο βρείτε κάποια μορφή στρατηγικής διαχείρισης παρεμβολών για την επίτευξη των στόχων του LPWAN. Αυτό το έγγραφο θεωρεί επίσης την ανάπτυξη στο φάσμα με άδεια χρήσης ως μία από τις τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών.

3.2.6. Ολοκλήρωση

Η ολοκλήρωση, αναφέρεται στην ικανότητα του anLPWAN με άλλα LPWAN και συστήματα πληροφοριών. Τα δεδομένα από αισθητήρες θα είναι σε μεγάλο βαθμό άχρηστα εάν δεν μπορούν να ανακτηθούν ποτέ και τα συστήματα ενεργοποίησης

πρέπει να είναι ελεγχόμενα από εξωτερικά συστήματα. Η ενοποίηση επιτυγχάνεται μέσω των εξής: Πολλοί χρήστες, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη επένδυση και ευρύτερη βάση υποστήριξης. Ευκολία σύνδεσης στο δημόσιο Διαδίκτυο ή διακομιστές εφαρμογών. Διαθεσιμότητα API και λύσεων που αντιμετωπίζουν οι χρήστες.

3.3 Προτεινόμενες Τεχνολογίες των δικτύων LPWAN

3.3.1. NB-IoT

Το Narrowband IoT (NB-IoT), τυποποιημένη τεχνολογία από το πρότυπο 3GPP, ανήκει στην κατηγορία LPWA (Low Power Wide Area), η οποία καθιστά δυνατή τη λειτουργία σε μια μεγάλη γκάμα καινούριων αντικειμένων και υπηρεσιών IoT. Μέσω του NB-IoT επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ισχύος των επιμέρους διασυνδεδεμένων συσκευών. Την ίδια στιγμή, σε σημεία και περιοχές όπου τα συμβατικά κυψελωτά δίκτυα λόγω της φύσης και των αρχών λειτουργίας τους δεν μπορούν εύκολα να καλύψουν, σημειώνεται ενίσχυση των δυνατοτήτων του συστήματος και βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Σε σημαντικό αριθμό περιπτώσεων, ο κύκλος ζωής της μπαταρίας μιας NB-IoT συσκευής ξεπερνά τα 10 χρόνια. Προκειμένου να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις κάλυψης σε απομακρυσμένες περιοχές, σε χώρους μεγάλου βάθους κι εσωτερικότητας, το NB-IoT κάνει χρήση ενός καινούριου φυσικού επιπέδου, δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα για χρήση συσκευών μικρής πολυπλοκότητας.

Λαμβάνοντας υπόψιν τόσο την αυξανόμενη ζήτηση, όσο και το απλούστερο της υφιστάμενης τεχνολογίας σε σχέση με το αντίστοιχο των GSM / GPRS τεχνολογιών, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυξάνεται και η πιθανότητα ελαχιστοποίησης του απαιτούμενο κόστους για τις μονάδες NB-IoT. Στο γεγονός αυτό συνηγορούν αφ ενός

η δυνατότητα ταυτόχρονης ύπαρξης με δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G, 3G και 4G κι αφετέρου από τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των δομών ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικότητας των παραπάνω δικτύων. Σε εξέλιξη βρίσκονται εμπορικές εκκινήσεις, καθώς μεγάλος αριθμός οργανισμών θα παρέχουν υπηρεσίες NB-IoT στην Ασία, τη Μέση Ανατολή, τη Λατινική Αμερική και την Ευρώπη. Η China Mobile, η China Telecom, η China Unicom, η Deutsche Telekom, η Etisalat, η KT, η NOS, η TDC, η Telefónica, η Telia και η Vodafone αποτελούν φορείς εκμετάλλευσης NB-IoT, έχοντας πραγματοποιήσει δοκιμές με την τεχνολογία σε διαφορετικά στιγμιότυπα χρήσης, όπου είναι απαραίτητος ένας σημαντικός αριθμός συσκευών χαμηλού κόστους και οικονομικής συντήρησης, με παραδείγματα τον έξυπνο χώρο στάθμευσης, τη διεξαγωγή έξυπνων μετρήσεων και την έξυπνη γεωργία (Finnegan & Brown, 2018).

Πιο συγκεκριμένα, στη Γερμανία η Deutsche Telekom έγινε ο τηλεπικοινωνιακός φορέας, που εισήγαγε το NB-IoT, με διατιθέμενες υπηρεσίες σε υπαρκτά δίκτυα. Στις Κάτω Χώρες, το πρώτο παγκόσμιο δίκτυο NB-IoT, με πλήρη γεωγραφική κάλυψη, αποτελεί γεγονός από το Μάιο του 2017. Το NB-IoT μπήκε στην αγορά κι άλλων Ευρωπαϊκών χωρών. Η T-Mobile ανακοίνωσε τη δημιουργία του πρώτου εμπορικού NB-IoT δικτύου της ηπείρου στο Λας Βέγκας και ότι σχεδιάζει να επιτύχει κάλυψη σε όλη την επικράτεια, μέσα στο 2018 (Mekki et al., 2018).

Επί των πραγμάτων, το NB-IoT προέρχεται από το LTE με αρκετές όμως διαφοροποιήσεις. Αυτές αφορούν μειωμένες απαιτήσεις εύρους ζώνης (χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης 180 – 200 KHz, σε σύγκριση με το αντίστοιχο των 1.4 – 20 MHz που χρησιμοποιείται από το LTE) καθώς επίσης μείωση του απαιτούμενου χρόνου υλοποίησης, βασιζόμενο σε τροποποιημένο σύστημα τυχαίας πρόσβασης. Από την άλλη πλευρά, η διευρυμένη κάλυψη και οι μικρότερες απαιτήσεις σε ενέργεια έχουν σαν αντίκτυπο μειωμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, καθυστερήσεις και μειωμένη φασματική απόδοση. Τις περισσότερες φορές, οι φορείς εκμετάλλευσης

μπορούν να το αναπτύξουν στο LTE δίκτυό τους, μέσω απλών αναβαθμίσεων λογισμικού (Finnegan & Brown, 2018).

3.3.1.1 Πλεονεκτήματα

Στα βασικά πλεονεκτήματα του NB-IoT συγκαταλέγονται η επεκτασιμότητα, η καλύτερη ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών (μικρή πιθανότητα απώλειας πακέτου, εκτεταμένη κάλυψη σε δύσκολα σημεία όπως υπόγεια), σε σύγκριση πάντα με τα μη αδειοδοτούμενα LWPA δίκτυα όπως το SigFox. Επιπρόσθετα, όπως ήδη αναφέρθηκε προηγούμενα στην παρούσα διπλωματική, ο εκτεταμένος κύκλος ζωής της μπαταρίας των συνδεδεμένων συσκευών, εξαιτίας της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος (πράγμα όμως άρρηκτα συνδεδεμένο με μια αποδοτική εγκατάσταση κεραιάς εκπομπής ώστε να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση)

Η αυξημένη ασφάλεια, που στηρίζεται στη χρήση αδειοδοτούμενου φάσματος που αφαιρεί από το συνδρομητή τη δυνατότητα εκπομπής άρα κατ' επέκταση μειώνει την πιθανότητα παρεμβολών, συνιστά ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα

Λόγω του γεγονότος ότι το LTE αποτελεί τη βάση κατά κάποιο τρόπο του NB-IoT, συνεπάγεται ότι και το δεύτερο υποστηρίζεται από σημαντικό αριθμό χωρών στα πλαίσια ενός ήδη εδραιωμένου και καλά δομημένου δικτύου.

3.3.1.2 Μειονεκτήματα

Η ενσωμάτωση μετάδοσης υλικολογισμικού over-the-air (firmware-over-the-air, FOTA) καθώς και η μεταφορά αρχείων συνιστούν ένα δύσκολο εγχείρημα. Επίσης, ορισμένες από τις προδιαγραφές σχεδιασμού για το NB-IoT καθιστούν δύσκολη την αποστολή μεγαλύτερων ποσοτήτων δεδομένων σε μια συσκευή. Επιπλέον μεταβιβάσεις δικτύου και πύργων αποτελούν επίσης πρόβλημα, συνεπώς το NB-IoT είναι προτιμητέο κυρίως για στατικά στοιχεία, όπως μετρητές και αισθητήρες σε μια σταθερή τοποθεσία και όχι για στοιχεία περιαγωγής. Επιπλέον, δεν υποστηρίζεται η μεταφορά της φωνής πλέον σαν δεδομένα, όπως συμβαίνει κατά την περιήγηση στο διαδίκτυο, σε αντίθεση με το LTE (VoLTE, Voice over LTE). Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες LPWA, το υψηλό κόστος του NB-IoT αποτελεί επίσης σημαντικό μειονέκτημα.

3.3.2. Τεχνολογία LoRa

Το «διαδίκτυο των πραγμάτων» (IoT) έχει μεγάλη άνθηση. Μικρές συσκευές, π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο επιτρέποντας την ανάπτυξη εφαρμογών που διευκολύνουν την καθημερινή ζωή, π.χ. απομακρυσμένος έλεγχος θέρμανσης οικίας. Οι μετρήσεις των αισθητήρων συνήθως μεταφέρονται χρησιμοποιώντας κάποια ασύρματη επικοινωνία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος LPWAN (Low-Power Wide Area Networking). Μια τέτοια ραγδαία αναπτυσσόμενη ασύρματη τεχνολογία είναι το LoRaWAN, ένα πρωτόκολλο MAC για εφαρμογές IoT που βασίζεται στη μέθοδο διαμόρφωσης LoRa (Long Range). Η LoRa είναι ένας ψηφιακός τρόπος διαμόρφωσης εξάπλωσης φάσματος, CCS (Chirp Spread Spectrum), που επιτρέπει τη μετάδοση πληροφορίας χαμηλού ρυθμού (250 bps μέχρι 50 kbps) σε μεγάλες αποστάσεις (πολλά km) (Ayoub et al., 2018).

Η CCS μοιάζει με τη διαμόρφωση FM με τη διαφορά ότι η συχνότητα του φέροντος μεταβάλλεται (αυξάνει ή μειώνεται) με το χρόνο. Η CSS χρησιμοποιήθηκε επί μακρόν σε στρατιωτικά και δορυφορικά συστήματα και η LoRa είναι η πρώτη χαμηλού κόστους υλοποίησή της για εμπορικές εφαρμογές. Για εξοικονόμηση ενέργειας οι ακραίες (end nodes) συσκευές LoRaWAN έχουν μικρή περίοδο εργασίας με duty cycle 1% και επίσης υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί ως προς τη συχνότητα των μεταδόσεων. Το διαθέσιμο μέγεθος πλαισίου είναι μικρό και η πληροφορία που μεταφέρεται δεν έχει τη μορφή πακέτων IP. Τα πλαίσια εκπέμπονται στον ραδιοδιάυλο με τεχνική ALOHA προς πύλες (gateways) οι οποίες τα προωθούν σε υποδομή backend και στη συνέχεια προς το διαδίκτυο. Οι πύλες είναι αντίστοιχες των σταθμών βάσης της κινητής τηλεφωνίας, με τη διαφορά ότι έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια και μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγάλο αριθμό τερματικών (λόγω της LoRa). Η υποδομή backend συνίσταται κατά κύριο λόγο από ένα NS (Network Server) και διεπαφές προς άλλους εξυπηρετητές εφαρμογών (application servers) όπου αναπτύσσονται οι σχετικές με το IoT εφαρμογές των χρηστών.

Η διαχείριση των ακραίων κόμβων και των πυλών γίνεται κεντρικά από τον NS. Μεταξύ των λειτουργιών είναι η εγγραφή των κόμβων, η κρυπτογράφηση των δεδομένων, η ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης των κόμβων, κλπ. Εκτός από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους που διαθέτουν δίκτυα βασισμένα σε τεχνολογία LoRaWAN, το The Things Network προσφέρει μια κοινόχρηστη crowd-sourced υποδομή NS για υλοποίηση εφαρμογών IoT. Άλλες διαθέσιμες υλοποιήσεις ανοικτού κώδικα για την backend υποδομή του LoRaWAN NS είναι ο LoRa Server και ο Compact server

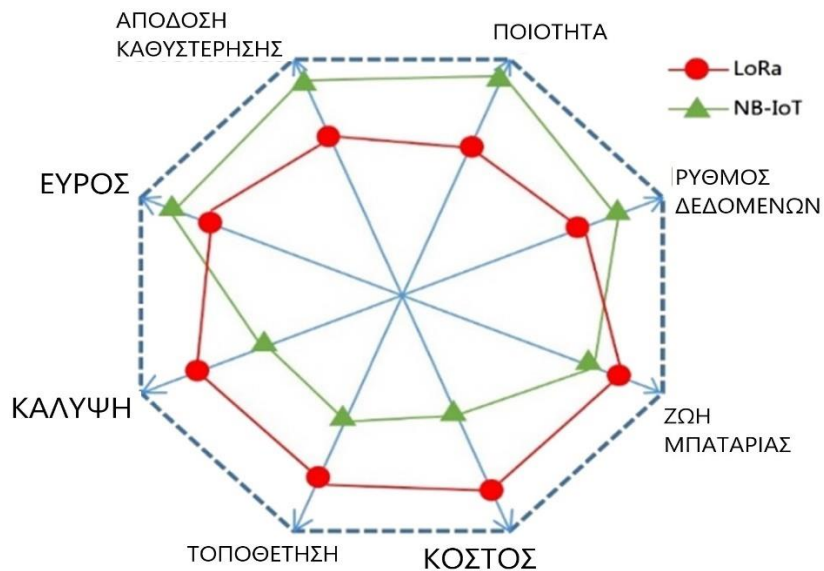
3.3.2.1 Πλεονεκτήματα

Το LoRa αποτελεί μια τεχνολογία που τραβάει την προσοχή στο χώρο των δικτύων ευρείας περιοχής-χαμηλής ισχύος λόγω μιας σειράς από πλεονεκτήματα που προσφέρει. Το βασικότερο όλων σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είναι η μεγάλη απόσταση κάλυψης-5 έως και 15km- συνδυαζόμενη με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, κάτι στο οποίο συμβάλει η ύπαρξη του μηχανισμού ADR που επιτρέπει τη μεταβολή του SF με βάση την ανταλλαγή παλαιότερων μηνυμάτων. Επιπλέον, το κόστος για τη συντήρηση μιας δομής LoRa είναι αρκετά χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο ενός κυψελοειδούς δικτύου εξαιτίας του χαμηλού εύρους ζώνης που χρησιμοποιεί.

Οι συσκευές LoRa αποδίδουν καλά σε κίνηση, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εντοπισμό και παρακολούθηση αντικειμένων. Η σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών, απευθείας στην πύλη, με τοπολογία αστέρα διευκολύνει την τοποθέτηση του δικτύου LoRa.

3.3.2.2 Μειονεκτήματα

Στα μειονεκτήματα του LoRa, μπορούν να προσμετρηθούν οι χαμηλότεροι ρυθμοί δεδομένων και το υψηλότερο latency, σε σχέση για παράδειγμα με το NB-IoT. Επιπρόσθετα, η δυσκολία των πρωτόκολλων επικύρωσης/επιβεβαίωσης και τα υψηλά ποσοστά λαθών



Εικόνα 10 - Συγκριτική LoRa Και ΙοT

3.3.2.3 LoRa Modules

Ακολουθούν ενδεικτικά διαθέσιμα LoRa Modules στο εμπόριο, με συνοπτική αναφορά των επιμέρους προδιαγραφών τους:

- **RAK811 – RisingHFo**

- ❖ *Τεχνικές προδιαγραφές*

Ευαισθησία δέκτη: -148dBm

Διαστάσεις: 22mm X 14mm X 1.7mm

Εύρος επικοινωνίας: έως 2km σε αστικά κέντρα, έως 15km σε ανοιχτές περιοχές

Χαμηλή κατανάλωση

Παρεμπόδιση παρεμβολών και αξιόπιστη μετάδοση

- **LoRaWAN module 900 / 915 MHz [XBee Socket]**

- ❖ *Τεχνικές προδιαγραφές*

Ευαισθησία δέκτη: -136 dBm

Διαστάσεις: 20mm X 24mm X 2.7mm

Εύρος επικοινωνίας: >5km σε αστικά κέντρα, >15km σε ανοιχτές περιοχές

Πρωτόκολλο: LoRaWAN 1.0, Class A

- **RFM95/96/97/98(W) – HOPERF ELECTRONIC**

- ❖ *Τεχνικές προδιαγραφές*

Ευαισθησία δέκτη: -148 dBm

Διαστάσεις: 16mm X 16mm

FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM and OOK διαμορφώσεις

Παρεμπόδιση παρεμβολών

- **ESP32-WROOM-32E - Espressif Systems**

- ❖ *Τεχνικές προδιαγραφές*

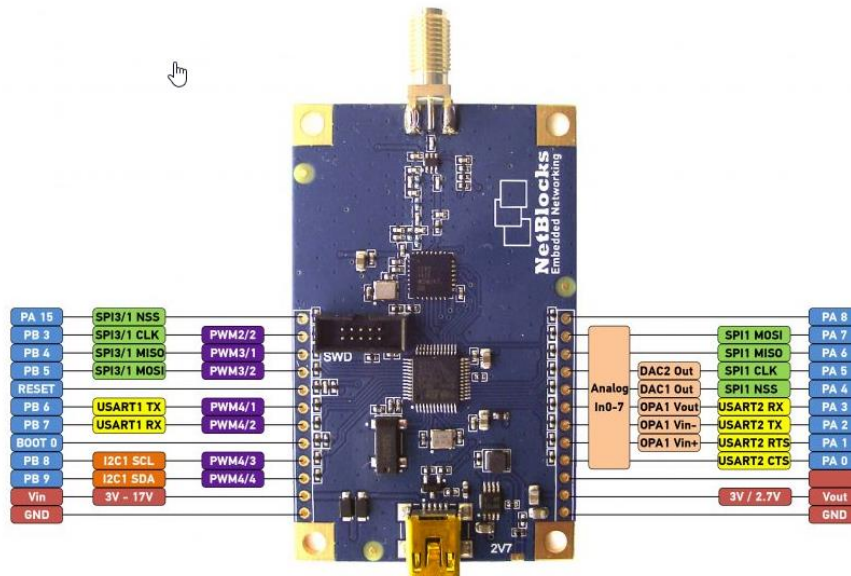
Ευαισθησία δέκτη: -148 dBm

Διαστάσεις: $(18.00 \pm 0.15) \times (25.50 \pm 0.15) \times (3.10 \pm 0.15)$

Bluetooth πιστοποίηση: BQB

RF πιστοποίηση: FCC/CE-RED/SRRC

Πιστοποίηση: REACH/RoHS



Εικόνα 11- XRange SX1272 LoRa RF module

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Αλγόριθμοι Εξοικονόμησης Ενέργειας

Δομές IoT μεγάλης κλίμακας αποτελούν πλέον πραγματικότητα και δίκτυα αναπτύσσονται για την υλοποίηση "έξυπνων πόλεων", ευφυών μέσων μεταφοράς, επισκόπηση περιβαλλοντικών μεταβλητών τα οποία απαιτούν την ασύρματη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Η μετάδοση αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται με το μικρότερο κόστος σε ότι αφορά την ενέργεια των εμπλεκόμενων συσκευών αλλά και του δικτύου γενικότερα. Για το σκοπό αυτό έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα που αφορά τα μέσα για να επιτευχθεί η ζητούμενη εξοικονόμηση ενέργειας. Η μελέτη της εξοικονόμησης ενέργειας σε IoT δίκτυα διάγεται σε όλα τα επίπεδα δικτύου. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό,

το ζήτημα της ενέργειας είναι πολύπλευρο κι αποτελεί συνάρτηση κι αποτέλεσμα μιας σειράς από παράγοντες. Τέτοιους αποτελούν εξυπηρετητές, αισθητήρες καθώς κι οι συσκευές αυτούσιες. Στο τρέχον κεφάλαιο περιγράφεται μια σειρά από σχετιζόμενες με την ενέργεια μεθόδους.

