



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ,  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥΠΟΛΗ ΣΕΡΡΩΝ

---

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

### **ΟΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ LORAWAN ΚΑΙ NARROW-BAND IoT ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ (LoraWan and Narrow-Band IoT Technologies)**

**ΝΕΛΛΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ**

**(AM 1)**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :

**Δρ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΣΕΡΡΕΣ ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2022**

## ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας και πως κάθε βοήθεια που είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στη Διπλωματική Εργασία, με κατάλληλη αναφορά. Επίσης, έχω αναφέρει τις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, εικόνων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες και αναλαμβάνω πλήρως την ευθύνη για τη χρήση των πηγών. Τέλος, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τις απαιτήσεις του Μεταπτυχιακού Προγράμματος στις Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Η/Υ.

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΝΕΛΛΑ**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Η/Υ» του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών, του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Δημήτρης Ευσταθίου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Δρ. Δημήτρη Ευσταθίου που μου έδωσε την ευκαιρία και μου εμπιστεύθηκε το πολύ ενδιαφέρον αυτό θέμα. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω, επίσης, επειδή καθ' όλη την περίοδο εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας έδειχνε το ενδιαφέρον του όχι μόνο για την περάτωση της τελευταίας αλλά και για μένα προσωπικά. Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετώπιζε τα προβλήματα που προέκυψαν στα διάφορα στάδια της εργασίας, η στάση του και η γενικότερη συμπεριφορά του ως άνθρωπος, η συνεχή του υποστήριξη και ενθάρρυνση, μου ενέπνευσαν βαθιά εκτίμηση και σεβασμό απέναντι στο πρόσωπό του, κατάφερε να μου μεταδώσει τις αξίες της συνεργασίας και της προσωπική βελτίωσης με απώτερο σκοπό την επίτευξη ενός κοινού στόχου, ενώ θεωρώ ότι αποτελούν εφόδια για την περαιτέρω πορεία μου ως μηχανικός τηλεπικοινωνιών.

Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την κάθε είδους υποστήριξη που μου παρείχε τόσο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας όσο και για την ψυχολογική της στήριξη. Χωρίς αυτήν δεν θα βρισκόμουν σε αυτή την θέση και δεν θα ήμουν ο άνθρωπος που είμαι τώρα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	9
Abstract.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ IoT.....	11
1.1 Τι είναι το Internet of Things.....	13
1.2 Ορισμοί του Internet of Things.....	13
1.3 Μοντέλα Επικοινωνίας.....	15
1.3.1 Μοντέλο Device-to-Device.....	16
1.3.2 Μοντέλο Device-to-Cloud.....	17
1.3.3 Μοντέλο Device-to-Gateway.....	18
1.3.4 Μοντέλο Back-End Data-Sharing.....	19
1.4 Η Αρχιτεκτονική του Internet of Things.....	20
1.5 Οι εφαρμογές του Internet of Things.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LoRaWAN.....	31
2.1 Τι είναι το LoRaWAN.....	32
2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος LoRaWAN.....	33
2.3 Πως λειτουργεί το LoRaWAN.....	35
2.4 LoRaWAN Classes A, B & C.....	37
2.5 Ασφάλεια του LoRaWAN.....	38

