



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής

Διπλωματική Εργασία

---

**Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας σε  
LPWAN δίκτυα βασισμένα σε τεχνολογία  
LoRa και NB-IoT και εξομοίωση δικτύων  
LoRa**

---

Κατσαμπίρης Σαλαγάδο Σπυρίδων Ανισέτο  
Α.Μ. 6078

Επιβλέπων  
Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων  
Απόστολος Γκάμας, Αναπληρωτής Καθηγητής

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

Πάτρα, 2019



© Copyright συγγραφήs Κατσαμπίρης Σαλγαδο Σπυρίδων Ανισέτο, 2019

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας, Απόστολος Γκαμάς

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.



*Mas vale pedir perdon, que pedir permiso*



## 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 «**Βελτιστοποίηση απόδοσης με χρήση εξομοίωσης δικτύων Internet of Things βασισμένα σε τεχνολογία LoRa**».

Πριν όμως τη παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας για το αντικείμενο που μελετήσαμε και των συμπερασμάτων στα οποία καταλήξαμε, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Μπούρα, καθηγητή του ΤΜΗΥΠ στο Πανεπιστήμιο Πατρών και Επιστημονικό Υπεύθυνο της Μονάδας 6 του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων (ITYE). Η καθοδήγησή του ήταν καθοριστική για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επιπρόσθετα, επιθυμώ να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο κ Γκάμα Απόστολο, αναπληρωτή καθηγητή της Ανώτατης Εκκλησιαστικής Ακαδημίας Βελλάς Ιωαννίνων, του οποίου οι πολύτιμες γνώσεις, συμβουλές, τα σχετικά σχόλια και η πολυετής εμπειρία με βοήθησαν σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδελφό 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, τότε δεν θα είχα φτάσει με επιτυχία στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Πάτρα, 2019

Κατσαμπίρης Σαλαγάδο Σπυρίδων Ανισέτο

## Περίληψη

Είναι πλέον αναμφίβολο το γεγονός ότι μετά την έλευση του διαδικτύου έχει αλλάξει ριζικά η ζωή μας. Πόσο μάλλον αν αναλογιστούμε ότι πλέον, δεν έχουμε μόνο δίκτυα προσωπικών υπολογιστών και εξυπηρετητών, αλλά όλο και περισσότερες συσκευές που παλιότερα δεν μπορούσαμε να συλλογιστούμε συνδέονται στο διαδίκτυο, όπως κινητά τηλέφωνα, φορητές συσκευές στα ρούχα κλπ.

Ένας τύπος δικτύων που θα μας απασχολήσει στο μέλλον είναι τα λεγόμενα LPWAN δίκτυα, ή αλλιώς δίκτυα χαμηλής ισχύος μεγάλης εμβέλειας. Αυτά τα δίκτυα έχουν την δυνατότητα να στέλνουν δεδομένα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, της τάξης μέχρι και 10 km LoS, με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Δύο από τις πιο γνωστές τεχνολογίες αυτού του τύπου είναι το LoRa και το NB-IoT. Όπως υπονοεί και το όνομα LPWAN κύριο μέλημα είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη των στοιχείων που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας και αλγορίθμων εξοικονόμησης ενέργειας σε τέτοια δίκτυα. Επιπρόσθετα, αφού γίνει κατανοητό η χρησιμότητα της χρήσης εξομοιωτών για την προσομοίωση δικτύων και μέτρησης της κατανάλωσης ενέργειας, γίνεται μια ενδελεχή μελέτη των υπαρχόντων εξομοιωτών και σύγκρισή τους.



## **Abstract**

It is now beyond doubt that since the advent of the internet, our lives have changed radically. Especially, considering that we no longer have only computer and server networks, but more and more devices that we could not previously think of are now connected to the internet, such as mobile phones, mobile devices in clothes, wearables etc.

One type of network that will be of interest to us in the future is the so-called LPWAN networks, (Low Power Wide Area Networks). These networks are capable of sending data over very long distances, up to 10 km LoS, with very low power consumption. Two of the most popular technologies of this type are LoRa and NB-IoT. As the name LPWAN implies, low energy consumption is the main concern.

The purpose of this work is to study the elements that affect energy consumption and energy saving algorithms in such networks. In addition, once understand the importance of using simulators for simulating networks and measuring energy consumption, a thorough study of existing simulators and their comparisons is made.

## Δημοσιεύσεις

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημοσιεύτηκε σε διεθνές συνέδριο η παρακάτω εργασία:

C. Bouras, A.Gkamas, **Spyridon Aniceto Katsampiris Salgado** and V.Kokkinos ‘*Comparison of LoRa simulation enviroments*’, in the 14th International Conference on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2019 (accepted).

### Περίληψη

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στην καθημερινότητά μας, συνδέοντας διαφορετικές ασύρματες συσκευές και η απόσταση τους μπορεί να διαφέρει από κάποια εκατοστά έως πολλά χιλιόμετρα. Νέες τεχνολογίες IoT όπως το LoRa αναδύονται επιτρέποντας την αποδοτική ασύρματη επικοινωνία σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Η προσομοίωση των δικτύων LoRa είναι πολύ σημαντική, επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της εφαρμογής με βάση το LoRa χωρίς την ανάγκη δαπανηρών υλοποιήσεων ή πριν να προχωρήσουμε στην πραγματική εφαρμογή του συστήματος. Επιλέγοντας τις σωστές παραμέτρους των συστημάτων όπως το spreading factor μπορεί να βελτιώσει την κατανάλωση ενέργειας των συσκευών που υπάρχουν στο ασύρματο δίκτυο. Αυτή η εργασία παρουσιάζει τα πιο σημαντικά περιβάλλοντα προσομοίωσης LoRa που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία και στη συνέχεια παρουσιάζουμε μια συγκριτική αξιολόγηση των λογισμικών αυτών. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τα κυριότερα σημεία κάθε περιβάλλοντος προσομοίωσης LoRa.

## **Abstract**

Internet of Things (IoT) is used more and more in our everyday life, connecting different wireless devices, and their distance can vary from some centimeters to many kilometers. New IoT technologies such as Long Range (LoRa) are emerging enabling power efficient wireless communication over very long distances. Simulation of LoRa networks is quite important, because can be used for the design and the evaluation of LoRa based application without the need of costly implementations or before to proceed to the actual implementation of the system. Choosing the right parameters of the systems like spreading factor can improve the energy consumption of the wireless devices. This paper presents the most important LoRa simulation environments available in the literature and after that, we present a comparative evaluation of LoRa simulation environments. The benefits, the disadvantages and the highlights of each LoRa simulation environment is presented.

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Σημασία του προβλήματος</b> ..... <b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Στόχοι της Εργασίας</b> ..... <b>1</b>
<b>1.3</b>	<b>Μεθοδολογία Προσέγγισης</b> ..... <b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας</b> ..... <b>2</b>
<b>2</b>	<b>5</b>
<b>Internet of Things (IoT)</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Ιστορική αναδρομή</b> ..... <b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Η κατάσταση σήμερα</b> ..... <b>6</b>
2.2.1	Εφαρμογές του IoT ..... <b>8</b>
2.2.2	Έξυπνο σπίτι ..... <b>8</b>
2.2.3	Industry 4.0..... <b>9</b>
2.2.4	Έξυπνη πόλη ..... <b>9</b>
2.2.5	E-health..... <b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>Search and Rescue Συστήματα</b> ..... <b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Προκλήσεις του IoT</b> ..... <b>13</b>
2.4.1	Ηθικές και κοινωνικές προκλήσεις ..... <b>13</b>
2.4.2	Τεχνολογικές προκλήσεις ..... <b>14</b>
2.4.3	Περιβαλλοντικές προκλήσεις ..... <b>14</b>
<b>3</b>	<b>17</b>
<b>Ασύρματες τεχνολογίες IoT</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Επισκόπηση χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών</b> ..... <b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Τεχνολογίες μικρής εμβέλειας</b> ..... <b>18</b>
3.2.1	Bluetooth..... <b>18</b>
3.2.2	IEEE 802.11/WiFi ..... <b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Κινητά δίκτυα επικοινωνίας</b> ..... <b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Τεχνολογία Lora</b> ..... <b>19</b>
3.4.1	Φυσικό επίπεδο..... <b>19</b>
3.4.2	Παράμετροι LoRa..... <b>20</b>
3.4.3	LoRaWAN..... <b>20</b>
3.4.4	Τρόπος λειτουργίας..... <b>21</b>
3.4.4.1	Τοπολογία..... <b>21</b>
3.4.4.2	The Internet of Things Network ..... <b>22</b>

3.4.4.3	Ασφάλεια .....	24
3.4.5	Πλεονεκτήματα .....	24
3.4.6	Μειονεκτήματα .....	25
3.4.7	Ενδεικτικά διαθέσιμα modules LoRa .....	25
3.4.8	Συνοπτικά Χαρακτηριστικά LoRa.....	26
<b>3.5</b>	<b>NB-IoT .....</b>	<b>27</b>
3.5.1	Τρόπος λειτουργίας.....	27
3.5.1.1	Φυσικό επίπεδο NB-IoT.....	27
3.5.1.2	MAC επίπεδο NB-IoT .....	28
3.5.2	Πλεονεκτήματα .....	29
3.5.3	Μειονεκτήματα .....	29
3.5.4	Ενδεικτικά διαθέσιμα modules NB-IoT .....	30
<b>3.6</b>	<b>Σύγκριση LoRa NB-IoT .....</b>	<b>31</b>
3.6.1.1	Φυσικό επίπεδο.....	31
3.6.1.2	MAC επίπεδο .....	32
3.6.1.3	Γενικά Συμπεράσματα .....	32
3.6.1.4	Σύγκριση εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν .....	32
<b>4</b>	<b>.....</b>	<b>35</b>
<b>Αλγόριθμοι εξοικονόμησης ενέργειας.....</b>	<b>.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Στην συσκευή.....</b>	<b>35</b>
4.1.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την διαχείριση ενέργειας στην μπαταρία .....	35
4.1.2	Λύσεις που αφορούν την ίδια την μπαταρία .....	36
<b>4.2</b>	<b>Στην συσκευή (Περίπτωση SAR συστήματος) .....</b>	<b>36</b>
4.2.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και διαχείριση αισθητήρων .....	38
4.2.2	Εξοικονόμηση ενέργειας και συχνότητας των μεταβάσεων καταστάσεων.....	40
4.2.3	Εξοικονόμηση ενέργειας και μετάδοση δεδομένων.....	41
<b>4.3</b>	<b>Στο ασύρματο κανάλι.....</b>	<b>42</b>
4.3.1	LoRa – οι επιπτώσεις της επιλογής των παραμέτρων μετάδοσης .....	42
4.3.2	Εξοικονόμηση ενέργειας και μετάδοση δεδομένων .....	43
<b>5</b>	<b>.....</b>	<b>45</b>
<b>Προσομοίωση LoRa.....</b>	<b>.....</b>	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>Διαθέσιμοι προσομοιωτές στην βιβλιογραφία .....</b>	<b>45</b>
5.1.1	Περιγραφή των εξομοιωτών .....	46
5.1.2	Μοντέλο Εξομοίωσης .....	50
<b>5.2</b>	<b>Σύγκριση εξομοιωτών .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Εκτέλεση σεναρίου προσομοίωσης σε FLoRa .....</b>	<b>54</b>
5.3.1	Περιγραφή της διάρθρωσης του εξομοιωτή FLoRa .....	54
5.3.2	Περιγραφή εξομοίωσης.....	56
5.3.2.1	Πρώτο παράδειγμα εξομοίωσης .....	56
5.3.2.2	Δεύτερο παράδειγμα εξομοίωσης .....	59
5.3.2.3	Τρίτο παράδειγμα εξομοίωσης .....	62
5.3.3	Σύγκριση τιμών RSSI κάθε σεναρίου εξομοίωσης.....	63
<b>6</b>	<b>.....</b>	<b>69</b>
<b>Συμπεράσματα, Προοπτικές και μελλοντική εργασία.....</b>	<b>.....</b>	<b>69</b>
<b>6.1</b>	<b>Σύνοψη και συμπεράσματα .....</b>	<b>69</b>

<b>6.2</b>	<b>Μελλοντική Εργασία.....</b>	<b>70</b>
	<b><i>Βιβλιογραφία- Αναφορές .....</i></b>	<b><i>75</i></b>

## Λίστα Εικόνων

<b>Εικόνα 1</b>	Το πλήθος των χρηστών του Διαδικτύου από το 1990 μέχρι το 2016.....	1
<b>Εικόνα 2</b>	Το πρώτο τρανζίστορ .....	1
<b>Εικόνα 3</b>	Ο αυτόματος πωλητής του Carnegie Mellon.....	5
<b>Εικόνα 4</b>	Ιστορική διαδρομή των LPWAN .....	8
<b>Εικόνα 5</b>	Ιστορική πορεία της βιομηχανίας.....	9
<b>Εικόνα 6</b>	Επιχείρηση έρευνας και διάσωσης.....	10
<b>Εικόνα 7</b>	Ένα τυπικό σύστημα για UAV με την βοήθεια IoT [7].....	11
<b>Εικόνα 8</b>	Μοντέλο Robot-as-a-Service σε Cloud Computing [8].....	11
<b>Εικόνα 9</b>	Διάγραμμα ροής για SAR σύστημα βασισμένο σε βιομετρικά στοιχεία .....	13
<b>Εικόνα 10</b>	θετικά και αρνητικά των κατηγοριών των τεχνολογιών διασύνδεσης.....	17
<b>Εικόνα 11</b>	Ιστορική πορεία του προτύπου IEEE 802.11 .....	18
<b>Εικόνα 12</b>	LoRaWAN Logo [11] .....	19
<b>Εικόνα 13</b>	Η στοιβα της τεχνολογίας LoRa [13] .....	21
<b>Εικόνα 14</b>	Περιγραφή βασικής αρχιτεκτονικής συστήματος βασισμένου στο LoRa .....	23
<b>Εικόνα 15</b>	Ο τρόπος αποστολής δεδομένων στην στοιβα του δικτύου.....	23
<b>Εικόνα 16</b>	Πορεία δημιουργίας του NB-IoT .....	27
<b>Εικόνα 17</b>	Τρόπος μετάδοσης μηνυμάτων μεταξύ χρήστη και εφαρμογής .....	28
<b>Εικόνα 18</b>	Η στοιβα πρωτοκόλλων του NB-IoT.....	29
<b>Εικόνα 19</b>	BC66 module.....	30
<b>Εικόνα 20</b>	Διάγραμμα μεταβάσεων των καταστάσεων του χρήστη .....	37
<b>Εικόνα 21</b>	Διάγραμμα ροή περιγραφόμενης λογικής για την εξοικονόμηση ενέργειας .....	42
<b>Εικόνα 22</b>	Παράδειγμα εκτέλεσης του physimulator .....	46
<b>Εικόνα 23</b>	Παράδειγμα εκτέλεσης σεναρίου του Omnet ++ .....	48
<b>Εικόνα 24</b>	Αρχιτεκτονική το ns3 module σε UML [28].....	49
<b>Εικόνα 25</b>	Παράδειγμα αποτελέσματος NetAnim .....	49
<b>Εικόνα 26</b>	Παράδειγμα εκτέλεσης του LoRaSim .....	50
<b>Εικόνα 27</b>	Διάγραμμα ροής της διαδικασίας εξομοίωσης .....	51
<b>Εικόνα 28</b>	Τοπολογία δικτύου LoRa .....	57
<b>Εικόνα 29</b>	Κίνηση πακέτων στο δίκτυο (με κόκκινο χρώμα).....	57
<b>Εικόνα 30</b>	Τιμές ενέργειας για τον κόμβο 0 .....	58
<b>Εικόνα 31</b>	Τιμές της ενέργειας για τον κόμβο 1 .....	58
<b>Εικόνα 32</b>	Τιμές ενέργειας για τον κόμβο2 .....	59
<b>Εικόνα 33</b>	Αρχική θέση των τελικών κόμβων .....	61
<b>Εικόνα 34</b>	Τελική τοπολογία: φαίνεται ότι οι κόμβοι καταλήγουν σε διαφορετικά σημεία από εκείνα που ξεκίνησαν .....	62
<b>Εικόνα 35</b>	Τοπολογία όπου υπάρχουν 3 πύλες και ένας τελικός κόμβος .....	63

## Λίστα Πινάκων

<b>Πίνακας 1</b> Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa.....	26
<b>Πίνακας 2</b> Εφαρμογές που υποστηρίζονται από την κάθε τεχνολογία.....	33
<b>Πίνακας 3</b> Σύγκριση μεταξύ LoRa και NB-IoT .....	33
<b>Πίνακας 4</b> Παράμετροι βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας.....	37
<b>Πίνακας 5:</b> Η σύγκριση των εξομοιωτών .....	52
<b>Πίνακας 6</b> Χαρακτηριστικά εξομοίωσης.....	56
<b>Πίνακας 7</b> Τιμές για το σενάριο εξομοίωσης στατικών κόμβων με μια πύλη .....	65
<b>Πίνακας 8</b> Τιμές RSSI για 3 κόμβους που κινούνται βάση του LinearMobility και μια πύλη.....	66
<b>Πίνακας 9</b> Σενάριο εξομοίωσης τριών πυλών με έναν στατικό κόμβο.....	67



## Συνομογραφίες

IoT	Internet of Things
LoRA	Long Range
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
LPWAN	Low Power Wide Area Network
SAR	Search And Rescue
PC	Personal Computer
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
QoS	Quality of Service
DER	Data Extraction Rate
NER	Network Energy Consumption
GPS	Global Positioning System
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
IPv4	Internet Protocol version 4
FLoRa	Framework for LoRa
IDE	Integrated Development Environment
CSS	Chirp Spread Spectrum
LoS	Line of Site
MAC	Medium Access Control
TTN	The Internet of Things Network
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal to Noise Ratio
GSM	Global System for Mobile communications
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
LTE	Long Term Evolution
ADR	Adaptive Data Rate
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
OTAA	Over-the-Air Activation
ABP	Activation by Personalization
AES	Advanced Encryption Standard
RSSI	Received Signal Strength Indication
ToA	Time of Arrival
TDoA	Time Difference of Arrival

ToF

Time of Flight

---

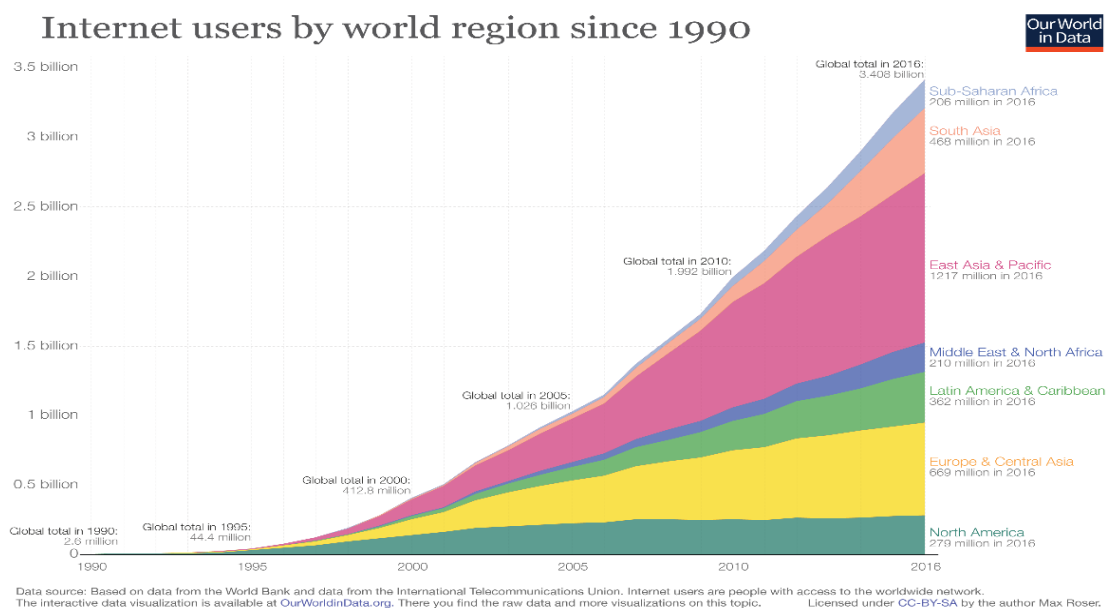




## Εισαγωγή

### 1.1 Σημασία του προβλήματος

Από την δημιουργία του σύγχρονου Internet, το οποίο αποτελεί μετεξέλιξη του APRANET, μπορούμε να πούμε πως έχει αποκτήσει γεωμετρική ανάπτυξη, έχοντας ως αποτέλεσμα την εδραίωση του σε ένα μεγάλο μέρος της ζωής μας. Το διαδίκτυο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας, καθώς συναντιέται σε διάφορες εκφάνσεις της ζωής μας, όπως στην βιομηχανία, στην εκπαίδευση και την ψυχαγωγία. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα το 2016 το πλήθος των ανθρώπων που είχαν πρόσβαση στο διαδίκτυο ανέρχεται στα 3,408 δισεκατομμύρια άτομα !



**Εικόνα 1** Το πλήθος των χρηστών του Διαδικτύου από το 1990 μέχρι το 2016



**Εικόνα 2** Το πρώτο τρανζίστορ

Η ανάπτυξη, ωστόσο του διαδικτύου αποτελεί απόρροια της εξέλιξης των τηλεπικοινωνιών και της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Μετά από την κατανόηση του ηλεκτρομαγνητισμού το 19ο αιώνα, στα μέσα του 20ου αιώνα οδηγηθήκαμε στην επινόηση του πρώτου τρανζίστορ.

Τα τρανζίστορ άνοιξαν τον δρόμο για την ψηφιακή τηλεπικοινωνία και εν συνεχεία προς το τέλος του 20ου αιώνα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής από ένα μηχάνημα που καταλαμβάνει ένα ολόκληρο δωμάτιο, γίνεται «προσωπικός» ού και το Personal στο PC, και υπάρχει πια σε κάθε σπίτι. Αυτή η εξάπλωση της χρήση του PC είχε ως αποτέλεσμα την παράλληλη ανάπτυξη του διαδικτύου, καθώς όλοι αυτοί οι προσωπικοί υπολογιστές έπρεπε να συνδέονται μεταξύ τους και να επικοινωνούν.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οδηγούμαστε σε μια νέα εποχή και σε έναν διαφορετικό τρόπο χρήσης του διαδικτύου. Πλέον είναι γνωστό πως πρόσβαση στο διαδίκτυο δεν γίνεται μόνο από τους ανθρώπους μέσω κάποιων συσκευών, αλλά πια ακόμα και αυτόνομα αντικείμενα μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους αλλά και στο διαδίκτυο δημιουργώντας αυτό που λέγεται Internet of Things (IoT). Έκτοτε, διάφορες συσκευές όπως ψυγεία, μικροελεγκτές, θερμοσίφωνες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν και να στέλνουν δεδομένα μεταξύ τους.

Η επικοινωνία αυτών των συσκευών πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με την φύση των ίδιων των συσκευών αλλά και των αναγκών που σχεδιάστηκαν να λύσουν. Έτσι μπορούμε να πούμε πως, υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες και πρωτόκολλα για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών που ξέρουμε ότι βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους αλλά και από τον κεντρικό σταθμό, και διαφορετικά για συσκευές που θα βρίσκονται σε μακρινή απόσταση, απόσταση κάποιων μέτρων ή απόσταση ακόμα και χιλιομέτρων. Διαφορετικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του IoT στην βιομηχανία (Industry 4.0), και για χρήση συστημάτων Search And Rescue.

Ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα που έχουν καταφέρει αλλά και εντείνονται προς αυτή την κατεύθυνση είναι η ευρεία χρήση του IoT για υλοποίηση συστημάτων Search and Rescue, όπου μέσω κάποιων wearables ο χρήστης θα εντοπίζεται από άλλα άτομα και θα μπορεί να διασωθεί. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί μια σειρά από προϋποθέσεις καθώς και διάφοροι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Για παράδειγμα, η κατανάλωση ισχύος της φορητής συσκευής αποτελεί βασικό κομμάτι για την υλοποίηση του συστήματος και ίσως και το πιο σημαντικό. Δεδομένου ότι ο χρήστης που χρησιμοποιεί την φορητή συσκευή βρίσκεται σε κάποια δραστηριότητα συνεπώς θα αδυνατεί να φορτίσει την συσκευή, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα, αλγόριθμοι αλλά και υλικό που θα επικεντρώνεται στην όσο το δυνατό μικρότερη κατανάλωση.

## **1.2 Στόχοι της Εργασίας**

Για την υλοποίηση των παραπάνω έχουν προταθεί διάφορα πρωτόκολλα και τεχνολογίες. Κάποια από αυτά που προσπαθούν να λύσουν τα παραπάνω προβλήματα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους είναι τα LoRA και NB-IoT. Στην παρούσα

εργασία θα επικεντρωθούμε στη μελέτη των διαθέσιμων στην βιβλιογραφία εξομοιωτών δικτύων IoT για την τεχνολογία LoRa, και η εξομοίωση διάφορων σεναρίων δικτύων IoT με γνώμονα την βελτιστοποίηση τους και χρήση τους για συστήματα SAR.

### ***1.3 Μεθοδολογία Προσέγγισης***

Στην παρούσα εργασία ασχολείται με το ενδιαφέρον αναπτυσσόμενο κλάδο του IoT από την σκοπιά της διασύνδεσης των συσκευών δίνοντας έμφαση σε μια μεγάλη πρόκληση του τομέα αυτού, που είναι η διαχείριση και εξοικονόμηση ενέργειας των συσκευών των οποίων η τροφοδοσία γίνεται με μπαταρία. Η αφορμή είναι η προσωπική ερευνητική ενασχόληση μου με το κομμάτι του LoRa, βάση και της οποίας έχει γίνει και δημοσίευση στο διεθνές συνέδριο BWCCA (Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications)

### ***1.4 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας***

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της διασύνδεσης των συσκευών, δίνοντας έμφαση στο LoRa και NB-IoT. Στα πλαίσια της μελέτης καθίσταται αναγκαίο να γίνει μελέτη των διαθέσιμων εξομοιωτών για την πραγματοποίηση εξομοίωσης διάφορων σεναρίων δικτύων IoT σε LoRa, καθώς η εξομοίωση μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την μελέτη των προτεινόμενων λύσεων, εφαρμογών και μηχανισμών πριν την υλοποίησή τους .

Έτσι, στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μια ιστορική αναδρομή στο IoT, αναφέροντας την πρώτη εφαρμογή που έχει καταγραφεί και μπορεί να ονομαστεί ως IoT, δίνοντας μερικούς ορισμούς αυτής της έννοιας, και τονίζοντας την αλλαγή αυτή της έννοιας στο πέρασμα του χρόνου συναρτήσει των τεχνολογικών καινοτομιών στο υλικό των υπολογιστών αλλά και την εγκαθίδρυση του διαδικτύου. Επιπλέον, μετά από μια ανασκόπηση για τα σημερινά δεδομένα όσον αφορά το υλικό των IoT συσκευών και των και των ασύρματων τεχνολογιών αναφέρονται μερικά παραδείγματα εφαρμογών του IoT που χρησιμοποιούνται σήμερα. Έπειτα ορίζεται και αναφέρονται μερικά κύρια σημεία των Search and Rescue συστημάτων σε ένα γενικό πλαίσιο, καθώς είναι ένας τομέας που μπορεί να επωφεληθεί πολύ από αυτή το IoT. Εν συνέχεια, θα γίνει ανάλυση των βασικών αρχών που διέπουν τα IoT , θα αναλυθεί το state of the art που υπάρχει σήμερα στην τεχνολογική και επιστημονική κοινότητα όσον αφορά αυτές τις τεχνολογίες. Τέλος θα αναφερθούν οι προκλήσεις που καλείται η επιστημονική κοινότητα να αντιμετωπίσει για την επίτευξη της εδραίωσης αυτών των τεχνολογιών για την βελτίωση της ζωής μας.

Στο κεφάλαιο 3, θα επικεντρωθούμε στις ασύρματες τεχνολογίες που υποστηρίζουν το IoT. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει μια γενική επισκόπηση των διαθέσιμων τρόπων με τους οποίους γίνεται η διασύνδεση όλων αυτών των συσκευών. Παρουσιάζονται συνοπτικά μερικά πρωτόκολλα διασύνδεσης συσκευών μικρής εμβέλειας όπως π.χ Bluetooth, WiFi, μέχρι μεγαλύτερης εμβέλειας όπως τα κινητά δίκτυα. Θα μελετηθούν σε μεγαλύτερο βάθος δύο από τους πιο ιδανικούς υποψήφιους που προσπαθούν να λύσουν τις παραπάνω προκλήσεις και ανήκουν στην κατηγορία των LPWAN δικτύων, το πρωτόκολλο LoRa και NB-IoT. Σε πρώτη φάση θα γίνει παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας τους τα πλεονεκτήματα τα μειονεκτήματα

κάθε μια από αυτές τις τεχνολογίες και θα παρουσιασθεί και μια σύγκριση μεταξύ αυτών των τεχνολογιών σε διάφορα επίπεδα, όπως για παράδειγμα το είδος των εφαρμογών μπορεί να υποστηρίξει η κάθε μια τεχνολογία καλύτερα. Ακόμη θα δοθούν ως παράδειγμα μερικά από τα διαθέσιμα στην αγορά modules που υποστηρίζουν την κάθε μια από τις δύο τεχνολογίες.