4.1 Η Ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας στο IoT

Η έρευνα στον τομέα των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας ξεκίνησε πριν από δεκαετίες. Για εξοικονόμηση ενέργειας και βελτιστοποίηση, διαφορετικοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διάφορες μεθοδολογίες για την επίτευξη του στόχου.

Η πρόβλεψη κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί συνεχώς ζητούμενο για τις εταιρείες παραγωγής ενέργειας λόγω της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας που προκαλείται από την ταχεία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι εάν δεν ελεγχθεί η κατανάλωση ενέργειας, μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη ενέργειας μετά από λίγα χρόνια. Υπάρχουν δύο επιλογές για την αντιμετώπιση του ελλείμματος ενέργειας: (1) Παραγωγή περισσότερης ενέργειας ή (2) ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ήδη διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και μείωση της σπατάλης.

Η παραγωγή ενέργειας είναι μια πολύ δαπανηρή λύση στο πρόβλημα, το οποίο απαιτεί πολύ χρόνο και πόρους, αλλά από την άλλη πλευρά, λαμβάνοντας ορισμένα προληπτικά μέτρα, μπορεί να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Από τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν γίνει πολλές έρευνες από τους ερευνητές σχετικά με την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Η ενεργειακή πρόβλεψη είναι το πρώτο βήμα για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Με βάση την ενέργεια που καταναλώθηκε προηγουμένως, πρέπει να προβλέψουμε την κατανάλωση ενέργειας της επόμενης ώρας, μήνα ή έτους.

Η έννοια της βελτιστοποίησης ενέργειας είναι χρήσιμη σε έξυπνα σπίτια όπου οι συσκευές καταναλώνουν συνεχώς την ίδια ποσότητα ενέργειας. Με την έννοια της βελτιστοποίησης στην περίπτωση αυτή, θα μπορούσαμε να εξασφαλίσουμε ότι η παρεχόμενη ενέργεια θα ήταν το ακριβώς αυτό που απαιτείται. Η τεχνική βελτιστοποίησης πραγματοποιείται βάσει εξωτερικών συνθηκών του δωματίου, όπως θερμοκρασία, φωτισμός, υγρασία, ροή αέρα, ποιότητα αέρα και ούτω καθεξής.

Οι ερευνητές έχουν προτείνει διαφορετικές τεχνικές βασισμένες σε αλγόριθμους βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της διαχείρισης ενέργειας και τη βελτίωση του δείκτη άνεσης των κατοίκων έξυπνων κτιρίων. Η βελτιστοποίηση των αποικιών και η ασαφής λογική έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά εξακολουθεί να υπάρχει κενό στις γνώσεις σχετικά με τα σενάρια ψύξης και ο δείκτης άνεσης των κατοίκων πρέπει να βελτιωθεί σε κάποιο βαθμό με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας

Το κύριο πρόβλημα με τις ήδη διαθέσιμες τεχνικές είναι η εξάρτηση από τη γεωγραφική περιοχή του συστήματος και η διαφοροποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών. Ακόμα ένα σημαντικό ζήτημα που γεννάται είναι η εξασφάλιση της ισορροπίας ανάμεσα στην κατανάλωση ενέργειας και στο δείκτη άνεσης. Ο σχεδιασμός κανόνων σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες στην ασαφή λογική είναι ένα άλλο ζήτημα. Οι ερευνητές στοχεύουν στην αύξηση του δείκτη άνεσης των κατοίκων και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης και βελτιστοποίησης βάσει κανόνων.

4.2 Εξοικονόμηση στη συσκευή

4.2.1 Μπαταρία κι απόδοση

Παράγοντες άρρηκτα συνδεδεμένοι τόσο με τη διάρκεια ζωής, όσο και με την απόδοση μιας μπαταρίας είναι οι ακόλουθοι:

- **Τάση:** Στοιχείο στο οποίο απαιτείται ακρίβεια, πάντοτε εντός των ορίων λειτουργίας, με σκοπό τόσο την επέκταση του κύκλου ζωής όσο και την εξασφάλιση της μη καταστροφής της μπαταρίας.
- **Καταστάσεις λειτουργίας:** Ανάλογα και με την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, αναφέρονται σε διαφορετικά λειτουργικά περιβάλλοντα στα οποία μπορεί να περιέλθει μια συσκευή. Προκειμένου να μειωθούν περιπτώσεις σπατάλης ενέργειας, έχουν οριστεί καταστάσεις με διακύμανση της απαιτούμενης ενέργειας, σε συνδυασμό με την ανάλογη λειτουργία που πρέπει να πραγματοποιηθεί.
- **Θερμοκρασία:** Ο σχεδιασμός και οι αρχές λειτουργίας της συσκευής, θα πρέπει να γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε περίπτωση να αποφεύγεται υπερθέρμανση της συσκευής, παράγοντας που επιδρά αρνητικά στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

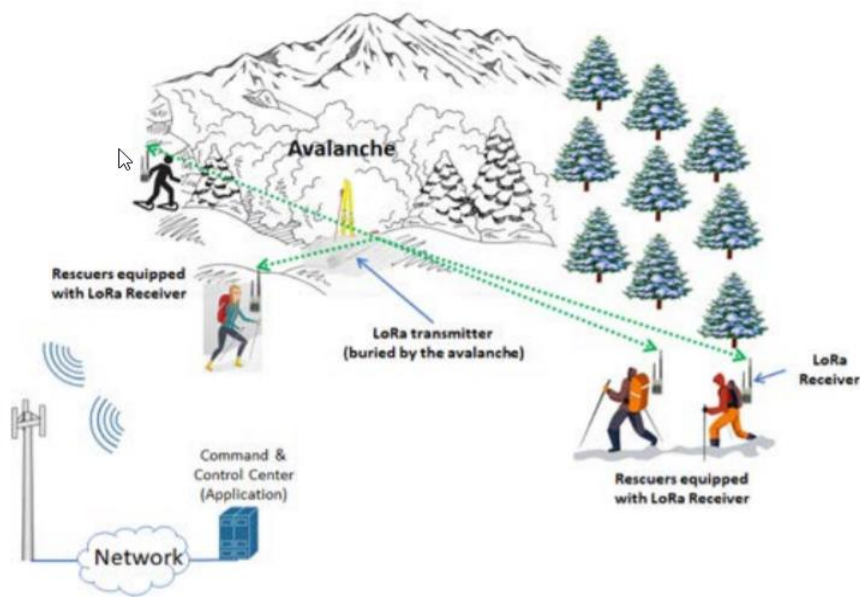
4.2.2 Λύσεις προερχόμενες από την μπαταρία αυτούσια

Μια λύση για εξοικονόμηση ενέργειας στην ίδια τη συσκευή θα μπορεί να δοθεί αναβαθμίζοντας την ίδια την μπαταρία. Διαδεχόμενες τις μη -επαναφορτιζόμενες, οι οποίες αρχικά προτιμηθήκαν για μείωση κόστους, είναι οι επαναφορτιζόμενες, κάτι που οδήγησε και στην ανάπτυξη τεχνικών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας για την απαιτούμενη φόρτιση. Παρά το γεγονός αυτό, δεν έχει κριθεί ως αποδοτική η χρήση τέτοιων μεθόδων. Αντικείμενο έρευνας και ταυτόχρονα λύση στην ανάγκη αυτή, μπορεί να αποτελέσει η ασύρματη φόρτιση, η οποία επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών ηλεκτρικής και μαγνητικής ακτινοβολίας. Ωστόσο, η απόσβεση, λόγω της απομάκρυνσης από την πηγή, είναι μεγάλη και μη αμελητέα καθιστώντας επί του παρόντος τη λύση της ασύρματης φόρτισης ως μη βιώσιμη, συνυπολογίζοντας σε αυτό και τις ενδεχόμενες επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία που προκαλούνται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

4.2.3 Εξοικονόμηση στη συσκευή (Σύστημα Search and Rescue)

Σε περιπτώσεις ατυχημάτων, για μια επιτυχημένη έρευνα και διάσωση εμπλεκόμενων ατόμων αποτελεί ο εντοπισμός τους. Για το σκοπό αυτό η τεχνολογία του IoT προσφέρει ισχυρά εργαλεία προσφέροντας δυνατότητες απόκτησης κι ανάλυσης δεδομένων στον αέρα. Στην ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος θα βοηθούσε η κατανόηση των καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο χρήστης, που ορίζει αντίστοιχα και τις καταστάσεις της συσκευής.



(a)

Εικόνα 12 - Αναπαράσταση σεναρίου *Search and Rescue Network*

Πηγή: LoRa System for Search and Rescue: Path Loss

Models and Procedures in Mountain Scenarios

G. M. Bianco, R. Giuliano, G. Marrocco, F. Mazzenga, A. Mejia-Aguilar

1. *low risk*, για παράδειγμα το wearable είναι σε κατάσταση φόρτισης, είτε ο χρήστης κοιμάται
2. *normal*, δεν υπάρχει κάποιος κίνδυνος
3. *High risk*, οριακές ενδείξεις κάποιου αισθητήρα, βιομετρικές ή χωροταξικές
4. *Emergency*, ο χρήστης βρίσκεται σε κατάσταση κινδύνου

Παράγοντας	Κατάσταση		
Διαχείριση αισθητήρων	Αισθητήρες απενεργοποιημένοι	Μερικοί αισθητήρες απενεργοποιημένοι	Αισθητήρες ενεργοποιημένοι
Συχνότητας των μεταβάσεων καταστάσεων	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη
Μετάδοση δεδομένων	Sleep	Radio ON	Transmission
Παράμετροι μετάδοσης	Μικρή ισχύς	Μεσαία ισχύς	Μεγάλη Ισχύς
Κατανάλωση ενέργειας / Απόδοση συστήματος	LOW⇒⇒⇒⇒	MEDIUM⇒⇒⇒⇒⇒	HIGH⇒⇒⇒⇒⇒⇒

Πίνακας 3 - Παράμετροι της διαχείρισης ενέργειας

Το επίπεδο φθοράς της μπαταρίας, ο κύκλος ζωής της, επηρεάζεται από μια πληθώρα παραγόντων. Ένας από αυτούς αποτελούν οι αισθητήρες που μπορεί να διαθέτει. Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας θα εξασφάλιζε το γεγονός η χρήση αυτών να γίνεται όταν είναι απαραίτητο. Ο πιο σημαντικός παράγοντας για να πετύχουμε τη μέγιστη κατά το δυνατόν ζωή της μπαταρίας αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας. Εύκολα γίνεται αντιληπτό σε οριακές καταστάσεις η συσκευή θα πρέπει να επιτυγχάνει μέγιστη διάρκεια ενεργοποίησης, προκειμένου να εξυπηρετεί τον εκάστοτε σκοπό της, πχ εντοπισμό θύματος από διασώστη. Η έρευνα του ζητήματος αυτού είναι πολυεπίπεδη και σε κάθε περίπτωση λαμβάνει υπόψιν την υλικοτεχνική υποδομή ενός τέτοιου συστήματος. Η κατεύθυνση της διαχείρισης ενέργειας συνεπώς σε ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να γίνεται με άξονα την κατά το δυνατό αύξηση της διάρκειας λειτουργίας της.

Αναπόσπαστο κομμάτι στη βελτίωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, αποτελεί η συμπεριφορά της συσκευής στην εκάστοτε υπάρχουσα στάθμη ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα , πως λειτουργεί η συσκευή ανάλογα με την ενέργεια τη δεδομένη στιγμή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η μετάβαση σε κατάσταση εξοικονόμησης ενέργειας ενός wearable, όταν το ποσοστό της μπαταρίας περάσει ένα ορισμένο κατώφλι. Στην περίπτωση ενός SAR συστήματος αισθητήρων, θα πρέπει να παραμένουν απενεργοποιημένοι για μεγαλύτερο διάστημα από ότι όταν η στάθμη ενέργειας είναι μεγαλύτερη.

4.3 Ο ADR Μηχανισμός

Ο Adaptive Data Rate (ADR) αποτελεί ένα μηχανισμό βελτιστοποίησης στο τρόπο μετάδοσης και ρυθμό των δεδομένων. Εξετάζει το χρόνο εκπομπής και τη κατανάλωση ενέργειας σε ένα δίκτυο LoRa. Ο μηχανισμός ADR ελέγχει τις ακόλουθες παραμέτρους μετάδοσης μιας τελικής συσκευής:

- ✓ Συντελεστή διάδοσης
- ✓ Εύρος ζώνης
- ✓ Ισχύ μετάδοσης

Ο ADR μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας της συσκευής, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι τα μηνύματα εξακολουθούν να λαμβάνονται σε πύλες. Όταν χρησιμοποιείται ADR, ο διακομιστής δικτύου θα δείξει στην τελική συσκευή ότι θα μειώσει την ισχύ μετάδοσης ή θα αυξήσει τον ρυθμό δεδομένων. Οι τελικές συσκευές που βρίσκονται κοντά σε πύλες θα πρέπει να χρησιμοποιούν χαμηλότερο συντελεστή διασποράς και υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, ενώ οι συσκευές πιο μακριά θα πρέπει να χρησιμοποιούν υψηλό συντελεστή διασποράς, επειδή χρειάζονται

υψηλότερο προϋπολογισμό σύνδεσης. Ο ADR πρέπει να ενεργοποιείται κάθε φορά που μια τελική συσκευή έχει επαρκώς σταθερές συνθήκες RF. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί γενικά να ενεργοποιηθεί για στατικές συσκευές. Εάν η στατική τελική συσκευή μπορεί να προσδιορίσει ότι οι συνθήκες RF είναι ασταθείς (για παράδειγμα, όταν ένα αυτοκίνητο είναι σταθμευμένο πάνω από έναν αισθητήρα στάθμευσης), το ADR θα πρέπει (προσωρινά) να απενεργοποιηθεί.

Οι κινητές τελικές συσκευές θα πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίζουν πότε βρίσκονται σε στάση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να επιτρέπουν την ADR κατά τη διάρκεια αυτών των ωρών. Οι τελικές συσκευές αποφασίζουν εάν θα πρέπει να χρησιμοποιείται ADR ή όχι, όχι η εφαρμογή ή το δίκτυο. (M. Haghghi, Z. Qin, D. Carboni, U. Adeel, F. Shi and J. A. McCann, 2016)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Επισκόπηση διαθέσιμων προσομοιωτών

5.1 Η ανάγκη για προσομοίωση

Ο μεγάλος αριθμός από ασύρματες τεχνολογίες που έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί, νομοτελειακά "γεννούν" μια σειρά από καινούριες ανάγκες-απαιτήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η διασύνδεση συσκευών, τοποθετημένες σε μεγάλες αποστάσεις. Το LoRa, προϊόν της LoRa Alliance™, αποτελεί μια εν δυνάμει λύση για τις απαιτήσεις αυτές. Τα πλεονεκτήματα του LoRa είναι αυτά που συνηγορούν προς αυτή την κατεύθυνση. Συνοπτικά και συγκεκριμένα, όπως διατυπώθηκε προηγουμένως, συνιστά μια λύση ευρείας περιοχής με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Συνεπώς γίνεται εύκολα αντιληπτό, πόσο ήσσονος σημασίας είναι η μελέτη του. Στα πλαίσια της

ευρύτερης αυτής μελέτης και με άξονα την αποφυγή περιττών, δύσχρηστων ή αναποτελεσματικών υλοποιήσεων με υψηλό κόστος, η δυνατότητα προσομοίωσης του σχεδιαζόμενου δικτύου θα συντελούσε σε μια πιο, κατά το δυνατόν, αξιολόγησή του. Με δεδομένο ειδικότερα ότι η σωστή παραμετροποίηση μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση μετρικών όπως η κατανάλωση ενέργειας και το Data Rate. Στον αντίποδα, η παραμετροποίηση αυτή αποτελεί μια σύνθετη εργασία, καθώς πρέπει να ληφθούν σε κάθε περίπτωση υπόψιν οι μεταβλητές του εκάστοτε προβλήματος καθώς και οι επικρατούσες καταστάσεις. Υπογραμμίζεται έτσι η σημασία του λογισμικού εξομοίωσης, πριν την τελική υλοποίηση. Οι προδιαγραφές του εκάστοτε προβλήματος είναι αυτές που θα καθορίσουν την απόφαση για το ποιο λογισμικό θα χρησιμοποιηθεί. Προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα και τις δυνατότητες ενός λογισμικού προσομοίωσης, θα πρέπει να γνωρίζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές του λογισμικού αυτού. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα υποστηριζόμενα από το λογισμικό λειτουργικά συστήματα, οι προαπαιτούμενες γνώσεις προγραμματισμού, οι πλατφόρμες στις οποίες μπορούν να αναπτυχθούν.