2.6 Εφαρμογές του LoRaWAN.....	39
2.7 Αρχιτεκτονική του LoRaWAN.....	40
2.7.1 Στοιβά Πρωτοκόλλων.....	40
2.8 Διαμόρφωση LoRa.....	41
2.8.1 Διαμόρφωση LoRa - Υλοποίηση του σήματος chirp.....	41
2.8.2 Διαμόρφωση LoRa - Παράγοντας διασποράς (Spreading Factor).....	42
2.9 Τεχνικές Κωδικοποίησης.....	43
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ Narrow-Band IoT.....	45
3. Τι είναι το Narrow-Band IoT.....	45
3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος Narrow-Band IoT.....	45
3.2 Αρχιτεκτονική δικτύου του Narrow-Band IoT.....	48
3.3 Ασφάλεια του Narrow-Band IoT.....	50
3.4 Εφαρμογές του Narrow-Band IoT.....	51
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	
Σύγκριση κύριων ποιοτικών χαρακτηριστικών του LoRa και του Narrow-Band IoT.....	52
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο	
Προσομοίωση συστημάτων LoRaWAN και Narrow-Band IoT	
5.1 Εισαγωγή.....	54
5.2 Προσομοίωση του συστήματος LoRaWAN.....	55
5.3 Προσομοίωση του συστήματος Narrow-Band IoT.....	65
5.4 Συμπεράσματα και μελλοντική επέκταση της εργασίας.....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Εικόνα 1.1:</b> Το διαδίκτυο των Πραγμάτων δείχνοντας τους τελικούς χρήστες και τις περιοχές εφαρμογής που βασίζονται στα δεδομένα (Gubbiet. al,2012).....	11
<b>Εικόνα 1.2:</b> Παράδειγμα “Internet of Things” ως αποτέλεσμα της σύγκλισης των διαφορετικών οραμάτων (Atzori, IeraandMorabito, 2010).....	13
<b>Εικόνα 1.3</b> Device to Device.....	15
<b>Εικόνα 1.4:</b> Device to Cloud.....	16
<b>Εικόνα 1.5:</b> Device-to-Gateway.....	17
<b>Εικόνα 1.6:</b> Back-End Data-Sharing.....	19
<b>Εικόνα 1.7:</b> Γενική τεχνική επισκόπηση του IoT. Πηγή :(ITU-T-Y.2060, 2016)....	20
<b>Εικόνα 1.8:</b> Τεχνολογική αρχιτεκτονική IoT.Πηγή :(Patel et al., 2016).....	21
<b>Εικόνα 1.9:</b> Μια μικρή ιδέα για την έξυπνη πόλη.....	24
<b>Εικόνα1.10:</b> Οι εφαρμογές για τα έξυπνα σπίτια και κτίρια.....	25
<b>Εικόνα 1.11:</b> Η εφαρμογή στην υγεία.....	26
<b>Εικόνα 1.12:</b> Η εφαρμογή στην υγεία.....	27
<b>Εικόνα 1.13:</b> Το έξυπνο περιβάλλον.....	29
<b>Εικόνα 1.14:</b> Το έξυπνο περιβάλλον.....	30
<b>Εικόνα 2.1:</b> Το LoRaWAN δίκτυο.....	34
<b>Εικόνα 2.2:</b> Το LoRaWANσύστημα πως λειτουργεί.....	36
<b>Εικόνα 2.3:</b> ΤοLoRaWAN Classes A,B &C.....	37
<b>Εικόνα 2.4:</b> Η δομή του δικτύου LoRa της στοίβας πρωτοκόλλων.....	41
<b>Εικόνα 3.1:</b> Αρχιτεκτονική δικτύου NB-IoT.....	49
<b>Εικόνα 3.2:</b> Ασφάλεια στοNB-IoT.....	50
<b>Εικόνα 5.2:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=7, PER προς το SNR(dB) όπου η μέγιστη τιμή είναι 1 προς -30(dB) και η ελάχιστη 0 προς 30(dB).....	57
<b>Εικόνα 5.3:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=7, SER προς το EsNo(dB) όπου η μέγιστη τιμή είναι 1προς -10(dB) και η ελάχιστη 0 προς 52(dB).....	58
<b>Εικόνα 5.4:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=7, BER προς το EbNo(dB), όπου η μέγιστη τιμή είναι 0.2 προς -20(dB) και η ελάχιστη είναι 0 προς 43(dB).....	58
<b>Εικόνα 5.5:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=8, PER προς το SNR(dB), όπου η μέγιστη τιμή είναι 1 προς -30(dB) και η ελάχιστη 0 προς 30(dB).....	59
<b>Εικόνα 5.6:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=8, SER προς το EsNo(dB) όπου η μέγιστη τιμή είναι 1προς -10(dB) και η ελάχιστη 0 προς 55(dB).....	59