Το κεφάλαιο 4 ασχολείται με την παρουσίαση αλγορίθμων για εξοικονόμηση ενέργειας σε δίκτυα IoT δίνοντας έμφαση σε λύσεις που αφορούν τα δίκτυα LoRa που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Οι αλγόριθμοι και οι τρόποι που παρουσιάζονται μελετήθηκαν στα εξής επίπεδα: τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της συσκευής μέσω αλλαγών και αλγορίθμων που εκτελούνται στην ίδια την συσκευή, αλγόριθμοι που βασίζονται στο ασύρματο κανάλι, όπως για παράδειγμα την επιλογή των παραμέτρων μετάδοσης. Εκτός αυτού, προτείνεται μια αρχιτεκτονική για την εξοικονόμηση ενέργειας έχοντας στον νου την περίπτωση όπου το LoRa χρησιμοποιείται για σύστημα εύρεσης και διάσωσης ανθρώπων, περιγράφοντας της καταστάσεις που βρίσκεται ο χρήστης και η συσκευή και περιγράφονται τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας σε τρία επίπεδα, σε επίπεδο διαχείρισης των αισθητήρων, συχνότητα μεταβάσεων των καταστάσεων και στην μετάδοση των δεδομένων.

Το κεφάλαιο 5 ασχολείται με την εξομοίωση δικτύων LoRa. Αναλυτικότερα, γίνεται αναφορά στους διαθέσιμους εξομοιωτές που υπάρχει στην βιβλιογραφία και την επιστημονική κοινότητα. Θα παρουσιαστεί η γενική λειτουργία μιας εξομοίωσης, θα γίνει ενδελεχής σύγκριση των εξομοιωτών και στο τέλος θα δοθούν κάποια σενάρια εξομοίωσης με τον εξομοιωτή που βάση της σύγκρισης κρίθηκε καταλληλότερος σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που προσφέρει.

Εν κατακλείδι, στο κεφάλαιο 6, θα γίνει 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 ενασχόλησης μου και μελέτης στα επόμενα χρόνια.





# 2

## Internet of Things (IoT)

### 2.1 Ιστορική αναδρομή

Μεγάλος λόγος γίνεται στις μέρες μας για διάφορες καινοτομίες που διαδραματίζονται στον κλάδο της μηχανικής Η/Υ και πληροφορική, όπως Big Data, Machine Learning και Internet of Things. Ωστόσο, τι ακριβώς σημαίνει ο όρος Internet of Things; Όπως συμβαίνει συνήθως με οποιαδήποτε νέα έννοια, δεν υπάρχει ένας σαφής και απόλυτος ορισμός του IoT, καθώς διαφορετικές ομάδες «δημιουργών» IoT, όπως ερευνητές, ακαδημαϊκοί, εταιρείες έχουν προτείνει διάφορους ορισμούς. Ένας ορισμός που προτείνεται από τους Somayya Madakam, R. Ramaswamy, Siddharth Tripathi [2] είναι ο εξής: ένα ανοικτό δίκτυο έξυπνων αντικειμένων που έχουν την ικανότητα να αυτό-οργανώνονται, να μοιράζονται πληροφορίες, δεδομένα και πόρους, αντιδρώντας στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Αλλιώς, μπορούμε να ορίσουμε ως IoT το δίκτυο επικοινωνίας μιας σειράς συσκευών, οικιακών συσκευών, αυτοκινήτων καθώς και κάθε λογής αντικειμένου που ενσωματώνει ηλεκτρονικά μέσα, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα σε δίκτυο ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων [3]. Διαφορετικά, μπορούμε να πούμε πως η φιλοσοφία του IoT είναι η σύνδεση όλων των ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους μέσω κάποιου τοπικού δικτύου ή με δυνατότητα σύνδεσης τους στο διαδίκτυο.



*Εικόνα 3* Ο αυτόματος πωλητής του Carnegie Mellon

Η ιδέα του IoT είναι προσανατολισμένη προς την μεγαλύτερη χρήση όλων των υπάρχοντων τεχνολογιών διασύνδεσης, άρα και του διαδικτύου. Η δημιουργία όλο και πιο αποτελεσματικών, οικονομικών μικροϋπολογιστών, η μείωση του κόστους έχει συμβάλει στην διάδοση των συσκευών αυτών, καθώς και η σμίκρυνση τους έχει οδηγήσει στην χρήση τους σε μια ευρεία γκάμα περιπτώσεων, μέχρι ακόμα και σε ενδύματα όπως ρούχα και παπούτσια.

Η ιδέα του IoT, έχει γεννηθεί εδώ και πολλά χρόνια κυρίως μέσω προβλέψεων και σενάρια επιστημονικής φαντασίας, η απαρχή του εντούτοις είχε αρχίσει να συζητιέται από την δεκαετία του 1980, όπου δημιουργήθηκε ο πρώτος αυτόματος πωλητής από το αμερικάνικο πανεπιστήμιο Carnegie Mellon, η οποία μηχανή ήταν η πρώτη μηχανή που συνδέθηκε στο διαδίκτυο. Η ιδέα προήλθε από έναν φοιτητή τον David Nichols όπου πρακτικά πίστευε ότι η απόσταση από το δωμάτιο του στους αυτόματους πωλητές ήταν «σχετικά μεγάλη» και η ουρά που σχηματίζονταν από τα άτομα ήταν και αυτή μεγάλη [4].

Έτσι γεννήθηκε η ιδέα ενός αυτόματου πωλητή όπου θα μπορούν οι χρήστες του πανεπιστημίου να παρακολουθούν από μακριά την διαθεσιμότητα των προϊόντων του αυτόματου πωλητή. Για να μπορέσουν να πάρουν τα δεδομένα από τον αυτόματο πωλητή εγκαταστάθηκε σε αυτό ένα module με αισθητήρες για να καταλαβαίνει όταν γίνεται αγορά. Ακόμη, προστέθηκε μια γραμμή από την συσκευή μέχρι τον κεντρικό υπολογιστή του τμήματος, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος στο APRANET, ο προκάτοχος του σημερινού Internet. Επίσης αναπτύχθηκε το κατάλληλο πρόγραμμα για αυτή την εργασία, έχοντας στο τέλος ως αποτέλεσμα κάθε φοιτητής που συνδέεται μέσω του τοπικού ethernet να μπορεί να παρακολουθήσει τον αυτόματο πωλητή [4].

Μετά από αυτή την επιτυχία αρχίζει σιγά σιγά η «ρευστοποίηση» της έννοιας του Ιντερνετ. Από την αυστηρή περιγραφή του ως η διασύνδεση υπολογιστών και η σχεδίαση των διάφορων πρωτοκόλλων που αφορούσαν κυρίως προσωπικούς υπολογιστές, σε μια ευρύτερη έννοια διασύνδεσης περισσότερων συσκευών. Έτσι γεννιούνται οι έννοιες του διάχυτου προγραμματισμού (pervasive computing) και ubiquitous computing. Είναι η ιδέα στην επιστήμη των υπολογιστών και στην τεχνολογία λογισμικού, όπου ο υπολογισμός συμβαίνει «παντού». Τον όρο ubiquitous computing εισήχθη από τον Mark Weiser το 1988, επικεφαλής του Xerox PARC, δημιουργώντας τις πρώτες δημοσιεύσεις στο θέμα αυτό.

## 2.2 Η κατάσταση σήμερα

Όπως έχει εξηγηθεί η εξέλιξη του IoT ακολουθεί την πορεία των άλλων τομέων της επιστήμης και τεχνολογίας υπολογιστών. Οι εξελίξεις σε επίπεδο hardware έχουν οδηγήσει σήμερα στην διάδοση του σε διάφορες πτυχές της καθημερινότητας μας. Η ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης, έχουν οδηγήσει στην ενσωμάτωσή της μέσω του IoT σε διάφορες εκφάνσεις της καθημερινότητας επίσης. Τέλος η ανάπτυξη των τεχνολογιών διασύνδεση και δικτύων αποτελεί ένας ακόμη ακρογωνιαίος λίθος για το IoT.

Στο κομμάτι του hardware η αποδοτικότερη υλοποίηση και σμίκρυνση των τρανζίστορ έχει οδηγήσει στην μείωση του μεγέθους των μικροεπεξεργαστών. Κυρίαρχο ρόλο σήμερα σε αυτή την κατηγορία κατέχουν τα «έξυπνα» κινητά, όπου πλέον είναι ικανά να εκτελέσουν εργασίες που μπορεί να εκτελεστούν και σε desktops. Οι σημερινοί επεξεργαστές που έχουν ανακοινωθεί το 2019 όπως ο Snapdragon 855 της Qualcomm [5] έχουν 8 πυρήνες, υποστηρίζουν μέχρι και 16 GB Ram μνήμη ! Εκτός από τα παραπάνω έχουν μια πληθώρα αισθητήρων, γυροσκοπίων, επιταχυνσιόμετρα κ.α. Άλλη κατηγορία που αποκτάει ολοένα μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά είναι τα wearables. Wearables είναι έξυπνες μικρές ηλεκτρονικές συσκευές που ενσωματώνονται στην καθημερινότητα, καθώς χρησιμοποιούνται ως ρολόγια, ενσωματώνονται σε ρουχισμό, όπως σε κολιέ, παπούτσια κλπ. Τέτοιες τεχνολογίες βοηθάνε τον χρήστη κυρίως για δραστηριότητες άθλησης, καθώς μπορούν να

μετρούν τα βήματα, καρδιακούς παλμούς, παρακολουθήση της ποιότητας ύπνου, μπορεί να διαθέτουν GPS, και να παρακολουθούν την πορεία κατά την διάρκεια της άθλησης με ποδήλατο. Όλες αυτές οι έξυπνες λειτουργίες έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην ζωή καθώς μπορεί να βοηθήσει στην καταπολέμηση της παχυσαρκίας αλλά και στην προώθηση ενός πιο υγιεινού τρόπου ζωής. Εκτός αυτού αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τους αθλητές, καθώς μπορεί να τους προσφέρει ακριβές μετρήσεις. Ορισμένα διαθέτουν προηγμένες λειτουργίες προπόνησης για παρακολούθηση της τεχνικής και της απόδοσης, παρέχοντας στην συνέχεια και στατιστικά δεδομένα από το σύνολο των προπονήσεων, δίνοντας μια καλύτερη γνώση για το είδος των προπονήσεων που πρέπει να ακολουθήσει ο αθλούμενος.

Στο κομμάτι της ασύρματης σύνδεσης και μετάδοσης δεδομένων έχουν αναπτυχθεί μια σειρά από τεχνολογίες. Ως ασύρματο δίκτυο ορίζουμε το δίκτυο όπου η μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των κόμβων γίνεται ασύρματα. Η ασύρματη μετάδοση γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Μερικά παραδείγματα είναι το ραδιόφωνο, το GPS, το ασύρματο Ιντερνέτ. Εφόσον, μιλάμε για μικρές συσκευές που υπάρχουν σε διάφορα μέρη, η ασύρματη μετάδοση αποτελεί μια πολύ σημαντική συνιστώσα. Τα ασύρματα δίκτυα, χωρίζονται ανάλογα με την εμβέλεια. Αυτό επεκτείνεται και στο IoT, καθώς και εδώ η εμβέλεια μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με μια κατηγορία ασύρματων δικτύων που ονομάζεται LPWAN, όπου είναι ένας τύπος ασύρματης σύνδεσης μεγάλης εμβέλειας με χαμηλή ισχύ. Αυτός ο τύπος ειδικεύεται σε περιπτώσεις όπου περιοριζόμαστε σε ενέργεια, δηλαδή σε αισθητήρες που βρίσκονται σε συσκευές που χρησιμοποιούν μπαταρία για την ενέργεια τους. Οι βασικές αρχές αυτής της κατηγορίας είναι τα εξής:

- Μεγάλη εμβέλεια. Η εμβέλεια θα πρέπει να είναι περίπου κάτι χιλιόμετρα.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τα πρωτόκολλα έχουν σαν γνώμονα την μικρότερη κατανάλωση, την όσον την δυνατόν μικρότερη μετάδοση δεδομένων με χαμηλό bit rate.
- Χαμηλό κόστος. Το πρωτόκολλο δεν θα πρέπει να είναι περίπλοκο και να αυξάνει την πολυπλοκότητα του hardware της συσκευής.

Μερικά τέτοια πρωτόκολλα είναι τα LoRa, NB-IoT, Sigfox, weightless, Telensa, Nwave, κλπ. Από τα πιο διαδεδομένα από αυτά είναι το LoRA και το NB-IoT



Εικόνα 4 Ιστορική διαδρομή των LPWAN

## 2.2.1 Εφαρμογές του IoT

Η βελτίωση του hardware και η δημιουργία των διάφορων δικτυακών τεχνολογιών και Πρωτοκόλλων έχει οδηγήσει στην δυνατότητα εφαρμογής του IoT σε πολλούς τομείς όπου εισάγεται η δυνατότητα αυτοματισμού και επικοινωνίας μηχανής με μηχανής. Οι τομείς αυτοί μπορεί να είναι η διαχείριση στην βιομηχανία (Industry 4.0), η έξυπνη πόλη, οικιακός αυτοματισμός, συστήματα έρευνας και διάσωσης κλπ.

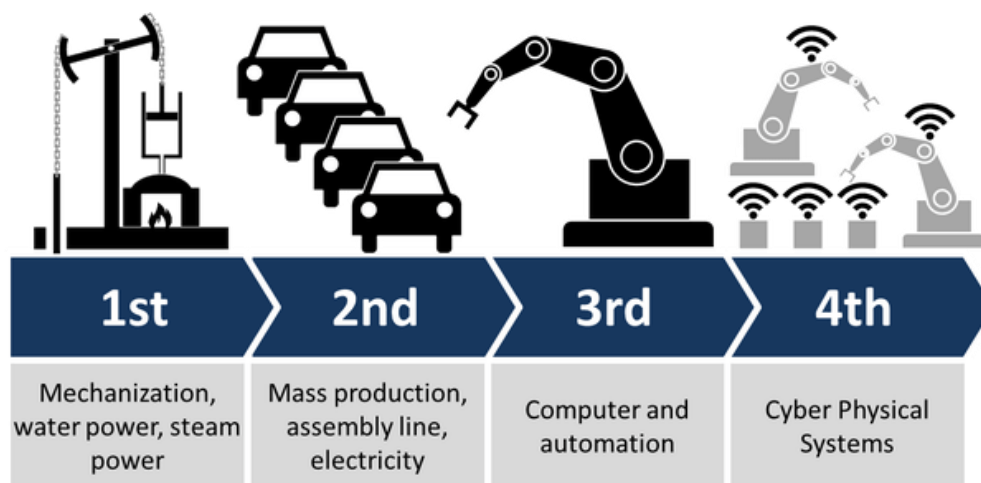
## 2.2.2 Έξυπνο σπίτι

Διάφορες εταιρείες στον τομέα έχουν ήδη ξεκινήσει στην δημιουργία του λεγόμενου έξυπνου σπιτιού. Αρχικά, γίνεται προσπάθεια να προσφερθεί στον χρήστη περισσότερη άνεση. Έτσι, για παράδειγμα έχει αναπτυχθεί ο οικιακός βοηθός όπως η Alexa από την Amazon, όπου αλληλοεπιδρά με τον χρήστη μέσω φωνητικών εντολών. Μέσω αυτών των εντολών, η Alexa δίνει πληροφορίες καιρού, τα νέα, να βάζει ξυπνητήρι, να παίζει μουσική. Οι δυνατότητες της επεκτείνονται, καθώς έχει την δυνατότητα να συνδέεται και με άλλες έξυπνες συσκευές, όπως τηλεοράσεις, συναγερμούς και κάμερες ασφαλείας με αποτέλεσμα να μπορεί να παρακολουθεί την ασφάλεια του σπιτιού.

Εκτός από άνεση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το IoT για μείωση των συνολικών δαπανών και εξοικονόμηση ενέργειας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, απαιτείται παρακολούθηση της κατανάλωσης, και μέσω IoT να προσφέρεται μια «ευφυΐα» στις συσκευές ώστε για παράδειγμα να ρυθμίζονται ανάλογα με τις ανάγκες χωρίς την παρέμβαση του ανθρώπου, όπως η διαχείριση του φωτισμού ανάλογα με την ύπαρξη ανθρώπου στον χώρο, η διαχείριση του κλιματισμού ανάλογα με την ύπαρξη ανθρώπου στο δωμάτιο και την υπάρχουσα θερμοκρασία.

### 2.2.3 Industry 4.0

Με τον όρο industry 4.0 εννοούμε την τέταρτη βιομηχανική «επανάσταση». Στην ουσία αναφέρεται στην ενσωμάτωση τεχνολογιών πληροφορική συμπεριλαμβανομένου και χρήση δικτύων IoT, με σκοπό την αυτοματοποίηση της βιομηχανίας και την μετάδοση δεδομένων μεταξύ των επιμέρους συστημάτων της βιομηχανίας και των μηχανών. Ένα από τα θετικά αποτελέσματα είναι η εξόρυξη γνώσης που μπορεί να γίνει, καθώς οι αισθητήρες μπορούν να λαμβάνουν πολλά δεδομένα κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτή η γνώση μπορεί να αξιοποιηθεί για την πρόβλεψη βλαβών, για τον καλύτερο προγραμματισμό της συντήρησης των διάφορων μηχανημάτων. Ένας άλλος τομέας που επωφελείται από την χρήση IoT τεχνολογιών είναι η αυτόνομη οδήγηση. Η βιομηχανία επωφελείται από την αυτόνομη οδήγησης, καθώς ήδη έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική, στην Amazon υπάρχουν αυτόνομα οχήματα για μεταφορά αντικειμένων. Επιπλέον, ένας άλλος τομέας που χαρακτηρίζει το Industry 4.0 είναι το 3D printing [6].



Εικόνα 5 Ιστορική πορεία της βιομηχανίας

### 2.2.4 Έξυπνη πόλη

Μια έξυπνη πόλη λέμε μια αστική περιοχή που ενσωματώνει διάφορες νέες τεχνολογίες για την συλλογή δεδομένων με σκοπό την βελτίωση στην διαχείριση διάφορων θεμάτων. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η συμβολή στην διαχείριση της κυκλοφορίας. Συγκεντρώνοντας δεδομένα από αυτοκίνητα, από πολίτες και από τους οδικούς σηματοδότες, μπορεί να γίνει πιο σωστή η ρύθμιση της οδικής κυκλοφορίας. Ακόμη, μπορεί με χρήση τέτοιων τεχνολογιών να γίνει καλύτερη διαχείριση του οδικού φωτισμού με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας, να γίνει καλύτερη διαχείριση απορριμμάτων. Η διαχείριση απορριμμάτων αποτελεί μείζονα σημασίας σε περιοχές απομακρυσμένες όπως για παράδειγμα σε μικρά χωριά, όπου το απορριματοφόρο πρέπει να περνάει κατά διαστήματα και όχι καθημερινά. Έτσι με χρήση IoT μπορεί το κέντρο να γνωρίζει αν οι κάδοι στα γύρω μικρά χωριά είναι γεμάτα και έτσι πρέπει να σταλθεί όχημα ή αν είναι άδεια να μην σταλθεί όχημα και να εξοικονομηθεί το κόστος της μεταφοράς.

## 2.2.5 E-health

Η ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στις υπηρεσίες υγείας δεν αποτελεί ανήκουστο γεγονός. Ήδη πολλές διαδικασίες για παράδειγμα στην οργάνωση των υπηρεσιών υγείας έχουν αυτοματοποιηθεί και χρησιμοποιούν το διαδίκτυο για την επικοινωνία με τον χρήστη και για τις εσωτερικές οργανωτικές διαδικασίες, χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για πρόβλεψη ασθενειών κλπ. Σε αυτό το πλαίσιο οι τεχνολογία των IoT έχει αρχίσει να συμβάλει σε διάφορους τομείς της υγείας.

Το IoT δίνει την δυνατότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ μηχανών και αισθητήρων. Ένα μέρος στο οποίο εφαρμόζεται αυτή η δυνατότητα είναι η συνεχής παρακολούθηση του ασθενούς, μέσω διάφορων αισθητήρων που μετράνε διάφορα σημαντικά για την υγεία στοιχεία όπως την θερμοκρασία, την πίεση κτλ του ασθενούς και μέσω κάποιου δικτύου στέλνεται και γίνεται η επεξεργασία από τους γιατρούς, πολλές φορές ακόμα και πραγματικό χρόνο. Τέτοια συστήματα έχουν πολλά οφέλη, καθώς μπορεί το ιατρικό προσωπικό να παρεμβεί άμεσα όταν τα βιομετρικά αυτά στοιχεία χειροτερεύσουν. Επιπλέον, παρόμοια συστήματα μπορεί να παίξουν καταλυτικό ρόλο στην ιατρική περίθαλψη ασθενών που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές και είναι δύσκολο να μεταβεί κάποιος γιατρός από άλλη περιοχή κάποιας διαφορετικής ειδικότητας. Τέλος, το πλήθος των δεδομένων μπορεί να αποθηκευτούν και να αποτελούν το ιστορικό του ασθενή για μελλοντική χρήση.

## 2.3 Search and Rescue Συστήματα



*Εικόνα 6* Επιχείρηση έρευνας και διάσωσης

Με τον ορισμό Search and Rescue (έρευνα και διάσωση) εννοούμε την διαδικασία κατά την οποία γίνεται έρευνα και παρέχεται βοήθεια σε άτομα τα οποία βρίσκονται σε κίνδυνο. Αυτή η έννοια περιλαμβάνει ένα σύνολο ειδικοτήτων και εξαρτάται, κυρίως από το είδος και το μέρος διάσωσης, καθώς σε κάθε τέτοια περίπτωση απαιτεί διαφορετικό εξοπλισμό. Για παράδειγμα για διάσωση που συμβαίνει σε βουνό, συνήθως χρησιμοποιούνται και σκύλοι-διάσώστες, ενώ αντίθετα για διάσωση στην θάλασσα χρησιμοποιούνται ελικόπτερα και διάφορα

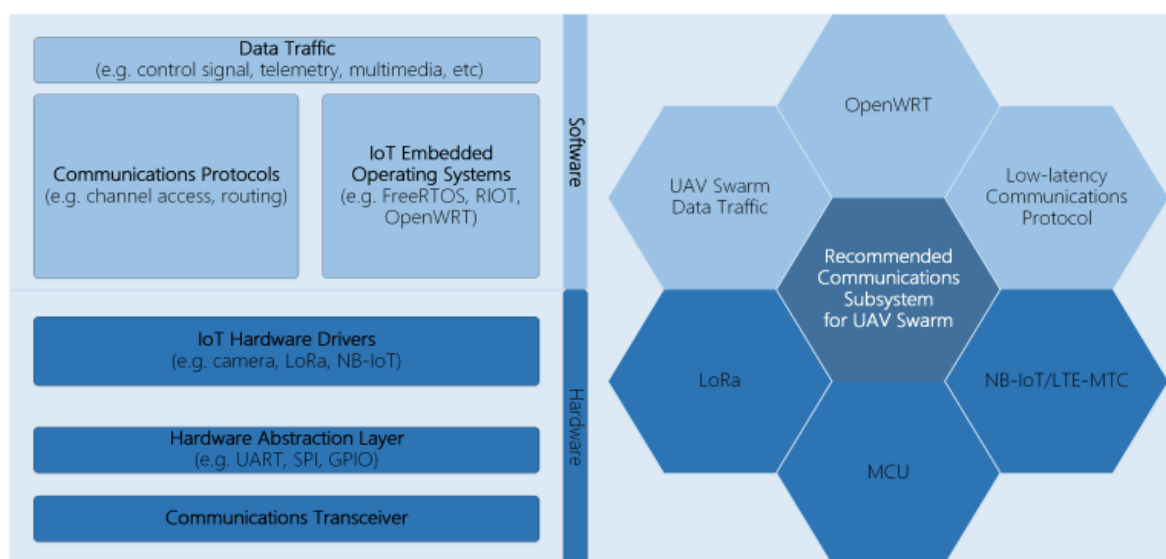
εναέρια και επίγεια μέσα. Επίσης, όπως είναι λογικό διαφορετικά μέσα χρησιμοποιούνται όταν είναι ένα άτομο που χάθηκε και διαφορετικά όταν είναι μια ολόκληρη ομάδα, ή για παράδειγμα ένα πλοίο ή ένα αεροπλάνο που έπεσε στην θάλασσα. Κάθε κράτος διαθέτει ομάδες εύρεσης και διάσωσης και ιστορικά υπάρχουν περιπτώσεις όπου υπήρξαν δυστυχήματα σε διεθνή ύδατα, κινητοποιήθηκαν συντονισμένα τέτοιες ομάδες από διάφορες χώρες.

Όπως καταλαβαίνουμε και από τον ορισμό πολύ σημαντικό είναι να γίνεται γρήγορα και σωστά η έρευνα, δηλαδή ο έγκαιρος εντοπισμός του ατόμου/ατόμων που χάθηκαν. Σε αυτή την διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθούν ελικόπτερα, αεροπλάνα πλοία, ραντάρ κλπ. Όμως με την ραγδαία ανάπτυξη του IoT, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το IoT για αυτό τον σκοπό.

Η τεχνολογία του IoT έχει συμβάλει κυρίως με την χρήση των UAV, τα οποία αποτελούν πολύ ισχυρά εργαλεία, επειδή προσφέρουν δυνατότητες απόκτησης και ανάλυσης

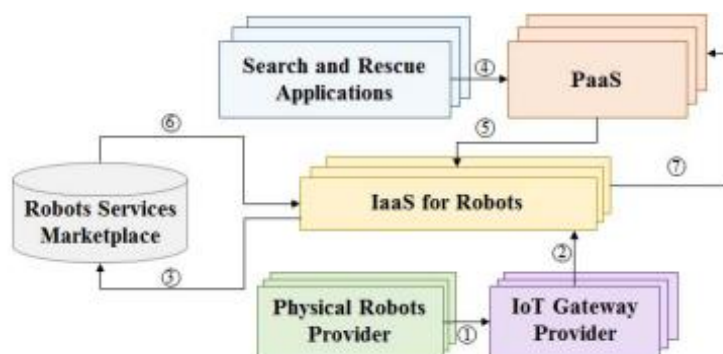


δεδομένων στον αέρα. Για την εξοικονόμηση ενέργειας των οχημάτων αυτών, αλλά και την πιο γρήγορη εύρεση του ατόμου, πρέπει να υπάρχει μια υποδομή δικτύου. Καταρχάς, τα UAV πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους για να πετάνε διατεταγμένα σαν σμήνος και σύμφωνα με κάποιον αλγόριθμο. Η δικτύωση τους αποτελεί μια σύγχρονη πρόκληση, καθώς σε αστικό περιβάλλον που το δίκτυο είναι καλό μπορούν εύκολα να ελεγχθούν εξ αποστάσεως, όμως εκτός αστικού περιβάλλοντος τα πράγματα είναι πιο δύσκολα. Συνήθως μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο LoRa για την μεταξύ τους επικοινωνία, που σε κατάσταση αναζήτησης αποτελεί σημαντικό, καθώς πρέπει να ρυθμίζονται οι σχετικές παράμετροι όπως το ύψος στο οποίο θα πετάνε η απόσταση που θα πρέπει να κρατάνε μεταξύ τους τα drones, η ταχύτητα, και η κατεύθυνση [7].



Εικόνα 7 Ένα τυπικό σύστημα για UAV με την βοήθεια IoT [7]

Άλλη οπτική που έχει προταθεί στην επιστημονική κοινότητα για την χρήση του IoT για τον παραπάνω σκοπό, αυτή που θεωρεί τα επιμέρους συστήματα σαν υπηρεσία. Στην βιβλιογραφία, έχει προταθεί ως ιδέα για την χρήση IoT και ρομπότ για search and rescue, ως ρομπότ-as-a-Service. Πιο συγκεκριμένα έχουν περιγράψει cloud αρχιτεκτονικές όπου λογισμικό που εκτελείται στο cloud για τον συντονισμό μιας τέτοιας έρευνας, επικοινωνώντας με ρομπότ που βρίσκονται στα σημεία όπου πραγματοποιείται η έρευνα. Πέρα από την αρχιτεκτονική του cloud, δίνεται μεγάλη έμφαση στα επίπεδα κόμβου και του δικτύου. Μια γενική ιδέα αρχιτεκτονικής παρατίθεται παρακάτω [8]:



Εικόνα 8 Μοντέλο Robot-as-a-Service σε Cloud Computing [8]



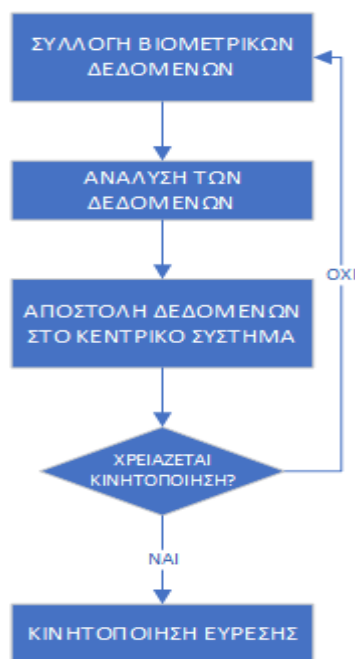
Μια άλλη προσέγγιση στην οποία ήδη γίνεται προσπάθεια να υλοποιηθεί είναι με την χρήση wearables. Ένα τέτοιο σύστημα έχει την δυνατότητα εντοπισμού του χρήστη μέσω των wearables, το οποίο μπορεί να είτε κάποιο ρολόι ή κάποιος αισθητήρας που να ενσωματώνεται στον ρουχισμό (π.χ στα παπούτσια). Η ιδέα είναι ότι οι χρήστες, οι οποίοι μπορεί να είναι άτομα μεγάλης ηλικίας με κάποια μορφή άνοιας, μικρά παιδιά, ή άτομα με διαταραχές του φάσματος του αυτισμού, δηλαδή ομάδες οι οποίες είναι πολύ εύκολο να χαθούν και να μην μπορούν να επιστρέψουν, εφοδιάζονται με wearables και τα άτομα που έχουν την ευθύνη αυτών των ατόμων έχουν την δυνατότητα να τους εντοπίζουν, όταν ξεφεύγουν από κάποιο όριο, το οποίο μπορεί να είναι ο χώρος διαμονής του μέχρι και μια ευρύτερη περιοχή, όπως η γειτονιά του. Εκτός των παραπάνω βασικών λειτουργιών στην βιβλιογραφία υπάρχουν συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αισθητήρες βιολογικών δεδομένων και με συνδυασμό με τα παραπάνω μπορεί να γίνεται εύρεση του ατόμου την ώρα που τα βιομετρικά του στοιχεία ξεπεράσουν κάποιο όριο.