5.1.1 Συνοπτική ανάλυση των εξομοιωτών

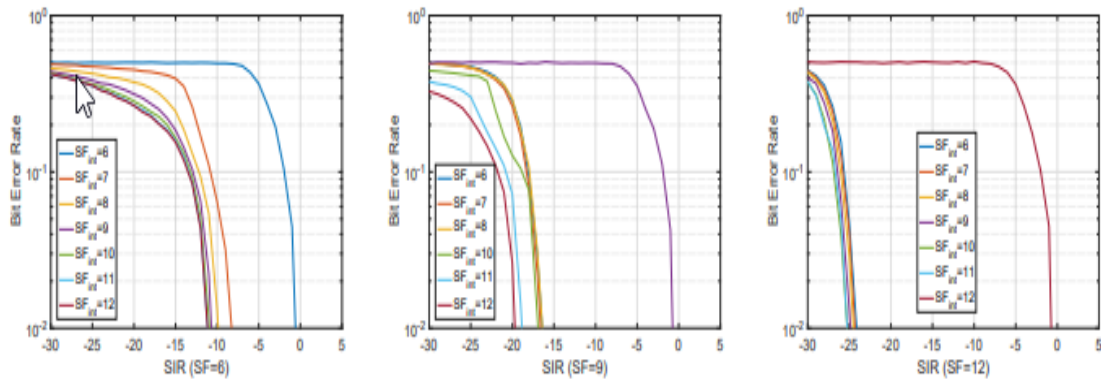
Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση διάφορων διαθέσιμων εξομοιωτών LoRa :

PhySimulator	http://lora.tti.unipa.it/
FLoRa	https://flora.aalto.fi/
Ns3 module	https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3199913
LoRaSim	https://www.lancaster.ac.uk/scc/sites/lora/

Πίνακας 4 - Simulators URL

5.1.1.1 PHY SIMULATOR

Εξομοιωτής υλοποιημένος σε MATLAB. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εξομοιώνει το link level του LoRa και να εξετάζει τη λήψη δυο μεταδόσεων LoRa, επικαλυπτόμενων και διαμορφωμένων με διαφορετικά SFs. Στο αντίστοιχο επιστημονικό άρθρο, περιγράφεται ότι ενώ τα SFs είναι δυνατόν να θεωρηθούν ορθοκανονικά, σε πραγματικές συνθήκες οι επικείμενες συγκρούσεις καθιστούν προβληματική τη λήψη τους. Το αποτέλεσμα της εξομοίωσης είναι παραγόμενα διαγράμματα, στα οποία απεικονίζεται για κάθε τιμή των spreading factors, τα οποία αλληλοεπιδρούν με σήματα των υπόλοιπων spreading factors, πακέτο, σύμβολο και bit error rate. Ο Phy Simulator υποστηρίζει τη δυνατότητα μεταβολής παραμέτρων, όπως το μέγιστο πλήθος ανά βήμα δοκιμών, το εύρος ζώνης κλπ. Στα μειονεκτήματα, η απουσία GUI (γραφικού περιβάλλοντος χρήστη), το οποίο έχει σαν επακόλουθο η παραμετροποίηση να συντελείτε στις τιμές των μεταβλητών του κώδικα.



Εικόνα 13 - Παραδείγματα εξομοίωσης σε *Phy Simulator*

Πηγή: Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-level Performance

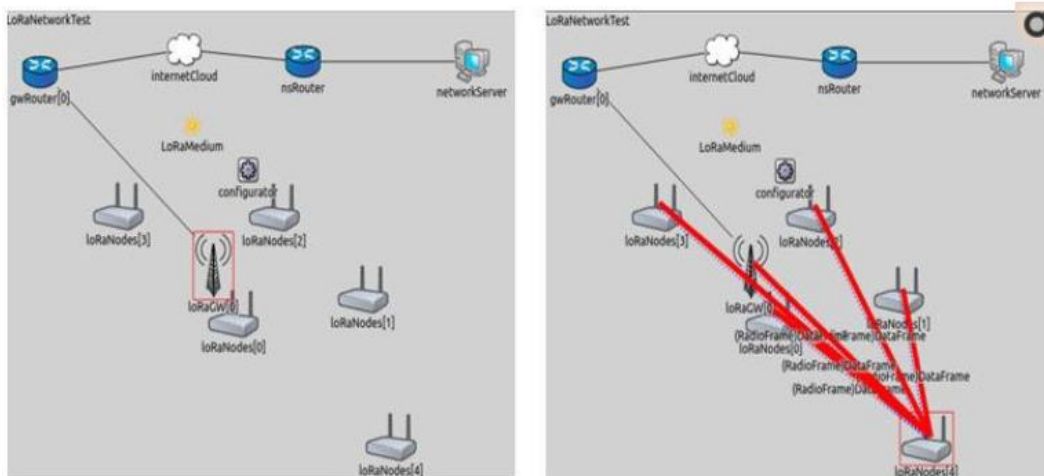
Daniele Croce, Michele Gucciardo, Stefano Mangione, Giuseppe Santaromita, Ilenia Tinnirello

5.1.1.2 FLoRa

Συνιστά μια δομή εξομοίωσης, στηριζόμενη στο OMNET++, μια αρθρωτή βιβλιοθήκη προσομοίωσης διακριτών συμβάντων και στη δομή INET, μοντέλο ανοιχτού κώδικα με κύριο σκοπό την αξιολόγηση μέσω πειραμάτων κι εξομοιώσεων πολλαπλών δικτυακών πρωτοκόλλων, προσφέροντας διαδικτυακά μοντέλα όπως τα επίπεδα OSI (φυσικό επίπεδο, σύνδεσης δικτύου μεταφοράς και εφαρμογής) TCP, UDP, IPv4, IPv6 κλπ. Το OMNET++ αποτελεί ένα δημοφιλές εργαλείο εξομοιώσεων διάφορων μετρικών, βασισμένο σε C++ και χρησιμοποιείται και για εξομοίωση δικτύων. Το γραφικό του περιβάλλον είναι αυτό που προσδίδει στο FLoRa μια αποδοτική γραφική διεπαφή, σε σύγκριση και με τους υπόλοιπους εξομοιωτές. Αξιοποιώντας τις δομές στις οποίες βασίζεται, συνοπτικά ο εξομοιωτής FLoRa:

- Παρέχει να ακριβές μοντέλο του φυσικού επιπέδου του LoRa

- Καθιστά δυνατή την προσομοίωση δικτύου με χρήση μιας ή περισσότερων πυλών
- Επιτρέπει τη δημιουργία κόμβων LoRa, πυλών και διακομιστή δικτύου
- Παρέχει σε κάθε εκτέλεση εξομοίωσης στατιστικά δεδομένα από την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο
- Περιλαμβάνει δείγματα σεναρίων εξομοίωσης



Εικόνα 14 - Framework for LoRa (FLoRa) γραφική διεπαφή

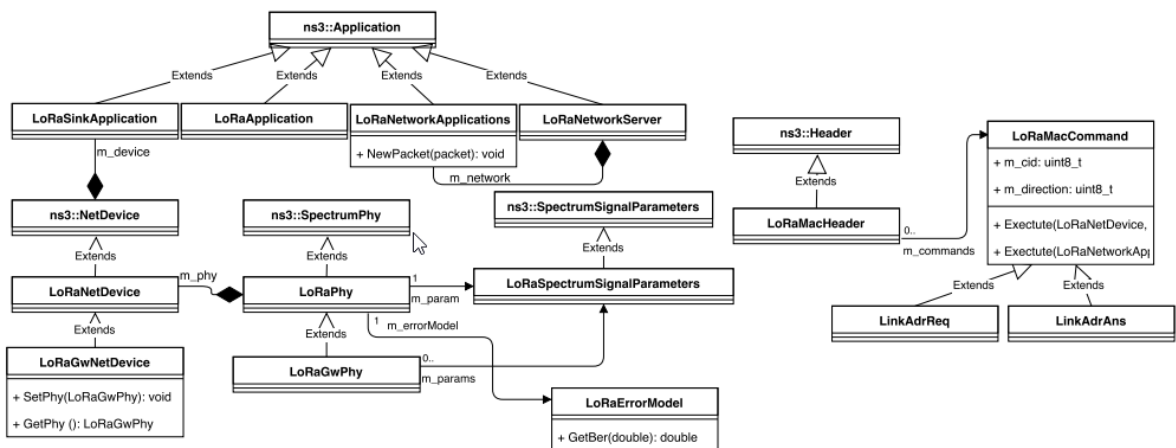
Πηγή: Performance Analysis of IoT and Long-Range Radio-Based Sensor Node and Gateway Architecture for Solid Waste Management Shaik Vaseem Akram , Rajesh Singh , Mohammed A. AlZain , Anita Gehlot , Mamoon Rashid, Osama S. Faragallah , Walid El-Shafai and Deepak Prashar

5.1.1.3 NS3

Η τρίτη προς εξέταση περίπτωση δεν συνιστά διακριτό εξομοιωτή, όπως οι υπόλοιπες περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί ένα module, με βάση τον εξομοιωτή ns-3. Ο ns-3 είναι ένας διακριτού χρόνου εξομοιωτής δικτύου για συστήματα Διαδικτύου, με σκοπό Ακαδημαϊκή χρήση κι έρευνα, ανοιχτού κώδικα.

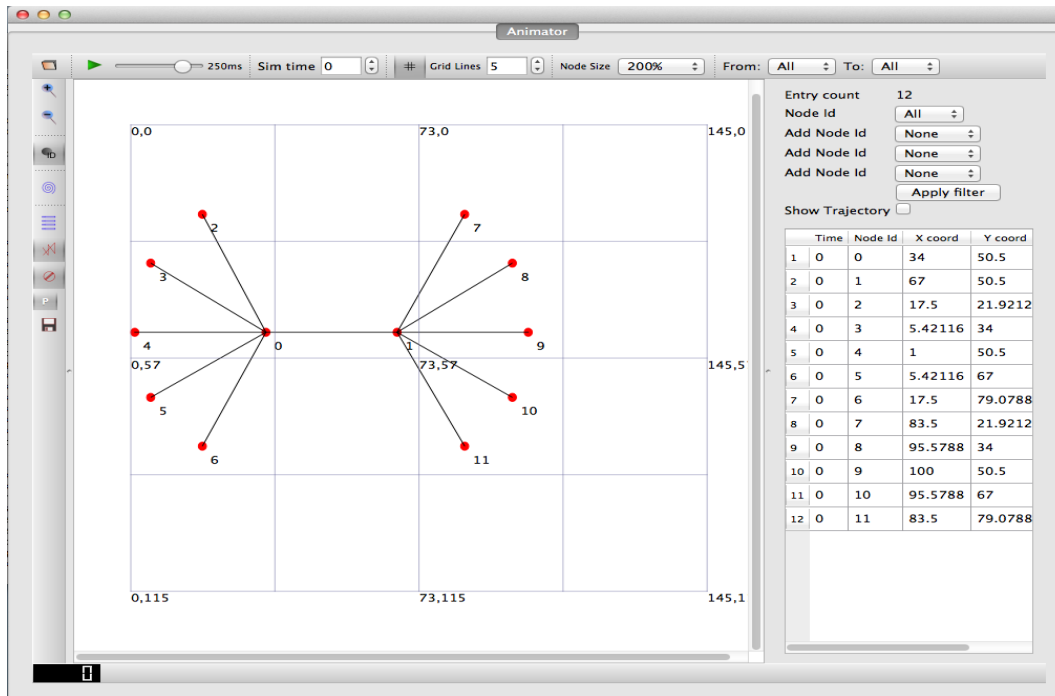
(Christos Bouras, Apostolos Gkamas, Spyridon Aniceto Katsampiris Salgado, 2021)

Ο εξομοιωτής αυτός είναι υλοποιημένος στην γλώσσα C++. Παράλληλα, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί ργθση στη γραμμή εντολών. Το εξεταζόμενο module υποστηρίζει την A κλάση του πρωτοκόλλου LoRaWAN. Αυτό ερμηνεύεται ως εξής: Η προσομοίωση μπορεί να γίνει για συσκευές που αποστέλλουν uplink μεταδόσεις και για Server που αποστέλλει downlink μεταδόσεις. Στην προσπάθεια να δοθεί μια λύση εύκολα διαχειριστική και παραμετροποιήσιμη, πραγματοποιείται προσομοίωση από το module όλων των επιπέδων του LoRa, καθιστώντας δυνατή στην πλευρά του Server μιας πληθώρας διαφορετικών αλγορίθμων. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό αποτελεί η απόδοση στατιστικών και μετρικών που αφορούν την καταναλισκόμενη ενέργεια στο φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου.



Εικόνα 15 - Μοντέλο LoRaWAN σε UML

Πηγή: A LoRaWAN Module for ns-3: Implementation and Evaluation Brecht Reynders, Qing Wang, Soie Pollin



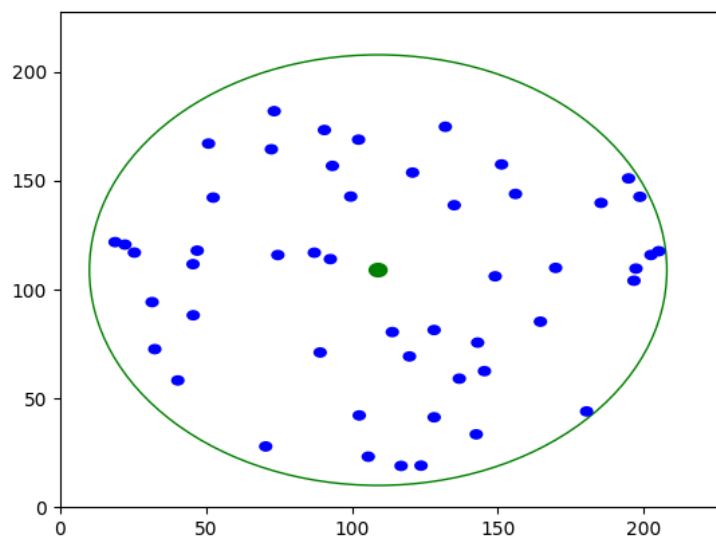
Εικόνα 16 - Οπτικοποίηση εξομοίωσης NS-3 module μέσω του animator NetAnim

5.1.1.4 LoRaSim

Ο εξομοιωτής που χρησιμοποιήθηκε για το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας, LoRaSim αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Lancaster στα πλαίσια έρευνας και μελέτης της επεκτασιμότητας του LoRa. Έχει υλοποιηθεί σε ρυθμό, ενσωματώνοντας τις βιβλιοθήκες NumPy, Matplotlib, Simpy κι αποτελεί έναν ειδικά κατασκευασμένο εξομοιωτή διακριτών γεγονότων. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε εξομοίωσης, διαθέτει μια σειρά από διαφορετικά αρχεία στα οποία γίνεται περιγραφή διακριτών κάθε φορά σεναρίων. Δίνεται για παράδειγμα η δυνατότητα προσομοίωσης από έναν έως 4 σταθμούς λήψης. Επιπρόσθετα, παρέχεται η δυνατότητα εξομοίωσης συγκρούσεων στους κόμβους, για τους οποίους επίσης υπάρχει η δυνατότητα εξομοίωσης με κατευθυνόμενες ή μη κεραιές. Το αποτέλεσμα

της εξομοίωσης είναι ένα αρχείο δεδομένων με τα χαρακτηριστικά και τις λεπτομέρειες του δικτύου (κόμβους, μεταδόσεις, συγκρούσεις και συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια).

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα, θέτοντας την αντίστοιχη τιμή στην κατάλληλη μεταβλητή του εκτελέσιμου αρχείου, να παραχθούν μια σειρά από γραφικές παραστάσεις, όπως στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 17 - Παραγόμενη γραφική παράσταση από εξομοίωση σε *LoRaSim*

5.1.2 Συνοπτική συγκριτική των εξομοιωτών

Στον πίνακα κα που ακολουθεί, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά μια σύγκριση των επιμέρους χαρακτηριστικών των εξομοιωτών τους οποίους αναφέραμε προγενέστερα:

PHY Simulator		FLoRa	NS-3 module	LoRaSim
Τύπος εξομοιωτή	Διακριτού χρόνου	Διακριτού χρόνου	Διακριτού χρόνου	Διακριτού χρόνου
Τύπος άδειας	Ανοικτού κώδικα	Ανοικτού κώδικα	Ανοικτού κώδικα	Creative Commons Attribution 4.0
Γλώσσα προγραμματισμού	MATLAB	C++	C++,Python	Python
GUI	Μόνο γραφικές παραστάσεις	NAI	NAI	Μόνο γραφικές παραστάσεις
Υποστηριζόμενες πλατφόρμες	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS
Ιστοσελίδα	NAI	NAI	OXI	NAI
Στατιστικά δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας	ΌΧΙ	NAI	NAI	ΌΧΙ

Πίνακας 5 - Συγκριτική των εξομοιωτών

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι 3 είναι τα βασικά σημεία, όταν έρχεται η στιγμή για την αντιπαραβολή των διαθέσιμων εξομοιωτών:

- Η πλατφόρμα στην οποία θα γίνει η εξομοίωση
- Η γλώσσα προγραμματισμού στην οποία είναι υλοποιημένος ο εξομοιωτής
- Η επεκτασιμότητα που σχετίζεται με το αν είναι ανοιχτού κώδικα ή όχι

Μετά και την περιγραφή λοιπόν των επιμέρους χαρακτηριστικών, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι :

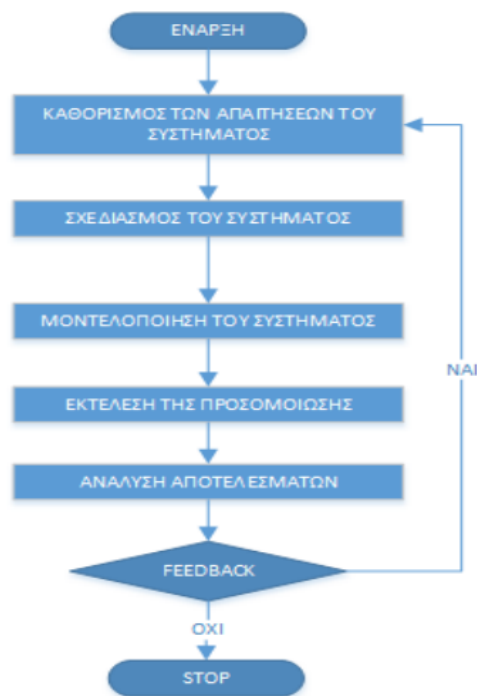
- όλοι οι εξομοιωτές είναι διακριτών γεγονότων
- Οι γλώσσες προγραμματισμού με βάση τις οποίες έχουν υλοποιηθεί τα επιμέρους λογισμικά, είναι όλες δημοφιλείς και υποστηρίζονται από μεγάλες κοινότητες
- Είναι δωρεάν
- Τρέχουν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα είτε άμεσα είτε έμμεσα

- Όλοι οι εξομοιωτές, πλην του NS3, συνοδεύονται από ιστοσελίδα με αναλυτικές οδηγίες εγκατάστασης και χρήσης
- Μόνο οι FLoRa και LoRaSim παρέχουν στατιστικά που αφορούν την κατανάλωση ενέργειας
- LoRasim και PHY Simulator στερούνται κάποιας γραφικής διεπαφής χρήστη, και τα εξαγόμενα αποτελέσματα αποτελούν γραφικές παραστάσεις

5.1.3 Μοντελοποίηση της προσομοίωσης

Τι θα πρέπει να διαθέτει ένα λογισμικό εξομοίωσης προκειμένου να το επιλέξει ένας χρήστης; Η απάντηση στο ερώτημα αυτό αποτελούν ορισμένες επιμέρους δυνατότητες του εκάστοτε λογισμικού:

- ✓ Τοπολογία: Ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να καθορίσει την τοπολογία που σχεδιάζει
- ✓ Χαρακτηριστικά του δικτύου: Πλήθος και χαρακτηριστικά των κόμβων, αποστάσεις μεταξύ των κόμβων, ρυθμός αποστολής δεδομένων
- ✓ Εξαγόμενα αποτελέσματα-πληροφορίες: Θα πρέπει να παρέχονται στο χρήστη όλες οι σχετιζόμενες με το δίκτυο προσομοίωσης μετρικές και στατιστικά στοιχεία καθώς και να οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα αυτά.
- ✓ Πρωτόκολλα: Θα πρέπει να υποστηρίζεται μια γκάμα διαφορετικών πρωτοκόλλων.