<b>Εικόνα 5.7:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=8, BER προς το EbNo(dB), όπου η μέγιστη τιμή είναι 0.2 προς -20(dB) και η ελάχιστη είναι 0 προς 46(dB).....	60
<b>Εικόνα 5.8:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=9, PER προς το SNR(dB) όπου η μέγιστη τιμή είναι 1 προς -30(dB) και η ελάχιστη 0 προς 30(dB).....	60
<b>Εικόνα 5.9:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=9, SER προς το EsNo(dB) όπου η μέγιστη τιμή είναι 1προς -10(dB) και η ελάχιστη 0 προς 58(dB).....	61
<b>Εικόνα 5.10:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=9, BER προς το EbNo(dB), όπου η μέγιστη τιμή είναι 0.2 προς -20(dB) και η ελάχιστη είναι 0 προς 49(dB).....	61
<b>Εικόνα 5.11</b> Block διάγραμμα LoRa με AWGN κανάλι.....	63
<b>Εικόνα 5.12:</b> Προσομοίωση LoRa για SF=7-12, BER προς το EbNo(dB).....	64
<b>Εικόνα 5.13:</b> Block διάγραμμα NB-IoT με διαμόρφωση QPSK .....	66
<b>Εικόνα 5.14:</b> Διάγραμμα αστερισμού QPSK.....	68
<b>Εικόνα 5.15:</b> NB-IoT με διαμόρφωση QPSK (φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού).....	68
<b>Εικόνα 5.16:</b> Διαμόρφωση QPSK, το φάσμα του σήματος στην βασική ζώνη του πομπού (Zoom της εικόνας 5.15).....	69
<b>Εικόνα 5.17:</b> BER σε σχέση με το SNR (dB) για NB-IoT με διαμόρφωση QPSK.....	69
<b>Εικόνα 5.18:</b> Διάγραμμα αστερισμού 16-QAM.....	70
<b>Εικόνα 5.19:</b> NB-IoT με διαμόρφωση 16-QAM (φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού).....	70
<b>Εικόνα 5.20:</b> Διαμόρφωση 16-QAM, το φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού (Zoom της εικόνας 5.19).....	71
<b>Εικόνα 5.21:</b> BER σε σχέση με το SNR (dB) για NB-IoT με διαμόρφωση 16-QAM.....	71

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τα πρωτόκολλα LoraWAN και Narrow – Band IoT. Αφού θα αναφερθούμε σε κάποια εισαγωγικά – θεωρητικά στοιχεία στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στις τεχνικές λεπτομέρειες και προσομοίωση του LoraWAN και Narrow – Band IoT .

Στο πρώτο κεφάλαιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT). Δίνονται οι ορισμοί, ποια μοντέλα χρησιμοποιεί και αναφερόμαστε στις σύγχρονες εφαρμογές του.

Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στο πρωτόκολλο LoraWAN και Narrow - Band όσο αφορά τις βασικές λειτουργίες τους. Μία αναλυτική περιγραφή της αρχιτεκτονικής που χρησιμοποιούν, τα επίπεδα του OSI που χρησιμοποιούν, τις διάφορες κατηγορίες των συσκευών που υπάρχουν, τις κλάσεις τους και κάποια άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του LoRa και του Narrow-Band IoT, όπου παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ τους. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας. Οι παράγοντες αυτοί παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του LoRa για το Internet of Things και του Narrow-Band για το Internet of Things (NB-IoT) σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση δύο τεχνολογικών συστημάτων του LoRa για το IoT και του Narrow-Band για το IoT (NB-IoT) προσομοιώνοντας τα σε προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα είναι ο ρυθμός εσφαλμένων bit (BER) σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο (SNR). Αυτό που θέλουμε να πετύχουμε είναι να δούμε ποιο από αυτά τα δύο συστήματα είναι προτιμότερο και ποιο καλύτερο για συσκευές IoT.



## **ABSTRACT**

In this MSc dissertation we will study the LoraWAN and Narrow-Band IoT protocols. In the beginning we will present some theoretical elements, then we will focus on the technical details and simulation of LoraWAN and Narrow - Band IoT.

In the first chapter, reference is made to the Internet of Things (IoT). The definitions, the used models and some modern applications are presented.

In the second and third chapters, reference is made to the LoraWAN and Narrow-Band protocols regarding their basic functions. A detailed description of the architecture they use, the OSI layers they use, the various categories of devices that exist, their classes and some other technical characteristics.

In the fourth chapter we analyze to the qualitative characteristics of LoRa and Narrow-Band IoT, where a comparison between them is presented. There are many factors to consider when choosing the most appropriate technology. These factors are presented in the specific chapter.