Τέτοια συστήματα με βιομετρικά στοιχεία προτείνονται στις δημοσιεύσεις [9][10][11]. Πιο συγκεκριμένα, ένα τέτοιο σύστημα συλλογής βιομετρικών στοιχείων ασχολείται με την απόκτηση των δεδομένων μέσω των αισθητήρων, την μετάδοση τους μέσω κάποιου πρωτοκόλλου, την ανάλυση αυτή την δεδομένων και πάντα με γνώμονα την ασφάλεια των δεδομένων. Συνήθως αυτά τα συστήματα πρέπει λαμβάνουν υπόψιν τα εξής:

- Τα δεδομένα πρέπει να είναι κρυπτογραφημένα κατά την μετάδοση.
- Είναι σημαντικό να γίνετε με χαμηλό οικονομικό και ενεργειακό κόστος.
- Τα βιομετρικά δεδομένα πρέπει να είναι σωστά και ακριβή.

Ακόμη, όταν χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο LoRaWAN για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται:

- τερματικές συσκευές LoRa που περιέχουν όλους τους αισθητήρες, οι οποίοι μπορεί να είναι και για εντοπισμό θέσης όπως GPS, και σίγουρα βιομετρικοί αισθητήρες. Ανάλογα με τις περιπτώσεις μπορεί να είναι αισθητήρας μέτρησης γλυκόζης, θερμόμετρο, μέτρησης πίεσης, μετρητή καρδιακών παλμών που μπορεί να είναι είτε οπτικός μετρητής είτε ηλεκτροδιάγραμμα.
- Πύλες LoRa: συσκευή η οποία είναι υπεύθυνη για την μετατροπή του σήματος σε IP πακέτα.
- LoRa Server: ελέγχει τα πακέτα και τα δεδομένα που έρχονται και τα αποθηκεύει σε μια βάση δεδομένων
- Και ένα interface που ενώνει όλα αυτά τα στοιχεία [9].



Εικόνα 9 Διάγραμμα ροής για SAR σύστημα βασισμένο σε βιομετρικά στοιχεία

## 2.4 Προκλήσεις του IoT

Όπως συμβαίνει συνήθως σε κάθε νέα τεχνολογία, η εισαγωγή και η εδραίωση του IoT έρχεται μαζί από μια σειρά από προκλήσεις διαφορετικής φύσης η κάθε μία, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν από την επιστημονική και τεχνολογική κοινότητα. Παρακάτω θα αναλύσουμε μερικές από τις βασικότερες προκλήσεις που κλινόμαστε να αντιμετωπίσουμε.

### 2.4.1 Ηθικές και κοινωνικές προκλήσεις

Είναι γνωστό ότι στις περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιείται το IoT οι συσκευές έχουν κάποιους αισθητήρες και συλλέγουν δεδομένα. Η συλλογή αυτών των δεδομένων δημιουργεί ένα θέμα ασφάλειας αλλά και ηθικής. Καταρχάς, αυτά τα δεδομένα μπορεί να είναι σε ορισμένες εφαρμογές προσωπικά δεδομένα όπως συμβαίνει στην περίπτωση των ιατρικών εφαρμογών. Αυτά τα δεδομένα μεταδίδονται και αποθηκεύονται προς άλλες συσκευές, εξυπηρετητές κλπ. Επομένως, δημιουργείται η πρόκληση της ασφάλειας των προσωπικών δεδομένων, από εισβολές τρίτων μη εξουσιοδοτημένων ανθρώπων.

Εκτός όμως το ενδεχόμενο της «εισβολής» από μη εξουσιοδοτημένα άτομα, η ίδια η αποθήκευση αυτών των δεδομένων εγείρει διάφορα κοινωνικά θέματα. Αυτά τα δεδομένα που μπορούν να συλλεχθούν είναι ποικίλα, όπως για παράδειγμα η τοποθεσία, βιομετρικά στοιχεία, των οποίων η επεξεργασία μπορεί να προσφέρει διάφορα οφέλη, όμως δίνει στον οργανισμό που τα συλλέγει και τα επεξεργάζεται μεγάλη γνώση για την ζωή των ατόμων και

της ιδιωτικής τους ζωής. Έτσι, το κατά πόσο μπορεί να διατηρείται και να επεξεργάζεται όλη αυτή η πληροφορία βρίσκεται ανάμεσα από την διελκυστίνδα της βελτίωσης των υπηρεσιών με χρήση αυτών των δεδομένων και της προστασίας των ιδιωτικών δεδομένων. Όπως αναφέρεται στον κανονισμό της ΕΕ 2016/679 η προστασία των φυσικών προσώπων έναντι της επεξεργασίας των δεδομένων προσωπικού χαρακτήρα είναι θεμελιώδες δικαίωμα [12].

## 2.4.2 Τεχνολογικές προκλήσεις

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο τομέας του IoT εξαρτάται από την εξέλιξη πολλών άλλων τομέων της επιστήμης των υπολογιστών αλλά και της τεχνολογίας γενικότερα. Επίσης ο ίδιος ο ορισμός του είναι αρκετά ρευστός υποδεικνύοντας την μεγάλη σημασία της δυνατότητας συνεργασίας όλων των τεχνολογιών αυτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τεχνολογικές εταιρείες και οργανισμοί να συνεργάζονται και να επικοινωνούν έτσι ώστε να θέτουν κάποια standard βάση αυτών να υλοποιούνται οι διάφορες εφαρμογές.

Επιπλέον, ένα άλλο θέμα το οποίο αποτελεί πρόκληση για τα σημερινά δεδομένα είναι η κατανάλωση ενέργειας των συσκευών IoT. Οι τεχνολογίες για την αποθήκευση της ενέργειας πρέπει να πληρούν διάφορα απαιτούμενα όπως η παροχή κατάλληλων μπαταριών που θα ενσωματώνονται σε μικρές συσκευές που θα έχουν ενσωματωμένους επεξεργαστές και κάποιους αισθητήρες. Αυτό σήμερα είναι μια πρόκληση και ένα ανοικτό θέμα προς έρευνα. Μια τέτοια ανοικτή ερευνητική περιοχή είναι η ασύρματη φόρτιση. Σήμερα, ωστόσο μπορούμε να μεταδώσουμε ισχύ σε μικρή μόνο απόσταση. Παρόλα αυτά η ασύρματη φόρτιση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αυτή την χρονική στιγμή βρίσκεται σε αρκετά πρώιμο στάδιο

Ένα άλλο παράδειγμα τεχνολογικής πρόκλησης στον τομέα είναι η ενσωμάτωση λειτουργιών που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική επεξεργασία, με επέκταση και μεγάλης ενεργειακής ισχύς, σε μικρές συσκευές οι οποίες είναι επεξεργαστικά ασθενή αλλά και η τροφοδοσία τους βασίζεται πολλές φορές στην χρήση μπαταρίας. έτσι πρέπει να υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ αύξησης των δυνατοτήτων των συσκευών ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να μειώνεται το κόστος παραγωγής και η κατανάλωση της ενέργειας.

## 2.4.3 Περιβαλλοντικές προκλήσεις

Όσον αφορά το περιβάλλον το IoT μπορεί να έχει πολλές θετικές συνέπειες όμως έχει και κάποιες αρνητικές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η περιβαλλοντική υποβάθμιση είναι μία από τις μεγαλύτερες ανησυχίες λόγω της αύξησης των ενεργειακών αναγκών και των ηλεκτρονικών αποβλήτων που παράγονται από τις ίδιες τις συσκευές αλλά και από το γεγονός ότι πλέον μια συσκευή θεωρείται σε σύντομο χρονικό διάστημα παλιά με αποτέλεσμα να αποσύρεται. Παραδείγματα ερευνητικών θεμάτων για το περιβάλλον είναι: μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση του μεγέθους των συσκευών μείωσης της ποσότητας μη βιοδιασπόμενων υλικών, διάφορες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία κ.λπ.

Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι εκτός από τα παραπάνω έχει και θετικές συνέπειες το IoT στο περιβάλλον, με το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της χρήσης IoT στην παρακολούθηση δασών λιμνών κλπ. Συνεπώς, το IoT μπορεί να προσφέρει μια σειρά

από ευκαιρίες και θα πρέπει να βελτιώνεται η τεχνολογία συνεχώς προσπαθώντας να εξαλειφθούν οι αρνητικές συνέπειες.









# 3

## Ασύρματες τεχνολογίες IoT

### 3.1 Επισκόπηση χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών

Όπως έχει τονιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο το IoT ανάλογα με την οπτική γωνία που μελετάται έχουν δοθεί διαφορετικοί ορισμοί για αυτή την έννοια. Γενικά όμως μπορούμε πως αποσκοπούν στην συνεργασία διάφορων συσκευών. Αυτή η συνεργασία όμως αποτελεί μια πολύ γενική ιδέα, μα κυρίως πολυπαραμετρική με αποτέλεσμα να υπάρχει πληθώρα τεχνολογιών, πρωτοκόλλων και πρωτοτύπων ανάλογα με τις διάφορες προδιαγραφές του προβλήματος που προσπαθούν να λύσουν.

	<b>Local Area Network</b> Short Range Communication	<b>Low Power Wide Area</b> (LPWAN) Internet of Things	<b>Cellular Network</b> Traditional M2M
	<b>40%</b>	<b>45%</b>	<b>15%</b>
	Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
	Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
			

Εικόνα 10 θετικά και αρνητικά των κατηγοριών των τεχνολογιών διασύνδεσης

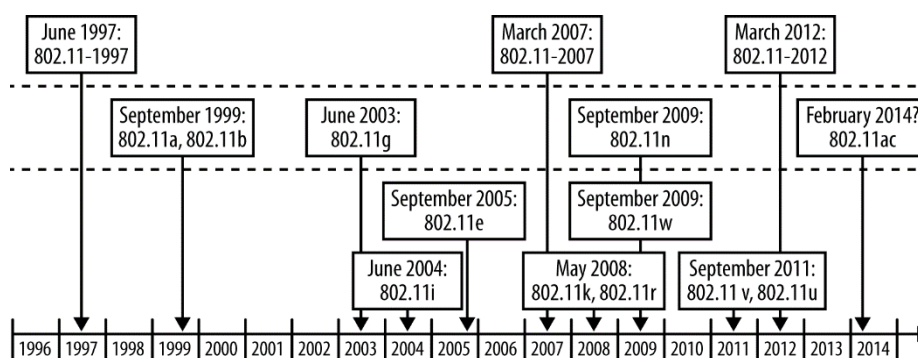
## 3.2 Τεχνολογίες μικρής εμβέλειας

### 3.2.1 Bluetooth

Το Bluetooth είναι μια τεχνολογία μικρής εμβέλειας που δημιουργήθηκε την δεκαετία του 90 και αποτελεί πρότυπο για ασύρματα προσωπικά δίκτυα. Λειτουργεί στο ελεύθερο φάσμα 2,4 GHz, με αποτέλεσμα οι συσκευές που υποστηρίζουν Bluetooth να μπορούν να μεταδώσουν σε όλα τα μέρη του κόσμου. Στο Bluetooth γίνεται άμεση σύνδεση δύο συσκευών (συσκευή προς συσκευή). Η τεχνολογία αυτή δίνει την δυνατότητα σύνδεσης χωρίς καλωδίωση σε αντικείμενα όπως ποντίκια σε υπολογιστή, σύνδεση φορητών συσκευών/wearable με κινητό όταν βρίσκονται σε μικρή απόσταση. Μετάδοση πολυμέσων όπως εικόνες, τραγούδια μεταξύ δυο συσκευών.

### 3.2.2 IEEE 802.11/WiFi

Το πρότυπο IEEE 802.11 αποτελεί μια οικογένεια από πρότυπα για ασύρματα τοπικά δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούνται για μια σειρά από εφαρμογές. Ορισμένα από αυτά είναι η πρόσβαση στο διαδίκτυο, την τηλεφωνία μέσω διαδικτύου και διασύνδεσης διάφορων αντικειμένων μεταξύ τους όπως τηλεοράσεις ψηφιακές κάμερες και ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Η πρώτη έκδοση του WiFi έγινε το 1997 και έκτοτε χρησιμοποιείται κατά κόρον. Όσον αφορά το κομμάτι IoT η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για διασύνδεση στα πλαίσια ενός κτηρίου και πολλές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά με άλλες τεχνολογίες, όπως το LoRa.



Εικόνα 11 Ιστορική πορεία του προτύπου IEEE 802.11

## 3.3 Κινητά δίκτυα επικοινωνίας

Ένας άλλος τύπος διασύνδεσης συσκευών είναι και τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας τα οποία έδωσαν μεγάλη δυνατότητα στην αποστολή δεδομένων από μηχανή σε μηχανή, και προβλέπεται να με την έλευση των 5G να δώσουν μεγάλη ώθηση στην εγκαθίδρυση του IoT στην ζωή μας. Τα δίκτυα 5G αναμένεται να προσφέρουν αυξημένες ταχύτητες σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές ενώ παράλληλα θα είναι σε θέση να υποστηρίξει πολλαπλούς χρήστες του ίδιου δικτύου μέσω της αύξησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης με το ελάχιστο

δυνατό χρόνο απόκρισης, χρησιμοποιώντας παράλληλα τεχνικές μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης εντός του δικτύου.



### 3.4 Τεχνολογία Lora

Η τεχνολογία LoRa μπορεί να γίνει αντιληπτή ως δύο επιμέρους τμήματα, το πρώτο είναι το LoRa και το δεύτερο είναι το LoRaWAN. Το LoRa είναι μια ιδιοταγής τεχνολογία η οποία ανήκει στην εταιρεία Semtech και προέρχεται από την CSS τεχνολογία, ενώ το LoRaWAN αποτελεί ένα ανοικτό δικτυακό πρωτόκολλο.

#### 3.4.1 Φυσικό επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο του LoRa έχει ως στόχο να προσφέρει την δυνατότητα της επικοινωνίας συσκευών που λειτουργούν με μπαταρία με χαμηλό ενεργειακό κόστος, σε μεγάλες αποστάσεις, θεωρητικά αποστάσεις που φθάνουν την κάλυψη μέχρι και 15 χιλιόμετρα LoS. Το γεγονός ότι βασίζεται στην διαμόρφωση CSS έχει ως αποτέλεσμα την εξισορρόπηση μεταξύ του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της "ευαισθησίας" στον θόρυβο μέσα στο κανάλι μετάδοσης. Έτσι, διατηρείται χαμηλό ενεργειακό κόστος, ενώ αυξάνεται η απόσταση μετάδοσης, έχοντας χαμηλό κόστος.

Πριν περιγράψουμε περισσότερες λεπτομέρειες για το φυσικό επίπεδο του LoRa, είναι σωστό να γίνει μια αναφορά στις έννοιες που απασχολούν και περιγράφουν το εν λόγω επίπεδο.

Μια συσκευή LoRa μπορεί να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο έτσι να αλλάζουν οι παράμετροι: SF (spreading factor), bandwidth, coding rate, και ισχύς μετάδοσης. Η σωστή επιλογή αυτών των παραμέτρων έχει σημαντική επίπτωση στην κατανάλωση ενέργειας.

Η σχέση που συνδέει τον ρυθμό συμβόλων με το SF είναι ο εξής:



Εικόνα 12 LoRaWAN Logo [13]



$$R_b = SF * \frac{1}{2^{SF}} \text{ bits/s [15]}$$

Αυτό το είδος διαμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε κυρίως για στρατιωτικές και διαστημικές επικοινωνίες. Γενικά, για την αξιολόγηση της διαμόρφωσης χρησιμοποιείται BER vs  $E_b/N_0$  (Λόγος ενέργειας κάθε bit προς τον θόρυβο). Η γενική μαθηματική σχέση που υπολογίζει το BER βασισμένο στο SINR είναι η εξής:

$$\frac{E_b}{N_0(dB)} = SNR(dB) + 10 \log \frac{BW}{R_b} [15]$$

### 3.4.2 Παράμετροι LoRa

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει αναφορά των παραμέτρων των συσκευών που υποστηρίζουν το LoRa, με μεγαλύτερη ανάλυση και είναι οι εξής:

- **Η ισχύς μετάδοσης (Transmission Power):** στο LoRa οι τιμές είναι από -4db μέχρι 20 db.
- **Συχνότητα Φορέα (Carrier Frequency):** είναι η κεντρική συχνότητα και το εύρος της είναι από 137Hz-1020Hz.
- **Spreading factor:** είναι ο λόγος μεταξύ του ρυθμού συμβόλων και τον ρυθμό των chirp. Μεγαλύτερο spreading factor σημαίνει αύξηση του SNR. Ο αριθμός των chirps ανά σύμβολο υπολογίζεται ως  $2^{SF}$ . Όσο αυξάνουμε το spreading factor αυξάνεται ο χρόνος μετάδοσης, συνεπώς αυξάνεται και η κατανάλωση της ενέργειας. Οι τιμές που μπορεί να λάβει είναι από 6 μέχρι 12.
- **Εύρος ζώνης:** υψηλότερο εύρος ζώνης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων και αντίστροφα αν είναι μικρότερο τότε έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο ρυθμό δεδομένων.
- **Ρυθμός κωδικοποίησης:** χρησιμοποιείται από το model του LoRa και δείχνει την προστασία που δίνεται έναντι παρεμβολών. Προφανώς, μεγαλύτερος ρυθμός κωδικοποίησης δίνει μεγαλύτερη προστασία από παρεμβολές εντούτοις μειώνει τον ρυθμό δεδομένων. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι 4/5, 4/6, 4/7, 4/8.

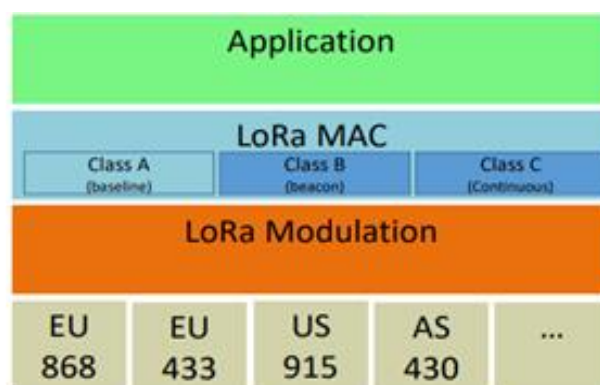
Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι συσκευές με διαφορετικές επιλογές των παραπάνω παραμέτρων μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους.

### 3.4.3 LoRaWAN

Σε αντίθεση με το φυσικό επίπεδο του LoRa, το LoRaWAN υποστηρίζεται από την «Συμμαχία LoRa» (LoRa Alliance), η οποία αποτελείται από μεγάλες εταιρείες όπως η Semtech, IBM, STMicro κλπ. Το LoRaWAN ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας του δικτύου και το MAC επίπεδο. Ο πρωταρχικός ρόλος του επιπέδου αυτού είναι να καθορίσει τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις διάφορες παραμέτρους έτσι ώστε να πετύχει την καλύτερη αυτονομία μπαταρίας της συσκευής, την χωρητικότητα του δικτύου, το QoS κλπ. Το LoRaWAN κατηγοριοποιεί τους κόμβους σε 3 κλάσεις A, B, C. Όλες οι συσκευές πρέπει να

υποστηρίζουν τουλάχιστον την κλάση A. Οι άλλες δύο κλάσεις είναι προαιρετικές και αναλόγως το hardware μπορεί να υποστηρίζονται από το υλικό

- Κλάση A: σε αυτή την κλάση οι τελικές συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν αμφίδρομα, και πιο συγκεκριμένα η τελική συσκευή κάνει uplink μετάδοση και ακολουθούν δύο μικρά παράθυρα για λήψη downlink μετάδοση. Αυτή η κλάση είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική και χρησιμοποιείται για εφαρμογές που δεν χρειάζεται ο server να στείλει πρώτος downlink μετάδοση. Όταν ο server θέλει να στείλει downlink μετάδοση πρέπει να περιμένει μέχρι την επόμενη μετάδοση uplink από την τελική συσκευή.
- Κλάση B: σε αυτή την κλάση προσθέτει στην κλάση A την δυνατότητα αποστολής downlink μεταδόσεων σε προγραμματισμένο χρόνο.
- Κλάση C: σε αυτή την κλάση έχει σχεδόν συνεχόμενα ανοικτό παράθυρο για την λήψη downlink μετάδοσης και κλείνουν μόνο στην περίπτωση που η τελική συσκευή πραγματοποιεί uplink μετάδοση. Συνήθως οι συσκευές που υποστηρίζουν αυτή την κλάση δεν λειτουργούν με μπαταρία αλλά είναι συνεχώς συνδεδεμένες στο ρεύμα. Αυτή η κλάση είναι η πιο ενεργοβόρα από όλες [14].



Εικόνα 13 Η στοίβα της τεχνολογίας LoRa [13]

### 3.4.4 Τρόπος λειτουργίας

#### 3.4.4.1 Τοπολογία

Ένα τυπικό σύστημα που βασίζεται στο LoRa αποτελείται συνήθως από τα εξής συστατικά στοιχεία:

- **τελικοί χρήστες- τελικοί κόμβοι:** αποτελούν αντικείμενα τα οποία συνήθως χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι τροφοδοτούνται από μπαταρία χωρίς να είναι υποχρεωτικό αυτό.
- **Πύλη:** κεραία η οποία δέχεται δεδομένα από τις τελικές συσκευές και τις προωθεί στον εξυπηρετητή δικτύου και το αντίθετο. Τα δεδομένα που στέλνουν οι τελικοί κόμβοι είναι συνήθως δεδομένα που έχουν αντληθεί από τους ενσωματωμένους

αισθητήρες. Κάθε πύλη μπορεί να διαχειριστεί μεγάλο πλήθος τελικών συσκευών.

- **Εξυπηρετητής δικτύου:** εξυπηρετητές που δρομολογούν τα μηνύματα από τις τελικές συσκευές στη σωστή εφαρμογή και το αντίστροφο.

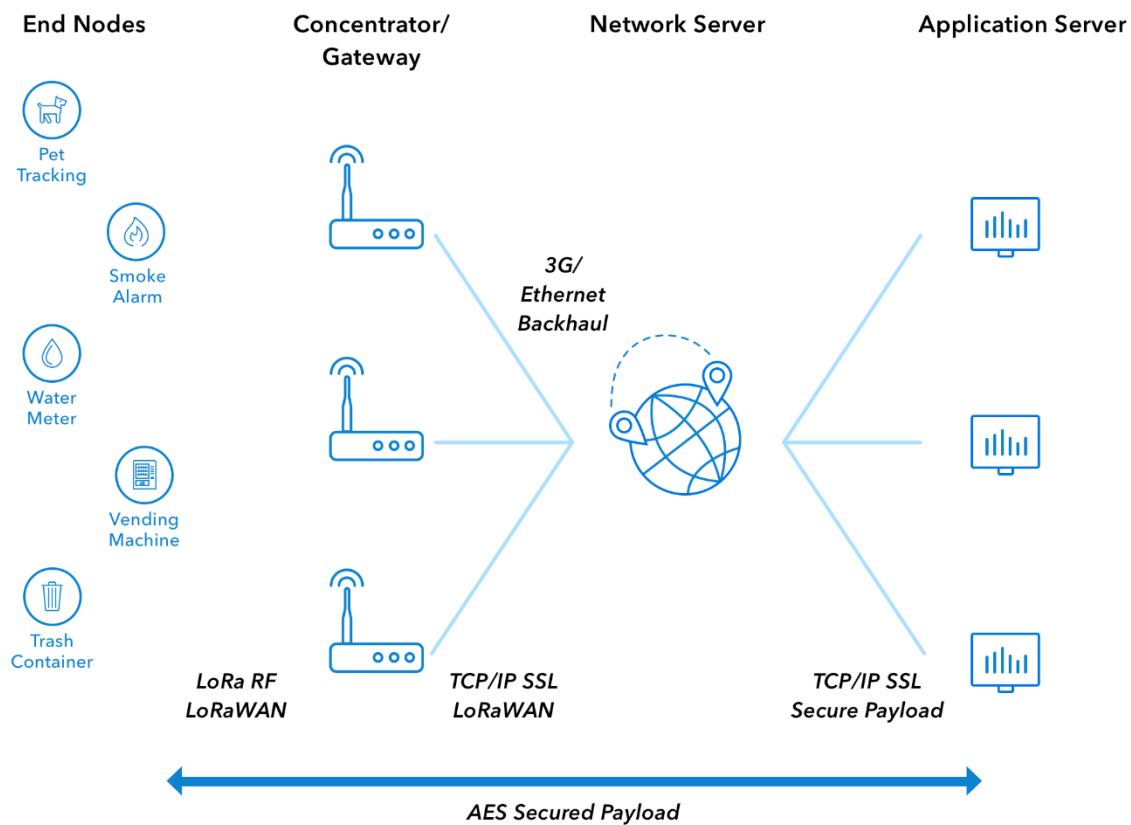
Η αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN αναπτύσσεται σε μια τοπολογία αστέρα στην οποία τα μηνύματα στέλνονται μέσω ενός Gateway, μεταξύ των τελικών συσκευών και ενός κεντρικού εξυπηρετητή δικτύου στον εξυπηρετητή επιπέδου εφαρμογής. Στο LoRaWAN οι τελικοί κόμβοι ακολουθούν την μέθοδο broadcasting, σύμφωνα με την οποία γίνεται αποστολή κρυπτογραφημένων πακέτων όχι προς κάποια συγκεκριμένη πύλη. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κρυπτογράφηση περιγράφεται παρακάτω. Οι πύλες συνδέονται με τον διακομιστή δικτύου μέσω τυπικών συνδέσεων IP και λειτουργούν ως διαφανής γέφυρα, μετατρέποντας απλά πακέτα RF σε πακέτα IP και αντίστροφα. Η ασύρματη επικοινωνία εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά μεγάλης εμβέλειας του φυσικού στρώματος LoRa, επιτρέποντας μια σύνδεση single-hop μεταξύ της τελικής συσκευής και μιας ή πολλών πύλων. Όλες οι λειτουργίες είναι δυνατές για αμφίδρομη επικοινωνία και υπάρχει υποστήριξη για ομάδες διευθύνσεων multicast να κάνουν αποδοτική χρήση του φάσματος κατά τη διάρκεια εργασιών όπως αναβαθμίσεις FTMA (Firmware over-the-air) ή άλλων μηνυμάτων μαζικής διανομής. Η επικοινωνία μεταξύ της πύλης και του εξυπηρετητή δικτύου μπορεί να γίνει με διαφορετικά πρωτόκολλα όπως για παράδειγμα το Wi-fi, LTE, Ethernet.

#### 3.4.4.2 The Internet of Things Network

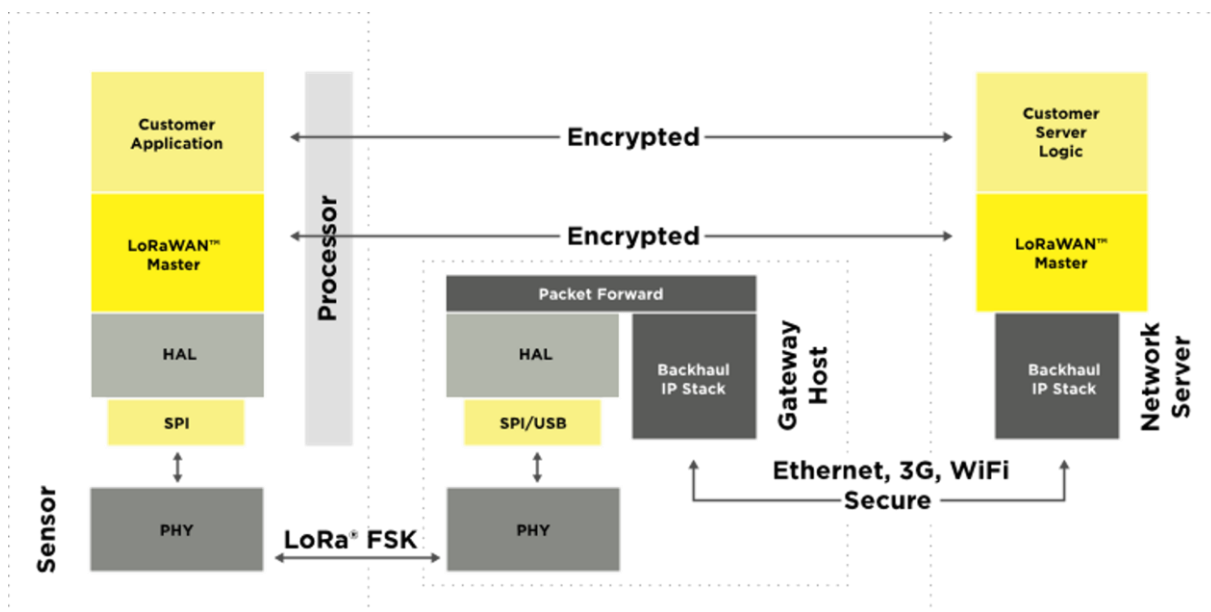
Όπως αναφέρεται και στην 3.2.1.2 μέρος του συστήματος είναι ο εξυπηρετητής δικτύου. Μια διαθέσιμη επιλογή για εξυπηρετητή δικτύου είναι το TTN. Το TTN είναι ένα ανοιχτό δίκτυο πυλών (gateways) και εξυπηρετητές διαχείρισης του δικτύου για το LoRa. Οι βασικές αρμοδιότητες του TTN είναι τα εξής:

- Να λαμβάνει το εισερχόμενο πακέτο και να ελέγχει αν προέρχεται από κάποιο γνωστό λογαριασμό (οι τελικές συσκευές οφείλουν να είναι εγγεγραμμένες στον εξυπηρετητή).
- Να αποκρυπτογραφεί τα πακέτα.
- Να συλλέγει πληροφορίες όπως τον λόγο σήματος προς τον θόρυβο (SNR), την ισχύ λήψης (RSSI), ταχύτητα εκπομπής και πόσα διαφορετικά gateways άκουσαν το ίδιο πακέτο.
- Με βάση όλων των παραπάνω πληροφοριών μεταφέρει το νέο πακέτο προς τον κατάλληλο εξυπηρετητή εφαρμογής.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς μπορούν να εφαρμοστούν σε μια σειρά από εφαρμογές όπως για παράδειγμα την εύρεση τοποθεσίας, η οποία βασίζεται στο RSSI.