Εικόνα 18 – Διαδικασία εξομοίωσης

Στην Εικόνα 18 βλέπουμε μια σειρά από ενδεικτικά βήματα τα οποία απαρτίζουν μια διαδικασία εξομοίωσης. Για να κατανοήσουμε ένα πρόβλημα και να σχεδιάσουμε τη λύση του, πρωτίστως θα πρέπει να ορίσουμε το πρόβλημα. Στο στάδιο της περιγραφής του προβλήματος θα καθοριστούν οι απαιτήσεις του καθώς και οι μεταβλητές που το επηρεάζουν και πρέπει να ληφθούν υπόψιν.

Στη συνέχεια, θα πρέπει να προχωρήσουμε σε σχεδιασμό της λύσης, στην περίπτωση μας του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να οριστεί η τοπολογία του δικτύου, οι ιδιότητες των κόμβων, το πρωτόκολλο υλοποίησης.

Αφού καθοριστούν οι μεταβλητές αυτές, προχωράμε στο τελευταίο βήμα, το οποίο είναι η λύση του προβλήματος, η εκτέλεση δηλαδή της προσομοίωσης κι η ανάλυση των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

Η επεξεργασία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων μπορεί να οδηγήσει σε ανατροφοδότηση κι επανάληψη της προσομοίωσης με διαφοροποιημένα δεδομένα. Σε διαφορετική περίπτωση προχωρούμε σε μελέτη και ανάλυση των παραγόμενων μετρικών και δεδομένων.

5.2 Δομή του εξομοιωτή LoRaSim

5.2.1 Χαρακτηριστικά LoRaSim

Εγκατάσταση

Το LoRaSim αποτελείται από 4 Python scripts:

- *loraDir.py* : προσομοιώνει έναν σταθμό βάσης
- *loraDirMulBs.py* : προσομοιώνει περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης (έως 24)
- *directionalLoralntf.py* : προσομοιώνει κόμβους με κατευθυντική κεραία και πολλαπλά δίκτυα
- *oneDirectionalLoralntf.py* : προσομοιώνει σταθμούς βάσης με κατευθυντική κεραία και πολλαπλά δίκτυα

Όλα έχουν σαν προαπαιτούμενο τις ακόλουθες βιβλιοθήκες : matplotlib, simpy και numpy.

Χρήση

Όλοι οι προσομοιωτές λειτουργούν κυρίως με τον ίδιο τρόπο και λαμβάνουν τις ίδιες παραμέτρους.

Σύνοψη

- ***./loraDir.py*** <NODES> <AVGSEND> <EXPERIMENT> <SIMTIME> [COLLISION]
- ***./loraDirMulBS.py*** <NODES> <AVGSEND> <EXPERIMENT> <SIMTIME> <BASESTATIONS> [COLLISION]
- ***directionalLoralntf.py*** <NODES> <AVGSEND> <EXPERIMENT> <SIMTIME> <BASESTATIONS> <COLLISION> <DIRECTIONALITY> <NETWORKS> <BASEDIST>

- **oneDirectionalLoraIntf.py** <NODES> <AVGSEND> <EXPERIMENT> <SIMTIME> <BASESTATIONS> <COLLISION> <DIRECTIONALITY> <NETWORKS> <BASEDIST>

Περιγραφή

<NODES>

Ο αριθμός των κόμβων για την εξομοίωση.

<AVGSEND>

μέσο διάστημα αποστολής σε χιλιοστά του δευτερολέπτου.

<EXPERIMENT>

Το πείραμα είναι ένας ακέραιος αριθμός που καθορίζει με ποιες ρυθμίσεις ραδιοφώνου εκτελείται η προσομοίωση. Όλοι οι κόμβοι έχουν διαμορφωθεί με σταθερή ισχύ μετάδοσης και με μία μόνο συχνότητα μετάδοσης, εκτός εάν αναφέρεται διαφορετικά.

- 0
χρησιμοποιήστε τις ρυθμίσεις με την πιο αργή επίπεδη τιμή (SF12, BW125, CR4 / 8).
- 1
παρόμοιο με το πείραμα 0, αλλά χρησιμοποιήστε μια τυχαία επιλογή 3 συχνοτήτων μετάδοσης.
- 2
χρησιμοποιήστε τις ρυθμίσεις με τον ταχύτερο ρυθμό δεδομένων (SF6, BW500, CR4 / 5).
- 3
βελτιστοποιήστε τη ρύθμιση ανά κόμβο με βάση την απόσταση από την πύλη.
- 4
χρησιμοποιήστε τις ρυθμίσεις όπως ορίζονται στο LoRaWAN (SF12, BW125, CR4 / 5).
- 5
παρόμοιο με το πείραμα 3, αλλά βελτιστοποιεί επίσης την ισχύ μετάδοσης

<SIMTIME>

συνολικός χρόνος λειτουργίας σε χιλιοστά του δευτερολέπτου.

<BASESTATIONS>

Πλήθος των προς εξομοίωση σταθμών βάσης. Μπορούν να είναι 1, 2, 3, 4, 6, 8 ή 24.

<COLLISION>

ορίζουμε σε 1 για να ενεργοποιηθεί ο πλήρης έλεγχος σύγκρουσης, 0 για να χρησιμοποιήσουμε έναν απλοποιημένο έλεγχο (προεπιλογή). Με τον απλοποιημένο έλεγχο, δύο μηνύματα συγκρούονται όταν φτάνουν ταυτόχρονα, με την ίδια συχνότητα και συντελεστή διάδοσης. Ο πλήρης έλεγχος σύγκρουσης λαμβάνει υπόψη το «αποτέλεσμα λήψης», σύμφωνα με το οποίο ένα από τα δύο μηνύματα σύγκρουσης μπορεί να περάσει ανάλογα με το σχετικό χρόνο και τη διαφορά στην ισχύ λήψης.

<DIRECTIONALITY>

ορίζουμε σε 1 για να ενεργοποιήσουμε κατευθυντική κεραία στους κόμβους

<NETWORKS>

πλήθος δικτύων LoRa.

<BASEDIST>

X-απόσταση μεταξύ δυο σταθμών βάσης.

Output

Το αποτέλεσμα κάθε εκτέλεσης προσομοίωσης θα προσαρτηθεί σε ένα αρχείο με το όνομα expX.dat, όπου το X είναι ο αριθμός πειράματος. Το αρχείο περιέχει έναν πίνακα τιμών διαχωρισμένων με χώρο για κόμβους, συγκρούσεις, μεταδόσεις και συνολική ενέργεια που δαπανάται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Πειράματα

6.1 Περιγραφή του πειράματος

Η διαδικασία των πειραμάτων έγινε με σκοπό τον υπολογισμό του DER – Data Extraction Rate και της καταναλισκόμενης ενέργειας στο δίκτυο, Network energy Consumption (NEC). Από τη στιγμή που ερευνούμε εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυα LoRa, αντιλαμβανόμαστε ότι το ζητούμενο είναι η βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται από το δίκτυο προκειμένου να αποσταλούν τα μηνύματα. Ο ρυθμός εξαγωγής δεδομένων (DER) αποτυπώνει την αναλογία των μηνυμάτων που ελήφθησαν προς τα μηνύματα που στάλθηκαν, με την τιμή του να κυμαίνεται από 0 έως 1.

$$DER = \frac{\sum \text{packet sent} - \sum \text{collision}}{\sum \text{packet sent}}$$

- Packet sent: τα πακέτα που αποστέλλονται από κάθε κόμβο
- Collision: οι συγκρούσεις κατά την αποστολή πακέτων

$$NEC = \frac{\sum_{i=0}^n t \text{ packet}_i * TxPower_i * V * \text{packet sent}_i}{10^6}$$

- i: ο δείκτης του κόμβου
- n: τ πλήθος των κόμβων
- t packet: ο χρόνος αποστολής πακέτου για κάθε κόμβο
- Tx Power: η ισχύς μετάδοσης
- V: η ισχύς κάθε κόμβου
- packet sent: τα πακέτα που αποστέλλονται από κάθε κόμβο

```

C:\Windows\System32\cmd.exe - python loraDir.py 1 36000 0 360000 0
C:\Users\WlamisT\Desktop\Thesis\lorasim>1 36000 0 360000 0
'i' is not recognized as an internal or external command,
operable program or batch file.

C:\Users\WlamisT\Desktop\Thesis\lorasim>python loraDir.py 1 36000 0 360000 0
Nodes: 1
AvgSendTime (exp. distributed): 36000
Experiment: 0
Simtime: 360000
Full Collision: False
amin -132.25 Lpl 146.25
maxDist: 98.95336562721985
First node
('node 0', 'x', 43.07117988130198, 'y', 155.69574656897353, 'dist: ', 80.04707765072371)
lpl: 139.6767381929362
the rssi: -119.6767381929362
frequency 860000000 symTime 32.768
bw 125 sf 12 cr 4 rssi -119.6767381929362
sf 12 cr 4 pl 20 bw 125
rectime node 0 1712.1280000000002
nrCollisions 0
energy (in J): 2.486009856000001
sent packets: 11
collisions: 0
received packets: 11
processed packets: 11
lost packets: 0
DER: 1.0
DER method 2: 1.0
Press Enter to continue ...

```

Εικόνα 19 – Εκτέλεση δοκιμαστικού σεναρίου

Στην Εικόνα 19 – Εκτέλεση δοκιμαστικού σεναρίου φαίνεται η εκτέλεση ενός απλού δοκιμαστικού σεναρίου, όπου έχουμε 1 κόμβο προφανώς χωρίς συγκρούσεις και χρησιμοποιούμε τα χαρακτηριστικά του Experiment 0, όπως περιγράφονται στο 5.2 Δομή του εξομοιωτή LoRaSim. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

Παράμετρος	Τιμή
Nodes	1
SF	12
BW (kHz)	125
AvgSendTime (ms)	36000
Simtime (ms)	360000
Experiment	0
Collision	True
CR	4/8
megethosPacketou (Bytes) ²	20

Πίνακας 6 – Παράμετροι πρώτου δοκιμαστικού σεναρίου

² megethosPacketou έχουμε ονομάσει στον κώδικα τη μεταβλητή που αφορά το μέγεθος του πακέτου σε bytes που αποστέλλει ο κάθε κόμβος, ώστε να είναι εύκολα προσπελάσιμη και διαχειρίσιμη.

Το εξαγόμενο αρχείο από την εκτέλεση, το οποίο έχει τη μορφή expX.dat, όπου X ο αριθμός του πειράματος, έχει τα εξής περιεχόμενα:

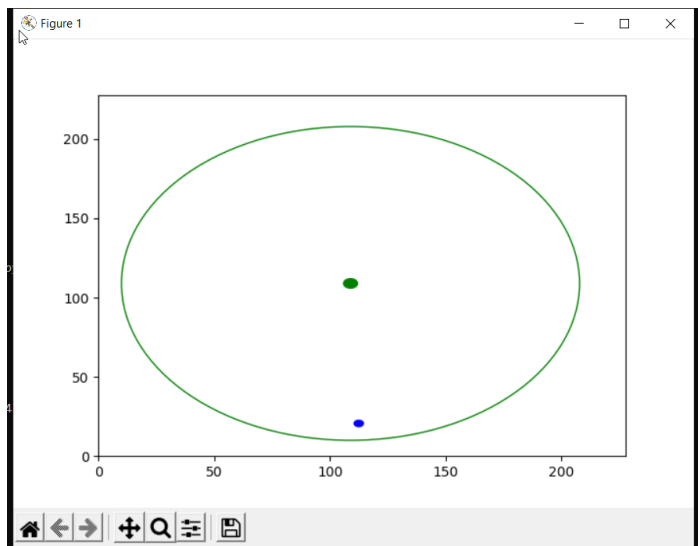
#nrNodes	nrCollisions	nrTransmissions	OverallEnergy
1	0	11	2.486009856000001

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης, σε ότι αφορά τα ζητούμενα DER και NEC είναι τα εξής:

Παράμετρος	Τιμή
DER	1
NEC (J)	2.486009856000001

Πίνακας 7 – Αποτελέσματα πρώτου δοκιμαστικού σεναρίου

Το εξαγόμενο γράφημα έχει την παρακάτω μορφή:



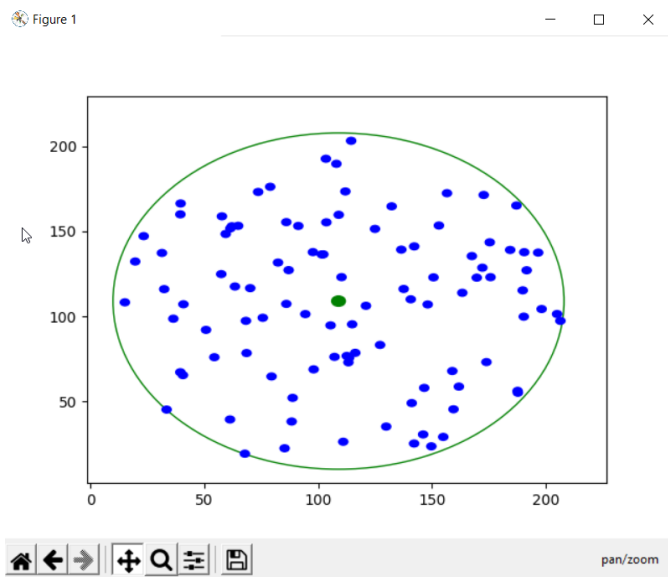
Εικόνα 20 - Παραγόμενη γραφική παράσταση από το δοκιμαστικό σενάριο σε LoRaSim

Στο δεύτερο δοκιμαστικό σενάριο, αυξάνουμε τους κόμβους σε 100 και θεωρώντας ότι σε έναν τέτοιο αριθμό διεπαφών οι συγκρούσεις είναι αναπόφευκτες, θέτουμε την τιμή της παραμέτρου collision σε 1.

Παράμετρος	Τιμή
Nodes	100
SF	12
BW (kHz)	125
AvgSendTime (ms)	36000
Simtime (ms)	360000
Experiment	0
Collision	True
CR	4/8
megethosPacketou (byte) ³	20

Πίνακας 8 - Παράμετροι δεύτερου δοκιμαστικού σεναρίου

Το εξαγόμενο γράφημα φαίνεται παρακάτω:



Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα:

³ megethosPacketou έχουμε ονομάσει στον κώδικα τη μεταβλητή που αφορά το μέγεθος του πακέτου σε bytes που αποστέλλει ο κάθε κόμβος, ώστε να είναι εύκολα προσπελάσιμη και διαχειρίσιμη.

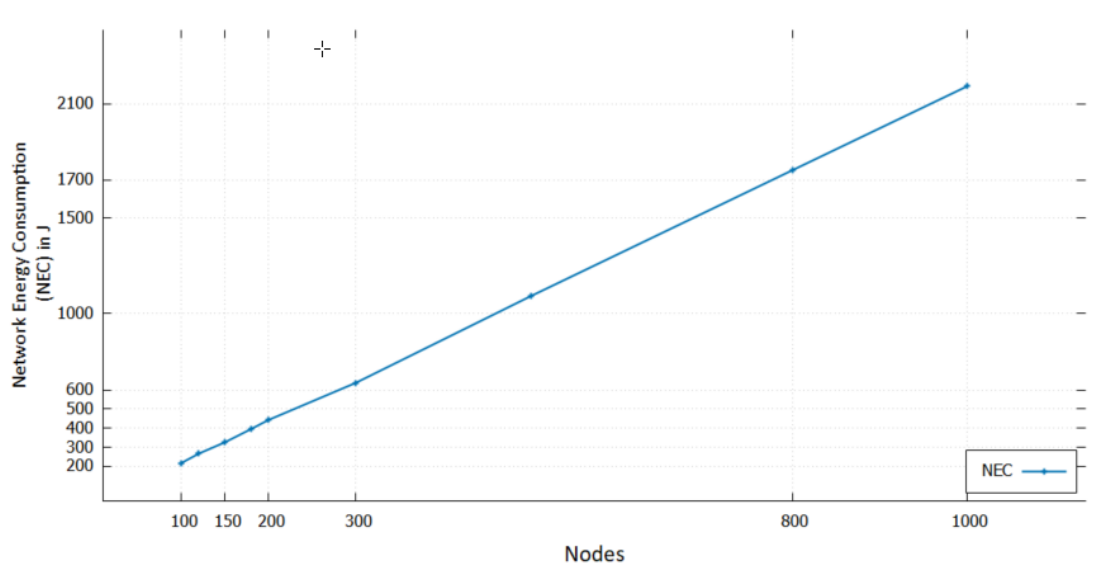
Παράμετρος	Τιμή
nrCollisions	895
Packets sent	937
Packets received	38
NEC (J)	211.76283955200017
DER	0.0044823906083244394

Πίνακας 9 – Αποτελέσματα δεύτερου δοκιμαστικού σεναρίου

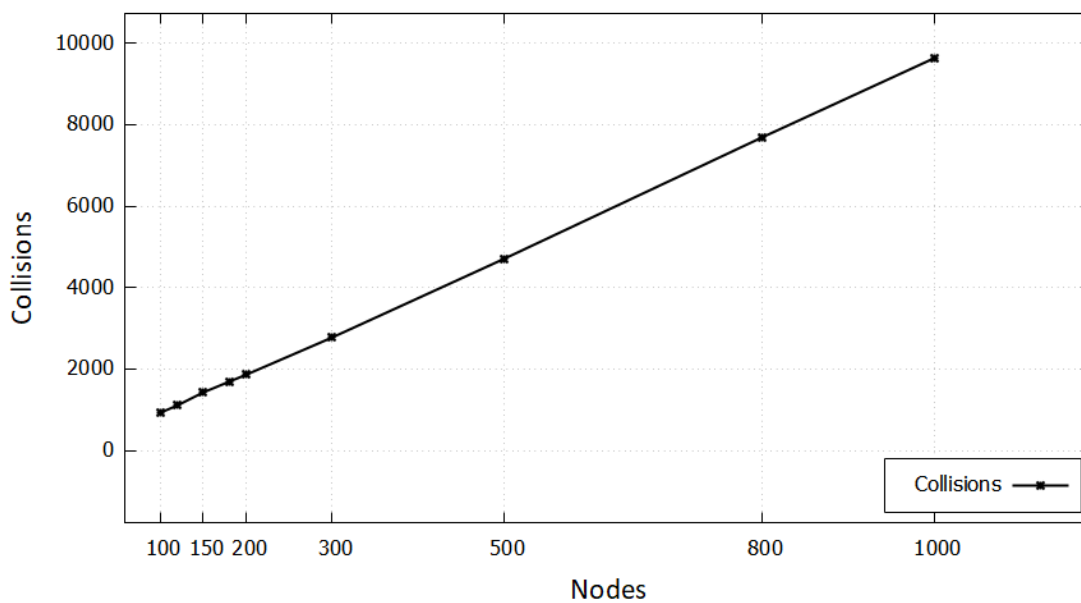
Επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του δοκιμαστικού σεναρίου για 120, 150, 180, 200,300,500, 800 και 1000 κόμβους :

Παράμετρος	Δοκιμαστικό Σενάριο								
Nodes	100	120	150	180	200	300	500	800	1000
AvgSend (ms)	36000								
SimTime	360000								
Experiment	0								
Collision	1								