In the fifth chapter we will deal with the comparison of the simulation results of LoRa for the Internet of Things and Narrow-Band for the Internet of Things (NB-IoT) in a Matlab programming environment.

Furthermore, the purpose of this thesis is to study and compare two wireless systems -LoRa for IoT and Narrow-Band for IoT (NB-IoT)- by simulating them in a Matlab programming environment. The results of the simulation will be the bit error rate (BER) versus the signal-to-noise ratio (SNR). The goal of this MSc thesis is to find out which of the two protocols is a better fit for IoT devices.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

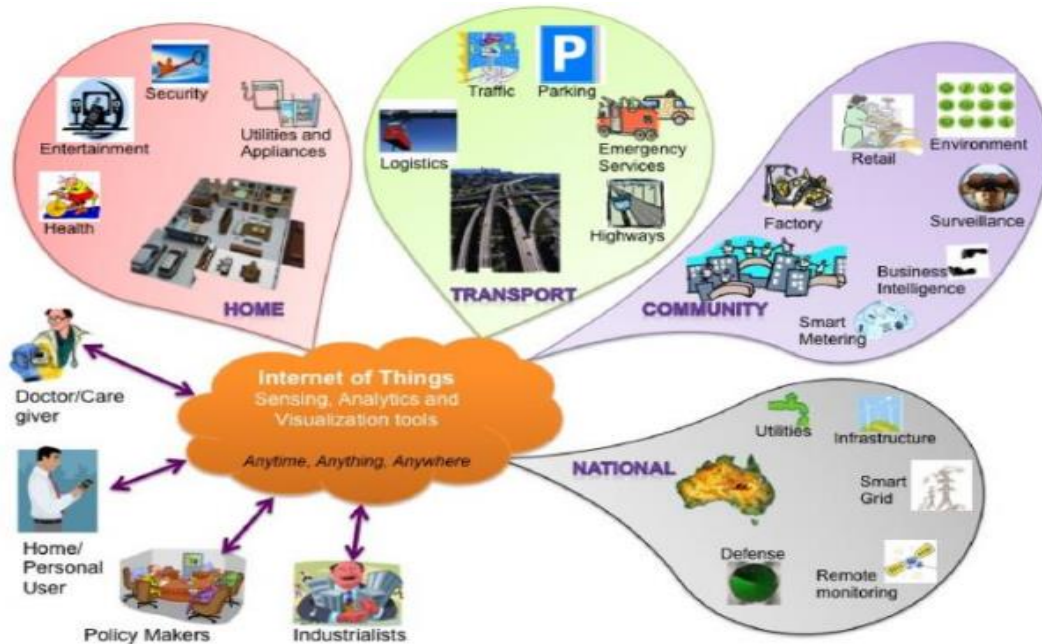
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΙοΤ

Πλέον στις μέρες μας, η μεγαλύτερη πλειοψηφία των συνδέσεων στο Διαδίκτυο παγκοσμίως είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται απ' ευθείας από τον άνθρωπο, όπως υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Η κύρια μορφή επικοινωνίας είναι μεταξύ ανθρώπου-ανθρώπου. Σε ένα όχι πολύ μακρινό μέλλον, κάθε αντικείμενο θα μπορεί να συνδεθεί, (ήδη εφαρμόζεται σε πολλές περιοχές στον κόσμο). Έτσι με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους οι άνθρωποι και ο αριθμός των συσκευών που συνδέονται με το διαδίκτυο θα είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των «ανθρώπων» (Tan,Wang, 2009). Το μέλλον δεν πρόκειται να είναι οι άνθρωποι που μιλούν με τους ανθρώπους, δεν πρόκειται να είναι οι άνθρωποι που έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες, αλλά πρόκειται να είναι η χρήση μηχανών για να μιλούν με άλλες μηχανές για λογαριασμό των ανθρώπων.