Εικόνα 14 Περιγραφή βασικής αρχιτεκτονικής συστήματος βασισμένου στο LoRa



Εικόνα 15 Ο τρόπος αποστολής δεδομένων στην στήβα του δικτύου

### 3.4.4.3 Ασφάλεια

Η ασφάλεια αποτελεί πρωταρχικός στόχος για οποιαδήποτε μαζική τοποθέτηση IoT συστημάτων και για αυτό τον λόγο οι προδιαγραφές του LoRaWAN ορίζουν δύο επίπεδα κρυπτογραφίας:

- Ένα μοναδικό κλειδί σύνδεσης δικτύου 128 bit που μοιράζεται μεταξύ του διακομιστή τελικής συσκευής και του διακομιστή δικτύου
- Ένα μοναδικό κλειδί σύνδεσης εφαρμογής 128 bit (AppSKey) μοιράστηκε από άκρο σε άκρο σε επίπεδο εφαρμογής

Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι AES χρησιμοποιούνται για την παροχή της πιστοποίησης ταυτότητας και της ακεραιότητας των πακέτων στο διακομιστή δικτύου και την κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο στον διακομιστή εφαρμογών. Παρέχοντας αυτά τα δύο επίπεδα, καθίσταται δυνατή η υλοποίηση κοινών δικτύων «πολλαπλών μισθωτών» χωρίς ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου να έχει ορατότητα των δεδομένων ωφέλιμου φορτίου των χρηστών.

Τα πλήκτρα μπορούν να ενεργοποιηθούν με Εξατομίκευση (ABP) στη γραμμή παραγωγής ή κατά τη θέση σε λειτουργία, ή μπορούν να ενεργοποιηθούν μέσω του αέρα (OTAA) στο πεδίο. Το OTAA επιτρέπει την επανεγγραφή των συσκευών εάν είναι απαραίτητο.

### 3.4.5 Πλεονεκτήματα

Το LoRa είναι μια αρκετά ανταγωνιστική λύση για την κάλυψη της ανάγκης για επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων με χαμηλό rate. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει στους χρήστες του.

1. Αρχικά, η τεχνολογία LoRa χρησιμοποιεί 868/915 MHz η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διεθνές επίπεδο. Ακόμη, είναι ελεύθερη συχνότητα που σημαίνει ότι δεν προσθέτει κόστος για την αδειοδότησης.
2. Μπορεί να στείλει μηνύματα σε μεγάλη απόσταση που κυμαίνεται από 5 km μέχρι 15 km.
3. Έχει καλή κατανάλωση ενέργειας. Η διάρκεια μπαταρίας των συσκευών μπορεί να φθάσει μέχρι και δέκα χρόνια.
4. Μια πύλη μπορεί να διαχειριστεί πολύ μεγάλο αριθμό συσκευών. Αυτός ο αριθμός είναι γύρω στα χίλια.
5. Οι συσκευές μπορεί να συνδεθούν κατευθείαν στην πύλη, έχοντας τοπολογία αστέρα. Αυτό καθιστά το LoRa, εύκολο στην τοποθέτηση.
6. Υπάρχει ο μηχανισμός ADR. Ο μηχανισμός αυτός δίνει την δυνατότητα μεταβολής του SF, όχι όμως με τυχαίο τρόπο αλλά, βάση των παλαιότερων μηνυμάτων που έχουν σταλεί. Έτσι επιτυγχάνεται καλύτερη κατανάλωση ενέργειας στις συσκευές.

### 3.4.6 Μειονεκτήματα

Ορισμένα από τα μειονεκτήματα τα οποία είναι μειονεκτήματα, δεν είναι ακριβώς μειονεκτήματα αλλά περιορισμοί για κάποιες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης.

1. Δεν είναι καλή επιλογή για εφαρμογές που χρειάζεται μεγάλο ρυθμό δεδομένων.
2. Έχει μεγαλύτερο latency από ότι για παράδειγμα το NB-IoT. Γενικά, είναι καλύτερη λύση για εφαρμογές όπου το πολύ μικρό latency δεν είναι ζητούμενο και αναγκαίο. Βέβαια, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, υπάρχουν 3 κλάσεις συσκευών LoRa καθένα από την οποία έχει διαφορετικό Latency συνεπώς και διαφορετική κατανάλωση ενέργειας.

### 3.4.7 Ενδεικτικά διαθέσιμα modules LoRa

Έχουν δημιουργηθεί διάφορες λύσεις που βασίζονται στο LoRa. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει συνοπτική αναφορά μερικών ενδεικτικών τέτοιων λύσεων με τα χαρακτηριστικά τους που υπάρχουν στην αγορά.

- Η εταιρεία IMST έχει αναπτύξει διάφορες λύσεις όπως για παράδειγμα τα **iM881A-M**.
  - Τεχνικές προδιαγραφές
    - Μέγεθος module 20x25x3.3 mm
    - Μέγιστη ευαισθησία 138 dBm
    - Εμβέλεια έως 12000 m (LoS)
    - Μπορεί να συγκολληθεί σαν ένα εξάρτημα SMD
    - Υποδοχή για κεραία 50Ω
    - Πιστοποίηση RoHS
- Η εταιρεία Multitech προτείνει στις λύσεις της το **MultiConnect® xDot™**.
  - Τεχνικές προδιαγραφές
    - Μέγεθος module 23.6 x 23.6 mm
    - Πιστοποιήσεις FCC/CE/RCM/GITEKI
    - Data rates 293bps 20Kbps+ LoRa
    - Μέγιστη ευαισθησία 137 dBm
    - Πιστοποίηση RoHS
- Η εταιρεία Four-Faith προτείνει στις λύσεις της το **F8L10D**.
  - Τεχνικές προδιαγραφές
    - Μέγεθος module 24.4x37.5x5 mm
    - Εμβέλεια 2-11.5 km
    - Μέγιστη ευαισθησία 140 dBm
    - Παρεμπόδιση παρεμβολών και αξιόπιστη μετάδοση

- Χαμηλή κατανάλωση
- Ρυθμιζόμενη ισχύς μετάδοσης
- Η εταιρεία Maxiot προτείνει στις λύσεις της το **DL7612**.
  - Τεχνικές προδιαγραφές
    - Μέγεθος module 22.0x15.0x2.7mm
    - Μέγιστη ευαισθησία 139 dBm
    - Έξοδος RF + 18,6dBm
    - Εύρος αποτελεσματικής επικοινωνίας: 3- 5 km.
    - Πιστοποίηση RoHS
- Η εταιρεία Onethinx προτείνει στις λύσεις της το **Onethinx Core LoRaWAN module**.
  - Τεχνικές προδιαγραφές
    - Μέγεθος module 24.5 x 20 x 3 mm
    - BLE 5.0
    - PSoC 6 MCU inside
    - PSoC 6 Secure Architecture
    - Dual ARM core
    - Semtech LoRa radio module
    - Μεγάλη εμβέλεια
    - Χαμηλή κατανάλωση

### 3.4.8 Συνοπτικά Χαρακτηριστικά LoRa

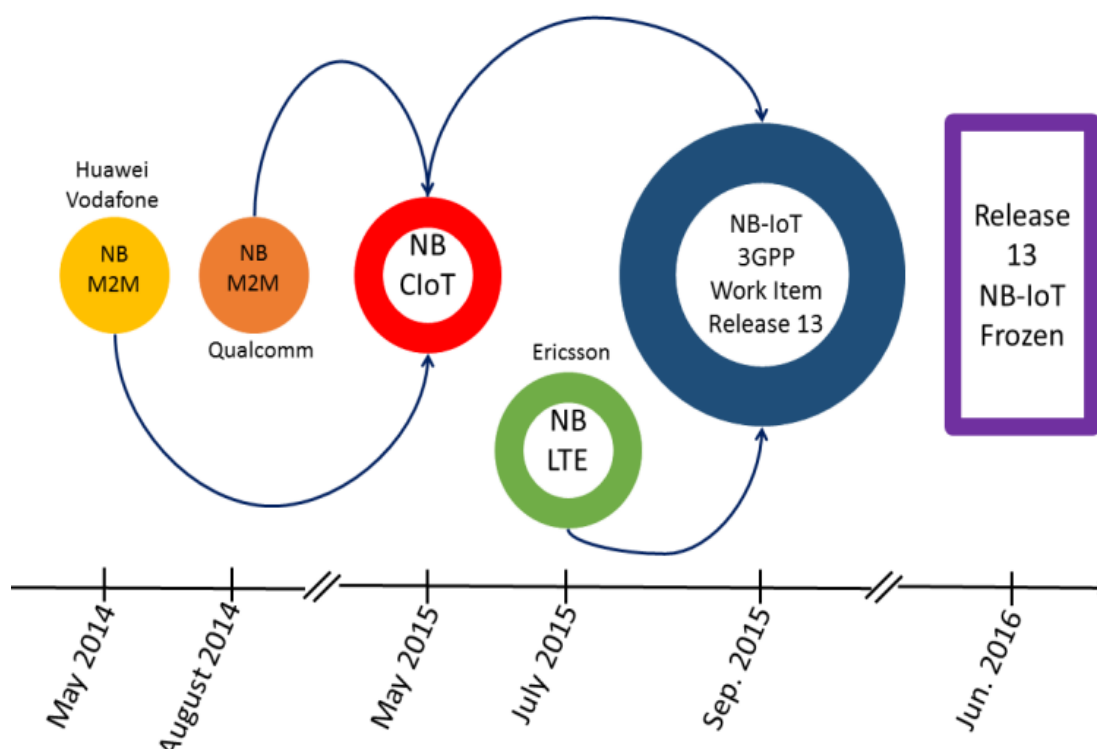
Πίνακας 1 Βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa

Προδιαγραφές	Χαρακτηριστικά LoRa
Εμβέλεια	Περίπου 15km
Εύρος ζώνης	125-500 kHz
Διαμορφωση	CSS
Χωρητικότητα συσκευών	Εξαρτάται από τις δυνατότητες της πύλης, μπορεί και χιλιάδες κόμβοι
Διάρκεια μπαταρίας	Διάρκεια ζωής μπαταρίας μέχρι και 10 χρόνια
Φάσμα	Μη αδειοτούμενο

## 3.5 NB-IoT

Όπως και το LoRa έτσι και το NarrowBand IoT είναι μια τεχνολογία LPWA, η οποία αναπτύχθηκε από την 3GPP, και αποτελεί ένα μέρος του LTE, και με την έλευση του 5G θα ενσωματωθεί σε αυτό επίσης. Μέχρι στιγμής συνυπάρχει μαζί με GSM, UMTS και LTE και αποτελεί μετεξέλιξη του MTC.

Η 3GPP είναι η οργάνωση η οποία θέτει τα standard για τα LTE GSM, UMTS, και αυτά τα standards αναφέρονται ως Releases. Σημαντικός όρος που χρησιμοποιείται στα πλαίσια αυτά είναι το UE, που είναι οι συσκευές από τις οποίες μπορεί να γίνει η σύνδεση στο δίκτυο, και τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι ένα ενσωματωμένο σύστημα ή ένα κινητό.



Εικόνα 16 Πορεία δημιουργίας του NB-IoT

### 3.5.1 Τρόπος λειτουργίας

#### 3.5.1.1 Φυσικό επίπεδο NB-IoT

Το NB-IoT προσφέρει πρόσβαση στις υπηρεσίες του δικτύου χρησιμοποιώντας το φυσικό επίπεδο το οποίο έχει βελτιστοποιηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να υπάρχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό κόστος. Το εύρος ζώνης του πλήρη φορέα είναι 180 kHz. Η διαμόρφωση είναι QPSK και υπάρχει δυνατότητα για half-duplex επικοινωνία τα μηνύματα



downlink βασίζονται στο σχήμα OFDMA, ενώ για τα uplink μηνύματα μπορεί να είναι είτε μονού «τόνου» ή πολλαπλών «τόνων»

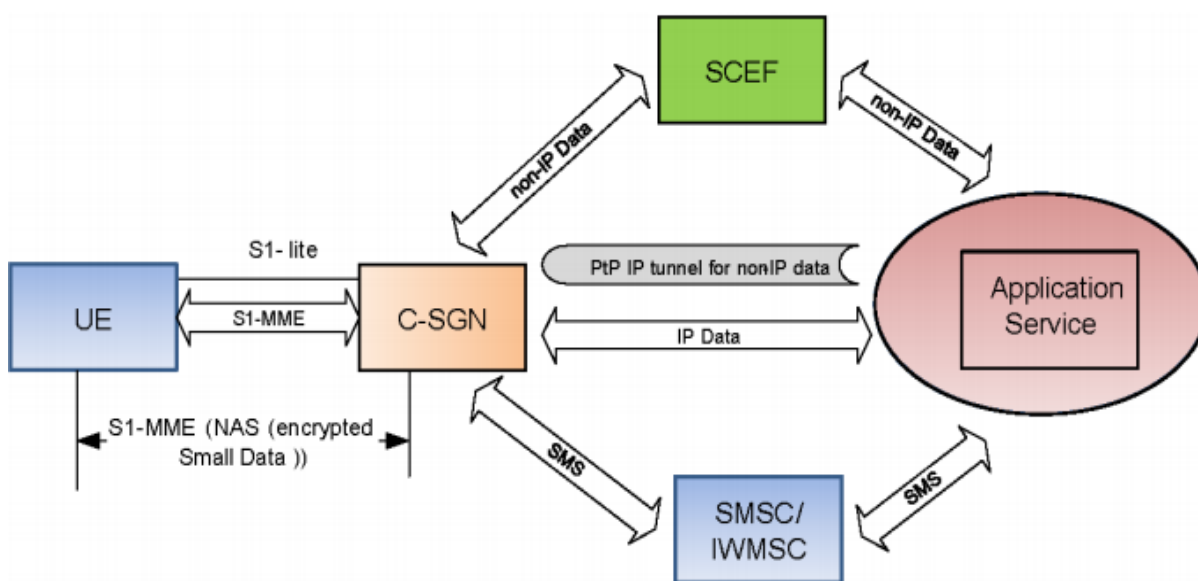
Στην υπάρχουσα υποδομή του LTE, προστέθηκαν έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξοικονόμηση ενέργειας 5 νέα κανάλια. Τα κανάλια αυτά είναι τα εξής:

- Narrowband Physical Broadcast
- Narrowband Physical Downlink Shared Channel
- Narrowband Physical Downlink Control Channel
- Narrowband Physical Uplink Shared Channel
- Narrowband Physical Random Access Channel

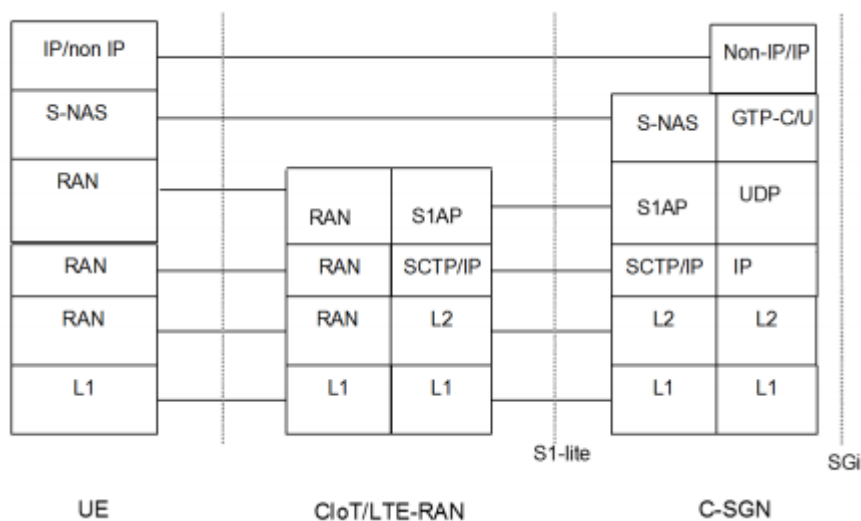
### 3.5.1.2 MAC επίπεδο NB-IoT

Επιπρόσθετα των βελτιώσεων του φυσικού επιπέδου, έχουν γίνει διάφορες αλλαγές και στο επίπεδο MAC με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Καταρχάς, λόγω των μικρότερων απαιτήσεων όσον αφορά το data rate αλλά και το μέγεθος των δεδομένων που στέλνονται σε σχέση με το LTE, χρησιμοποιείται μόνο μία διαδικασία HARQ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των bit ελέγχου, αυξάνοντας την επίδοση και την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι επαναμεταδόσεις έγιναν ασύγχρονες και για τα Uplink και downlink μηνύματα. Αυτό έχει θετικό αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας καθώς έτσι αποφεύγονται οι άσκοπες προγραμματισμένες επαναμεταδόσεις, ενώ τώρα γίνονται μόνο μετά από την κατάλληλη αίτηση.

Επιπλέον, έχουν γίνει βελτιώσεις στα επίπεδα L1, L2 του NB-IoT (Τα επίπεδα φαίνονται στην εικόνα). Έχει μειωθεί ο αριθμός των bytes σε διάφορες μονάδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους των πακέτων που μεταδίδονται στο δίκτυο σημαντικά. Μάλιστα δεν ξεπερνάει το μέγεθος των 1500 bytes ανά IP πακέτο.



Εικόνα 17 Τρόπος μετάδοσης μηνυμάτων μεταξύ χρήστη και εφαρμογής



Εικόνα 18 Η στοίβα πρωτοκόλλων του NB-IoT

### 3.5.2 Πλεονεκτήματα

Το NB-IoT έχει υποστεί μια σειρά από αλλαγές έτσι ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως LPWA. Όπως κάθε τεχνολογία έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες.

1. Καταρχάς, υποστηρίζεται από την 3GPP που υποστηρίζει και το LTE, αλλά και το 5G. Εκτός αυτού, ήδη βασίζεται και είναι ενσωματωμένο το NB-IoT στο LTE και στην συνέχεια όταν θα εδραιωθεί και το 5G θα βασίζεται και στην τεχνολογία 5G. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα, γιατί χρησιμοποιείται στα πλαίσια ενός ήδη εδραιωμένου και καλά δομημένου δικτύου, με παρόχους μεγάλες πολυεθνικές εταιρείες.
2. Επιπλέον, επειδή το φάσμα είναι αδειοδοτούμενο και δεν μπορεί κανείς εκτός από τους συνδρομητές να εκπέμψει, μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολών. Αυτό στην συνέχεια οδηγεί και σε μεγαλύτερη ασφάλεια σε σύγκριση με μη αδειοδοτούμενες τεχνολογίες όπως είναι και το LoRa.
3. Λόγω του ότι βασίζεται στο LTE, υποστηρίζεται σε πολλές χώρες.
4. Η απόσταση που μπορεί να γίνει αποστολή δεδομένων είναι μεγαλύτερη από το LTE, αλλά εφάμιλλη του LoRa.

### 3.5.3 Μειονεκτήματα

Το NB-IoT σε γενικές γραμμές έχει μεγαλύτερο κόστος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες LPWA. Επιπλέον, δεν υποστηρίζει μετάδοση φωνητικών δεδομένων όπως επιτρέπεται στο LTE (VoLTE).

### 3.5.4 Ενδεικτικά διαθέσιμα modules NB-IoT

Έχουν δημιουργηθεί διάφορες λύσεις που βασίζονται στο NB-IoT . Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει συνοπτική αναφορά μερικών ενδεικτικών τέτοιων λύσεων με τα χαρακτηριστικά τους που υπάρχουν στην αγορά.

Η εταιρεία QUECTEL έχει αναπτύξει μια σειρά από NB-IoT modules τα οποία θα δούμε αναλυτικά παρακάτω:

- Το **BC95** το οποίο είναι ένα NB-IoT module υψηλής απόδοσης με πολύ χαμηλή κατανάλωση και μικρό μέγεθος. Επίσης , λόγω της εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης και του μεγάλου εύρους θερμοκρασιών που καλύπτει ( $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ ) το BC95 είναι πολύ καλή επιλογή για μια ευρεία γκάμα εφαρμογών IoT.
  - Τεχνικές προδιαγραφές
    - Μέγεθος module  $23.6 \times 19.9 \times 2.2\text{mm}$
    - Μέγιστη ευαισθησία  $-129\text{dBm} \pm 1\text{dB}$
    - Πιστοποιήσεις CCC/SRRC/NAL (China)
    - Πιστοποιήσεις CE/GCF/Deutsche Telecom (Europe)
    - Πιστοποίηση RoHS
    - DFOTA
- Το BC66 είναι ένα NB-IoT module υψηλών επιδόσεων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το μικρό μέγεθος του LCC επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωση του BC66 σε εφαρμογές περιορισμένου χώρου.



*Εικόνα 19 BC66 module*

- Τεχνικές προδιαγραφές
  - Μέγεθος module  $17.7 \times 15.8 \times 2.0\text{mm}$
  - Μέγιστη ευαισθησία  $-129\text{dBm}$
  - Πιστοποιήσεις FCC/IC
  - Πιστοποιήσεις CE/GCF/
  - Πιστοποίηση RoHS
  - DFOTA

Η εταιρεία Ublox έχει αναπτύξει μια σειρά από NB-IoT modules τα οποία θα δούμε αναλυτικά παρακάτω:

- Το **SARA-N2 series** είναι το πρώτο NB-IoT module που αναπτύχθηκε και έχει μέγεθος 16.0 x 26.0 x 2.3 mm. Η σειρά SARA-N2 έχει πιστοποίηση RoHs, CE,CCC,SRRC,NCC, Deutsche Telecom και έχει πρότυπο ISO 16750. Υποστηρίζει ένα ολοκληρωμένο σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως SMS, IP και αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων χωρίς IP, όλα με ελάχιστη επιβάρυνση σηματοδότησης για να διατηρηθεί η κατανάλωση ενέργειας και παρέχει 10+ χρόνια ζωής μπαταρίας. Το SARA-N2 προσφέρει εύκολη μετάβαση από τις μονάδες U-blox GSM (σειρά SARA-G3), UMTS (σειρά SARA-U2) καθώς και από μονάδες LTE Cat 1 (σειρά LARA-R2). Υποστηρίζει ταχύτητες downlink 227 kbps και uplink μέχρι 21 kbps.
- Το SARA-N3 series μπορεί να λειτουργήσει κάτω από οποιοδήποτε δίκτυο NB-IoT παγκοσμίως, με μέγεθος 16.0 x 26.0 x 2.4 mm. Η σειρά SARA-N3 έχει πιστοποίηση RoHs και κατασκευάζεται σύμφωνα με τα πρότυπα επαγγελματικής ποιότητας ,διαδικασία PCN, και ανάλυση αποτυχίας και αξιοπιστίας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 16750. Τα χαρακτηριστικά που υποστηρίζει το SARA-N3 series βασίζονται στην έκδοση 3GPP 14 μπορεί να λάβει χαρακτηριστικά και ώστε να συμμορφώνεται με έκδοση 14 και 5G μέσω μεταγενέστερου firmware update. Το module εισάγει πολλές νέες δυνατότητες firmware και πρωτόκολλα Διαδικτύου για προϊόντα NB-IoT, όπως TCP, CoAP, DTLS, LWM2M, MQTT, SSL / TLS και HTTP (S). Το SARA-N3 είναι ένα προϊόν με βελτιστοποιημένη ισχύ που παρέχει 10+ χρόνια ζωής μπαταρίας. Επίσης, οι ενημερώσεις firmware γίνονται χρησιμοποιώντας με u-blox uFOTA client / server με LWM2M, η οποία είναι μια πιο ελαφριά λύση σε σύγκριση με το OMA-DM.

## 3.6 Σύγκριση LoRa NB-IoT

### 3.6.1.1 Φυσικό επίπεδο

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, το LoRa και NB-IoT έχουν δημιουργηθεί από διαφορετικούς οργανισμούς χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες. Από την μία το LoRa χρησιμοποιεί μια ιδιοταγή παραλλαγή του CSS ενώ το NB-IoT είναι ενσωματωμένο στην υποδομή του LTE και στην συνέχεια θα ενσωματωθεί και στα πλαίσια του 5G. Για να επιτευχθεί η μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε IoT εφαρμογές έχουν γίνει μια σειρά από αλλαγές και προσθήκες. Εντούτοις, χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με το LTE, και χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK.

Όσον αφορά την δομή και την αρχιτεκτονική που είναι δομημένα: το LoRa χρησιμοποιεί τοπολογία αστέρα, όπου οι πύλες έχουν την ευθύνη της μετάδοσης των μηνυμάτων που στέλνονται από τις τελικές συσκευές μέσω LoRa σε ένα κεντρικό δίκτυο. Ένας κόμβος στέλνει το μήνυμα σε όσες πύλες μπορούν να το ακούσουν, και κάθε πύλη το

προωθεί μέσω ενός δικτύου που μπορεί να είναι WiFi ethernet κλπ στον εξυπηρετητή δικτύου όπου γίνεται και το φιλτράρισμα για τα διπλότυπα πακέτα που έρχονται από τις διαφορετικές πύλες. Ακόμη το εξυπηρετητή δικτύου έχει τον ρόλο της προώθησης του μηνύματος στον κατάλληλο εξυπηρετητή εφαρμογής που συνήθως είναι βασισμένος στο cloud. Αντίθετα, το NB-IoT βασίζεται στο LTE που σημαίνει ότι είναι κυψελλοειδές. Επειδή βασίζεται στο LTE διαλέγονται κάποια "μονοπάτια" τα οποία περιέχουν τις βελτιστοποιήσεις για το NB-IoT. Η αρχιτεκτονική του NB-IoT είναι αρκετά πιο περίπλοκη από αυτή του LoRa [17].

### **3.6.1.2 MAC επίπεδο**

Όπως περιεγράφηκε και παραπάνω στο LoRaWAN οι συσκευές μπορούν να χωριστούν σε τρεις κλάσεις, και είναι συναρτήσει των παραχωρήσεων μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και του latency. Έτσι, η κλάση A είναι η πιο αποδοτική όσον αφορά την ενέργεια ενώ η C είναι η καλύτερη όσον αφορά το latency. Η στοίβα του NB-IoT είναι παρόμοια του LTE, απλουστευμένη έτσι ώστε να είναι η κατανάλωση στα χαμηλότερα επίπεδα. Με την έλευση των 5G δικτύων το NB-IoT θα ενσωματωθεί στην νέα γενιά δικτύων, έτσι αναμένεται να υπάρχουν βελτιώσεις και διαφοροποιήσεις στο επίπεδο MAC.

### **3.6.1.3 Γενικά Συμπεράσματα**

Κάθε τεχνολογία έχει τα θετικά και τα αρνητικά του και δεν υπάρχει μια τεχνολογία καλύτερη σε όλες τις πτυχές. Και οι δύο τεχνολογίες χρησιμοποιούνται αναλόγως τις ανάγκες που υπάρχουν και τις συνθήκες που επικρατούν αλλά και τον προϋπολογισμό που μπορεί να διατεθεί για την κάθε εφαρμογή. Ένας κανόνας για την επιλογή, σύμφωνα και με την παραπάνω σύγκριση είναι ότι χρησιμοποιείται το NB-IoT για εφαρμογές που είναι κρίσιμο να υπάρχει μεγάλο QoS και χαμηλό latency. Βεβαία το κόστος είναι μεγαλύτερο σε αυτή την περίπτωση. Το LoRa προτιμάτε για εφαρμογές που το κόστος είναι σημαντικός παράγοντας, ενώ τα δεδομένα που μεταδίδονται είναι πολύ μικρά σε μέγεθος (για παράδειγμα εφαρμογή παρακολούθησης τοποθεσίας ενός δέματος).

### **3.6.1.4 Σύγκριση εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν**

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 3.4.1.3 κάθε μια από τις τεχνολογίες είναι πιο κατάλληλη από την άλλη, αναλόγως την εφαρμογή και τις διάφορες συνθήκες στις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι εφαρμογές. Σε αυτή την παράγραφο σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά αυτά θα αναφερθούν στον επόμενο πίνακα οι εφαρμογές που θα ήταν προτιμότερες για κάθε μία από τις εξεταζόμενες τεχνολογίες. Βέβαια μετά από σχετική έρευνα που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ο παρακάτω πίνακας δεν είναι καθόλου δεσμευτικός, καθώς υπάρχουν προϊόντα και υπηρεσίες που έχουν υλοποιηθεί και με τις δύο παρακάτω τεχνολογίες, δηλαδή σε εμπορικές εφαρμογές μπορεί να υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των δύο τεχνολογιών.