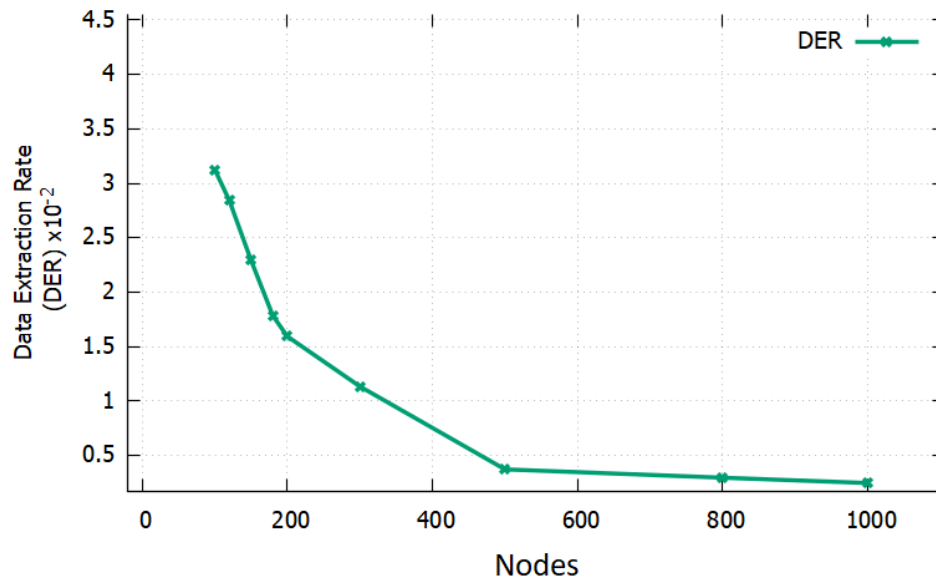
Πίνακας 10 – Παράμετροι δοκιμαστικών σεναρίων



Εικόνα 21 – Network Energy Consumption Δοκιμαστικού Σεναρίου



Εικόνα 22 – Πλήθος συγκρούσεων σε σχέση με το πλήθος των κόμβων



Εικόνα 23 - Data Extraction Rate σε σχέση με το πλήθος των κόμβων

Μια ακόμα μετρική που επηρεάζει την απόδοση του δικτύου είναι οι συγκρούσεις. Οι συγκρούσεις πακέτων συμβαίνουν όταν δύο ή περισσότεροι κόμβοι δικτύου προσπαθούν ταυτόχρονα να στείλουν δεδομένα, με αποτέλεσμα συγκρούσεις και πιθανή απώλεια μεταδιδόμενων δεδομένων, προκαλώντας αρνητική επίδραση στην απόδοση του συστήματος. (Eduardo Sallum , Nuno Pereira, Mário Alves and Max Santos, 2019). Στα παραγόμενα διαγράμματα του δοκιμαστικού σεναρίου παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι κόμβοι, αυξάνεται και το πλήθος των συγκρούσεων, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και μικρότερο ρυθμό εξαγωγής δεδομένων (DER), καθιστώντας το δίκτυο μη αποδοτικό. Ένας από τους κύριους περιορισμούς στο LoRaWAN είναι η μείωση της χωρητικότητας λόγω συγκρούσεων προκαλείται από τον μηχανισμό πρόσβασης καναλιού ALOHA (που χρησιμοποιούμε στο δοκιμαστικό σενάριο στον εξομοιωτή Experiment 0) και κατ' επέκταση της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, έχει διεξαχθεί

εκτεταμένη έρευνα, που δε θα αναλύσουμε περαιτέρω στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

6.2 Σενάρια Εξομοίωσης

Σε ότι αφορά τα σενάρια εξομοίωσης θα χρησιμοποιήσουμε τα χαρακτηριστικά του πειράματος 3 (Exp. 3) και του πειράματος 5 (Exp. 5), όπως αυτά περιγράφονται στην ενότητα 5.2.1 Χαρακτηριστικά LoRaSim. Τα σενάρια εκτελέστηκαν με στόχο την αξιολόγηση της επεκτασιμότητας και της απόδοσης των εφαρμογών LoRa. Πιο συγκεκριμένα, σε ότι αφορά το Exp. 3, κάθε κόμβος έχει βέλτιστες ρυθμίσεις σε ότι αφορά την απόσταση από την πύλη. Στο Exp.5 έχουμε και βέλτιστη ενέργεια μετάδοσης. Το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου - payload το διατηρήσαμε στα 20 byte όπως και το AvgSendTime στα 36000 ms (σε σχέση με τα δοκιμαστικά σενάρια). Λαμβάνουμε υπόψιν και τον παράγοντα συγκρούσεις που προκύπτουν στο δίκτυο, συνεπώς η τιμή της μεταβλητής collision τίθεται σε 1. Για να εκτελέσουμε την εξομοίωση, εκτελέσαμε την ακόλουθη εντολής γραμμής:

```
python loraDir.py <Nodes> <AvgSend> <Experiment> <SimTime> [Collision]
```

Παράμετρος	Τιμή	
	Exp. 3	Exp. 5
TP	14	Ελάχιστο
SF	Βέλτιστο	Βέλτιστο
BW (kHz)	Βέλτιστο	Βέλτιστο
Collision	1	1
CR	4/5	4/5
megethosPacketou (byte) ⁴	20	20

Πίνακας 11– Προκαθορισμένοι παράμετροι πειραματικών σεναρίων

Υλοποιήσαμε 4 διαφορετικά σεναρία προσομοίωσης. Στο Σενάριο I, επιλέγουμε 100,120,150,180,200 και 500 κόμβους. Θέτουμε το χρόνο εξομοίωσης (SimTime) 10 λεπτά (600000 ms) ,το μέσο διάστημα αποστολής (AvgSendTime) σε 36000 ms, επιλεγούμε την τιμή 3 για την παράμετρο πείραμα (Experiment) κι όπως αναφέραμε, την τιμή 1 για την παράμετρο των συγκρούσεων (Collision).

Στο Σενάριο II, για το ίδιο πλήθος κόμβων με το Σενάριο I, διατηρούμε το μέσο διάστημα αποστολής (AvgSendTime) σε 36000 ms, επιλεγούμε την τιμή 3 για την παράμετρο πείραμα (Experiment) και την τιμή 1 για την παράμετρο των συγκρούσεων (Collision). Αυτό που αλλάζουμε είναι η τιμή της παραμέτρου < SimTime> που στη μια υποπερίπτωση είναι η το ½ της αντίστοιχης στο Σενάριο I, δηλαδή 300000 ms και στη δεύτερη υποπερίπτωση η διπλάσια, δηλαδή 1200000 ms. Στο Σενάριο III χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες τιμές για τις παραμέτρους με το Σενάριο III,

⁴ megethosPacketou έχουμε ονομάσει στον κώδικα τη μεταβλητή που αφορά το μέγεθος του πακέτου σε bytes που αποστέλλει ο κάθε κόμβος, ώστε να είναι εύκολα προσπελάσιμη και διαχειρίσιμη.

με τη διαφορά να έγκειται στην επιλογή πειράματος, όπου σε αυτό το σενάριο ήταν η τιμή 5.

Στο σενάριο IV , εκτελέσαμε ένα σενάριο με 100 κόμβους, με το χρόνο εξομοίωσης (SimTime) 12 λεπτά (720000 ms) ,το μέσο διάστημα αποστολής (AvgSendTime) σε 30000 ms, επιλεγούμε την τιμή 1 για την παράμετρο πείραμα (Experiment) και την τιμή 1 για την παράμετρο των συγκρούσεων (Collision). Αυτό που διαφοροποιούμε σε κάθε εκτέλεση είναι η τιμή της μεταβλητής megethosPacketου που αποτελεί το racket payload- μέγεθος ωφέλιμου φορτίου, προκειμένου να διαπιστώσουμε εάν και πώς το διαφορετικό μέγεθος ωφέλιμου φορτίου επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας.

6.2.1 Σενάριο I

Παράμετρος	Σενάριο I					
	100	120	150	180	200	500
Πλήθος κόμβων	100	120	150	180	200	500
AvgSend (ms)	36000					
SimTime	600000					
Exp	3					
Collision	1					

Πίνακας 12 – Τιμές παραμέτρων Σεναρίου I

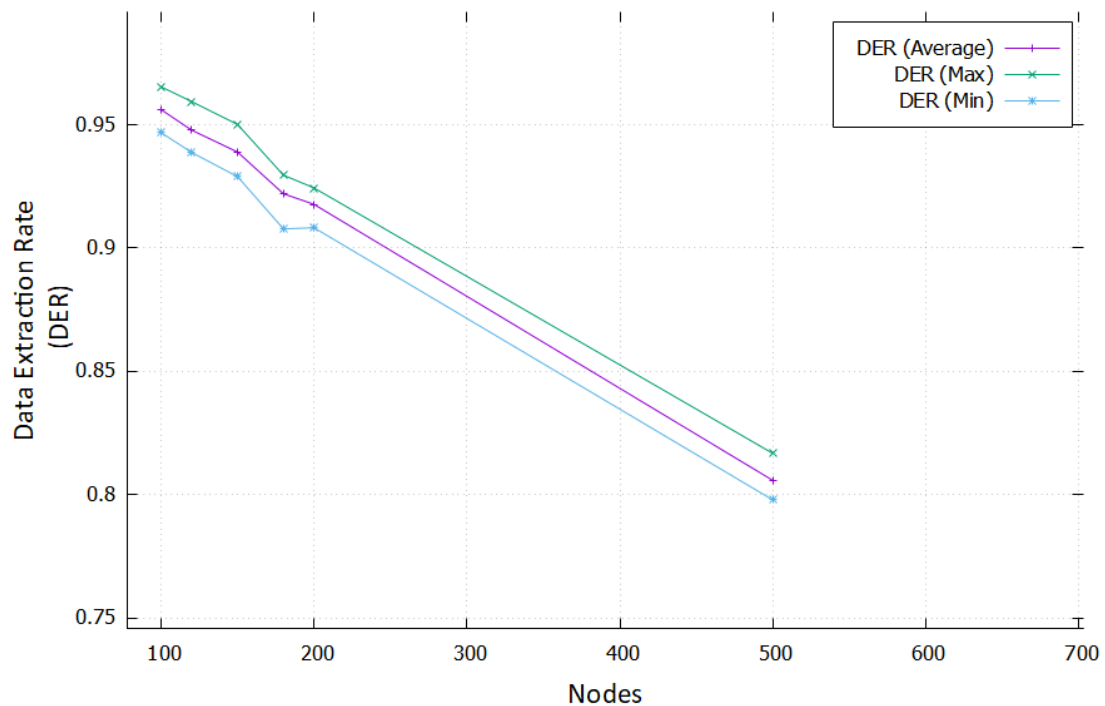
Εκτελώντας για κάθε πλήθος κόμβων 20 φορές την προσομοίωση, υπολογίσαμε τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή για το Data Extraction Rate (DER). Οι τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Nodes	DER Average	DER Max	DER min	STD
100	0.95609654969072	0.9653755868544601	0.9467956469165659	0.0051988455433424
120	0.94777846035617	0.9593621399176955	0.9387229660144182	0.0060437147521998
150	0.93891065611175	0.95009900990099	0.9289118347895154	0.0066954544420403
180	0.92198031628703	0.9295290477827433	0.9077637690776377	0.0062857134450847
200	0.9177002718418	0.9243547908632453	0.9082183563287343	0.0047178597777262
500	0.80578503738915	0.8167330677290837	0.7978530937160777	0.005790809965015

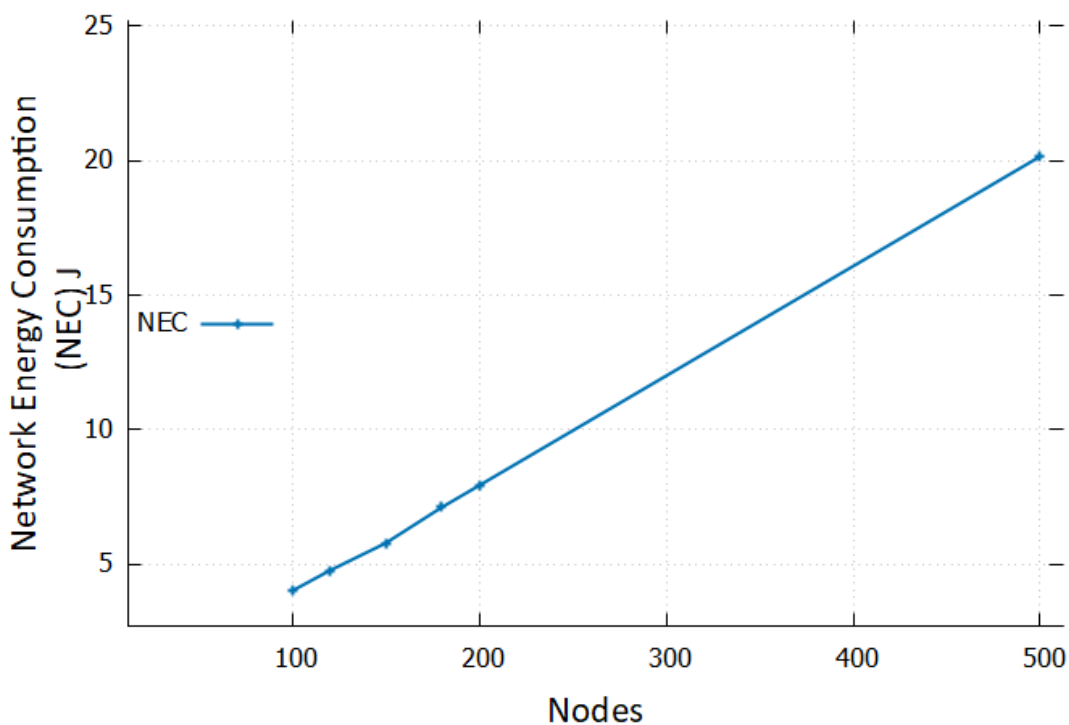
Πίνακας 13 – DER Σενάριο I

Τα δεδομένα του

Πίνακας 13 αποτυπώνονται στο παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 24 - Data Extraction Rate σε σχέση με το πλήθος των κόμβων, Σενάριο I



Εικόνα 25 - Network Energy Consumption Σεναρίου I

Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι σε κάποιο πλήθος κόμβων η τιμή του DER μειώνεται (DER min). Αυτό οφείλεται στο γεγονός της ύπαρξης συγκρούσεων κατά την αποστολή του πακέτου. Παρατηρώντας τα δεδομένα που εξάγονται στο αρχείο `exp3.dat`, ως αποτελέσματα των εξομοιώσεων, βλέπουμε για παράδειγμα ότι κάποια χρονική στιγμή ο αριθμός των συγκρούσεων στους 180 κόμβους είναι 2824 αντί για το μέσο αριθμό συγκρούσεων του βέλτιστου DER, ο οποίος ισούται με 650. Όταν το πλήθος των συγκρούσεων είναι εντός κανονικών ορίων, παρατηρούμε ότι η τιμή του DER κυμαίνεται στο 0.9. Παρομοίως, η μέση τιμή για το DER κυμαίνεται επίσης γύρω από το 0.9 με εξαίρεση τους 500 κόμβους. Αυτό που επίσης παρατηρούμε είναι ότι η αύξησή του πλήθους των κόμβων συνεπάγεται αύξηση των συγκρούσεων και κατ'

επέκταση αύξηση της καταναλισκομένης ενέργειας, όπως φαίνεται στο γράφημα στην Εικόνα 25 - *Network Energy Consumption Σεναρίου Ι* Εικόνα 25.

6.2.2 Σενάριο II

Παράμετρος	Σενάριο II					
	100	120	150	180	200	500
Πλήθος κόμβων						
AvgSend (ms)	36000					
SimTime (i)	300000					
SimTime (ii)	12000000					
Exp	3					
Collision	1					

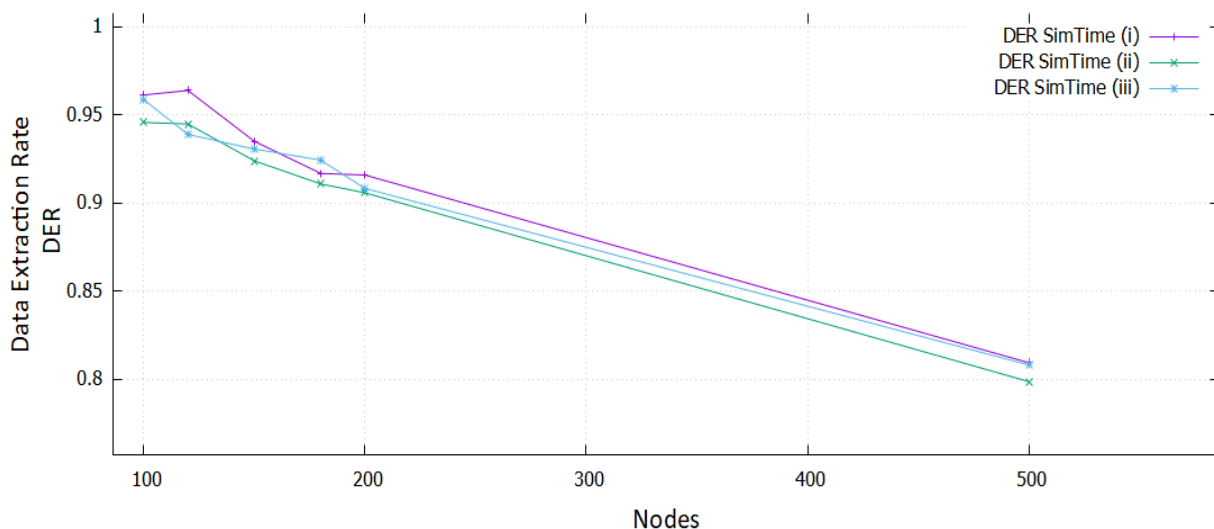
Πίνακας 14 - Τιμές παραμέτρων Σεναρίου II

Εκτελώντας το Σενάριο II για τις τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου <SimTime> προέκυψαν για κάθε διαφορετικό πλήθος κόμβων τα ακόλουθα αποτελέσματα σε ότι αφορά το Data Extraction Rate (DER):

Nodes	DER		
	SimTime (i)	SimTime (ii)	SimTime (iii)
100	0.9611764705882353	0.9456140350877194	0.95850746268656725
120	0.9637096774193549	0.9447162426614482	0.9388111888111889
150	0.9349206349206349	0.923861852433281	0.9305331179321487
180	0.91672218520986	0.910761154855643	0.92427865644872
200	0.915826911677534	0.9057228915662651	0.908199121522694
500	0.8094538329659564	0.7987819441127298	0.8081725312145289

Πίνακας 15 – DER σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο II

Ακολουθεί το αντίστοιχο γράφημα:



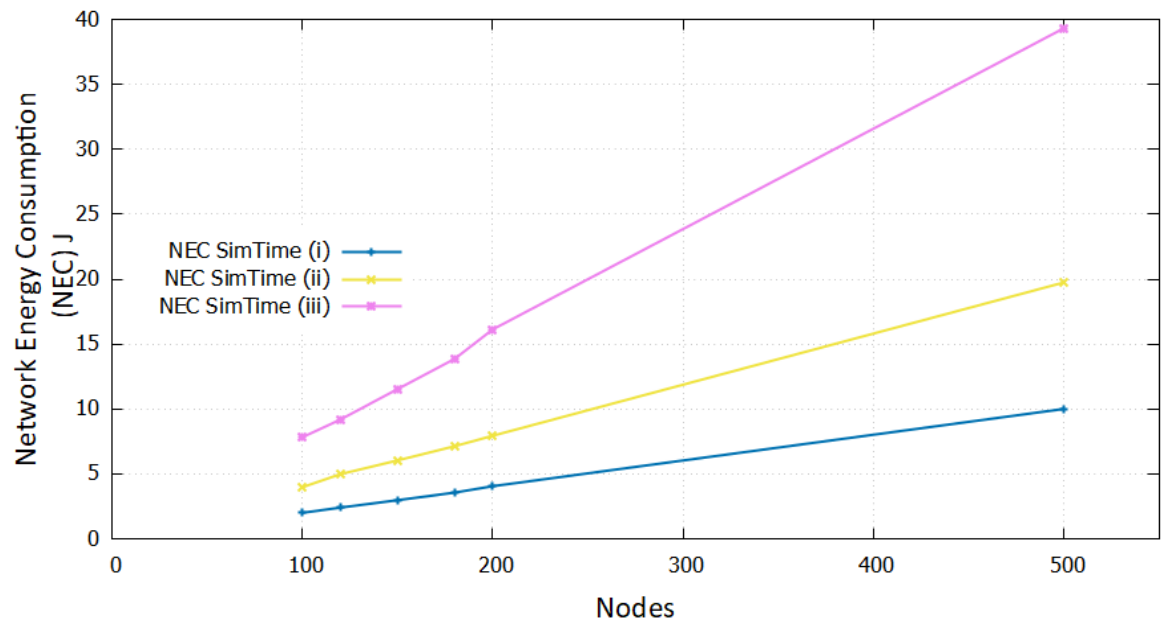
Εικόνα 26 - Data Extraction Rate σε σχέση με το πλήθος των κόμβων, Σενάριο II

Συγκεντρώσαμε επίσης τη μέση τιμή για την καταναλισκόμενη ενέργεια, σε κάθε πλήθος κόμβων για τις τρεις διαφορετικές διάρκειες εξομίωσης του Σεναρίου II, οι οποίες αποτυπώνονται παρακάτω:

Nodes	Network Energy Consumption in J		
	SimTime (i)	SimTime (ii)	SimTime (iii)
100	2.001339647999999	3.967831296000002	7.819029504000004
120	2.401014527999999	4.975213056000001	9.180433152
150	2.973239807999999	6.408551424	11.525403648
180	3.557748479999998	7.127459327999997	13.852658688000009
200	4.053333503999997	7.935045887999999	16.120245503999996
500	9.997667328000013	19.74298444800001	39.31654425599999

Πίνακας 16 – NEC σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο II

Οι παραπάνω τιμές αποτυπώνονται στο ακόλουθο γράφημα:



Εικόνα 27 - Network Energy Consumption Σεναρίου II

Για τους τρεις διαφορετικούς χρόνους προσομοίωσης, παρατηρούμε σε ότι αφορά το Data Extraction Rate, η απόδοση να μην επηρεάζεται σημαντικά από την διάρκεια και οι υφιστάμενες συγκρούσεις να εξακολουθούν να παίζουν ρόλο στην απόδοση του δικτύου. Ωστόσο, σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας, αυτή αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται η διάρκεια της προσομοίωσης.

6.2.3 Σενάριο III

Παράμετρος	Σενάριο III					
	100	120	150	180	200	500
AvgSend (ms)	36000					
SimTime (i)	300000					
SimTime (ii)	600000					
SimTime (iii)	1200000					
Exp	5					
Collision	1					

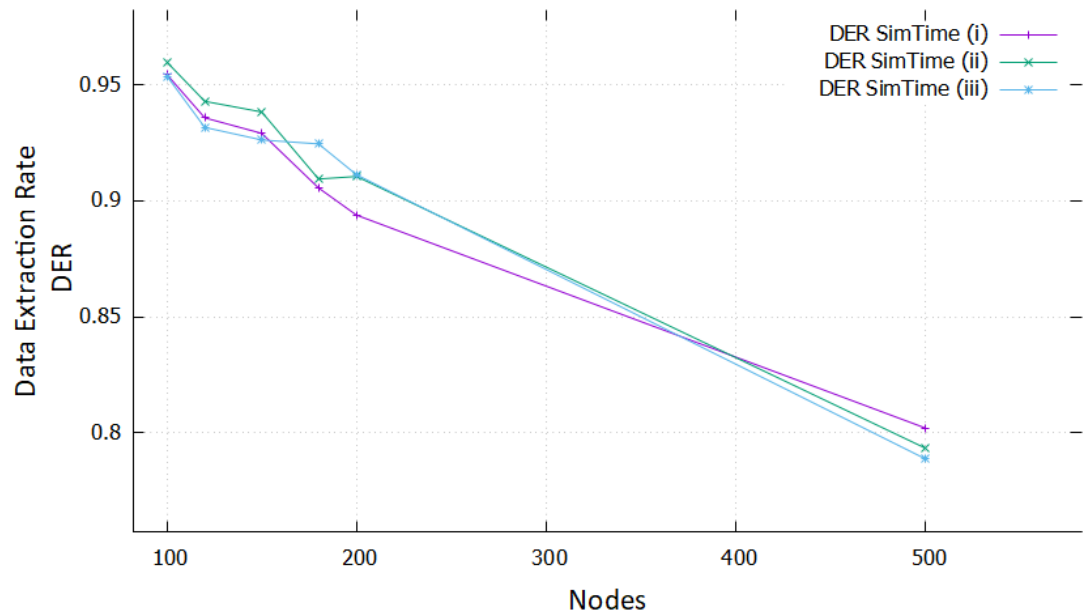
Πίνακας 17 - Τιμές παραμέτρων Σεναρίου III

Εκτελώντας το Σενάριο III για τις τρεις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου <SimTime> προέκυψαν για κάθε διαφορετικό πλήθος κόμβων τα ακόλουθα αποτελέσματα σε ότι αφορά το Data Extraction Rate (DER):

Nodes	DER		
	SimTime (i)	SimTime (ii)	SimTime (iii)
100	0.9544895448954489	0.959832134292566	0.953793318763659
120	0.9357976653696498	0.9429305912596401	0.9316785450970755
150	0.9291075896580484	0.9383116883116883	0.9262654444001595
180	0.9055718475073313	0.9094251336898396	0.9245593806621644
200	0.8938442211055276	0.9105214439987658	0.911249809712285
500	0.802001953125	0.7933206560494414	0.7887239285928953

Πίνακας 18 - DER σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο III

Ακολουθεί το αντίστοιχο γράφημα:



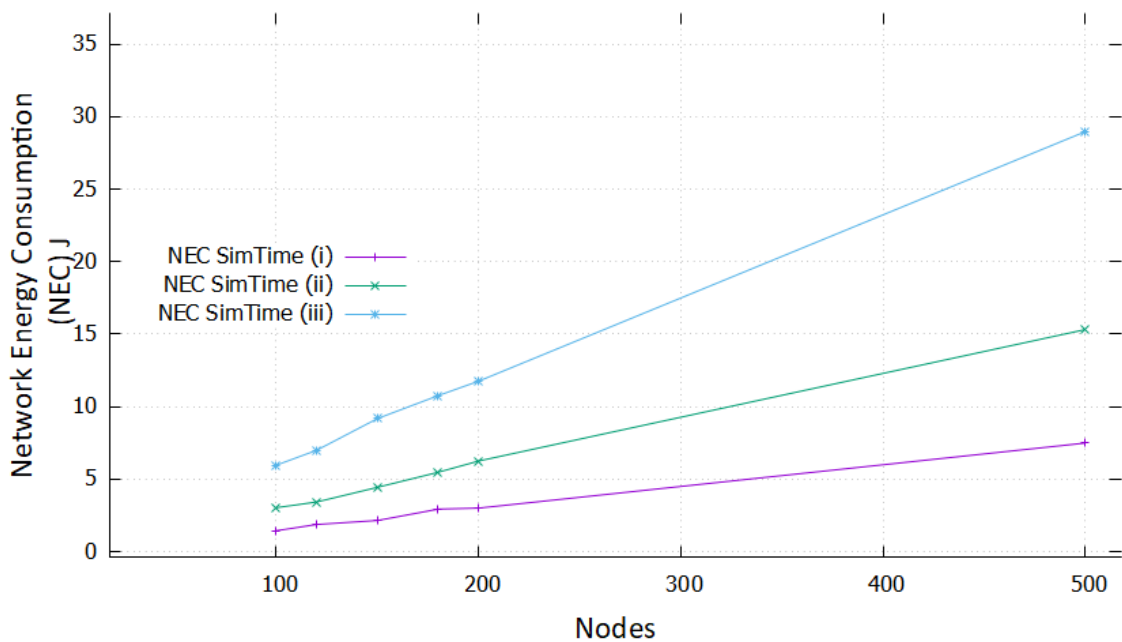
Εικόνα 28 - Data Extraction Rate σε σχέση με το πλήθος των κόμβων, Σενάριο III

Συγκεντρώσαμε επίσης τη μέση τιμή για την καταναλισκόμενη ενέργεια, σε κάθε πλήθος κόμβων για τις τρεις διαφορετικές διάρκειες εξομίωσης του Σεναρίου III, οι οποίες αποτυπώνονται παρακάτω:

Nodes	Network Energy Consumption in J		
	SimTime (i)	SimTime (ii)	SimTime (iii)
100	1.441827072	3.0296463360000003	5.9621391359999985
120	1.8753300480000001	3.4254551039999996	6.996106175999999
150	2.1457962239999999	4.4370439679999985	9.174711744000001
180	2.9306192639999993	5.4714938879999995	10.762433087999996
200	3.0016191359999999	6.248278080000001	11.754500736
500	7.489404288000011	15.316468224000005	28.967525759999962

Πίνακας 19 - NEC σε σχέση με το πλήθος κόμβων για κάθε χρόνο προσομοίωσης Σενάριο III

Οι παραπάνω τιμές αποτυπώνονται στο ακόλουθο γράφημα:



Εικόνα 29 - Network Energy Consumption Σεναρίου III

Παρατηρούμε μικρή διαφοροποίηση στις τιμές για το Data Extraction Rate, σε σχέση με το Σενάριο II, όπου και στην περίπτωση αυτή επηρεάζεται από τον αριθμό των υφιστάμενων συγκρούσεων. Ωστόσο, παρατηρούμε σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του Exp. 5 σε σχέση με τις αντίστοιχες του Exp. 3. Το στοιχείο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το Exp. 5 βελτιστοποιεί την ισχύ μετάδοσης (TP) που συνεπάγεται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

6.2.4 Σενάριο IV

Παράμετρος	Σενάριο IV				
Nodes	100				
AvgSend (ms)	30000				
SimTime	7200000				
megethosPacketou (payload) (byte)	10	30	50	70	100
Exp	1				

Collision	1
-----------	---

Πίνακας 20 - Τιμές παραμέτρων Σεναρίου IV

Εκτελώντας το Σενάριο IV για τις διαφορετικές τιμές της μεταβλητής `megethosPacketou` (payload-ωφέλιμου φορτίου) προέκυψαν για πλήθος κόμβων 100 τα ακόλουθα αποτελέσματα σε ότι αφορά το Data Extraction Rate (DER):

megethosPacketou (payload) (byte)	Data Extraction Rate (DER)
10	0.19066147859922178
20	0.093542973
30	0.0671491757137113
50	0.029907058065703505
70	0.039339857992707734
100	0.02265725926662029

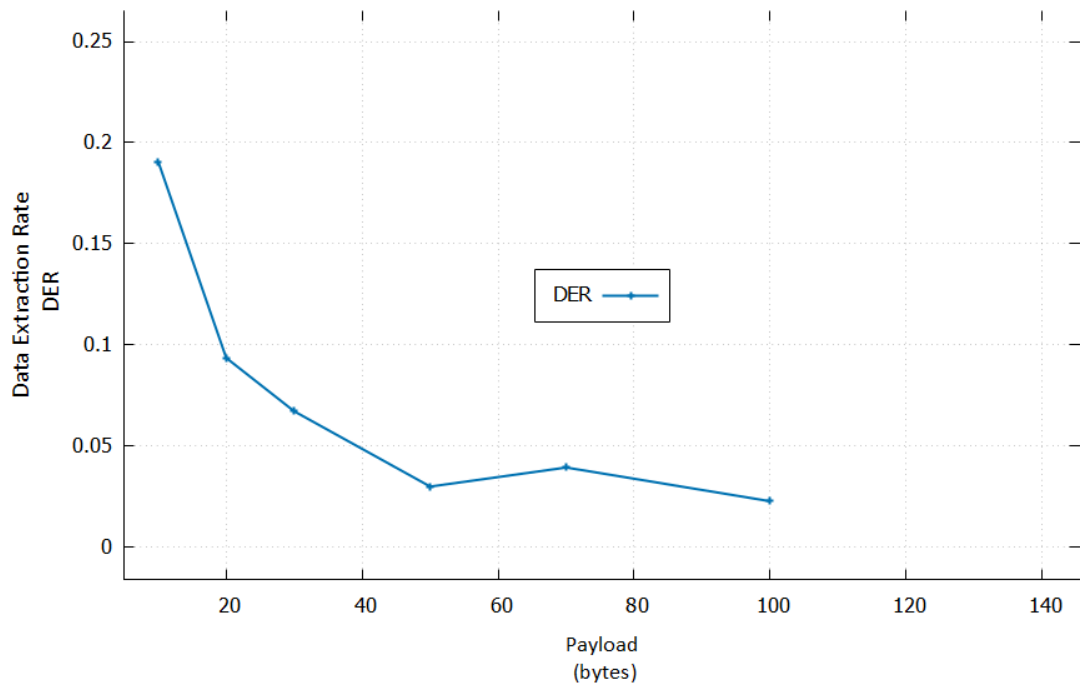
Πίνακας 21 - Data Extraction Rate σε σχέση με το payload, Σενάριο IV

Η κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο σε κάθε περίπτωση φαίνεται παρακάτω:

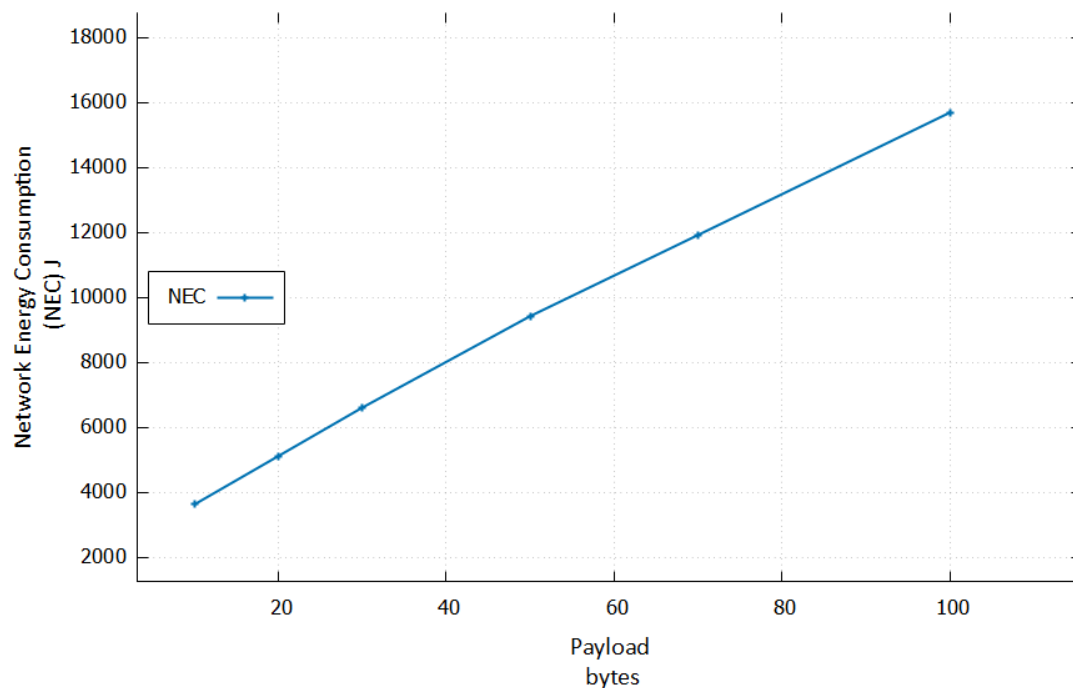
megethosPacketou (payload) (byte)	Network Energy Consumption (NEC) in J
10	3626.6655744000004
20	5117.112287232
30	6607.616311295999
50	9424.274128895997
70	11923.413663744
100	15691.216257024003

Πίνακας 22 - NEC σε σχέση με payload, Σενάριο IV

Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για την κάθε περίπτωση:



Εικόνα 30 - *Data Extraction Rate σε σχέση με το payload, Σενάριο IV*



Εικόνα 31 - NEC σε σχέση με payload, Σενάριο III

Παρατηρούμε γραμμική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας όσο μεγαλώνει το payload, γεγονός που το καθιστά μια παράμετρο που δεν μπορεί να αγνοηθεί και πρέπει να ληφθεί υπόψιν στο σχεδιασμό του δικτύου, καθώς θα καθορίσει το μέγιστο αριθμό από αισθητήρες που μπορούν να ενσωματωθούν. Αυτό συμβαίνει γιατί το payload επηρεάζει την παράμετρο time on air, που αποτελεί το χρόνο παραμονής στον αέρα του πακέτου μεταξύ της πύλης και της συσκευής. Ο χρόνος στον αέρα για διαφορετικές παραμέτρους για κάθε πακέτο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας ένα τύπο που παρέχεται στις προδιαγραφές LoRaWAN. σε Σένα βασικό δίκτυο LoRa, μια συσκευή στην άκρη του δικτύου πρέπει να επικοινωνεί με έναν υψηλό συντελεστή διασποράς (δηλαδή SF12, όπως στις παραμέτρους του Exp.1 που χρησιμοποιήσαμε στην εξομίωση) και μπορεί να διαρκέσει περίπου 0,9s-1,5s. Ενδεικτικά, ο αντίστοιχος χρόνος για ένα ο χρόνος μετάδοσης πακέτων πάνω από τον αέρα κυμαίνεται μεταξύ 0,3 ms και 30 ms.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- Σύνοψη - Συμπεράσματα, Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

7.1 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Η δυναμική που έχει αποκτήσει το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), τόσο στη βιομηχανία όσο και στην ερευνητική κοινότητα λόγω της ευκολίας που παρέχει στη διασύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών εφαρμογής και αισθητήρων που βρίσκονται σε αποστάσεις μικρότερες ή ακόμα και μεγαλύτερες, είναι αδιαμφισβήτητα μεγάλη. Η εκθετική ανάπτυξη του IoT έχει αναδείξει μια ραγδαία αύξηση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η πλειονότητα αυτών των εφαρμογών απαιτεί μεγάλη εμβέλεια, χαμηλό ρυθμό δεδομένων με χαμηλό κόστος ανάπτυξης και διαχείρισης αυξάνοντας τη ζήτηση για καλύτερες μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης.