Κατά τα τελευταία χρόνια, το Διαδίκτυο έχει αυξηθεί ραγδαία από ένα μικρό ερευνητικό δίκτυο, σε ένα παγκόσμιο δίκτυο που εξυπηρετεί περισσότερους από ένα δισεκατομμύριο χρήστες. Η μείωση του κόστους ηλεκτρονικών συσκευών επίσης καθιστά δυνατό το να επεκταθεί το Διαδίκτυο σε μια νέα διάσταση: δηλαδή σε έξυπνες συσκευές, συσκευές που χρησιμοποιούνται ήδη στην καθημερινότητα μας και που πλέον ενισχύονται από μια μικρή ηλεκτρονική συσκευή η οποία να παρέχει τοπική νοημοσύνη και σύνδεση με τον κυβερνοχώρο που δημιουργήθηκε από το Διαδίκτυο.

Η μικρή ηλεκτρονική συσκευή, ένα υπολογιστικό μέλος που συνδέεται σε κάτι φυσικό, γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ του φυσικού κόσμου και του κόσμου των πληροφοριών (Ning ,Hu, 2012).

Ένα έξυπνο αντικείμενο είναι λοιπόν ένα σύστημα κυβερνο-φυσικό ή ενσωματωμένο σύστημα, που αποτελείται από ένα σύστημα (τη φυσική οντότητα) και ένα στοιχείο (ο υπολογιστής) που επεξεργάζεται τα δεδομένα και υποστηρίζει ασύρματη επικοινωνία-σύνδεση με το Διαδίκτυο.



*Εικόνα 1.1: Το διαδίκτυο των Πραγμάτων δείχνοντας τους τελικούς χρήστες και τις περιοχές εφαρμογής που βασίζονται στα δεδομένα (Gubbiet. al, 2012).*

Ήδη σήμερα πολλά ενσωματωμένα συστήματα είναι συνδεδεμένα με το Διαδίκτυο, αλλά στο μέλλον το αναμενόμενο μέγεθος των δισεκατομμυρίων έξυπνων αντικειμένων θα επιφέρουν νέα τεχνικά και κοινωνικά θέματα που θα σχετίζονται με το πλήθος των συσκευών. Μερικά παραδείγματα από αυτά τα θέματα είναι: η αυθεντική ταυτοποίηση ενός έξυπνου αντικειμένου, η αυτόνομη διαχείριση και η αυτο-οργάνωση των δικτύων των έξυπνων αντικειμένων, η διάγνωση και η συντήρηση, η γνώση της συγκεκριμένης συμπεριφοράς και η πρόσβαση στην ιδιωτική ζωή.

Μπορούμε να προβλέψουμε ένα αυτόνομο έξυπνο αντικείμενο που έχει πρόσβαση σε μία γνωσιακή βάση δεδομένων ενός συγκεκριμένου επιστημονικού πεδίου και έχει δυνατότητες όπως λογική σκέψη ώστε να προσανατολίζεται μόνο του στο επιλεγμένο επιστημονικό πεδίο εφαρμογής. Με βάση το επίπεδο ικανότητας ενός έξυπνου αντικειμένου, διακρίνουμε τα έξυπνα αντικείμενα σε αντικείμενα που έχουν επίγνωση όσον αφορά δραστηριότητες, πολιτική και διαδικασίες (Kortuemetal., 2010).

## 1.1 Τι είναι το Internet of Things

Το Internet of Things (IoT) είναι ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων, συσκευών, οχημάτων, κτιρίων αλλά και άλλων αντικειμένων τα οποία περιέχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, λογισμικά, αισθητήρες και διαδικτυακή δυνατότητα σύνδεσης, κάτι που επιτρέπει σε αυτά τα αντικείμενα να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα. Το IoT επιτρέπει στα αντικείμενα αυτά να ελέγχονται απομακρυσμένα μέσω μιας δικτυακής υποδομής δημιουργώντας ευκαιρίες του φυσικού κόσμου με τα υπολογιστικά συστήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συσκευών αυτών, της ακρίβειας αλλά και τη μείωση του κόστους. Επιπλέον το IoT στηρίζεται σε τεχνολογία που συμπεριλαμβάνει αισθητήρες και ενεργοποιητές τα οποία αποτελούν μέρος των καθημερινών έξυπνων συστημάτων όπως τα έξυπνα σπίτια και τα έξυπνα οχήματα. Κάθε αντικείμενο αναγνωρίζεται ξεχωριστά από το ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα και μπορεί να λειτουργεί τόσο αυτόνομα όσο και σε συνεργασία με την υπόλοιπη διαδικτυακή υποδομή.