**Πίνακας 2** Εφαρμογές που υποστηρίζονται από την κάθε τεχνολογία

LoRa	NB-IoT
Παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων	Wearables
Έξυπνη γεωργία	Έξυπνη ποδηλασία
Βιομηχανικές εφαρμογές	Παρακολούθηση παιδιών
Διαχείριση αεροδρομίων	Παρακολούθηση κατοικίδιων
Εφαρμογές στην υγεία, όπως παρακολούθηση ασθενών	Έξυπνη στάθμιση
	Συναγερμοί
	Έξυπνοι κάδοι απορριμμάτων

Στον πίνακα 3 βλέπουμε μια σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών LoRa και NB-IoT.

**Πίνακας 3** Σύγκριση μεταξύ LoRa και NB-IoT

Παράμετροι	LoRa	NB-IoT
<b>Φάσμα</b>	Μη αδειοδοτούμενο	Αδειοδοτούμενο LTE
<b>Τύπος διαμόρφωσης</b>	CSS	QPSK
<b>Εύρος ζώνης</b>	500-125 kHz	180 kHz
<b>Μέγιστο data rate</b>	290 bps-50kbps (DL/UL)	DL:234,7 kbps UL:204,8 kbps
<b>Διάρκεια μπαταρίας</b>	Μέχρι και 10 χρόνια	Μέχρι και 10 χρόνια
<b>Μέγιστος αριθμός μηνυμάτων</b>	Απεριόριστος	Απεριόριστος
<b>Ανοχή στις παρεμβολές</b>	Υψηλή	Χαμηλή



# 4

## Αλγόριθμοι εξοικονόμησης ενέργειας

«Οι σπουδαίοι αλγόριθμοι είναι η ποίηση του υπολογισμού. Όπως μια στροφή ενός ποιήματος, μπορεί να είναι λακωνικοί, υπαινικτικοί, πυκνοί, ακόμα και μυστηριώδεις. Όταν όμως ξεκλειδωθούν, ρίχνουν ένα λαμπρό φως σε κάποια διάσταση του υπολογισμού.»

--Francis Sullivan

Στα δίκτυα IoT, όπου γίνεται ανταλλαγή δεδομένων από διάφορες μηχανές μεταξύ τους, γίνεται αντιληπτό ότι έχει μεγάλη σημασία να υπάρχει όσο το δυνατό μικρότερο ενεργειακό αντίκτυπο στις συσκευές αυτές, αλλά και στο δίκτυο γενικότερα. Έτσι, έχει γίνει μεγάλη έρευνα για τους τρόπους, αλγόριθμους και μηχανισμούς με τους οποίους μπορούμε να επιτύχουμε καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Η μελέτη της εξοικονόμησης ενέργειας σε IoT δίκτυα ασχολείται με όλα τα επίπεδα δικτύου. Ακόμη, το θέμα της ενέργειας είναι ένα πολυπαραμετρικό θέμα, καθώς επηρεάζεται από τους αισθητήρες, τους εξυπηρετητές, τις ίδιες της συσκευές και τα μηχανήματα. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση των διάφορων μεθόδων που έχουν υλοποιηθεί και αφορούν την ενέργεια και στην παράγραφο 4.3 προτείνεται μια γενική αρχιτεκτονική βάση της οποίας ένα σύστημα μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών.

### 4.1 Στην συσκευή

#### 4.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διαχείριση ενέργειας στην μπαταρία

Σχεδιάζοντας τις λύσεις υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι οι εξής:

- **Ακρίβεια της τάσης:** για να μπορεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας αλλά και για να μην καταστραφεί η μπαταρία πρέπει η τάση είναι εντός των ορίων λειτουργίας. Τα όρια αυτά ορίζονται από τις προδιαγραφές του μικροϋπολογιστή, της μνήμης και των περιφερειακών συσκευών.



- **Καταστάσεις λειτουργίας:** για την μείωση «σπατάλης» ενέργειας σε εφαρμογές όπου υπάρχουν συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, έχει εισαχθεί η έννοια των καταστάσεων λειτουργίας. Ανάλογα με την τεχνολογία, ορίζονται κάποιες καταστάσεις όπου η συσκευή έχει την λιγότερη κατανάλωση ενώ σε άλλες καταστάσεις ανάλογα με την λειτουργία που πρέπει να πραγματοποιήσει η κατανάλωση να είναι μεγαλύτερη. Στις καταστάσεις sleep θα πρέπει το ρεύμα να έχει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές.
- **Διαχείριση της θερμότητας στην συσκευή:** ο σχεδιασμός της συσκευής πρέπει να είναι τέτοιος έτσι ώστε να μην αυξάνεται υπερβολικά η θερμοκρασία της συσκευής, καθώς κάτι τέτοιο έχει αρνητικό αντίκτυπο στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας [18].

### 4.1.2 Λύσεις που αφορούν την ίδια την μπαταρία

Η εξοικονόμηση ενέργειας στην ίδια την συσκευή μπορεί να ληφθεί υπόψιν από πολλές πλευρές. Αρχικά, ένας άμεσος τρόπος αναβάθμισης είναι η αναβάθμιση της ίδιας της μπαταρίας. Ιστορικά, συσκευές-κόμβοι είχαν μπαταρίες μη επαναφορτιζόμενες για μείωση του κόστους. Στην συνέχεια, άρχισαν να χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Λόγω της ανάγκης για φόρτιση, έχουν εισαχθεί και χρησιμοποιηθεί τεχνικές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μηχανικών, ηλιακών και θερμοηλεκτρικών τεχνικών. Εντούτοις, δεν έχει αποδειχθεί η χρήση τέτοιων μεθόδων ικανοποιητική για την χρήση τους σε IoT συστήματα, εκτός για παράδειγμα σε περιπτώσεις όπου η ανθρώπινη παρουσία σε αυτές τις συσκευές είναι αδύνατη. Μια ανοικτή ερευνητική περιοχή που θα μπορούσε να βοηθήσει σε αυτή την κατεύθυνση είναι η ασύρματη φόρτιση, η οποία συμβαίνει μέσω ηλεκτρικής και μαγνητικής ακτινοβολίας. Όμως η απόσβεση όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή είναι μεγάλη, κάτι που την τεχνική αυτή την καθιστά προς το παρόν μη χρηστική. Άλλα προβλήματα που υπάρχουν σε αυτή την λύση είναι ότι τέτοια συστήματα είναι περίπλοκα, και εισάγεται επίσης και θέμα υγείας, αφού η μαγνητική και ηλεκτρική ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί και επικίνδυνη για την υγεία [18].

## 4.2 Στην συσκευή (Περίπτωση SAR συστήματος)

Για την μελέτη του παρακάτω συστήματος SAR πρέπει να θεωρήσουμε σε πρώτη φάση κάποιες καταστάσεις και περιπτώσεις χρήσης στις οποίες ο χρήστης μπορεί να βρίσκεται. Έτσι γίνεται πιο εύκολη η κατανόηση των καταστάσεων που μπορούν να οριστούν για την συσκευή κάτι που θα βοηθήσει στην εξοικονόμηση της ενέργειας της:

- a. Χαμηλού κινδύνου, π.χ. ο χρήστης κοιμάται ή το wearable φορτίζει
- b. Κανονική, δεν διακρίνεται κάποιος κίνδυνος
- c. Υψηλού κινδύνου, υψηλή πιθανότητα κινδύνου, π.χ. παιδί στα όρια τις ελεγχόμενης περιοχής, κάποιος βιομετρικός αισθητήρια παρουσιάζει υψηλές αλλά όχι επικίνδυνες ενδείξεις.



Η φορητή συσκευή θα έχει την δυνατότητα να μπορεί να συνδέεται μέσω BLE (Bluetooth Low Energy) με κάποια συσκευή κινητής τηλεφωνίας. Όταν γίνεται αυτού του είδους η σύνδεση η λειτουργία εντοπισμού θέσης της φορητής συσκευής πραγματοποιείται απλά χρησιμοποιώντας το GPS του κινητού παρέχοντας αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια. Σε αυτή την κατάσταση (δηλαδή σε κατάσταση paired) έχουμε την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς η αποστολή των δεδομένων που είναι διαδικασία με μεγάλη κατανάλωση ενέργειας την αναλαμβάνει το κινητό τηλέφωνο.

Στην συνέχεια περιγράφονται οι αλγόριθμοι και οι διαδικασίες που θα ακολουθηθούν στα πλαίσια της εξομοίωσης για την εξοικονόμηση ενέργειας του τελικού κόμβου - συσκευής.

- Εξοικονόμηση ενέργειας και διαχείριση αισθητήρων
- Εξοικονόμηση ενέργειας και συχνότητας των μεταβάσεων καταστάσεων
- Εξοικονόμηση ενέργειας και μετάδοση δεδομένων

#### 4.2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και διαχείριση αισθητήρων

Ένας από τους παράγοντες που οδηγούν στη μείωση της στάθμης της μπαταρίας οφείλεται στην χρήση των διάφορων αισθητήρων που έχει μια φορητή συσκευή. Για αυτό τον λόγο είναι σημαντικό να μην λειτουργούν οι αισθητήρες όταν αυτό δεν είναι απαραίτητο. Έτσι ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η φορητή συσκευή μπορεί κανείς να διακρίνει τις παρακάτω περιπτώσεις διαχείρισης των αισθητήρων της φορητής συσκευής:

- **Hibernate:** Σε αυτή την κατάσταση δεν λειτουργεί κανένας αισθητήρας πλην του επιταχυνσιόμετρου (έχει την δυνατότητα αντίληψης κίνησης για μετάβαση στην κατάσταση normal/idle), συνεπώς είναι κατάσταση με την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας
- **Idle/normal:** Σε αυτή την κατάσταση γίνεται ανάγνωση των αισθητήρων ή γίνεται ανάγνωση των αισθητήρων και αποστολή αυτών των πληροφοριών. Οι αισθητήρες παραμένουν ενεργοί μόνο για την καταγραφή των στοιχείων ενώ τα modules επικοινωνίας παραμένουν ενεργά μόνο κατά την αποστολή και λήψη δεδομένων.
- **Emergency:** κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Σε αυτή την κατάσταση όλοι οι αισθητήρες είναι κλειστοί έτσι ώστε να γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας και παραμένουν ενεργοί μόνο αυτοί που είναι κρίσιμοι για τον εντοπισμό του χρήστη και την αξιολόγηση της κατάστασης του.

Παραπάνω ορίστηκαν οι διαθέσιμες καταστάσεις. Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου μας ορίζουμε τις μεταβάσεις των παραπάνω καταστάσεων, Η κατάσταση Off δεν λαμβάνεται υπόψιν στις μεταβάσεις από την μια κατάσταση στην άλλη.

Έχοντας ως αφετηρία την κατάσταση hibernate, γίνεται μετάβαση στην κατάσταση idle/normal ως εξής:

- Κάθε x χρονικές μονάδες γίνεται μετάβαση από την κατάσταση hibernate στην idle normal για να γίνει ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων και εν συνεχεία ξανά γυρνάει στην κατάσταση hibernate.
- Κάθε y χρονικές μονάδες γίνεται μετάβαση από την κατάσταση hibernate στην idle/normal και εκτός από την ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων γίνεται και αποστολή τους στον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την διαθέσιμη τεχνολογία επικοινωνίας (BLE ή LoRa ή NB-IoT). Μετά την αποστολή των στοιχείων η συσκευή/wearable αναμένει την λήψη τυχόν μηνυμάτων από το cloud και στην συνέχεια γυρνάει στην κατάσταση hibernate.

Ο μοναδικός αισθητήρας που λειτουργεί στην κατάσταση hibernate είναι το επιταχυνσιόμετρο. Όταν το επιταχυνσιόμετρο αντιληφθεί επικίνδυνη κίνηση μεταβαίνει στην κατάσταση idle/normal και γίνεται ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων και αποστολή τους στον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την διαθέσιμη τεχνολογία επικοινωνίας (BLE ή LoRa ή NB-IoT). Μετά την αποστολή των στοιχείων η φορητή συσκευή αναμένει την λήψη τυχόν μηνυμάτων από το cloud και στην συνέχεια μεταβαίνει στην κατάσταση hibernate.

Όταν ο χρήστης πιάσει το κουμπί κινδύνου μεταβαίνει στην κατάσταση idle/normal και γίνεται ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων και αποστολή τους στον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την διαθέσιμη τεχνολογία επικοινωνίας (BLE ή LoRa ή NB-IoT). Μετά την αποστολή των στοιχείων η συσκευή/wearable αναμένει την λήψη τυχόν μηνυμάτων από το cloud και στην συνέχεια μεταβαίνει στην κατάσταση hibernate.

Από την κατάσταση idle/normal γίνονται οι παρακάτω μεταβάσεις είτε στην κατάσταση hibernate είτε στην κατάσταση emergency:

- Μετά από την ανάγνωση των αισθητήρων ή και την αποστολή τους μετά από τις x ή y χρονικές μονάδες και την λήψη τυχόν μηνυμάτων από το cloud μεταβαίνει από την idle/normal στην κατάσταση hibernate.

Μετά από πίεση του κουμπιού κινδύνου γίνεται ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων και αποστολή τους στον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την τεχνολογία επικοινωνίας LoRa και την λήψη τυχόν μηνυμάτων από το cloud, στην συνέχεια η συσκευή/wearable μεταβαίνει στην κατάσταση hibernate.

Η απόφαση για μετάβαση στην κατάσταση emergency λαμβάνεται από το cloud και με την αποστολή κατάλληλου μηνύματος η φορητή συσκευή μεταβαίνει στην κατάσταση emergency. Από την κατάσταση emergency γίνονται οι παρακάτω μεταβάσεις στην κατάσταση idle/normal:

- Με την αποστολή κατάλληλου μηνύματος από το cloud η φορητή συσκευή μεταβαίνει στην κατάσταση idle/normal.
- Μετά από πίεση του κουμπιού κινδύνου η φορητή συσκευή μεταβαίνει στην κατάσταση idle/normal.

Σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται οι αλγόριθμοι που μπορεί να βοηθήσουν στην εξοικονόμηση ενέργειας των τελικών συσκευών στα πλαίσια ενός συστήματος έρευνας και διάσωσης.

Η κατανάλωση ενέργειας αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα σε φορητές συσκευές προκειμένου να πετύχουν τη βέλτιστη διαχείριση της μπαταρίας και κατά συνέπεια την μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια λειτουργίας, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς την περίπτωση έκτακτης ανάγκης(μετάβαση στην κατάσταση emergency) η φορητή συσκευή θα πρέπει να μπορεί να παραμείνει ενεργή όσο περισσότερη ώρα γίνεται μέχρις ότου να πραγματοποιηθεί η διάσωση του χρήστη. Η μελέτη αυτού του θέματος γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα τμήματα υλικού που μπορεί να είναι διαθέσιμα στα πλαίσια ενός τέτοιου συστήματος. Μια φορητή συσκευή περιέχει διάφορους αισθητήρες και modules επικοινωνίας, και η βέλτιστη διαχείριση τους μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να αυξήσει σημαντικά την διάρκεια λειτουργίας της

Για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας η μελέτη δύναται να γίνει κυρίως σε τρία επίπεδα, καθένα από τα οποία συνεισφέρει με τον δικό του τρόπο σε αυτό το σκοπό. Στο πίνακα 2 φαίνονται οι παράμετροι όπου αξιολογούνται και επηρεάζουν τη διαδικασία εξοικονόμησης ενέργειας μιας φορητής συσκευής.

Μια άλλη παράμετρος στην διαχείριση των αισθητήρων είναι η υπάρχουσα στάθμη ενέργειας. Έτσι, όταν η στάθμη βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα οι αισθητήρες θα πρέπει να παραμένουν απενεργοποιημένοι για μεγαλύτερο διάστημα από ότι όταν η στάθμη ενέργειας είναι μεγαλύτερη.

## 4.2.2 Εξοικονόμηση ενέργειας και συχνότητας των μεταβάσεων καταστάσεων

Όπως αναφέρεται και στην περιγραφή των καταστάσεων σε παραπάνω παράγραφο, η συσκευή θα μπορεί να μεταβαίνει από την κατάσταση hibernate στην κατάσταση idle/normal ως εξής (μεταξύ άλλων συνθηκών):

- Κάθε  $x$  χρονικές μονάδες για να γίνει ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων
- Κάθε  $y$  χρονικές μονάδες για την ανάγνωση των τιμών των αισθητήρων και την αποστολή τους στον σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας την διαθέσιμη τεχνολογία επικοινωνίας (για παράδειγμα BLE ή LoRa ή NB-IoT).

Καθοριστικός παράγοντας για την κατανάλωση ενέργειας είναι ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες και αποστολή τους. Συνεπώς, είναι σημαντικό να υπάρχει μια διαφοροποίηση στον ρυθμό που θα αποστέλλονται τα δεδομένα ανάλογα με την κατάσταση του χρήστη και αλλά και της ίδιας της φορητής συσκευής. Αυτός ο ρυθμός καθορίζεται από σχετικό αλγόριθμο οποίος θα εκτελείται στο cloud και λαμβάνει υπόψη την υπάρχουσα τιμή της μπαταρίας μεταξύ άλλων παραμέτρων. Οι παράμετροι λειτουργίας του αλγορίθμου θα καθοριστούν στην φάση ανάπτυξης με κρήση εξομοίωσης και κατάλληλων δοκιμών στην πρωτότυπη φορητή συσκευή/wearable του έργου WeSAR.

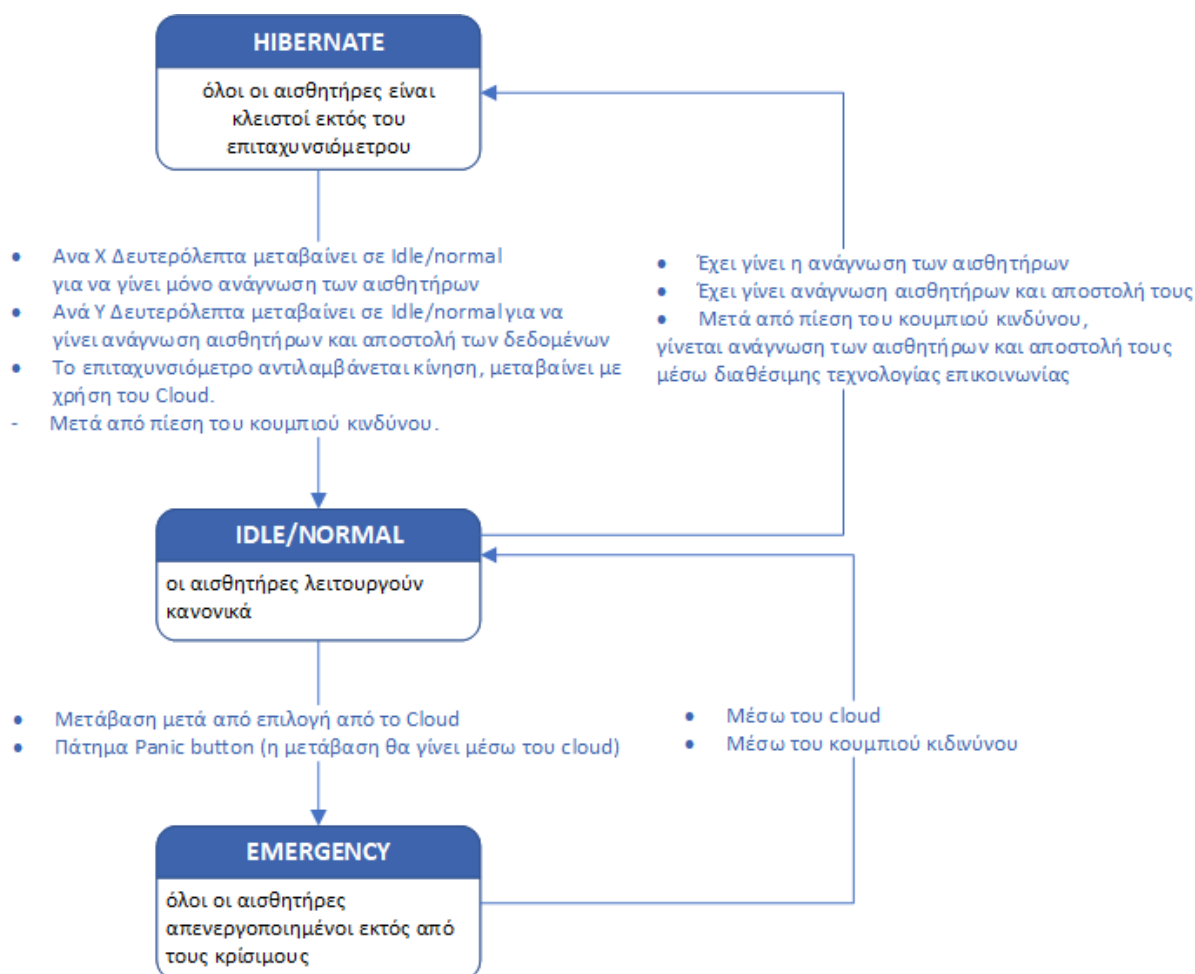
Μεταξύ άλλων πρέπει να ληφθεί υπόψη και οι παρακάτω παράμετροι: Όταν γίνει μετάβαση από την κατάσταση normal/idle σε κατάσταση emergency, αυξάνεται ο ρυθμός αποστολής δεδομένων, καθώς αποτελεί ζωτικής σημασίας για την εύρεση του χρήστη, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Δεδομένου, ότι ο αλλαγές αυτές γίνονται με βάση τον αλγόριθμο ο οποίος θα εκτελείται στο cloud μπορεί να αλλάξει ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται η μπαταρία με αποτέλεσμα ο ρυθμός σε κάθε κατάσταση να μην είναι συνέχεια ίδιος αλλά να βελτιστοποιείται ανάλογα με τις

υπάρχουσες συνθήκες. Για παράδειγμα αν η μπαταρία είναι κάτω από μια τιμή π.χ. 30 τοις εκατό στην κατάσταση normal/idle, ο ρυθμός να είναι μικρότερος σε σχέση με τη περίπτωση που θα βρισκόταν στην ίδια κατάσταση με τη στάθμη της μπαταρίας να είναι 90 τοις εκατό. Αυτό επεκτείνεται και στην κατάσταση emergency όπου ανάλογα με την στάθμη της μπαταρίας ρυθμίζεται ο ρυθμός αποστολής δεδομένων. Όταν η μπαταρία είναι σε χαμηλά επίπεδα θα πρέπει η συχνότητα αποστολής να γίνεται μικρότερη.

### 4.2.3 Εξοικονόμηση ενέργειας και μετάδοση δεδομένων

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας είναι η μετάδοση των δεδομένων. Σε γενικές γραμμές όταν τα modules επικοινωνίας είναι ανενεργά (ή σε κατάσταση hibernate) η κατανάλωση ενέργειας είναι η ελάχιστη, κατά την λήψη δεδομένων η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται και μεγιστοποιείται κατά την αποστολή δεδομένων. Μπορούμε σε μια γενική περίπτωση να θεωρήσουμε τρεις τρόποι μετάδοσης BLE (στην περίπτωση που η φορητή συσκευή είναι paired με το κινητό), LoRa και NarrowBand-IoT.

Στην πρώτη περίπτωση με την χρήση BLE η κατανάλωση ενέργειας είναι η μικρότερη από τις τρεις περιπτώσεις γιατί ουσιαστικά το paired κινητό τηλέφωνο αναλαμβάνει την επικοινωνία με τον σταθμό λήψης. Στην περίπτωση που η φορητή συσκευή δεν είναι paired με το κινητό, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα διαθέσιμα πρωτόκολλα επικοινωνίας (LoRa/NB-IoT). Κάθε ένα από τα δύο πρωτόκολλα έχουν μια σειρά από παράμετρος οι οποίοι επηρεάζουν την επικοινωνία ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες όπως για παράδειγμα την απόσταση της συσκευής με τον σταθμό λήψης. Επομένως θα υλοποιηθεί αλγόριθμος στα πλαίσια εξομοιωτή, ο οποίος θα καθορίζει τις παραμέτρους μετάδοσης (πχ ο ρυθμός και η ισχύς της εκπομπής των πακέτων δεδομένων) με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες ώστε να υπάρχει βελτιστοποίηση στην κατανάλωση ενέργειας. .



Εικόνα 21 Διάγραμμα ροή περιγραφόμενης λογικής για την εξοικονόμηση ενέργειας

### 4.3 Στο ασύρματο κανάλι

#### 4.3.1 LoRa – οι επιπτώσεις της επιλογής των παραμέτρων μετάδοσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τεχνολογία LoRa έχει μια σειρά από παραμέτρους βάση των οποίων γίνεται η μετάδοση των δεδομένων. Όταν η μετάδοση γίνεται από συσκευές κόμβους που λειτουργούν με μπαταρία, η επιλογή αυτών των παραμέτρων είναι σημαντική έτσι ώστε να πετύχουμε χαμηλή κατανάλωση αλλά και εντέλει να μπορέσει να φθάσει το μήνυμα από τους κόμβους στον κατάλληλο εξυπηρετητή. Εν προκειμένω, οι παράμετροι αυτοί είναι το spreading factor, το εύρος ζώνης, ο ρυθμός κωδικοποίησης, η ρυθμίσεις για την ισχύς της μετάδοσης. Για το LoRa αυτοί οι παράμετροι μας δίνουν μέχρι και 6720 δυνατές επιλογές. Οι παράμετροι έχουν οριστεί και εξηγηθεί παραπάνω.

Η επιλογή αυτών των παραμέτρων έχουν αντίκτυπο στην ποιότητα της μετάδοσης (επίδραση του θορύβου και των παρεμβολών, εύρος απόστασης που μπορεί να γίνει η μετάδοση) και στην κατανάλωση ενέργειας. Ο σκοπός μας είναι να έχουμε μια ισορροπία

μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της επίδοσης της επικοινωνίας. Από τις παραμέτρους είναι ξεκάθαρο ότι η ισχύς με την οποία θα κάνουμε τη μετάδοση επηρεάζει άμεσα την στάθμη της μπαταρίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς μετάδοσης τόσο μεγαλύτερη είναι η κατανάλωση ενέργειας και το αντίστροφο. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας είναι ο χρόνος μετάδοσης των δεδομένων, ο οποίος εξαρτάται από το ρυθμό bit και το μέγεθος του πακέτου. Το bitrate εξαρτάται από το spreading factor και από το εύρος ζώνης. Το μέγεθος του πακέτου εξαρτάται επίσης και από την κωδικοποίηση, καθώς υπάρχει επιπλέον πληροφορία. Είναι φανερό επομένως ότι ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων χρήζει μελέτης. Έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι για την επιλογή αυτών των παραμέτρων. Το LoRaWAN υποστηρίζει το Adaptive Data Rate [19].

### 4.3.2 Εξοικονόμηση ενέργειας και μετάδοση δεδομένων

Το Adaptive Data Rate (ADR) είναι ένας μηχανισμός βελτιστοποίησης των ρυθμών δεδομένων, του χρόνου εκπομπής και της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο LoRa. Το ADR θα 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 συσκευή τερματισμού μπορεί να καθορίσει ότι οι συνθήκες RF είναι ασταθείς (για παράδειγμα, όταν ένα αυτοκίνητο είναι σταθμευμένο πάνω από έναν αισθητήρα στάθμευσης), ο μηχανισμός ADR θα πρέπει (προσωρινά) να απενεργοποιηθεί. Οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύουν τότε είναι ακινητοποιημένες για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και να επιτρέπουν την ADR κατά τη διάρκεια αυτών των χρόνων. Οι κόμβοι μόνο μπορούν να αποφασίζουν αν πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ADR ή όχι.

Η τεχνολογία ADR υλοποιείται στα πλαίσια του LoRAWAN. Εντούτοις, στην βιβλιογραφία υπάρχουν και άλλες προτάσεις προς αυτή την κατεύθυνση. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι εργασίες [21] [22]. Αυτές οι εργασίες προτείνουν αλγόριθμους που θεωρούν «εχθρικό περιβάλλον», με άλλα λόγια θεωρούν ότι υπάρχει κάποιος ανταγωνισμός μεταξύ των τελικών κόμβων για τους πολύ συγκεκριμένους πόρους του δικτύου βασιζόμενοι στο γνωστό δίλημμα εξερεύνησης έναντι εκμετάλλευσης, το οποίο περιγράφει τα προβλήματα στα οποία οι αποφάσεις παίρνονται με βάση το πέρασμα του χρόνου, αλλά και του επιστημονικού κλάδου της θεωρίας παιγνίων. Πιο συγκεκριμένα στην εργασία [21] προτείνεται μια συνάρτηση κόστους, την οποία μέσω του προτεινόμενου αλγορίθμου προσπαθεί να γίνει μεγιστοποίηση της «ανταμοιβής» και ελαχιστοποίηση του «κόστους». Η εξισορρόπηση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και packet loss εκφράζονται με μια μετρική κόστους, δηλαδή με το σταθμισμένο άθροισμα του ενεργειακού κόστους και του κόστους απώλειας.

$$\text{Κόστος} = \text{ενέργεια} * N_{\text{μετάδοση}} + \text{απώλεια}$$

- Όπου η ενέργεια είναι το ενεργειακό κόστος για την αποστολή ενός πακέτου. Αυτό ισούται με την ισχύ αποστολής επί την διάρκεια της εκπομπής.
- $N_{\text{μετάδοσης}}$  είναι το πλήθος των μεταδόσεων για να σταλθεί ένα πακέτο
- Απώλεια είναι όταν δεν μεταδίδεται σωστά ένα πακέτο σε μονάδες ενέργειας.