Αντιλαμβανόμενοι συνεπώς την σημασία της κατανάλωσης ενέργειας για τις συσκευές IoT που χρησιμοποιούν ασύρματη τεχνολογία, έγινε μια αναφορά στις προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε σήμερα. Η πρώτη προσέγγιση του IoT έγινε μέσα από μια σύντομη αναδρομή, με στόχο την καλύτερη κατανόησή του. Μεταφερόμενοι στο παρόν, αναφέρθηκαν εφαρμογές μαζί με τις προκλήσεις που εγείρουν σε κοινωνικό, οικονομικό και τεχνολογικό επίπεδο. Συνακόλουθα, μετά από μια ανασκόπηση στις διαθέσιμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των συσκευών σήμερα και περιγραφή των επιμέρους χαρακτηριστικών τους επικεντρωθήκαμε στα χαρακτηριστικά και σε μια σύγκριση μεταξύ δυο τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν ευρύτατα στο μέλλον, το LoRa και το NB-IoT. Ακολούθησε μια αναφορά στην ανάγκη

για εξοικονόμηση ενέργειας στις υλοποιήσεις IoT και παραδείγματα λύσεων προς την κατεύθυνση αυτή.

Για το πειραματικό μέρος της εργασίας έγινε μια συγκριτική των διαθέσιμων εξομοιωτών LoRa στην βιβλιογραφία. Μετά από καταγραφή των χαρακτηριστικών τους, επιλέχθηκε ο LoRaSim για την προσομοίωση κι εκτέλεση σεναρίων προκειμένου να μελετήσουμε πως τα διάφορα χαρακτηριστικά κι οι παράμετροι μια υλοποίησης LoRa επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και τη συνολική απόδοση σε ένα δίκτυο καθώς και το κατά πόσο είναι επεκτάσιμο ένα τέτοιο δίκτυο. Μέσα από τα αποτελέσματα των πειραμάτων διαπιστώσαμε πως η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων είναι πολύ σημαντική για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου του αισθητήρα. Συγκεκριμένα, με την παραπάνω μελέτη διαπιστώνεται η εξαιρετική σημασία στην επιλογή των παραμέτρων. Συνοπτικά παρατηρήσαμε ότι αύξηση του πλήθους των κόμβων συνεπάγεται κι αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας, λόγω των υφιστάμενων συγκρούσεων. Μια πρόκληση σε μια τέτοια υλοποίηση είναι η επιλογή κατάλληλης χρονικής στιγμής όπου ο αριθμός των συγκρούσεων δεν είναι μεγάλος. Επίσης, όταν βελτιστοποιείται η ισχύς μετάδοσης, έχουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Έως το 2025, θα συνδεθούν έως και 75 δισεκατομμύρια συσκευές στο Internet-of-Things (IoT), με πιθανό οικονομικό αντίκτυπο περίπου 11,1 τρισεκατομμυρίων δολαρίων ετησίως. Ο μεγάλος αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευές που ανταλλάσσουν πληροφορίες και επιτρέπουν υπηρεσίες, αποτελούν το κλειδί για την υποστήριξη του IoT. Από τη στιγμή μάλιστα που το IoT συνιστά μια καινούρια σχετικά

τεχνολογία εύκολα συμπεραίνουμε ότι γεννά μια πληθώρα ερευνητικών θεμάτων, σε διαφορετικά επίπεδα.

Αρχικά, έρχεται μια σειρά από προκλήσεις διαφορετικής φύσης η κάθε μία, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν από την επιστημονική και τεχνολογική κοινότητα. Η ασφάλεια των δεδομένων που μεταδίδονται και αποθηκεύονται, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον που επιφέρει η αναζήτηση για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση του μεγέθους των συσκευών μείωσης της ποσότητας μη βιοδιασπώμενων υλικών και οι απαιτήσεις για επέκταση των ήδη υφιστάμενων τεχνολογιών προκειμένου να ανταποκριθούν καλύτερα στις αυξανόμενες απαιτήσεις των IoT υλοποιήσεων αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα ερευνητικών θεμάτων. Ένα ακόμα ερευνητικό ζήτημα θα μπορούσε να αποτελέσει η δυνατότητα επέκτασης των δικτύων σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχουν πάρα πολλά πρότυπα, πρωτόκολλα και τύποι συσκευών.

Η εξοικονόμηση ενέργειας ωστόσο, στα πλαίσια της οποίας επικεντρώθηκε και η παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί το μείζον ζήτημα στη μελέτη του Internet-of-Things (IoT). Εκτός από βελτιώσεις και αναβαθμίσεις στο υλικό κατασκευής των συσκευών, είναι σημαντικό να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν μηχανισμοί και αλγόριθμοι με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Η επεξεργασία κι ανάλυση δεδομένων των δεδομένων που παράγονται από τις συσκευές IoT αποτελούν ένα βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Για παράδειγμα, η βαθιά μηχανική μάθηση εφαρμόζεται στον έλεγχο του δικτύου. Συγκεκριμένα μπορεί να γίνει χρήση αυτών των τεχνικών στην βελτιστοποίηση, της δρομολόγησης, και την κατανομή δεδομένων σε ένα δίκτυο τύπου radio.

Τέλος, ένας μηχανισμός που ήδη έχει αρχίσει να ενσωματώνεται στο IoT είναι η υπολογιστή νέφους. Μέσω αυτού να γίνει μεγάλος αριθμός πολύπλοκων

υπολογισμών, όπως να υλοποιηθούν σε αυτό αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Συνεπώς, η περαιτέρω ενσωμάτωση της υπολογιστικής νέφους θα συντελέσει σε ανάπτυξη κι εξέλιξη του ΙοΤ.

Παράρτημα: loraDir.py

```
#!/usr/bin/env python2
# -*- coding: utf-8 -*-

import simpy
import random
import numpy as np
import math
import sys
import matplotlib.pyplot as plt
import os

# turn on/off graphics
graphics = True

# do the full collision check
full_collision = False

# experiments:
# 0: packet with longest airtime, aloha-style experiment
# 0: one with 3 frequencies, 1 with 1 frequency
# 2: with shortest packets, still aloha-style
# 3: with shortest possible packets depending on distance

# this is an array with measured values for sensitivity
# see paper, Table 3
sf7 = np.array([7,-126.5,-124.25,-120.75])
sf8 = np.array([8,-127.25,-126.75,-124.0])
sf9 = np.array([9,-131.25,-128.25,-127.5])
sf10 = np.array([10,-132.75,-130.25,-128.75])
sf11 = np.array([11,-134.5,-132.75,-128.75])
sf12 = np.array([12,-133.25,-132.25,-132.25])

#
# check for collisions at base station
# Note: called before a packet (or rather node) is inserted into the
list
def checkcollision(packet):
    col = 0 # flag needed since there might be several collisions for
packet
    processing = 0
    for i in range(0,len(packetAtBS)):
```

```

        if packetsAtBS[i].packet.processed == 1:
            processing = processing + 1
    if (processing > maxBSReceives):
        print("too long:", len(packetsAtBS))
        packet.processed = 0
    else:
        packet.processed = 1

    if packetsAtBS:
        print("CHECK node {} (sf:{}_bw:{}_freq: {:.6e}) others:
        {}".format(
            packet.nodeid, packet.sf, packet.bw, packet.freq,
            len(packetsAtBS)))
        for other in packetsAtBS:
            if other.nodeid != packet.nodeid:
                print(">> node {} (sf:{}_bw:{}_freq: {:.6e})".format(
                    other.nodeid, other.packet.sf, other.packet.bw,
                    other.packet.freq))
                # simple collision
                if frequencyCollision(packet, other.packet) \
                    and sfCollision(packet, other.packet):
                    if full_collision:
                        if timingCollision(packet, other.packet):
                            # check who collides in the power domain
                            c = powerCollision(packet, other.packet)
                            # mark all the collided packets
                            # either this one, the other one, or both
                            for p in c:
                                p.collided = 1
                                if p == packet:
                                    col = 1
                            else:
                                # no timing collision, all fine
                                pass
                        else:
                            packet.collided = 1
                            other.packet.collided = 1 # other also got
                            lost, if it wasn't lost already
                            col = 1
                    return col
        return 0

#
# frequencyCollision, conditions
#
# |f1-f2| <= 120 kHz if f1 or f2 has bw 500
# |f1-f2| <= 60 kHz if f1 or f2 has bw 250
# |f1-f2| <= 30 kHz if f1 or f2 has bw 125
def frequencyCollision(p1,p2):
    if (abs(p1.freq-p2.freq)<=120 and (p1.bw==500 or p2.freq==500)):
        print("frequency coll 500")
        return True

```

```

elif (abs(p1.freq-p2.freq)<=60 and (p1.bw==250 or p2.freq==250)):
    print("frequency coll 250")
    return True
else:
    if (abs(p1.freq-p2.freq)<=30):
        print("frequency coll 125")
        return True
    #else:
    print("no frequency coll")
    return False

def sfCollision(p1, p2):
    if p1.sf == p2.sf:
        print("collision sf node {} and node {}".format(p1.nodeid,
p2.nodeid))
        # p2 may have been lost too, will be marked by other checks
        return True
    print("no sf collision")
    return False

def powerCollision(p1, p2):
    powerThreshold = 6 # dB
    print("pwr: node {0.nodeid} {0.rssi:3.2f} dBm node {1.nodeid}
{1.rssi:3.2f} dBm; diff {2:3.2f} dBm".format(p1, p2, round(p1.rssi -
p2.rssi,2)))
    if abs(p1.rssi - p2.rssi) < powerThreshold:
        print("collision pwr both node {} and node
{}".format(p1.nodeid, p2.nodeid))
        # packets are too close to each other, both collide
        # return both packets as casualties
        return (p1, p2)
    elif p1.rssi - p2.rssi < powerThreshold:
        # p2 overpowered p1, return p1 as casualty
        print("collision pwr node {} overpowered node
{}".format(p2.nodeid, p1.nodeid))
        return (p1,)
    print("p1 wins, p2 lost")
    # p2 was the weaker packet, return it as a casualty
    return (p2,)

def timingCollision(p1, p2):
    # assuming p1 is the freshly arrived packet and this is the last
check
    # we've already determined that p1 is a weak packet, so the only
    # way we can win is by being late enough (only the first n - 5
preamble symbols overlap)

    # assuming 8 preamble symbols
    Npreamb = 8

    # we can lose at most (Npreamb - 5) * Tsym of our preamble
    Tpreamb = 2**p1.sf/(1.0*p1.bw) * (Npreamb - 5)

```

```

# check whether p2 ends in p1's critical section
p2_end = p2.addTime + p2.rectime
p1_cs = env.now + Tpreamb
print("collision timing node {} ({{,{{,{{) node {{
({,{{)".format(
    p1.nodeid, env.now - env.now, p1_cs - env.now, p1.rectime,
    p2.nodeid, p2.addTime - env.now, p2_end - env.now
))
if p1_cs < p2_end:
    # p1 collided with p2 and lost
    print("not late enough")
    return True
print("saved by the preamble")
return False

# this function computes the airtime of a packet
# according to LoraDesignGuide_STD.pdf
#
def airtime(sf,cr,pl,bw):
    H = 0      # implicit header disabled (H=0) or not (H=1)
    DE = 0     # low data rate optimization enabled (=1) or not (=0)
    Npreamb = 8 # number of preamble symbol (12.25 from Utz paper)

    if bw == 125 and sf in [11, 12]:
        # low data rate optimization mandated for BW125 with SF11 and
SF12
        DE = 1
    if sf == 6:
        # can only have implicit header with SF6
        H = 1

    Tsym = (2.0**sf)/bw
    Tpreamb = (Npreamb + 4.25)*Tsym
    print("sf", sf, " cr", cr, "pl", pl, "bw", bw)
    payloadSymbNB = 8 + max(math.ceil((8.0*pl-4.0*sf+28+16-
20*H)/(4.0*(sf-2*DE)))*(cr+4), 0)
    Tpayload = payloadSymbNB * Tsym
    return Tpreamb + Tpayload

#
# this function creates a node
#
class myNode():
    def __init__(self, nodeid, bs, period, packetlen):
        self.nodeid = nodeid
        self.period = period
        self.bs = bs
        self.x = 0
        self.y = 0

        # this is very complex procedure for placing nodes

```

```

# and ensure minimum distance between each pair of nodes
found = 0
rounds = 0
global nodes
while (found == 0 and rounds < 100):
    a = random.random()
    b = random.random()
    if b < a:
        a, b = b, a
    posx = b*maxDist*math.cos(2*math.pi*a/b)+bsx
    posy = b*maxDist*math.sin(2*math.pi*a/b)+bsy
    if len(nodes) > 0:
        for index, n in enumerate(nodes):
            dist = np.sqrt(((abs(n.x-posx))**2)+((abs(n.y-
posy))**2))
            if dist >= 10:
                found = 1
                self.x = posx
                self.y = posy
            else:
                rounds = rounds + 1
                if rounds == 100:
                    print("could not place new node, giving
up")
                    exit(-1)
        else:
            print("first node")
            self.x = posx
            self.y = posy
            found = 1
    self.dist = np.sqrt((self.x-bsx)*(self.x-bsx)+(self.y-
bsy)*(self.y-bsy))
    print(('node %d' %nodeid, "x", self.x, "y", self.y, "dist: ",
self.dist))

    self.packet = myPacket(self.nodeid, packetlen, self.dist)
    self.sent = 0

# graphics for node
global graphics
if (graphics == 1):
    global ax
    ax.add_artist(plt.Circle((self.x, self.y), 2, fill=True,
color='blue'))

#
# this function creates a packet (associated with a node)
# it also sets all parameters, currently random
#
class myPacket():
    def __init__(self, nodeid, plen, distance):
        global experiment

```



```

global Ptx
global gamma
global d0
global var
global Lpld0
global GL

self.nodeid = nodeid
self.txpow = Ptx

# randomize configuration values
self.sf = random.randint(6,12)
self.cr = random.randint(1,4)
self.bw = random.choice([125, 250, 500])

# for certain experiments override these
if experiment==1 or experiment == 0:
    self.sf = 12
    self.cr = 4
    self.bw = 125

# for certain experiments override these
if experiment==2:
    self.sf = 6
    self.cr = 1
    self.bw = 500
# lorawan
if experiment == 4:
    self.sf = 12
    self.cr = 1
    self.bw = 125

# for experiment 3 find the best setting
# OBS, some hardcoded values
Prx = self.txpow ## zero path loss by default

# log-shadow
Lpl = Lpld0 + 10*gamma*math.log10(distance/d0)
print("Lpl:", Lpl)
Prx = self.txpow - GL - Lpl
print('the rssi ', Prx)
if (experiment == 3) or (experiment == 5):
    minairtime = 9999
    minsf = 0
    minbw = 0

    print("Prx:", Prx)

    for i in range(0,6):
        for j in range(1,4):
            if (sensi[i,j] < Prx):

```

```

        self.sf = int(sensi[i,0])
        if j==1:
            self.bw = 125
        elif j==2:
            self.bw = 250
        else:
            self.bw=500
        at = airtime(self.sf, 1, plen, self.bw)
        if at < minairtime:
            minairtime = at
            minsf = self.sf
            minbw = self.bw
            minsensi = sensi[i, j]
    if (minairtime == 9999):
        print("does not reach base station")
        exit(-1)
    print("best sf:", minsf, " best bw: ", minbw, "best
airtime:", minairtime)
    self.rectime = minairtime
    self.sf = minsf
    self.bw = minbw
    self.cr = 1

    if experiment == 5:
        # reduce the txpower if there's room left
        self.txpow = max(2, self.txpow - math.floor(Prx -
minsensi))
        Prx = self.txpow - GL - Lpl
        print('minsensi {} best txpow {}'.format(minsensi,
self.txpow))

    # transmission range, needs update XXX
    self.transRange = 150
    self.pl = plen
    self.symTime = (2.0**self.sf)/self.bw
    self.arriveTime = 0
    self.rssi = Prx
    # frequencies: lower bound + number of 61 Hz steps
    self.freq = 860000000 + random.randint(0,2622950)

    # for certain experiments override these and
    # choose some random frequences
    if experiment == 1:
        self.freq = random.choice([860000000, 864000000,
868000000])
    else:
        self.freq = 860000000

    print("frequency" ,self.freq, "symTime ", self.symTime)
    print("bw", self.bw, "sf", self.sf, "cr", self.cr, "rssi",
self.rssi)
    self.rectime = airtime(self.sf,self.cr,self.pl,self.bw)

```

```

    print("rectime node ", self.nodeid, " ", self.rectime)
    # denote if packet is collided
    self.collided = 0
    self.processed = 0

#
# main discrete event loop, runs for each node
# a global list of packet being processed at the gateway
# is maintained
#
def transmit(env,node):
    while True:
        yield env.timeout(random.expovariate(1.0/float(node.period)))

        # time sending and receiving
        # packet arrives -> add to base station

        node.sent = node.sent + 1
        if (node in packetsAtBS):
            print("ERROR: packet already in")
        else:
            sensitivity = sensi[node.packet.sf - 7,
[125,250,500].index(node.packet.bw) + 1]
            if node.packet.rssi < sensitivity:
                print("node {}): packet will be
lost".format(node.nodeid))
                node.packet.lost = True
            else:
                node.packet.lost = False
                # adding packet if no collision
                if (checkcollision(node.packet)==1):
                    node.packet.collided = 1
                else:
                    node.packet.collided = 0
                packetsAtBS.append(node)

            node.packet.addTime = env.now

        yield env.timeout(node.packet.rectime)

        if node.packet.lost:
            global nrLost
            nrLost += 1
        if node.packet.collided == 1:
            global nrCollisions
            nrCollisions = nrCollisions +1
        if node.packet.collided == 0 and not node.packet.lost:
            global nrReceived
            nrReceived = nrReceived + 1
        if node.packet.processed == 1:
            global nrProcessed
            nrProcessed = nrProcessed + 1

```

```

        # complete packet has been received by base station
        # can remove it
        if (node in packetsAtBS):
            packetsAtBS.remove(node)
            # reset the packet
            node.packet.collided = 0
            node.packet.processed = 0
            node.packet.lost = False

#
# "main" program
#

# get arguments
if len(sys.argv) >= 5:
    nrNodes = int(sys.argv[1])
    avgSendTime = int(sys.argv[2])
    experiment = int(sys.argv[3])
    simtime = int(sys.argv[4])
    if len(sys.argv) > 5:
        full_collision = bool(int(sys.argv[5]))
    print("Nodes:", nrNodes)
    print("AvgSendTime (exp. distributed):", avgSendTime)
    print("Experiment: ", experiment)
    print("Simtime: ", simtime)
    print("Full Collision: ", full_collision)
else:
    print("usage: ./loraDir <nodes> <avgsend> <experiment> <simtime>
[collision]")
    print("experiment 0 and 1 use 1 frequency only")
    exit(-1)

# global stuff
#Rnd = random.seed(12345)
nodes = []
packetsAtBS = []
env = simpy.Environment()

# maximum number of packets the BS can receive at the same time
maxBSReceives = 8

# max distance: 300m in city, 3000 m outside (5 km Utz experiment)
# also more unit-disc like according to Utz
bsId = 1
nrCollisions = 0
nrReceived = 0
nrProcessed = 0
nrLost = 0