## 1.2 Ορισμοί του Internet of Things

Ένας απλός αλλά και πολύ διαδεδομένος ορισμός του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Zhang, YuandZhai, 2011) και η βασική ιδέα αυτού είναι η διάχυτη παρουσία γύρω από μια ποικιλία αντικείμενων - όπως η Radio-Frequency Identification (RFID), αισθητήρες, ενεργοποιητές, κινητά τηλέφωνα, κλπ - τα οποία, μέσω των μοναδικών σχεδίων που θα καλύπτουν, είναι σε θέση να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους για να καταφέρουν να πετύχουν κοινούς στόχους (Comptonetal., 2009).

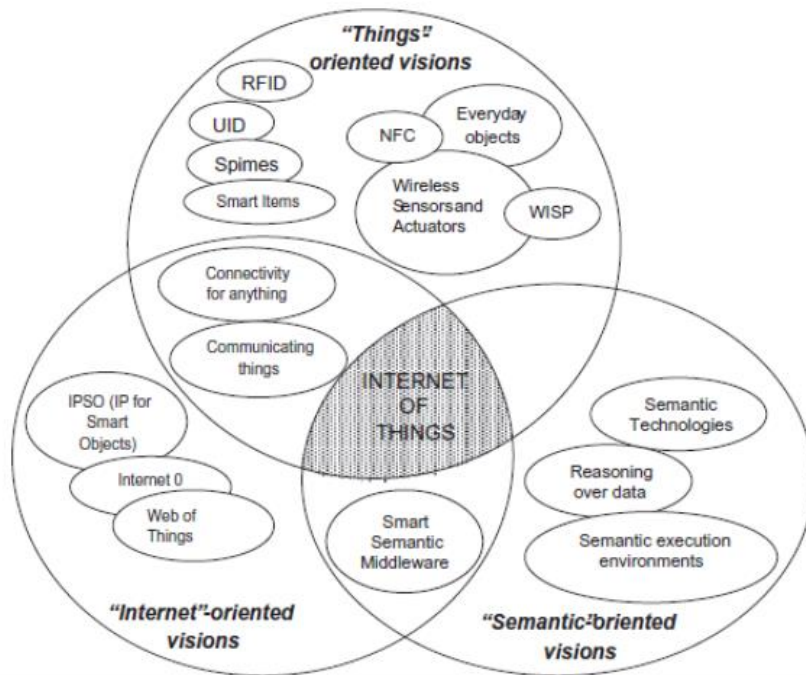
Η ομάδα RFID ορίζει ως Διαδίκτυο των Αντικειμένων, το παγκόσμιο δίκτυο των διασυνδεδεμένων αντικειμένων μοναδικά διευθυνσιοδοτήσιμα που βασίζονται σε τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Σύμφωνα με το Cluster των ευρωπαϊκών ερευνητικών έργων στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Alberti, Singh, 2013), ορίζονται τα «αντικείμενα» που συμμετέχουν ενεργά στην επιχείρηση,

στις πληροφορίες και τις κοινωνικές διαδικασίες, όπου αυτά μπορούν να αλληλεπιδρούν και να επικοινωνούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον, με την ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών που ανιχνεύονται από το περιβάλλον, ενώ αντιδρούν αυτόνομα σε πραγματικά / φυσικά παγκόσμια γεγονότα και το επηρεάζουν εκτελώντας τις διαδικασίες που ενεργοποιούν τις δράσεις και τη δημιουργία υπηρεσιών με ή χωρίς άμεση ανθρώπινη παρέμβαση.

Σύμφωνα με τον Forrester (Gubbietal., 2012), Διαδίκτυο των Αντικειμένων είναι ένα έξυπνο περιβάλλον που χρησιμοποιεί πληροφορίες και τεχνολογίες επικοινωνιών, για να δημιουργήσει κρίσιμα στοιχεία υποδομής και υπηρεσίες διοίκησης μιας πόλης, εκπαίδευσης, υγειονομικής περίθαλψης, δημόσιας ασφάλειας, πραγματικής περιουσίας, μεταφοράς και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μεγαλύτερης επίγνωσης, πιο διαδραστικές και αποτελεσματικές.