-

## Προσομοίωση LoRa

### 5.1 Διαθέσιμοι προσομοιωτές στην βιβλιογραφία

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την εδραίωση του IoT στην ζωή μας, λόγω των πολλών δυνατοτήτων που μας προσφέρει, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πληθώρας ασύρματων τεχνολογιών, που καλύπτουν μια σειρά από ανάγκες, όπως την ανάγκη διασύνδεσης συσκευών που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις. Ένας υποψήφιος που προτείνεται για αυτή την ανάγκη είναι το LoRa, η οποία υποστηρίζεται από την LoRa Alliance <sup>TM</sup>. Όπως έχει εξηγηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, προσφέρει μια χαμηλής κατανάλωσης, ευρείας περιοχής λύση, συνεπώς γίνεται επιτακτική η ανάγκη για μελέτη του, μιας και μπορεί να βελτιώσει τη ζωή μας άρδην.

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, είναι σημαντικό να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε κάποια προσομοίωση του εξεταζόμενου δικτύου, στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού του, καθώς να έχουμε την δυνατότητα αξιολόγησης του, πριν προβούμε σε κοστοβόρες υλοποιήσεις. Ειδικά, εφόσον γνωρίζουμε ότι η σωστή επιλογή των διάφορων παραμέτρων του δικτύου, όπως για παράδειγμα το spreading factor, και το bandwidth μπορεί να αποφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε διάφορες πτυχές όπως αύξηση του data rate, αλλά και την βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Εντούτοις, αυτή η επιλογή δεν είναι εύκολη δουλειά, καθώς αυτοί οι παράμετροι πρέπει να επιλεγθούν ανάλογα με το πρόβλημα που υπάρχει και τις καταστάσεις που επικρατούν. Συνεπώς είναι σημαντική η χρήση λογισμικού εξομοίωσης πριν προβούμε στην υλοποίηση.

Επίσης, πέρα από τις δυνατότητες που δίνονται από το λογισμικό εξομοίωσης για την καλύτερη προσομοίωση του εξεταζόμενου δικτύου, είναι σημαντική η γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών του λογισμικού αυτού, αφού έτσι καθορίζεται σε τι πλατφόρμες μπορούν οι χρήστες να εργαστούν (παραδείγματος χάριν σε τι λειτουργικό σύστημα μπορούν να τρέξουν αυτά τα λογισμικά, τι γνώσεις σε γλώσσες προγραμματισμού και σε βιβλιοθήκες χρειάζεται ο εκάστοτε εξομοιωτής). Ανάλογα των χαρακτηριστικών αυτών μπορεί να γίνει η επιλογή του λογισμικού σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προβλήματος που πρέπει να λυθεί.

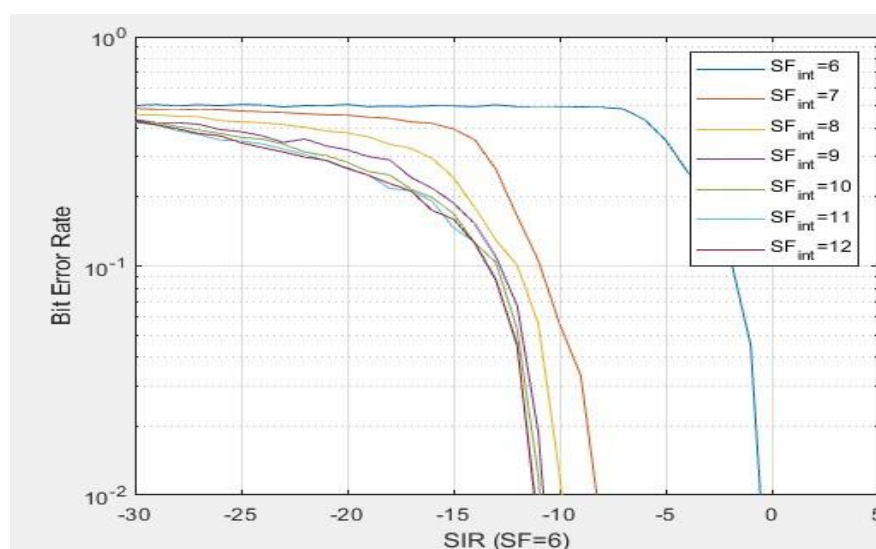
### 5.1.1 Περιγραφή των εξομοιωτών

Λόγω του ερευνητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος για τα LoRa δίκτυα, έχουν σχεδιαστεί διάφοροι εξομοιωτές όπως οι παρακάτω:

- “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/>

A.

Ο πρώτος εξεταζόμενος εξομοιωτής είναι ο PhySimulator. Αυτός ο εξομοιωτής έχει γραφτεί σε MATLAB. Σε αυτόν τον εξομοιωτή υλοποιείται το link level του LoRa και εξετάζεται η λήψη δύο επικαλυπτόμενων μεταδόσεων LoRa, οι οποίες έχουν διαμορφωθεί με διαφορετικά spreading factors. Στην σχετική δημοσίευση του, αναφέρει ότι στα πλαίσια της μελέτης και της ανάπτυξης αυτού του εργαλείου φαίνεται ότι παρά το γεγονός ότι θεωρητικά τα spreading factors μπορούν να θεωρηθούν ορθοκανονικά, στην πράξη όμως οι μεταξύ τους συγκρούσεις δημιουργούν πρόβλημα (δεν γίνεται σωστά η λήψη τους) [23][24]. Όσον αφορά τις πιο τεχνικές λεπτομέρειες, κάθε φορά που γίνεται η εκτέλεση του προγράμματος παράγονται σχήματα-διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν πακέτου, συμβόλου και bit error rate για όλες τις τιμές των spreading factors που αλληλοεπιδρούν με σήματα των υπόλοιπων spreading factors. Αυτός ο εξομοιωτής, δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να αλλάξει τις παραμέτρους του προβλήματος, όπως το εύρος ζώνης το μέγιστο αριθμό δοκιμών ανά βήμα κλπ. Επειδή το πρόγραμμα αυτό δεν έχει κάποιο γραφικό περιβάλλον, αυτές οι αλλαγές γίνονται αλλάζοντας κατευθείαν τις τιμές των μεταβλητών στον κώδικα.



Εικόνα 22 Παράδειγμα εκτέλεσης του physimulator

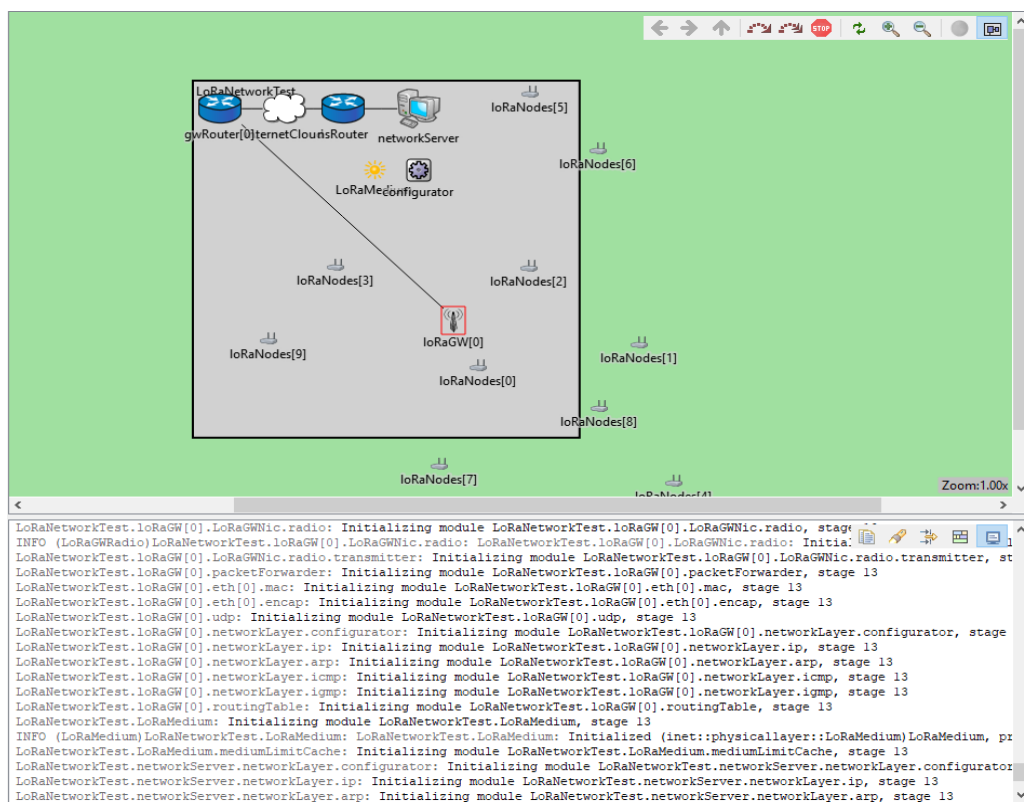
## B.

Ο δεύτερος εξεταζόμενος εξομοιωτής είναι ο FLoRa. Βασίζεται στον εξομοιωτή διακριτών γεγονότων OMNeT++ και στο framework INET. Το OMNeT++ είναι μια βιβλιοθήκη εξομοίωσης βασισμένο στην γλώσσα προγραμματισμού C++ και χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για εξομοιώσεις δικτύων διάφορων τύπων και με την ευρύτερη έννοια, όπως για παράδειγμα ενσύρματα, ασύρματα δίκτυα κλπ. Παρά το γεγονός ότι είναι ένα γενικό εργαλείο εξομοιώσεων διάφορων πραγμάτων όπως για μοντελοποίηση πόρων, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο και δημοφιλές για μοντελοποίηση δικτύων. Σε γενικές γραμμές το OMNeT++ βασίζεται στα εξής συστατικά στοιχεία:

- Ο βασικός πυρήνας εξομοιώσεων που έχει γραφτεί σε C++.
- Την γλώσσα NED, μέσω της οποίας γίνεται η περιγραφή της τοπολογίας του δικτύου και μοιάζει με την γλώσσα προγραμματισμού Java.
- Ένα γραφικό περιβάλλον βασισμένο στο Eclipse [25].

Το INET είναι ένα framework σχεδιασμένο για το OMNeT++, είναι ανοικτού κώδικα και έχει ως σκοπό να βοηθήσει στην πειραματική αξιολόγηση διάφορων πρωτοκόλλων. Προσφέρει μοντέλα για το διαδίκτυο, όπως για τα όλα τα επίπεδα OSI (φυσικό επίπεδο, σύνδεσης δικτύου μεταφοράς και εφαρμογής) TCP, UDP, IPv4, IPv6 κλπ [26]. Το FLoRa επιτρέπει την δημιουργία LoRa κόμβων, πύλες (gateways) και LoRa server. Τα αποτελούμενα αρθρώματα (modules), προσομοιώνουν το φυσικό επίπεδο του LoRa και το MAC επίπεδο του LoRaWAN. Ο FloRa χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης του LoRa χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό ADR, δείχνοντας ότι ο μηχανισμός ADR είναι ένας καλός τρόπος για αύξηση του ρυθμού αποστολής δεδομένων με γνώμονα την κατανάλωση ενέργειας [20]. Παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον στον χρήστη και δίνει στατιστικά δεδομένα από την κατανάλωση ενέργειας.

1. Παρέχεται ένα ακριβές μοντέλο του φυσικού επιπέδου του LoRa.
2. Δίνεται η δυνατότητα χρήσης ενός και περισσότερων πυλών .
3. Στατιστικά δεδομένα ενέργειας του δικτύου, μέσω των αρχείων LoRaEnergyConsumer.cc, LoRaEnergyConsumer.h, LoRaEnergyConsumer.ned.

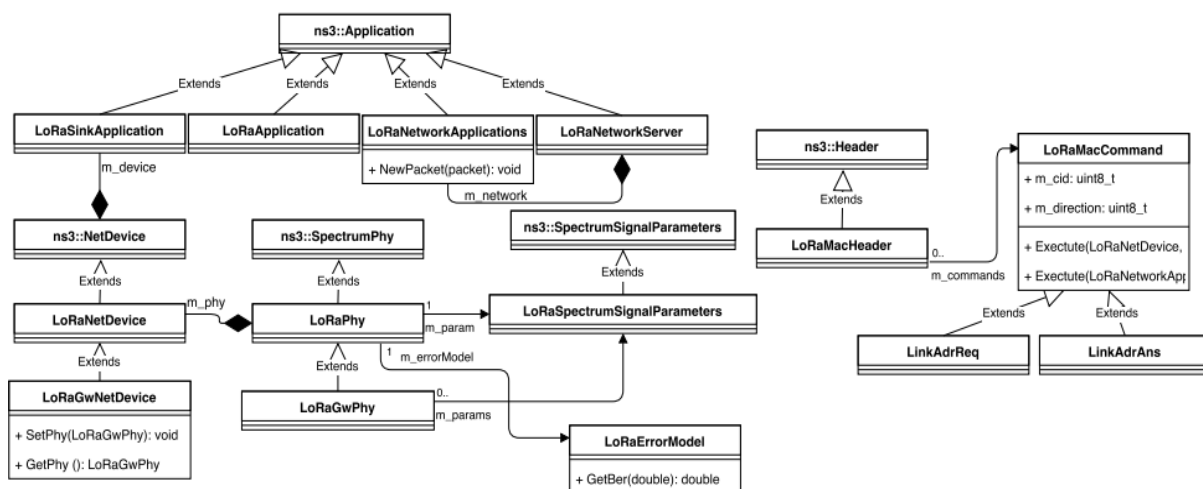


Εικόνα 23 Παράδειγμα εκτέλεσης σεναρίου του Omnet ++

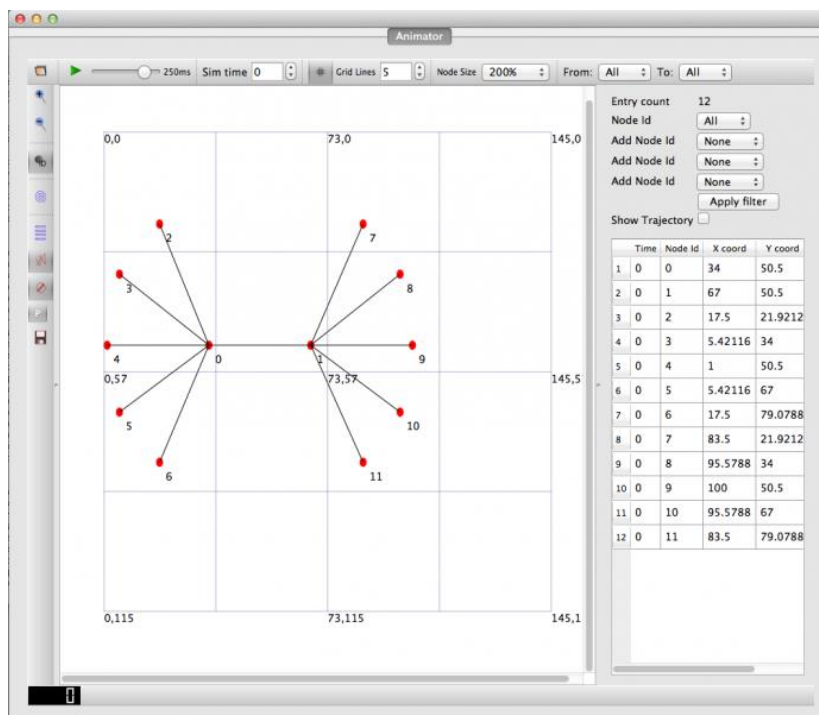
### C.

Η τρίτη περίπτωση δεν αποτελεί ένας ξεχωριστός εξομοιωτής όπως τα υπόλοιπα προγράμματα. Για την ακρίβεια είναι ένα module, που βασίζεται στον εξομοιωτή ns-3. Ο ns-3 είναι ένας διακριτού χρόνου εξομοιωτής για συστήματα διαδικτύου και χρησιμοποιείται για ερευνητική και εκπαιδευτική χρήση και είναι ανοικτού λογισμικού. Ο εξομοιωτής αυτός έχει γραφτεί στην γλώσσα προγραμματισμού C++ και δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιεί την γραμμή εντολών με python [27]. Το εξεταζόμενο module υποστηρίζει την A κλάση του πρωτοκόλλου LoRaWAN. Αυτό σημαίνει ότι γίνεται προσομοίωση για συσκευές που στέλνουν μόνο uplink μεταδόσεις και ο server μόνο downlink μεταδόσεις. Το module προσομοιώνει όλα τα επίπεδα του LoRa, προσπαθώντας να δώσει μια εύκολα ρυθμίσιμη και παραμετροποιήσιμη λύση, όπου μπορούν να ενταχθούν διάφοροι νέοι αλγόριθμοι στην πλευρά του server. Δίνονται επίσης μέσω της κλάσης *LoRaRadioEnergyModel* στατιστικά δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας των καταστάσεων στο φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου. Το παρόν εργαλείο εξετάστηκε σε τρία σενάρια

1. Στο πρώτο σενάριο θεωρεί κυκλική τοπολογία με μία πύλη η οποία βρίσκεται στο κέντρο, και δεν απαιτείται η χρήση acknowledgments.
2. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες πύλες, χρησιμοποιώντας κυκλική τοπολογία παρομοίως.
3. Τέλος, επαναλήφθηκε το πρώτο σενάριο όμως αυτή την φορά με χρήση acknowledgement.



Εικόνα 24 Αρχιτεκτονική το ns3 module σε UML [28]

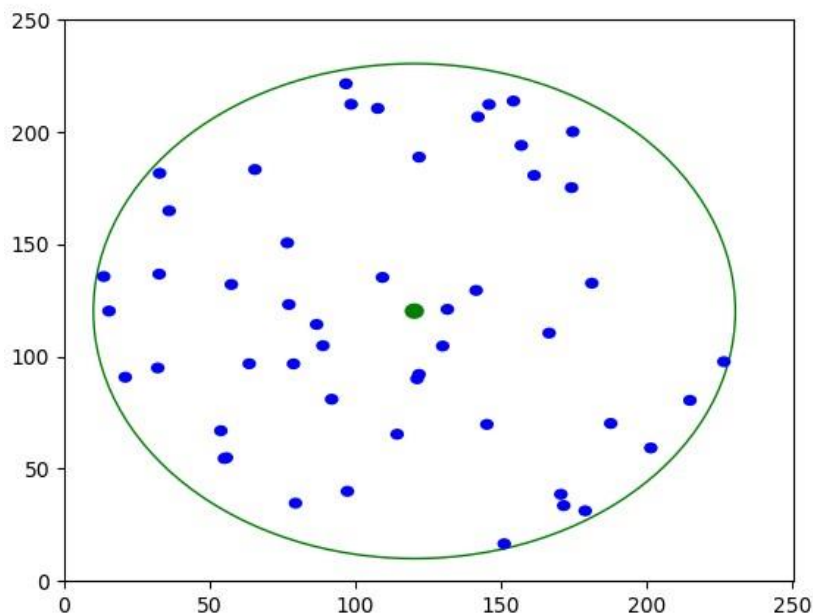


Εικόνα 25 Παράδειγμα αποτελέσματος NetAnim

D.

Τέλος, ο εξομοιωτής LoRaSim που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Lancaster, είναι ένας διακριτών γεγονότων εξομοιωτής και χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της δυνατότητας για επεκτασιμότητα του LoRa. Δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να τοποθετήσει σε διδιάστατο χώρο διάφορους κόμβους. Ο εξομοιωτής αυτός έχει γραφτεί στην γλώσσα προγραμματισμού python και χρησιμοποιεί τις βιβλιοθήκες NumPy, Matplotlib, Simpy. Έχει διαφορετικά αρχεία, όπου σε κάθε αρχείο περιγράφονται διαφορετικά σενάρια ανάλογα με τις ιδιότητες και την περίπτωση που για την οποία γίνεται η προσομοίωση. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα για εξομοίωση για την περίπτωση που έχουμε μόνο έναν σταθμό λήψης μέχρι 4 σταθμούς λήψης.

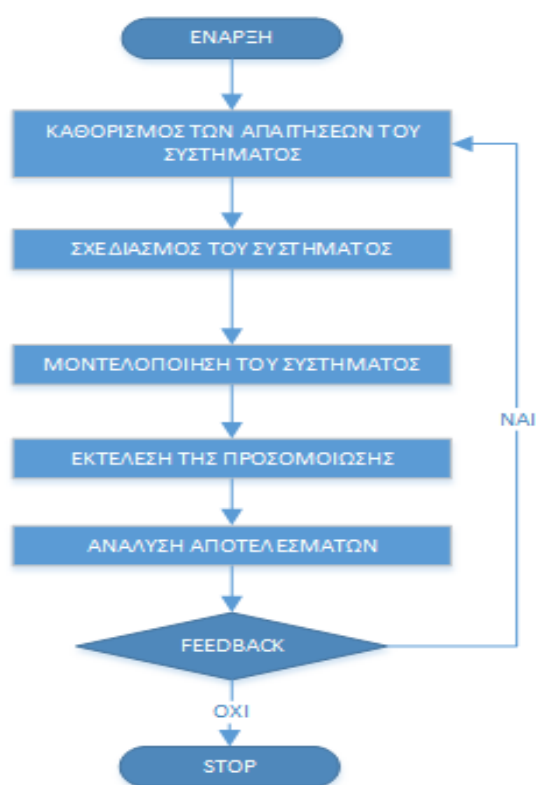
Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα για εξομοίωση με κόμβους που έχουν κατευθυνόμενες ή μη κατευθυνόμενες κεραιές. Μετά την εκτέλεση κάθε εξομοίωσης δίνεται στον χρήστη μια σειρά από γραφικές παραστάσεις, αν ο χρήστης θέσει την κατάλληλη μεταβλητή για τις γραφικές παραστάσεις στον κώδικα σε 1 και επίσης γίνεται εξαγωγή ενός αρχείου δεδομένων που περιέχει τις λεπτομέρειες του δικτύου.



Εικόνα 26 Παράδειγμα εκτέλεσης του LoRaSim

## 5.1.2 Μοντέλο Εξομοίωσης

Γενικά, ένα λογισμικό εξομοίωσης, πρέπει να παρέχει στον χρήστη μια σειρά από δυνατότητες. Αρχικά, ένα τέτοιο λογισμικό πρέπει δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να μπορεί να ορίσει και να δει την τοπολογία που σχεδιάζει. Θα πρέπει επίσης να μπορεί να ορίσει τα χαρακτηριστικά των κόμβων και τις αποστάσεις μεταξύ τους και το είδος, πλήθος, ρυθμό των δεδομένων που στέλνονται. Αφού γίνουν τα παραπάνω, θα πρέπει μετά την εκτέλεση της εξομοίωσης να εμφανίζονται με κάποιο τρόπο τις πληροφορίες, τα στατιστικά και διάφορες μετρικές του εξεταζόμενου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση του LoRa αυτές οι μετρικές θα μπορούσε να είναι DER, NER, το bit error rate κλπ. Γενικά, οι εξομοιωτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την πολυπλοκότητα τους όσον αφορά την ποσότητα πληροφορίας που δίνουν και το feedback που δίνουν στον χρήστη, στο πλήθος των πρωτοκόλλων που μπορούν να υποστηρίζουν. Ακόμα, ορισμένοι μπορεί να δίνουν πληθώρα γραφικών αποτελεσμάτων (συμπεριλαμβανομένου και γραφικού περιβάλλοντος), ενώ άλλοι να δίνουν μόνο κάποιες γραφικές παραστάσεις ή να δίνουν μόνο κάποια αποτελέσματα μέσω του command line. Επιπλέον, υπάρχουν εξομοιωτές που είναι επί πληρωμή, δωρεάν, ανοικτού κώδικα ή ιδιοταγής (δηλαδή ανήκουν σε κάποιο οργανισμό και δεν μπορεί να γίνει αλλαγή στον πηγαίο κώδικα τους). Εδώ θα εξεταστούν δωρεάν εξομοιωτές, οι οποίοι δεν είναι όλοι τους ανοικτού κώδικα.



Εικόνα 27 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας εξομοίωσης

Η διαδικασία της εξομοίωσης ενός δικτύου αποτελείται από μια σειρά από βήματα. Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το διάγραμμα ροής μιας τέτοιας διαδικασίας. Αρχικά, είναι σημαντικό ο χρήστης του λογισμικού αυτού να ορίσει σωστά το ίδιο το πρόβλημα το οποίο πρέπει να λυθεί, έτσι ώστε στην συνέχεια να μπορεί να οριστούν ορθά οι απαιτήσεις του προβλήματος. Όταν λέμε ότι ορίζουμε το πρόβλημα σημαίνει ότι γίνεται επίσης και περιγραφή του περιβάλλοντος, με σκοπό να ληφθεί υπόψιν ο θόρυβος και οι ιδιαιτερότητες που υπάρχουν ανάλογα τις συνθήκες.

Εφόσον γίνουν τα παραπάνω βήματα, στην συνέχεια γίνεται η υλοποίηση του δικτύου. Εν προκειμένω καθορίζονται οι ιδιότητες και οι παράμετροι των κόμβων, το πως θα γίνει η ανταλλαγή των δεδομένων, με βάση ποιο πρωτόκολλο θα γίνουν τα παραπάνω, καθώς και την τοπολογία του δικτύου. Στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων πρέπει να οριστεί και ένα μοντέλο κινητικότητας των κόμβων, δηλαδή βάση ποιους κανόνες και τρόπους μετακινούνται οι κόμβοι στον χώρο. Στο τελευταίο βήμα είναι η εκτέλεση της προσομοίωσης και η μελέτη των αποτελεσμάτων. Με βάση τα αποτελέσματα μπορεί να ξανά ορίσουμε τις μεταβλητές του προβλήματος και τις απαιτήσεις του και να επαναλάβουμε την προσομοίωση με τις αναθεωρημένες τιμές, ή διαφορετικά να λήξουμε την διαδικασία της προσομοίωσης και να γίνει μελέτη των μετρικών και στατιστικών αποτελεσμάτων που θα επιστραφούν.



## 5.2 Σύγκριση εξομοιωτών

Πίνακας 5: Η σύγκριση των εξομοιωτών

Χαρακτηριστικά	PhySimulator	FLoRa	Ns-3 module	LoRaSim
Event	discrete	discrete	discrete	discrete
Τύπος άδειας	Ανοικτού κώδικα	Ανοικτού κώδικα (για μελέτη έρευνα) και	Ανοικτού κώδικα	Creative Commons Attribution 4.0
Γλώσσα προγραμματισμού	MATLAB	C++	C++, python	python
Υποστηριζόμενα Λειτουργικά συστήματα	Windows, Linux, MacOS	Windows, Linux, MacOS	Linux, MacOS, Windows through virtualization	Windows, Linux, MacOS
Γραφικό Περιβάλλον	Μόνο γραφικές παραστάσεις	NAI	NAI	Μόνο γραφικές παραστάσεις
Στατιστικά δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας	OXI	NAI	NAI	OXI
Πλήθος δημοσιεύσεων	2	1	1	2
Ύπαρξη ιστοσελίδας	NAI	NAI	OXI	NAI
Υποστήριξη κοινότητας	Καλή	Περιορισμένη	Πολύ καλή	Περιορισμένη

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται διάφορα χαρακτηριστικά, σύμφωνα με τα οποία γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των διαθέσιμων εξομοιωτών. Η επιλογή των παραπάνω χαρακτηριστικών έγινε λαμβάνοντας υπόψιν την σημασία που έχουν στην επιστημονική κοινότητα, αλλά και για τους σχεδιαστές, αφού είναι σημαντικό για παράδειγμα να είναι γνωστό σε ποια πλατφόρμα θα γίνει η εξομοίωση (Linux, MacOS, Windows), ποιες γνώσεις σε γλώσσες προγραμματισμού χρειάζονται και αν είναι ανοικτού κώδικα έτσι ώστε η επιστημονική κοινότητα να μπορεί να επεκτείνει τα υπάρχοντα εργαλεία έτσι ώστε να συμπεριλάβει και νέες επιστημονικές ανακαλύψεις.

Καταρχάς, όπως βλέπουμε και στον πίνακα όλοι οι εξομοιωτές είναι διακριτών γεγονότων. Αυτό σημαίνει πως η μοντελοποίηση του συστήματος γίνεται θεωρώντας την ως μια σειρά από διακριτά στον χρόνο γεγονότα. Ο ενδιαμέσος χρόνος δεν μας απασχολεί και δεν λαμβάνεται υπόψιν, έτσι το σύστημα μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση χωρίς την ανάγκη να γίνεται συνεχόμενη παρακολούθηση του συστήματος.

Όσον αφορά τις γλώσσες προγραμματισμού στις οποίες βασίζονται οι εξομοιωτές, όλα τα λογισμικά βασίστηκαν σε γλώσσες που είναι ευρέως γνωστές και διαδεδομένες και υποστηρίζονται από μεγάλες κοινότητες. Αυτό το γεγονός αποτελεί σημαντική παράμετρος, γιατί δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες, ερευνητές και μηχανικούς ηλεκτρονικών υπολογιστών και πληροφορικής να επεκτείνουν τις δυνατότητες του κάθε εξομοιωτή δημιουργώντας διάφορα modules, τα οποία για παράδειγμα να υλοποιούν ένα διαφορετικό πρωτόκολλο. Ο εξομοιωτής Physimulator είναι υλοποιημένος στην γλώσσα Matlab, το FLoRa σε C++ , το module ns-3 σε C++ και python, το LoRaSim σε python.