```

```

Ptx = 14
gamma = 2.08
d0 = 40.0
var = 0          # variance ignored for now
Lpld0 = 127.41
GL = 0

sensi = np.array([sf7,sf8,sf9,sf10,sf11,sf12])
if experiment in [0,1,4]:
    minsensi = sensi[5,2] # 5th row is SF12, 2nd column is BW125
elif experiment == 2:
    minsensi = -112.0 # no experiments, so value from datasheet
elif experiment in [3,5]:
    minsensi = np.amin(sensi) ## Experiment 3 can use any setting, so
take minimum
Lpl = Ptx - minsensi
print("amin", minsensi, "Lpl", Lpl)
maxDist = d0*(math.e**((Lpl-Lpld0)/(10.0*gamma)))
print("maxDist:", maxDist)

# base station placement
bsx = maxDist+10
bsy = maxDist+10
xmax = bsx + maxDist + 20
ymax = bsy + maxDist + 20

# prepare graphics and add sink
if (graphics == 1):
    plt.ion()
    plt.figure()
    ax = plt.gca().gca()
    # XXX should be base station position
    ax.add_artist(plt.Circle((bsx, bsy), 3, fill=True, color='green'))
    ax.add_artist(plt.Circle((bsx, bsy), maxDist, fill=False,
color='green'))

megethosPacketou = 20
for i in range(0,nrNodes):
    # myNode takes period (in ms), base station id packetlen (in
Bytes)
    # 1000000 = 16 min
    node = myNode(i,bsId, avgSendTime,megethosPacketou)
    nodes.append(node)
    env.process(transmit(env,node))

#prepare show
if (graphics == 1):
    plt.xlim([0, xmax])
    plt.ylim([0, ymax])
    plt.draw()
    plt.show()

```

```

# start simulation
env.run(until=simtime)

# print stats and save into file
print("nrCollisions ", nrCollisions)

# compute energy
# Transmit consumption in mA from -2 to +17 dBm
TX = [22, 22, 22, 23, # RFO/PA0:
      -2..1
      24, 24, 24, 25, 25, 25, 25, 26, 31, 32, 34, 35, 44, #
PA_BOOST/PA1: 2..14
      82, 85, 90, #
PA_BOOST/PA1: 15..17
      105, 115, 125] #
PA_BOOST/PA1+PA2: 18..20
# mA = 90 # current draw for TX = 17 dBm
V = 3.0 # voltage XXX
sent = sum(n.sent for n in nodes)
energy = sum(node.packet.rectime * TX[int(node.packet.txpow)+2] * V *
node.sent for node in nodes) / 1e6

print("energy (in J): ", energy)
print("sent packets: ", sent)
print("collisions: ", nrCollisions)
print("received packets: ", nrReceived)
print("processed packets: ", nrProcessed)
print("lost packets: ", nrLost)

# data extraction rate
der = (sent-nrCollisions)/float(sent)
print("DER:", der)
der = (nrReceived)/float(sent)
print("DER method 2:", der)

# this can be done to keep graphics visible
if (graphics == 1):
    input('Press Enter to continue ...')

# save experiment data into a dat file that can be read by e.g.
gnuplot
# name of file would be: exp0.dat for experiment 0
fname = "exp" + str(experiment) + ".dat"
print(fname)
if os.path.isfile(fname):
    res = "\n" + str(nrNodes) + " " + str(nrCollisions) + " " +
str(sent) + " " + str(energy)
else:
    res = "#nrNodes nrCollisions nrTransmissions OverallEnergy\n" +
str(nrNodes) + " " + str(nrCollisions) + " " + str(sent) + " " +
str(energy)
with open(fname, "a") as myfile:

```

```

myfile.write(res)
myfile.close()

# with open('nodes.txt','w') as nfile:
#     for n in nodes:
#         nfile.write("{} {} {}\n".format(n.x, n.y, n.nodeid))
# with open('basestation.txt', 'w') as bfile:
#     bfile.write("{} {} {}\n".format(bsx, bsy, 0))

```

Παράρτημα: NEC Δοκιμαστικό Πείραμα.plt

Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GNUPLOT. Το εξαγόμενο αρχείο για το διάγραμμα στην Εικόνα 21 είναι το εξής :

```

#
#   G N U P L O T
#   Version 5.4 patchlevel 1   last modified 2020-12-01
#
#   Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2020
#   Thomas Williams, Colin Kelley and many others
#
#   gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
#   faq, bugs, etc:   type "help FAQ"
#   immediate help:   type "help" (plot window: hit 'h')
#
# set terminal wxt 0 enhanced
# set output
unset clip points
set clip one
unset clip two
unset clip radial
set errorbars front 1.000000
set border 3 front lt black linewidth 1.000 dashtype solid
set zdata
set ydata
set xdata
set y2data
set x2data
set boxwidth
set boxdepth 0
set style fill empty border
set style rectangle back fc bgnd fillstyle solid 1.00 border lt -1
set style circle radius graph 0.02
set style ellipse size graph 0.05, 0.03 angle 0 units xy

```

```

set dummy x, y
set format x "% h"
set format y "% h"
set format x2 "% h"
set format y2 "% h"
set format z "% h"
set format cb "% h"
set format r "% h"
set ttics format "% h"
set timefmt "%d/%m/%y,%H:%M"
set angles radians
set tics back
set grid nopolar
set grid xtics nomxtics ytics nomytics noztics nomztics nortics
nomrtics \
  nox2tics nomx2tics noy2tics nomy2tics nocbtics nomcbtics
set grid layerdefault lt 0 linecolor 0 linewidth 0.500, lt 0
linecolor 0 linewidth 0.500
unset raxis
set theta counterclockwise right
set style parallel front lt black linewidth 2.000 dashtype solid
set key notitle
set key fixed right bottom vertical Right noreverse enhanced autotitle
box lt black linewidth 1.000 dashtype solid
set key noinvert samplen 4 spacing 1 width 2 height 1
set key maxcolumns 0 maxrows 0
set key noopaque
unset label
unset arrow
unset style line
unset style arrow
set style histogram clustered gap 2 title textcolor lt -1

unset object
unset walls
set style textbox transparent margins 1.0, 1.0 border lt -1
linewidth 1.0
set offsets 0, 0, 0, 0
set pointsize 1
set pointintervalbox 1
set encoding default
unset polar
unset parametric
unset spiderplot
unset decimalsign
unset micro
unset minussign
set view 60, 30, 1, 1
set view azimuth 0
set rgbmax 255
set samples 100, 100
set isosamples 10, 10

```



```

set surface
unset contour
set cntrlabelformat '%8.3g' font '' start 5 interval 20
set mapping cartesian
set datafile separator whitespace
set datafile nocolumnheaders
unset hidden3d
set cntrparam order 4
set cntrparam linear
set cntrparam levels 5
set cntrparam levels auto
set cntrparam firstlinetype 0 unsorted
set cntrparam points 5
set size ratio 0 1,1
set origin 0,0
set style data points
set style function lines
unset xzeroaxis
unset yzeroaxis
unset zzeroaxis
unset x2zeroaxis
unset y2zeroaxis
set xyplane relative 0.5
set tics scale 1, 0.5, 1, 1, 1
set mxtics default
set mytics default
set mztics default
set mx2tics default
set my2tics default
set mcbtics default
set mrtics default
set nomttics

set xtics border in scale 1,0.5 mirror norotate autojustify
set xtics norangelimit
set xtics (100.000, 150.000, 200.000, 300.000, 800.000, 1000.00)
set ytics border in scale 1,0.5 mirror norotate autojustify
set ytics norangelimit autofreq
set ztics border in scale 1,0.5 nomirror norotate autojustify
set ztics norangelimit autofreq
unset x2tics
unset y2tics
set cbtics border in scale 1,0.5 mirror norotate autojustify
set cbtics norangelimit autofreq
set rtics axis in scale 1,0.5 nomirror norotate autojustify
set rtics norangelimit autofreq
unset ttics
set title ""
set title font "" textcolor lt -1 norotate
set timestamp bottom
set timestamp ""
set timestamp font "" textcolor lt -1 norotate

```

```

set trange [ * : * ] noreverse nowriteback
set urange [ * : * ] noreverse nowriteback
set vrange [ * : * ] noreverse nowriteback
set xlabel "Nodes"
set xlabel font "Calibri,14" textcolor lt -1 norotate
set x2label ""
set x2label font "" textcolor lt -1 norotate
set xrange [ * : * ] noreverse writeback
set x2range [ * : * ] noreverse writeback
set ylabel "Network Energy Consumption\n (NEC) J"
set ylabel font "Calibri,14" textcolor lt -1 rotate
set y2label ""
set y2label font "" textcolor lt -1 rotate
set yrange [ * : * ] noreverse writeback
set y2range [ * : * ] noreverse writeback
set zlabel ""
set zlabel font "" textcolor lt -1 norotate
set zrange [ * : * ] noreverse writeback
set cblabel ""
set cblabel font "" textcolor lt -1 rotate
set cbrange [ * : * ] noreverse writeback
set rlabel ""
set rlabel font "" textcolor lt -1 norotate
set rrange [ * : * ] noreverse writeback
unset logscale
unset jitter
set zero 1e-08
set lmargin -1
set bmargin -1
set rmargin -1
set tmargin -1
set locale "Greek_Greece.1253"

set pm3d explicit at s
set pm3d scansautomatic
set pm3d interpolate 1,1 flush begin noftriangles noborder
corners2color mean
set pm3d clip z
set pm3d nolighting
set palette positive nops_allcF maxcolors 0 gamma 1.5 color model RGB
set palette rgbformulae 7, 5, 15
set colorbox default
set colorbox vertical origin screen 0.9, 0.2 size screen 0.05, 0.6
front noinvert bdefault
set style boxplot candles range 1.50 outliers pt 7 separation 1
labels auto unsorted
set loadpath
set fontpath
set psdir
set fit brief errorvariables nocovariancevariables errorscaleing
prescale nowrap v5
GNUTERM = "qt"

```

```
VoxelDistance = 2.37151510003798e-322
## Last datafile plotted: "exp0.dat"
plot 'exp0.dat' with linespoints linetype 13 linecolor 14 lw 2 title
"NEC"
# EOF
```

Οι εντολές γραμμής που δόθηκαν είναι οι παρακάτω:

```
gnuplot> Set terminal wxt
gnuplot> cd 'C:\Users\VlamiST\Desktop\Thesis\lorasim'

gnuplot> plot 'exp0.dat' with linespoints linetype 13 linecolor 14 lw
2 title "NEC"

gnuplot> set grid
gnuplot> set ylabel "Network Energy Consumption\n (NEC) J" font
"Calibri,14"
gnuplot> set xlabel "Nodes" font "Calibri,14"

gnuplot> set key bottom right box
gnuplot> set key width 2
gnuplot> set key height 1
gnuplot> set xtics (100,150,200,300,800,1000)
gnuplot> set border 3
gnuplot> replot
```

Αντίστοιχα έγινε ο σχεδιασμός των υπόλοιπων διαγραμμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τη χρήση του λογισμικού gnuplot.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alberts, M. (2011). Analysis of the IEEE 802.15.4a ultra wideband physical layer through wireless sensor network simulations in OMNET. Διαθέσιμο σε <http://hdl.handle.net/2263/23103>
2. Ashton, K. (2009). That 'Internet of Things' thing. RFID Journal, 22 July. [Internet] Διαθέσιμο σε <http://www.rfidjournal.com/article/view/4986>
3. Ayoub, W., Samhat, A. E., Nouvel, F., Mroue, M., & Prévotet, J. C. (2018). Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility. IEEE Communications Surveys & Tutorials. [Google Scholar](#)
4. S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," 2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT), 2017, pp. 685-690, [doi: 10.1109/ICITECH.2017.8079928](https://doi.org/10.1109/ICITECH.2017.8079928).
5. C. Bouras, Kokkinos, V., και Papachristos, N., Συγγρ., 'Performance evaluation of LoraWan physical layer integration on IoT devices', in Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS 2018), Thessaloniki, Greece, 2018. Διαθέσιμο σε : <http://telematics.upatras.gr/telematics/publications/performance-evaluation-lorawan-physical-layer-integration-iot-devices>
6. Martin Bor, Utz Roedig, Thiemo Voigt, Juan M. Alonso. "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?". In MSWiM '16 Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, 2016. New York: ACM Press. pp. 59-67. <https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>

7. Bradbury, Danny(2015). "How Can Privacy Survive in the Era of the Internet of Things?" The Guardian, sec. Technology. Διαθέσιμο σε:
<http://www.theguardian.com/technology/2015/apr/07/how-can-privacy-survive-the-internet-of-things>
8. Buurman, Ben & Kamruzzaman, Joarder & Karmakar, Gour & Islam, Syed. (2020). Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
9. Burns J., Selcuk Kirtay(2015). Future use of license exempt radio spectrum," Plum Consulting, Tech. Rep. Διαθέσιμο σε <https://www.slideshare.net/TechUK/use-of-licence-exempt-frequency-bands-draft-report>
10. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. IEEE Wireless Communications, 23(5), 60-67, [arXiv:1510.00620 \[cs.NI\]](https://arxiv.org/abs/1510.00620)
11. Comparison of LoRa Simulation Environments , Bouras, C, Gkamas, A, Katsampiris, S, Kokkinos, V, The 14th International Conference on Broad - Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA - 2019), Antwerp, Belgium
[Google Scholar](#)
12. Cisco, (2015). "Cloud and Mobile Network Traffic Forecast - Visual Networking Index (VNI)." <http://cisco.com/c/en/us/solutions/serviceprovider/visual-networking-index-vni/index.html> 3

13. Domingo, Mari Carmen(2012), "An Overview of the Internet of Things for People with Disabilities." Journal of Network and Computer Applications 35, no. 2 , p. 584–96.
[doi:10.1016/j.jnca.2011.10.015](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2011.10.015).
14. Danova, Tony(2013). "Morgan Stanley: 75 Billion Devices Will Be Connected To The Internet Of Things By 2020." Business Insider, October 2, 2013. Διαθέσιμο σε:
<https://www.businessinsider.com/75-billion-devices-will-be-connected-to-the-internet-by-2020-2013-10>
15. Evans(2011), The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything.
https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/loT_IBSG_0411FINAL.pdf
16. Finnegan, J., & Brown, S. (2018). A Comparative Survey of LPWA Networking. [arXiv preprint arXiv:1802.04222](https://arxiv.org/abs/1802.04222).
17. M. Haghghi, Z. Qin, D. Carboni, U. Adeel, F. Shi and J. A. McCann, "Game theoretic and auction-based algorithms towards opportunistic communications in LPWA LoRa networks," 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Reston, VA, 2016, pp. 735-740. doi: 10.1109/WF-IoT.2016.7845517
18. Ingenu(2016). Rpm technology for the internet of things. Ingenu, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available:
https://theinternetofthings.report/Resources/Whitepapers/4cbc5e5e-6ef8-4455-b8cd-f6e3888624cb_RPMA%20Technology.pdf

19. Ismail D., M. Rahman, and A. Saifullah(2018), ``Low-power wide-area networks: Opportunities, challenges, and directions," in Proc. Workshops ICDCN, Varanasi, India.
<https://doi.org/10.1145/3170521.3170529>
20. LoRaWAN Specification, LoRa Alliance, 2017, v. 1.1
21. Manyika, James, Michael Chui, Peter Bisson, Jonathan Woetzel, Richard Dobbs, Jacques Bughin, and Dan Aharon(2015), "The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype." McKinsey Global Institute [The-Internet-of-things-Mapping-the-value-beyond-the-hype.pdf](#)
22. Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express
<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>
23. U. Raza, P. Kulkarni and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 19, no. 2, pp. 855-873, Secondquarter 2017, [doi: 10.1109/COMST.2017.2652320](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320).
24. A. Riahi, E. Natalizio, Y. Challal, N. Mitton and A. Iera, "A systemic and cognitive approach for IoT security," 2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 2014, pp. 183-188, [doi: 10.1109/ICCNC.2014.6785328](https://doi.org/10.1109/ICCNC.2014.6785328).

25. Sallum, E.; Pereira, N.; Alves, M.; Santos, M. Improving Quality-of-Service in LoRa Low-Power Wide-Area Networks through Optimized Radio Resource Management. J. Sens. Actuator Netw. 2020, 9, 10. [doi: 10.20944/preprints201909.0243.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201909.0243.v1)
26. Sinha R.S., Y. Wei, and S.-H. Hwang (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," ICT Express, vol. 3, no. 1, pp. 14. Διαθέσιμο σε :
<https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>
27. Stafford-Fraser, Quentin(2015), . "The Trojan Room Coffee Pot." N.p., May 1995. Web. 06 Sept. 2015. <http://www.cl.cam.ac.uk/coffee/qsf/coffee.html> 19 RFC 7452, "Architectural Considerations in Smart Object Networking" , Διαθέσιμο σε:
<https://tools.ietf.org/html/rfc7452>
28. Thierer, Adam, and Andrea Castillo(2015). "Projecting the Growth and Economic Impact of The Internet of Things." George Mason University, Mercatus Center, Διαθέσιμο σε: <http://mercatus.org/sites/default/files/loT-EP-v3.pdf>
29. Glen Schatz, LTE-M vs NB-IoT: An Overview of Narrowband IoT (NB-IoT) [2021 UPDATE] Published April 13, 2021,
Διαθέσιμο σε: <https://www.link-labs.com/blog/overview-of-narrowband-iot>

30. Κατσαμπίρης Σαλγάδο Σπυρίδων Ανισέτο, Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας σε LPWAN δίκτυα βασισμένα σε τεχνολογίες LoRa και NB-IoT και εξομίωση δικτύων LoRa Διαθέσιμο σε: <https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/12805>
31. Prasad and P. Chawda, "Power management factors and techniques for IoT design devices," 2018 19th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED), Santa Clara, CA, 2018, pp. 364-369. [doi: 10.1109/ISQED.2018.8357314](https://doi.org/10.1109/ISQED.2018.8357314)
32. D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita and I. Tinnirello, "Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance," in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 4, pp. 796-799, April 2018. [doi: 10.1109/LCOMM.2018.2797057](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2797057)
33. Brecht Reynders, Qing Wang, and Sofie Pollin. 2018. A LoRaWAN module for ns-3: implementation and evaluation. In Proceedings of the 10th Workshop on ns-3 (WNS3 '18). ACM, New York, NY, USA, 61-68. DOI: <https://doi.org/10.1145/3199902.319991>
34. Whitmore, A., Agarwal, A. & Da Xu, L. The Internet of Things—A survey of topics and trends. Inf Syst Front 17, 261–274 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>
35. <https://www.nsnam.org/>
36. <https://lora-alliance.org/>