Όλα τα προγράμματα είναι δωρεάν (όσον αφορά το κόστος). Ο Physimulator και το ns-3 module είναι ανοιχτού κώδικα, ενώ το FLoRa, είναι δωρεάν για μελέτη και έρευνα. Ο τύπος άδειας του LoRaSim είναι Creative Commons Attribution 4.0, που σημαίνει πως μπορεί ελεύθερα να χρησιμοποιηθεί και να αλλαχθεί ο κώδικας, δίνοντας την κατάλληλη αναφορά στους δημιουργούς του.

Όλοι οι εξομοιωτές τρέχουν σε όλα τα λειτουργικά συστήματα είτε άμεσα είτε έμμεσα. Ο physimulator τρέχει όπου γίνεται να τρέξει το MATLAB. Έτσι τρέχει και στα Windows, Linux και MacOS. Το LoRaSim τρέχει και αυτό όπου μπορεί να τρέξει η python, έτσι και αυτό τρέχει σε Windows, Linux και MacOS. Το ns-3 module, όπως γνωρίζουμε βασίζεται στον εξομοιωτή ns-3, έτσι τρέχει σε συστήματα linux και MacOS άμεσα, ενώ για να εργαστεί κάποιος στο λειτουργικό Windows θα πρέπει να χρησιμοποιήσει κάποια εικονική μηχανή. Τέλος και ο εξομοιωτής FLoRa τρέχει σε όλα τα λειτουργικά συστήματα.

Το LoRa είναι μια τεχνολογία όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση IoT εφαρμογών που στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας των συσκευών. Έτσι, η μελέτη της κατανάλωσης ενέργειας μέσω των στατιστικών μετρικών της κατανάλωσης ενέργειας είναι σημαντικό συστατικό στοιχείο ενός εξομοιωτή. Από τους διαθέσιμους εξομοιωτές που μελετήθηκαν μόνο το module ns3 και το FLoRa υποστηρίζουν την συλλογή στατιστικών κατανάλωσης ενέργειας.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την σύγκριση λογισμικών είναι η υποστήριξη που παρέχουν στους χρήστες. Έτσι, όλοι οι εξομοιωτές έχουν δημοσιεύσεις, οι physimulator και lorasim έχουν από δύο δημοσιεύσεις ενώ το FLoRa και το module του ns-3 έχουν από μία δημοσίευση. Όλοι οι εξομοιωτές εκτός του ns-3 module δεν έχουν και ιστοσελίδα όπου παρέχονται οι οδηγίες για την απόκτηση του λογισμικού καθώς και οδηγίες για την εγκατάσταση και χρήση των εργαλείων. Για την περίπτωση του ns-3 module η λήψη του γίνεται μέσω του Github, όμως υπάρχει κάποια έλλειψη όσον αφορά τις οδηγίες εγκατάστασης και χρήσης του. Όμως για τον ns-3 εξομοιωτή επειδή είναι αρκετά δημοφιλής και ανοικτού κώδικα, υπάρχει ολόκληρη κοινότητα που την υποστηρίζει.

Όσον αφορά την υποστήριξη από την κοινότητα, τα εργαλεία FLoRa και το Ns-3 module, έχουν πιο εκτεταμένη υποστήριξη καθώς όπως έχουμε αναφέρει βασίζονται στο OMNeT++ και Ns3 αντίστοιχα που χαίρουν ευρείας χρήσης. Το γεγονός ότι το ns3 είναι ανοικτού κώδικα σημαίνει πως υπάρχουν πολλοί χρήστες που βρίσκουν και επιδιορθώνουν πολλά σφάλματα γρήγορα και άμεσα. Έτσι σύμφωνα με τα στατιστικά [29], μια αναζήτηση στο Google Scholar “ns-3 simulator” μέχρι το 2017 χωρίς τις πατέντες και τις αναφορές, επιστρέφει πάνω από 2000 συνδέσμους. Ακόμη, υπάρχουν πάνω από 145 αναφορές στο ns-3 στην βιβλιοθήκη της IEEE και 2579 αναφορές στην βιβλιοθήκη της ACM το 2017. Παρομοίως, το OMNeT++ έχει και αυτό μια μεγάλη κοινότητα η οποία μάλιστα έχουν ήδη μέχρι και το 2018 διοργανώσει διάφορες συγκεντρώσεις της κοινότητας. Συνεπώς, αν

συγκρίνουμε τους εξομοιωτές έχοντας ως κριτήριο την υποστήριξη της κοινότητας τα δύο αυτά λογισμικά έχουν την μεγαλύτερη κοινότητα που διοργανώνει διάφορα συνέδρια για την εξέλιξη και την πορεία τους.

Εν κατακλείδι, στα πλαίσια της ευκολίας χρήσης ενός εργαλείου μελετήθηκε και το γραφικό περιβάλλον που μπορεί να προσφέρεται στον χρήστη. Το εργαλείο FLoRa έχει το καλύτερο γραφικό περιβάλλον για την υλοποίηση των σεναρίων. Το FLoRa βασίζεται στο OMNeT++ και στο INET προσφέρει ένα IDE το οποίο είναι βασισμένο στο ECLIPSE, και δίνει αρκετά εύχρηστες αναπαραστάσεις, όπως γραφική αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου. Οι εξομοιωτές LoRasim και physimulator, δεν χειρίζονται μέσω κάποιου GUI, αλλά οι αλλαγές πρέπει να γίνονται κατευθείαν με μετατροπή του κώδικα. Στα αποτελέσματα που επιστρέφονται στον χρήστη και στις δύο περιπτώσεις επιστρέφονται κάποιες γραφικές παραστάσεις, ενώ στην περίπτωση του LoRasim γίνεται εξαγωγή ενός αρχείου .dat, όπου υπάρχουν τα διάφορα δεδομένα για το δίκτυο. Το ns3 module έχει γραφικό περιβάλλον το οποίο παρέχεται μέσω του NetAnim.

### 5.3 Εκτέλεση σεναρίου προσομοίωσης σε FLoRa

Έπειτα από ενδελεχή και σε βάθος σύγκριση των διαθέσιμων εξομοιωτών επιλέχτηκε ως καταλληλότερο το εργαλείο FLoRa. Ο κύριος λόγος για τον οποίο έγινε αυτή η επιλογή είναι η end-to-end δυνατότητα εξομοίωσης, και επιπλέον η λεπτομερής περιγραφή όλης της στοίβας του LoRa. Με άλλα λόγια, εξομοιώνονται αδιάσπαστα το φυσικό επίπεδο, το MAC επίπεδο, καθώς και το επίπεδο εφαρμογής. Ακόμη, το γεγονός ότι προσφέρει ένα πλούσιο γραφικό περιβάλλον και δίνει στοιχεία της κατανάλωσης ενέργειας τα οποία στην συνέχεια μπορούν να επεξεργαστούν με άλλες γλώσσες προγραμματισμού ανάλυσης δεδομένων όπως για παράδειγμα βιβλιοθήκες της python (pandas) για ανάλυση δεδομένων ή η γλώσσα προγραμματισμού R, το καθιστά ιδανικό εργαλείο.

#### 5.3.1 Περιγραφή της διάρθρωσης του εξομοιωτή FLoRa

Το FLoRa βασίζεται σε δύο διαδεδομένα στην επιστημονική κοινότητα εργαλεία το Omnet++ και το INET. Το FLoRa χρησιμοποιεί την βιβλιοθήκη INET για να εξομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια και πιστότητα τα κομμάτια της αρχιτεκτονικής τα οποία δεν είναι υλοποιημένα στην πραγματικότητα με χρήση LoRa, και επεκτείνει κλάσεις της INET για να υλοποιήσει τα διάφορα επίπεδα του LoRa.

Το FloRa είναι δομημένο βάση του Omnet ++, έτσι υπάρχει ένα αρχείο τύπου .ini, στο οποίο δίνονται αρχικές τιμές για την εξομοίωση. Εν προκειμένω μερικές μεταβλητές που μπορεί να είναι, είναι το πλήθος των τελικών κόμβων, το πλήθος των πυλών η διάρκεια της προσομοίωσης κτλ. Ακόμη, γίνεται περιγραφή της τοπολογίας με αρχεία τύπου .ned. αυτά τα αρχεία περιγράφουν την τοπολογία σε διάφορα επίπεδα, και έτσι κάθε στοιχείο της τοπολογίας μπορεί να περιέχει υπο-τοπολογίες. Στο υψηλότερο επίπεδο θεώρησης τα στοιχεία που περιγράφονται είναι:

- **loraNodes** : είναι οι τελικές συσκευές LoRa και το πλήθος του ρυθμίζεται στο αρχείο .ini.

- **loRaGW:** είναι οι πύλες LoRa και το πλήθος ορίζεται πάλι από τον χρήστη
- **LoRaMedium:** ορίζονται μια σειρά από στοιχεία του μέσου μετάδοσης
- **networkServer:** είναι ο εξυπηρετητής δικτύου
- **configurator:** βάση αυτού δίνονται οι διευθύνσεις του κάθε τελικού κόμβου. Βασίζεται στη βιβλιοθήκη INET.
- **internetCloud:** προσομοιώνει το κομμάτι όπου οι συσκευές δεν ανήκουν στο ίδιο δίκτυο και θα πρέπει για να φθάσουν στον εξυπηρετητή δικτύου μέσω του διαδικτύου.
- **gwRouter:** δρομολογητής που δρομολογεί τα πακέτα από τις πύλες LoRa στο διαδίκτυο.

Ο πηγαίος κώδικας χωρίζεται στους εξής φακέλους *LoRa*, *LoRaApp*, *LoRaEnergyModules*, *LoRaNode*, *LoRaPhy*. Το κάθε ένα περιέχει κάποιο από τα επίπεδα της στοίβας του LoRa και μετρητές κατανάλωσης της ενέργειας.

- *LoraNode*: σε αυτό τον φάκελο υπάρχουν δύο αρχεία .ned, το *LoRaQW.ned*, *LoRaNode.ned*, στα οποία περιγράφονται οι τοπολογίες των πυλών και των τελικών κόμβων. Για τους τελικούς κόμβους ορίζεται το μοντέλο κίνησης τους, που στο δικό μας παράδειγμα θα είναι στατικοί οι κόμβοι και ορίζεται ως εξής: *mobility: StationaryMobility*. Ακόμη, φαίνονται και τα επίπεδα της στοίβας του LoRa και οι συνδέσεις μεταξύ των επιπέδων. Κατά παρόμοιο τρόπο περιγράφονται και τα χαρακτηριστικά των πυλών, ορίζεται το μοντέλο κίνησης που είναι στατικό, θέτονται οι τρόποι προώθησης των πακέτων στα διάφορα επίπεδα κλπ.
- *LoRaPhy*: σε αυτόν τον φάκελο υπάρχουν όλα τα αρχεία που περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια το φυσικό επίπεδο τους LoRa. Ακόμη, υλοποιείται ο πομπός ο δέκτης, ο τρόπος μετάδοσης, το μέσο μετάδοσης και το αναλογικό μοντέλο. Μεταξύ άλλων, δίνονται μια σειρά από μοντέλα για το Path Loss.
  - *Oulu path loss*: μοντέλο απώλειας διάδοσης της φινλανδικής πόλης Oulu.
  - *Hata-Okumura*: μοντέλο απώλειας διάδοσης
- *LoRa*: εδώ υπάρχουν οι υλοποιήσεις για το επίπεδο MAC, για την λειτουργικότητα του εξυπηρετητή δικτύου, της προώθησης των πακέτων στο επίπεδο MAC κ.α
- *LoRaApp*: στον φάκελο αυτό υπάρχουν τα αρχεία που περιγράφουν το επίπεδο εφαρμογής της στοίβας LoRa και περιγράφει το πακέτο επιπέδου εφαρμογής LoRa.
- *LoRaEnergyModules*: σε αυτό το φάκελο υπάρχει το μοντέλο κατανάλωσης της μπαταρίας και παρακάτω φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού του.

<Υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας σε κάθε κατάσταση>

```
receiverIdlePowerConsumption = mW(supplyVoltage*idleSupplyCurrent);
```

```
transmitterIdlePowerConsumption = mW(supplyVoltage*idleSupplyCurrent);
```

```
receiverReceivingPowerConsumption = mW(supplyVoltage*receiverReceivingSupplyCurrent);
```

```
receiverBusyPowerConsumption = mW(supplyVoltage*receiverBusySupplyCurrent);
```

## 5.3.2 Περιγραφή εξομοίωσης

### 5.3.2.1 Πρώτο παράδειγμα εξομοίωσης

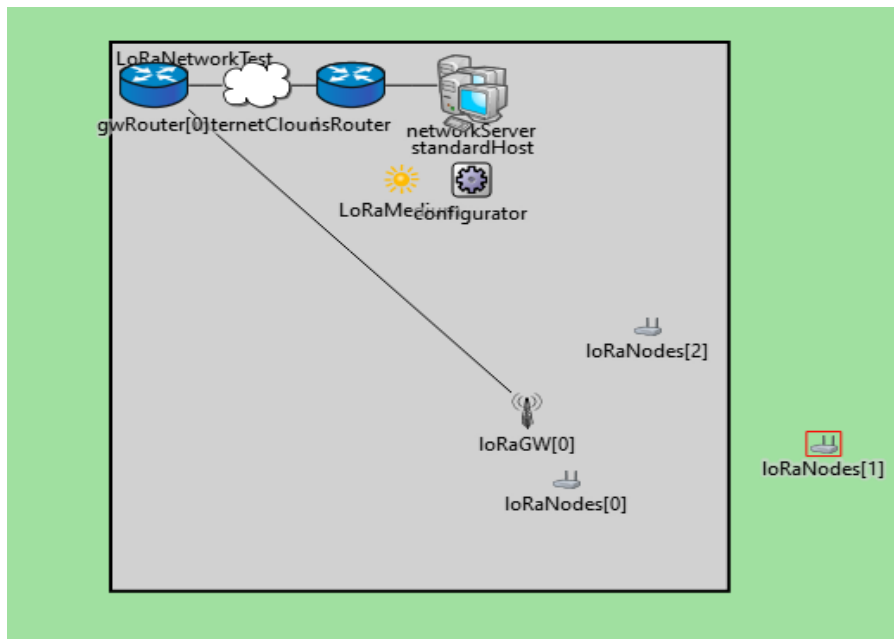
Παρακάτω θα τρέξουμε ένα σενάριο δικτύου LoRa με βασικά γενικά χαρακτηριστικά αυτά που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

*Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά εξομοίωσης*

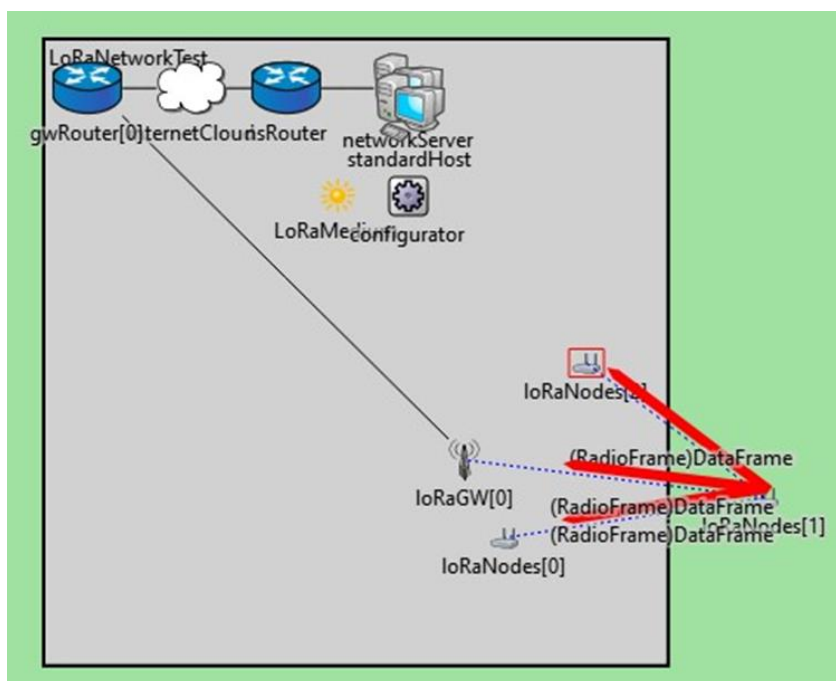
Χαρακτηριστικά	Τιμές
Τελικοί κόμβοι	3
Πλήθος πυλών	1
Χρήση ADR	false
Μοντέλο απώλειας διαδρομής	Normal Shadowing
Τάση	3,3
Ένταση ρεύματος δέκτη	9,7
Ρεύμα στην κατάσταση idle	0,0001
Μοντέλο κίνησης	Στατικό

Όπως έχει εξηγηθεί και πιο πάνω η αρχικοποίηση των διάφορων παραμέτρων για την εξομοίωση του δικτύου στο εργαλείο FLoRa γίνεται σε αρχείο τύπου .ini. Πιο αναλυτικά φαίνεται η αρχικοποίηση της εξομοίωσης του σεναρίου μας στον αντίστοιχο κώδικα .ini που παρατίθεται στο παράρτημα Α.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η τοπολογία του εξεταζόμενου δικτύου. Το δίκτυο αποτελείται από τρεις συσκευές που είναι στατικές και στέλνουν μηνύματα προς τον εξυπηρετητή δικτύου. Με κόκκινο χρώμα φαίνεται η πορεία των πακέτων. Στην πρώτη φωτογραφία φαίνεται η αρχική τοπολογία, ενώ στην δεύτερη φωτογραφία φαίνεται η αποστολή των δεδομένων. Εδώ να υπενθυμίσουμε ότι στο LoRa δίκτυο, όταν μια συσκευή στέλνει δεδομένα τα στέλνει με μέθοδο broadcast, δηλαδή στέλνει παντού, και τα δεδομένα είναι κρυπτογραφημένα.



Εικόνα 28 Τοπολογία δικτύου LoRa



Εικόνα 29 Κίνηση πακέτων στο δίκτυο (με κόκκινο χρώμα)

Μετά το πέρας της εξομοίωσης φαίνονται μερικά στατιστικά όπως το πλήθος των μεταδόσεων κλπ.

<Στατιστικά αποτελέσματα μετά από την εκτέλεση της προσομοίωσης>  
Radio signal arrival computation count = 41235  
Transmission count = 13745  
Radio frame send count = 41235

*Reception computation count = 41235*  
*Interference computation count = 56985*  
*Reception decision computation count = 14131*  
*Listening decision computation count = 28706*  
*Reception cache hit = 65.0299 %*  
*Interference cache hit = 56.8031 %*  
*Noise cache hit = 0 %*  
*SNIR cache hit = 23.9533 %*  
*Reception decision cache hit = 23.9533 %*  
*Reception result cache hit = 0 %*

Επιπρόσθετα, είναι γεγονός ότι το εργαλείο FLoRa δίνει υψηλού επιπέδου στατιστικά δεδομένα. Για παράδειγμα παραθέτουμε την κατανάλωση ενέργειας των κόμβων.

LoRaNetworkTest.LoRaNodes[0].LoRaNic.radio.energyConsumer	
powerConsumption:vector (vector)	0.00889910072072765 (56332)
Module name	LoRaNetworkTest.LoRaNodes[0].Lo...
Type	double
Count	56332
Mean	0.00889910072072765
StdDev	0.02086224411884469
Min	0.0
Max	0.0792
Start event number	61523
End event number	431222
Start time	86409.87285522
End time	604752.84848837593
Interpolationmode	sample-hold
Source	powerConsumptionChanged
Title	Power consumption, vector

*Εικόνα 30 Τιμές ενέργειας για τον κόμβο 0*

LoRaNetworkTest.LoRaNodes[1].LoRaNic.radio.energyConsumer	
powerConsumption:vector (vector)	0.009105092355459934 (57008)
Module name	LoRaNetworkTest.LoRaNodes[1].Lo...
Type	double
Count	57008
Mean	0.009105092355459934
StdDev	0.021547496678901424
Min	0.0
Max	0.0825
Start event number	61570
End event number	431237
Start time	86423.31976363723
End time	604759.03224407087
Interpolationmode	sample-hold
Source	powerConsumptionChanged
Title	Power consumption, vector

*Εικόνα 31 Τιμές της ενέργειας για τον κόμβο 1*

LoRaNetworkTest.LoRaNodes[1].LoRaNic.radio.energyConsumer	
powerConsumption:vector (vector)	0.009105092355459934 (57008)
Module name	LoRaNetworkTest.LoRaNodes[1].Lo...
Type	double
Count	57008
Mean	0.009105092355459934
StdDev	0.021547496678901424
Min	0.0
Max	0.0825
Start event number	61570
End event number	431237
Start time	86423.31976363723
End time	604759.03224407087
Interpolationmode	sample-hold
Source	powerConsumptionChanged
Title	Power consumption, vector

Εικόνα 32 Τιμές ενέργειας για τον κόμβο2

Τέλος παρατίθενται και οι τιμές για τα Spreading Factors και Transmission Power για κάθε κόμβο στον επόμενο πίνακα.

Μεταβλητές	Τιμές 0	Τιμές 1	Τιμές 2
<b>Spreading Factor</b>	10	10	7
<b>Transmission Power</b>	2	5	2

Ο λόγος για τον οποίο παρατηρούμε ότι οι τιμές αυτές για κάθε κόμβο παραμένουν σταθερές είναι, γιατί οι κόμβοι δεν κινούνται αλλά παραμένουν στατικά, σε όλη την διάρκεια της εξομοίωσης. Ακόμη, έχει γίνει και καταγραφή της τιμής του RSSI που λαμβάνει η πύλη από κάθε τελικό κόμβο. Η αναλυτική σύγκριση των τιμών του RSSI μεταξύ των σεναρίων θα γίνει αφού γίνει η παρουσίαση όλων των σεναρίων που εκτελέστηκαν.

### 5.3.2.2 Δεύτερο παράδειγμα εξομοίωσης

Για το δεύτερο παράδειγμα παραμένουν σχεδόν όλα ίδια με το προηγούμενο σενάριο, πλην του μοντέλου κίνησης. Ο ορισμός του μοντέλου κίνησης γίνεται με χρήση της βιβλιοθήκης INET. Η βιβλιοθήκη αυτή δίνει μια ευρεία γκάμα από επιλογές, καθώς προκειμένου να προσομοιωθούν τα ad-hoc ασύρματα δίκτυα, κινητά δίκτυα, και στην δικιά μας περίπτωση LPWAN ασύρματα δίκτυα, είναι σημαντικό να μοντελοποιηθεί η κίνηση των κόμβων των κινητών δικτύων. Η ληφθείσα ισχύς σήματος, η παρεμβολή σήματος και η κατοχή καναλιού εξαρτώνται από τις αποστάσεις μεταξύ κόμβων. Τα επιλεγμένα μοντέλα κινητικότητας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (π.χ. μέσω ρυθμών απώλειας πακέτων). Ένα μοντέλο κινητικότητας περιγράφει τη θέση και τον προσανατολισμό με την πάροδο του χρόνου σε ένα τρισδιάστατο ευκλείδειο σκύστημα συντεταγμένων. Οι βασικές παράμετροι που δέχονται αυτά τα μοντέλα ως είσοδο είναι η θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση καθώς και δεδομένων γωνιακής θέσης, γωνιακής ταχύτητας και γωνιακής επιτάχυνσης, στοιχεία που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης.



Στο INET, ένα μοντέλο κίνησης είναι συνήθως ένα απλό κομμάτι κώδικα στο OMNeT ++ που υλοποιεί την κίνηση ως αλγόριθμος γραμμένος στην γλώσσα προγραμματισμού C ++. Παρόλο που τα περισσότερα μοντέλα έχουν μερικές κοινές παραμέτρους (π.χ. για την αρχική τοποθέτηση), έρχονται πάντοτε με το δικό τους σύνολο παραμέτρων. Ορισμένα μοντέλα υποστηρίζουν τη γεωγραφική τοποθέτηση για να διευκολύνουν τη διαμόρφωση σεναρίων που βασίζονται σε γεωγραφικές τοποθεσίες σε χάρτη. Το INET έχει μοντέλα κίνησης που διαφοροποιούνται και βάση της συσχέτισης των κόμβων μεταξύ τους, όπως μοντέλα κίνησης που δεν σχετίζονται από τους υπόλοιπους κόμβους και σε άλλα που ομάδες κόμβων κινούνται βάση των άλλων κόμβων. Τα μοντέλα κίνησης που περιέχονται στην βιβλιοθήκη INET μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν ως ιχνογραφικά, ντετερμινιστικά, στοχαστικά και συνδυαστικά μοντέλα. Για να ορίσουμε το μοντέλο κίνησης ενός κόμβου, το θέτουμε ως ένα υπο-στοιχείο του κόμβου.

Παρατίθενται μερικά παραδείγματα από τα μοντέλα κίνησης που υπάρχουν.

1. Στατικά:
  - a. [StationaryMobility](#) : προσφέρει δυνατότητα τυχαίας τοποθέτησης ή και αιτιοκρατικής.
  - b. [StaticGridMobility](#): θέτει διάφορα μοντέλα κίνησης σε ένα πλέγμα.
  - c. [StaticConcentricMobility](#): θέτει διάφορα μοντέλα σε ένα κύκλους.
2. Ντετερμινιστικά:
  - a. [LinearMobility](#) : κινείται γραμμικά με μια σταθερή ταχύτητα ή επιτάχυνση
  - b. [CircleMobility](#) : κινείται γύρω από έναν κύκλο με σταθερή ταχύτητα
  - c. [RectangleMobility](#) : κινείται γύρω από ένα ορθογώνιο με σταθερή ταχύτητα.
  - d. [TractorMobility](#) : κινείται σαν τρακτέρ σε χωράφι με κάποιες γραμμές, δηλαδή κάνει μια ευθεία μετά στρίβει κάθετα μετά αντίθετα από την πορεία που είχε πιο πριν.
  - e. [VehicleMobility](#) : κινείται παρόμοια με αυτοκίνητο σε έναν δρόμο με στροφές.
3. Στοχαστικά:
  - a. [RandomWaypointMobility](#) : κινείται σε τυχαίο προορισμό με τυχαία ταχύτητα.
  - b. [GaussMarkovMobility](#) : χρησιμοποιεί παράμετρο που αλλάζει το κατά πόσο «τυχαία» θα είναι η ταχύτητα ανάμεσα από γραμμική σε κίνηση Brown.
  - c. [MassMobility](#) : κινείται σαν σώμα με αδράνεια και ορμή
  - d. [ChiangMobility](#) : χρησιμοποιεί πιθανοτικό μητρώο μετάβασης για να επιτευχθεί η αλλαγή της κατάστασης της κίνησης.
4. Συνδυαστικά:
  - a. [SuperpositioningMobility](#) : το μοντέλο αυτό συνδυάζει όλα τα άλλα μοντέλα με αθροιστικό τρόπο.
  - b. [AttachedMobility](#) : το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί διάφορα μοντέλα τα οποία τα σχετίζει μεταξύ τους με μια μετατόπιση [30].

Μετά από αυτή την συνοπτική περιγραφή μερικών από τα πιο σημαντικά μοντέλα κίνησης που είναι διαθέσιμα, κάνοντας το INET ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, θα γίνει περιγραφή της αλλαγής του μοντέλου που έγινε στην παρούσα εργασία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η επιλογή του μοντέλου είναι το ντετερμινιστικό μοντέλο [LinearMobility](#). Για να γίνει αυτό

χρειάστηκε να οριστεί στο .ned αρχείο IoRaNode, όπως φαίνεται παρακάτω. Επίσης στην δικιά μας περίπτωση ορίστηκε στο .ini αρχείο η ταχύτητα στα 5mps.

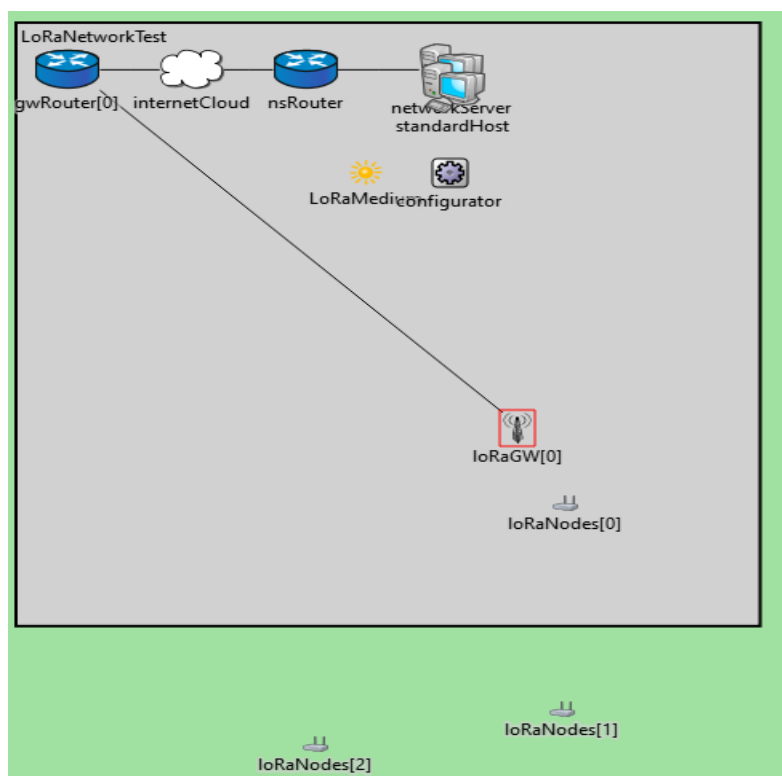
```
<Μοντέλο κίνησης σε LinearMobility στο αρχείο LoraNode.ned>

import inet.mobility.single.LinearMobility
...

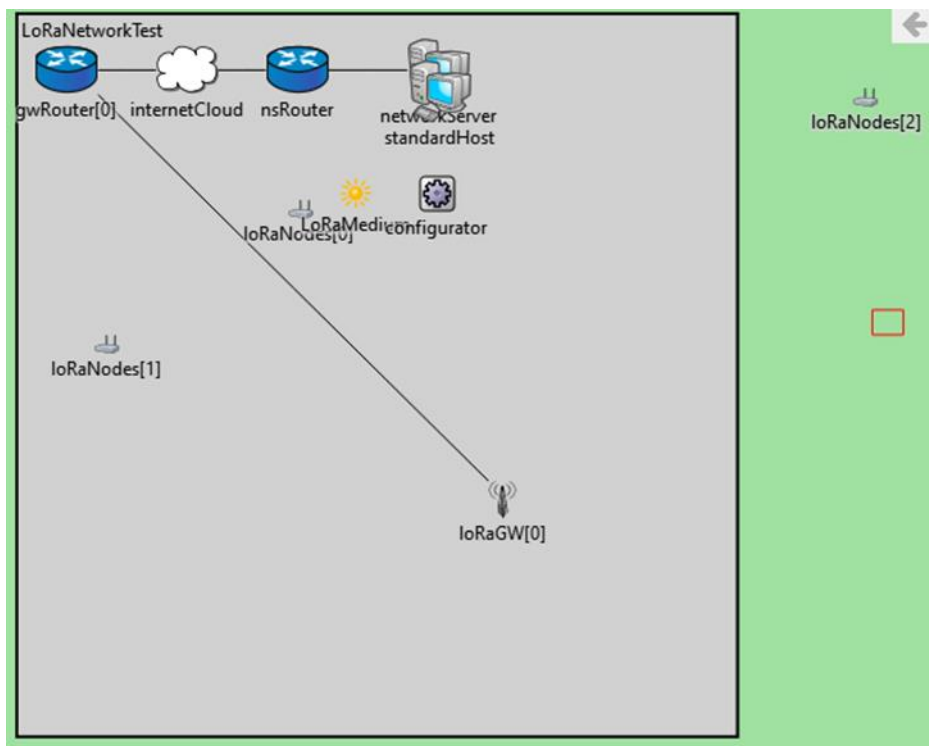
mobility: LinearMobility {
    @display("p=24,88");
}

```

Εδώ παρουσιάζεται η αρχική τοπολογία και η τελική. Στο ενδιάμεσο διάστημα τα LoRaNodes φαίνονται να κινούνται και να στέλνουν μηνύματα μετά από κάποια μετατόπιση.



Εικόνα 33 Αρχική θέση των τελικών κόμβων

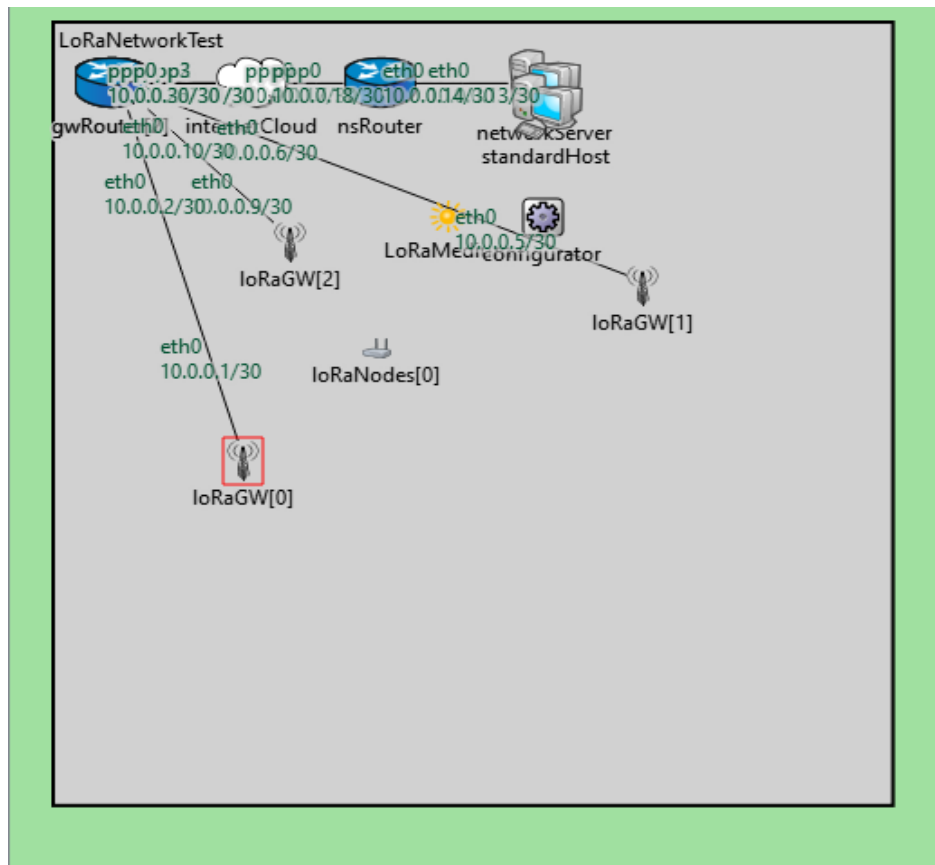


Εικόνα 34 Τελική τοπολογία: φαίνεται ότι οι κόμβοι καταλήγουν σε διαφορετικά σημεία από εκείνα που ξεκίνησαν

### 5.3.2.3 Τρίτο παράδειγμα εξομοίωσης

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα εξομοίωσης το οποίο αποτελεί ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα για εφαρμογές εύρεσης. Στην διαδικασία εύρεσης ακολουθείται η διαδικασία τριγωνοποίησης, που είναι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται η εκτίμηση της θέσης μια θέσης ενός σημείο με την σχεδίαση τριγώνων. Τα τρίγωνα σχεδιάζονται ως εξής: οι μετρήσεις από των γωνιών των σημάτων που φθάνουν μεταξύ του αντικειμένου και του σταθμού λήψης χρησιμοποιούνται για την σχεδίαση των γραμμών και η εκτίμηση γίνεται εκεί που τέμνονται αυτές οι γραμμές. Για να γίνει σωστή εκτίμηση χρειάζονται τουλάχιστον δύο σταθμοί λήψης, για αυτό εμείς σε αυτό το παράδειγμα εξομοίωσης θα το εκτελέσουμε με τρεις πύλες και έναν κόμβο. Επιπλέον, για την εκτίμηση της απόστασης χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως το RSSI, TOA, TDOA, TOF. Η μέθοδος με χρήση RSSI είναι από τις πιο συνηθισμένες μέθοδοι για αυτό και στις προσομοιώσεις έχουμε κρατήσει τις τιμές RSSI που λαμβάνουν οι σταθμοί λήψης. Βασίζεται στην μέτρηση της ισχύς που υπάρχει σε ένα σήμα μεταξύ του σταθμού λήψης και τον τελικό κόμβο. Οι μετρήσεις RSSI στους σταθμούς λήψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των αντίστοιχων αποστάσεων από τους σταθμούς λήψης με τη χρήση μοντέλων απώλειας διαδρομής (path loss) [31].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τοπολογία που εξετάζουμε.



Εικόνα 35 Τοπολογία όπου υπάρχουν 3 πύλες και ένας τελικός κόμβος

### 5.3.3 Σύγκριση τιμών RSSI κάθε σεναρίου εξομοίωσης

Εδώ θα παραθέσουμε τα στοιχεία για το RSSI κάθε σεναρίου και θα δοθεί η εξήγηση των αποτελεσμάτων. Επειδή η τοπολογία του κάθε σεναρίου είναι συγκεκριμένη δε θα παραθέσουμε όλα τα στοιχεία κάθε βήματος, καθώς δημιουργείται ένα τεράστιο πλήθος εγγραφών. Θα δοθούν κάποια στοιχεία γιατί όπως θα εξηγήσουμε κάποια στοιχεία επαναλαμβάνονται. Καταρχάς θα εξηγήσουμε πως παίρνουμε τα αποτελέσματα αυτά. Για την καταγραφή των δεδομένων αυτών αλλάζουμε τον κώδικα στο αρχείο *NetworkServer.cc*. Επειδή την εγγραφή των στοιχείων την κάνουμε σε .txt αρχείο, πρώτα κάνουμε include τις απαραίτητες βιβλιοθήκες και έπειτα στην συνάρτηση *addPktToProcessingTable*.

```
<εισαγωγή include και με κίτρινο οι αλλαγές στην συνάρτηση addPktToProcessingTable >
.....
#include <fstream>
#include <iostream>
.....
void NetworkServerApp::addPktToProcessingTable(LoRaMacFrame* pkt)
{
    bool packetExists = false;
    UDPDataIndication *cInfo = check_and_cast<UDPDataIndication*>(pkt->getControlInfo());
```

```
for(uint i=0;i<receivedPackets.size();i++)
{
    if(receivedPackets[i].rcvdPacket->getTransmitterAddress() == pkt->getTransmitterAddress() &&
receivedPackets[i].rcvdPacket->getSequenceNumber() == pkt->getSequenceNumber())
    {
        packetExists = true;
        receivedPackets[i].possibleGateways.emplace_back(cInfo->getSrcAddr(), math::fraction2dB(pkt-
>getSNIR()), pkt->getRSSI());
        //myfile<<cInfo->getSrcAddr()<<" "<<math::fraction2dB(pkt->getSNIR())<<" "<<pkt-
>getRSSI()<<endl;
        myfile<<cInfo->getSrcAddr()<<" ";
        myfile<<pkt->getTransmitterAddress()<<" ";
        myfile<<pkt->getRSSI()<<" ";

        delete pkt;
    }
}
if(packetExists == false)
{
    receivedPacket rcvPkt;
    rcvPkt.rcvdPacket = pkt;
    rcvPkt.endOfWaiting = new cMessage("endOfWaitingWindow");
    rcvPkt.endOfWaiting->setContextPointer(pkt);
    rcvPkt.possibleGateways.emplace_back(cInfo->getSrcAddr(), math::fraction2dB(pkt->getSNIR()),
pkt->getRSSI());
    scheduleAt(simTime() + 1.2, rcvPkt.endOfWaiting);
    receivedPackets.push_back(rcvPkt);
    myfile<<cInfo->getSrcAddr()<<" ";
    myfile<<pkt->getTransmitterAddress()<<" ";
    myfile<<pkt->getRSSI()<<" ";
}
myfile<<endl;
}
```

Στον πίνακα έχουμε τρεις στήλες. Η πρώτη στη θα περιγράφει την διεύθυνση της πύλης, η δεύτερη στήλη την διεύθυνση του LoRa κόμβου και στην τρίτη στήλη. Παρατηρούμε ότι κάθε κόμβος έχει την ίδια τιμή RSSI σε όλα την διάρκεια της εξομοίωσης. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό είναι ότι δεν αλλάζουν θέση οι κόμβοι, και το RSSI εξαρτάται άμεσα από την απόσταση του πομπού και του δέκτη.



σε αντίθεση με πριν που ήταν σε σταθερό σημείο, τώρα κάθε κόμβος κινείται και κάθε πακέτο στέλνεται από διαφορετική τοποθεσία από ότι ήταν στην προηγούμενη αποστολή δεδομένων.

*Πίνακας 8 Τιμές RSSI για 3 κόμβους που κινούνται βάση του LinearMobility και μια πύλη*

<b>Διεύθυνση πύλης</b>	<b>Διεύθυνση τελικού LoRa κόμβου</b>	<b>Τιμή RSSI</b>
10.0.0.1	00-00-00-02	-121.155
10.0.0.1	00-00-00-03	-128.748
10.0.0.1	00-00-00-01	-118.166
10.0.0.1	00-00-00-02	-126.991
10.0.0.1	00-00-00-03	-116.327
10.0.0.1	00-00-00-01	-132.954
10.0.0.1	00-00-00-02	-133.915
10.0.0.1	00-00-00-03	-131.739
10.0.0.1	00-00-00-01	-130.877
10.0.0.1	00-00-00-03	-127.744
10.0.0.1	00-00-00-02	-135.432
10.0.0.1	00-00-00-03	-131.511
10.0.0.1	00-00-00-01	-132.739
10.0.0.1	00-00-00-01	-133.621
10.0.0.1	00-00-00-03	-122.592
10.0.0.1	00-00-00-02	-126.05
10.0.0.1	00-00-00-01	-134.277
10.0.0.1	00-00-00-03	-129.969
10.0.0.1	00-00-00-01	-130.718
10.0.0.1	00-00-00-03	-127.573

Στην 3<sup>η</sup> εξομοίωση έχουμε τρεις πύλες. Οι διευθύνσεις αυτών είναι 10.0.0.1, 10.0.0.5, 10.0.0.9. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο το LoRa κάνει broadcast όταν μεταδίδει κάποιο πακέτο το οποίο όμως είναι κρυπτογραφημένο. Έτσι στην προσομοίωση μας κάθε φορά που ο τελικός κόμβος με διεύθυνση 00-00-00-01 στέλνει ένα πακέτο το ακούνε όλες οι πύλες.

*Πίνακας 9 Σενάριο εξομοίωσης τριών πυλών με έναν στατικό κόμβο*

Διεύθυνση πύλης	Διεύθυνση τελικού LoRa κόμβου	Τιμή RSSI
10.0.0.1	00-00-00-01	-124.267
10.0.0.5	00-00-00-01	-127.637
10.0.0.9	00-00-00-01	-123.5
10.0.0.1	00-00-00-01	-121.713
10.0.0.5	00-00-00-01	-120.523
10.0.0.9	00-00-00-01	-117.72
10.0.0.1	00-00-00-01	-123.108
10.0.0.5	00-00-00-01	-130.481
10.0.0.9	00-00-00-01	-119.403
10.0.0.1	00-00-00-01	-120.95
10.0.0.5	00-00-00-01	-134.465
10.0.0.9	00-00-00-01	-122.882
10.0.0.1	00-00-00-01	-118.77
10.0.0.5	00-00-00-01	-125.416
10.0.0.9	00-00-00-01	-119.787
10.0.0.1	00-00-00-01	-128.969
10.0.0.5	00-00-00-01	-123.048
10.0.0.9	00-00-00-01	-122.064
10.0.0.1	00-00-00-01	-124.301
10.0.0.5	00-00-00-01	-124.752





# 6

## Συμπεράσματα, Προοπτικές και μελλοντική εργασία

### 6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Το IoT καθημερινά τείνει να εγκαθιδρυθεί στην ζωή μας όλο και περισσότερο. Είναι αναμφίβολο το γεγονός ότι με την συνεχιζόμενη ανάπτυξη της τεχνολογίας θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην ζωή μας, καθώς θα εισαχθούν σε όλες τις πτυχές της. Η δυνατότητα διασύνδεσης των συσκευών που βρίσκονται σε αποστάσεις μικρότερες ή ακόμα και μεγάλες όπως μελετήσαμε στην παρούσα εργασία, γίνεται αντιληπτό ότι το πλήθος των εφαρμογών μπορεί να ποικίλουν. Με άλλα λόγια ο τομέας αυτός, θα έχει τεράστιο ενδιαφέρον για το μέλλον και αποτελεί ένα από τα «καυτά» κομμάτια της επιστήμης και της τεχνολογίας των υπολογιστών μαζί με την μηχανική μάθηση, ανάλυση μεγάλων δεδομένων, κρυπτονομίσματα και υπολογιστική νέφους. Δύο υποψήφιες επιλογές που θα μας απασχολήσουν στο μέλλον για την μεγάλης απόστασης μικρής κατανάλωσης δίκτυα είναι το LoRa και το NB-IoT. Το LoRa ήδη έχει αρχίσει να κερδίζει μεγάλο μερίδιο αγοράς λόγω και του μικρότερου οικονομικού κόστους σε σχέση με το NB-IoT, ωστόσο το NB-IoT που ανήκει στην 3GPP, θα έχει και αυτό μια μεγαλύτερη άνθηση, καθώς θα ενσωματωθεί στο ερχόμενο 5G. Τα 5G έχουν σκοπό να αλλάξουν τον τρόπο που θα αλληλοεπιδρούμε με την τεχνολογία, όπως και το 4G, έκανε με την έλευσή του, καθώς υπόσχεται θα προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα κλπ.

Έχοντας αυτό στο μυαλό, ότι δηλαδή η σημασία του τομέα του IoT είναι τεράστια, ασχοληθήκαμε μελετώντας μια από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει, και θα πρέπει να ξεπεραστεί, αυτό της κατανάλωσης ενέργειας στις τελικές συσκευές που συνήθως τροφοδοτούνται από μπαταρία. Αρχικά μετά από μια ιστορική αναδρομή για την βαθύτερη κατανόηση του IoT, αναφέρθηκαν κάποιες σημερινές εφαρμογές τους και τις προκλήσεις σε κοινωνικό, οικολογικό και τεχνολογικό επίπεδο που αντιμετωπίζουν. Στην συνέχεια μετά από μια ανασκόπηση στις διαθέσιμες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση των συσκευών σήμερα, όπως το Bluetooth και το WiFi, επικεντρωθήκαμε στα χαρακτηριστικά δύο τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν αρκετά στο μέλλον το LoRa και το NB-IoT. Μετά από σύγκριση των δύο τεχνολογιών ασχοληθήκαμε ενδελεχώς στους διαθέσιμους εξομοιωτές LoRa που είναι διαθέσιμοι στην βιβλιογραφία. Μετά από αναλυτική σύγκρισή τους σε πληθώρα χαρακτηριστικών, δόθηκε αναλυτικό παράδειγμα εξομοίωσης με χρήση του εξομοιωτή FLoRa, που ξεχωρίστηκε από τα υπόλοιπα εργαλεία λόγω των πολύ καλών και πλούσιων χαρακτηριστικών του. Αυτές οι δυνατότητες του εξομοιωτή θα αποτελέσουν θεμέλιο για εκτενέστερη μελέτη αλγορίθμων και μηχανισμών δικτύων IoT που βασίζονται σε LoRa σε μεταγενέστερο χρόνο.

## 6.2 Μελλοντική Εργασία

Όπως έχει τονιστεί επανειλημμένα το IoT αποτελεί ένα από τους τομείς της τεχνολογίας και επιστήμης των υπολογιστών που θα μας απασχολήσει πολύ στο μέλλον. Όπως κάθε τεχνολογία που βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, έτσι και το IoT έχει πληθώρα από ανοικτά ερευνητικά θέματα μπορούμε να καταπιαστούμε. Αρχικά, όπως αναφέρεται στην ενότητα 2, υπάρχουν κάποιες προκλήσεις που θα πρέπει να έχουμε υπόψιν. Ένα από αυτά είναι η δυνατότητα επέκτασης των δικτύων σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχουν πάρα πολλά πρότυπα, πρωτόκολλα και τύποι συσκευών. Ακόμη, θα πρέπει να γίνει μεγάλη προσπάθεια να αντιμετωπίσουμε το θέμα των απορριμμάτων που θα μας απασχολήσει πολύ στο μέλλον ειδικά με την έλευση του 5G, που εκτιμάται ότι οι συνδεδεμένες συσκευές θα είναι πάρα πολλές. Τέλος η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ένα ακόμα, ακανθώδες θέμα στο IoT σήμερα.

Έτσι, η εξοικονόμηση ενέργειας, πέρα από το ίδιο το υλικό των συσκευών και οι μπαταρίες που θα πρέπει να βελτιωθούν, μηχανισμοί και αλγόριθμοι πρέπει να σχεδιαστούν. Ένας κλάδος της επιστήμης των υπολογιστών που υπόσχεται να δώσει μεγάλη ώθηση σε αυτή την κατεύθυνση είναι η μηχανική μάθηση μέσω των δεδομένων που παράγονται από τις συσκευές IoT. Για παράδειγμα η βαθιά μηχανική μάθηση βρίσκει εφαρμογή για τον έλεγχο του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα μπορεί να γίνει χρήση αυτών των τεχνικών στην βελτιστοποίηση, της δρομολόγησης, και την κατανομή δεδομένων σε ένα radio δίκτυο.

Στην βελτιστοποίηση δικτύου, δηλαδή στην διαχείριση των διάφορων πόρων και της ενέργειας του δικτύου με σκοπό την αύξηση της απόδοσης, έχει συμβάλει στην διαχείριση μεταξύ της ζήτησης δεδομένων από τους χρήστες και την χρήση της σύνδεσης σε ασύρματα δίκτυα. Έτσι, με χρήση βαθιάς μάθησης είναι δυνατόν να γίνει πρόβλεψη ποια σύνδεση δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί αρκετά έτσι ώστε να την διακόψει. Επιπλέον, νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στην δρομολόγηση για την εύρεση βέλτιστου μονοπατιού. Για παράδειγμα σε ένα δίκτυο έχειδειχθεί ότι με μεγάλη ακρίβεια μπορεί να βρεθεί το «βέλτιστο» μονοπάτι με μειωμένη όμως καθυστέρηση. Αυτές οι βελτιώσεις υπάρχουν και στην περίπτωση των ad-hoc δικτύων. Ακόμη στην βιβλιογραφία, έχει χρησιμοποιηθεί βαθιά μάθηση για εξοικονόμηση ενέργειας σε κινητά δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, με χρήση μηχανικής μάθησης ανοίγουν και κλείνουν δυναμικά κάποιοι σταθμοί λήψης μιας συγκεκριμένης περιοχής για να εξοικονομήσουν ενέργεια. Επιπλέον, τεχνικές μηχανικής μάθησης έχουν χρησιμοποιηθεί για κατανομή φόρτου σε IoT.

Τέλος, η υπολογιστική νέφος έχει ήδη αρχίσει να ενσωματώνεται στο IoT, όπου μπορεί μέσω αυτού να γίνουν πολλοί δύσκολοι υπολογισμοί, όπως να υλοποιηθούν σε αυτό αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Άρα, η περαιτέρω ενσωμάτωση της υπολογιστικής νέφος θα δώσει μεγάλη ώθηση στο IoT, καθώς όλο και πιο πολύπλοκοι αλγόριθμοι που δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μέχρι στιγμής στο IoT, θα μπορούν πλέον να εκτελούνται.





## A. Παράρτημα : <loraTest.ini>

```
<Αναλυτική περιγραφή των αρχικοποιήσεων>
[General]
network = LoRaNetworkTest
rng-class = "cMersenneTwister"

# network features
**.numberOfGateways = 1
**.loRaGW[0].numUdpApps = 1
**.loRaGW[0].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[0].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[0].packetForwarder.indexNumber = 0

**.loRaGW[1].numUdpApps = 1
**.loRaGW[1].packetForwarder.localPort = 2000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destPort = 1000
**.loRaGW[1].packetForwarder.destAddresses = "networkServer"
**.loRaGW[1].packetForwarder.indexNumber = 1

**.networkServer.numUdpApps = 1
**.networkServer.**.evaluateADRinServer = false
**.networkServer.udpApp[0].typename = "NetworkServerApp"
**.networkServer.udpApp[0].destAddresses = "loRaGW[0]"
**.networkServer.udpApp[0].destPort = 2000
**.networkServer.udpApp[0].localPort = 1000
**.networkServer.udpApp[0].adrMethod = ${"avg"}

**.numberOfNodes = 3
**.numberOfPacketsToSend = 0 #0 means infinite number of packets
sim-time-limit = 7d
warmup-period = 1d
simtime-resolution = -11

**.timeToFirstPacket = exponential(100s)
**.timeToNextPacket = exponential(100s)
**.alohaChannelModel = false

#nodes features
**.loRaNodes[*].**.initFromDisplayString = false
**.loRaNodes[*].**.evaluateADRinNode = false
**.loRaNodes[*].**.initialLoRaSF = intuniform(7,12)
**.loRaNodes[*].**.initialLoRaBW = 125 kHz
**.loRaNodes[*].**.initialLoRaCR = 4
```

```
**loRaNodes[*]**initialLoRaTP = (2dBm + 3dBm*intuniform(0, 4))

# deployment of nodes in a circle with radius=maxGatewayDistance and gateway at gatewayX,gatewayY
**loRaNodes[*].deploymentType = "circle"
**loRaNodes[*].maxGatewayDistance = 120.0
**loRaNodes[*].gatewayX = 240
**loRaNodes[*].gatewayY = 240

# random deployment of nodes in a square square area
**loRaNodes[*]**.initialX = uniform(0m, 480m)
**loRaNodes[*]**.initialY = uniform(0m, 480m)

#gateway features
**LoRaGWNic.radio.iAmGateway = true
**loRaGW[*]**.initFromDisplayString = false
**loRaGW[0]**.initialX = 240m#uniform(0m, 50m)
**loRaGW[0]**.initialY = 240m

#power consumption features
**loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumerType = "LoRaEnergyConsumer"
**loRaNodes[*]**.energySourceModule = "IdealEpEnergyStorage"
**loRaNodes[*].LoRaNic.radio.energyConsumer.configFile = xmldoc("energyConsumptionParameters.xml")

#general features
**sigma = 0
**constraintAreaMinX = 0m
**constraintAreaMinY = 0m
**constraintAreaMinZ = 0m
**constraintAreaMaxX = 480m
**constraintAreaMaxY = 480m
**constraintAreaMaxZ = 0m

LoRaNetworkTest.**.radio.separateTransmissionParts = false
LoRaNetworkTest.**.radio.separateReceptionParts = false

**.delayer.config = xmldoc("cloudDelays.xml")
**radio.radioMediumModule = "LoRaMedium"
**LoRaMedium.pathLossType = "LoRaLogNormalShadowing"
**minInterferenceTime = 0s
**displayAddresses = false
```

## Βιβλιογραφία- Αναφορές

- [1]. 'ιστοσελίδα iot for all <https://www.iotforall.com/iot-connectivity-comparison-lora-sigfox-rpma-lpwan-technologies/>
- [2]. Madakam, Somayya & Ramaswamy, R & Tripathi, Siddharth. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*. 3. 164-173. 10.4236/jcc.2015.35021.
- [3]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_of\\_things](https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things)
- [4]. 'ιστοσελίδα IBM ' <https://www.ibm.com/blogs/industries/little-known-story-first-iot-device/>
- [5]. <https://www.qualcomm.com/products/snapdragon-855-mobile-platform>
- [6]. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/09/02/what-is-industry-4-0-heres-a-super-easy-explanation-for-anyone/#6c3953b09788>
- [7]. Z. Yuan, J. Jin, L. Sun, K. Chin and G. Muntean, "Ultra-Reliable IoT Communications with UAVs: A Swarm Use Case," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 12, pp. 90-96, December 2018. doi: 10.1109/MCOM.2018.1800161  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8570043&isnumber=8570022>
- [8]. C. Mouradian, S. Yangui and R. H. Glitho, "Robots as-a-service in cloud computing: Search and rescue in large-scale disasters case study," *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, 2018, pp. 1-7.  
doi: 10.1109/CCNC.2018.8319200  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8319200&isnumber=8319155>
- [9]. A. Mdhaffar, T. Chaari, K. Larbi, M. Jmaiel and B. Freisleben, "IoT-based health monitoring via LoRaWAN," *IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies*, Ohrid, 2017, pp. 519-524.  
doi: 10.1109/EUROCON.2017.8011165  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8011165&isnumber=8011054>
- [10]. M. T. Buyukakkaslar, M. A. Erturk, M. A. Aydin and L. Vollero, "LoRaWAN as an e-Health Communication Technology," *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, Turin, 2017, pp. 310-313.  
doi: 10.1109/COMPSAC.2017.162  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8029947&isnumber=8029872>
- [11]. P. A. Catherwood, D. Steele, M. Little, S. McComb and J. McLaughlin, "A Community-Based IoT Personalized Wireless Healthcare Solution Trial," in *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 6, pp. 1-13, 2018, Art no. 2800313.  
doi: 10.1109/JTEHM.2018.2822302  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8355907&isnumber=8253365>
- [12]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=celex%3A32016R0679>
- [13]. "Επίσημος δικτυακός τόπος LoRa Alliance " <https://lora-alliance.org/>
- [14]. "LoRa Specification " : <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>



- [15]. 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.
- [16]. A. D. Zayas and P. Merino, "The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things," 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Paris, 2017, pp. 277-282.
- [17]. Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang, A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT, ICT Express, Volume 3, Issue 1, 2017, Pages 14-21, ISSN 2405-9595, <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>.
- [18]. A. 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
- [19]. M. Bor and U. Roedig, "LoRa Transmission Parameter Selection," 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Ottawa, ON, 2017, pp. 27-34. doi: 10.1109/DCOSS.2017.10  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8271941&isnumber=8271927>
- [20]. M. Slabicki, G. Premsankar and M. Di Francesco, "Adaptive configuration of lora networks for dense IoT deployments," NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Taipei, 2018, pp. 1-9.  
doi: 10.1109/NOMS.2018.8406255  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8406255&isnumber=8406102>
- [21]. R. Kerkouche, R. Alami, R. Féraud, N. Varsier and P. Maillé, "Node-based optimization of LoRa transmissions with Multi-Armed Bandit algorithms," 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT), St. Malo, 2018, pp. 521-526.  
doi: 10.1109/ICT.2018.8464949  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8464949&isnumber=8464825>
- [22]. M. Haghighi, 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  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7845517&isnumber=7845389>
- [23]. “site of physimulator” <http://lora.tti.unipa.it/>
- [24]. 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
- [25]. “OMNeT++ official site ” <https://omnetpp.org/intro/>
- [26]. “INET framework official site ” <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>
- [27]. <https://www.nsnam.org/>
- [28]. 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/10.1145/3199902.3199913>
- [29]. Ns3 στατιστικά: <https://www.nsnam.org/about/statistics/>
- [30]. <https://inet.omnetpp.org/docs/users-guide/ch-mobility.html>

- [31]. I.Daramouskas, V.Kapoulas, και T.Pegiazis ‘A survey of methods for location estimation on Low Power Wide Area Networks’, in The 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA 2019) 15-17 July 2019, Patra, Greece