Άλλος ένας ορισμός του Διαδικτύου των Πραγμάτων για έξυπνα περιβάλλοντα είναι η Διασύνδεση των συσκευών ανίχνευσης και ενεργοποίησης που παρέχουν την ικανότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες σε όλες τις πλατφόρμες, μέσω ενός ενιαίου πλαισίου, αναπτύσσοντας μια κοινή επιχειρησιακή εικόνα για επιτρεπόμενες καινοτόμες εφαρμογές.



**Εικόνα 1.2 : Παράδειγμα “Internet of Things” ως αποτέλεσμα της σύγκλισης των διαφορετικών οραμάτων (Atzori, Iera and Morabito, 2010)**

Το Things Oriented Vision χρησιμοποιείται για να εντοπίζει συσκευές χρησιμοποιώντας αισθητήρες και χρήση της τεχνολογίας RFID. Η βασική φιλοσοφία είναι ο μοναδικός εντοπισμός κάθε αντικειμένου χρησιμοποιώντας τις προδιαγραφές του Ηλεκτρονικού Κωδικού Προϊόντος (EPC). Το Internet Oriented Vision χρησιμοποιεί το όραμα ενός προσανατολισμένου δικτύου που ικανοποιεί την ανάγκη να κάνουν τα έξυπνα αντικείμενα να συνδέονται. Τα αντικείμενα πρέπει να έχουν τα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων IP.

Το Semantic Oriented Vision χρησιμοποιεί το όραμα που τροφοδοτείται από το γεγονός ότι το σύνολο των διαθέσιμων αισθητήρων που θα είναι στη διάθεσή μας θα είναι τεράστιο και τα δεδομένα που θα συλλέγουν θα είναι τεράστια. Έτσι θα έχουμε τεράστια ποσότητα πληροφοριών, ενδεχομένως περιττή, η οποία θα πρέπει να υποβληθεί σε επεξεργασία. Τα ανεπεξέργαστα δεδομένα πρέπει να αντιμετωπιστούν και να επεξεργαστούν με ένα κατανοητό τρόπο για την καλύτερη παράσταση και κατανόηση. Εδώ χρειάζεται ένα γενικό όραμα της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων για να έχουν νόημα τα δεδομένα και ένας σημαντικός διαχωρισμός των δεδομένων και η ερμηνεία τους.

### **1.3 Μοντέλα Επικοινωνίας**

Τα μοντέλα της τεχνολογίας του IoT μπορούν να χωριστούν σε 2 μεγάλες υποκατηγορίες. Η μια κατηγορία αφορά το μοντέλα συνδεσιμότητας και η άλλη κατηγορία αφορά το μοντέλο αναφοράς του IoT και τα επίπεδα του. Επίσης από λειτουργικής πλευράς είναι χρήσιμο να σκεφτούμε πως οι συσκευές του IoT συνδέονται και επικοινωνούν σε σχέση με τα τεχνικά μοντέλα επικοινωνίας. Τον Μάρτιο του 2015 το Συμβούλιο Αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου (Internet Architecture Board, IAB) κυκλοφόρησε ένα κατευθυντήριο αρχιτεκτονικό έγγραφο για τη δικτύωση των έξυπνων αντικειμένων, που περιγράφει ένα πλαίσιο τεσσάρων κοινών μοντέλων επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από συσκευές IoT. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου ξεχωριστά.

### 1.3.1 Μοντέλο Device-to-Device

Το μοντέλο επικοινωνίας device-to-device είναι ένα μοντέλο που μπορεί και συνδέει δύο ή περισσότερες συσκευές που συνδέονται άμεσα και επικοινωνούν μεταξύ τους, και όχι μέσω ενδιάμεσου server εφαρμογών. Αυτές οι συσκευές επικοινωνούν μέσω πολλών τύπων δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων IP ή το Internet. Συχνά, ωστόσο αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως Bluetooth, 40 Z-Wave ή ZigBee για την καθιέρωση device-to-device επικοινωνίας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



*Εικόνα 1.3 Επικοινωνία από την μία συσκευή στην άλλη συσκευή.*

Τα device-to-device επιτρέπουν τις συσκευές που συμμορφώνονται με ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο επικοινωνίας να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν μηνύματα για να επιτευχθεί η λειτουργία τους. Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως τα συστήματα οικιακού αυτοματισμού, που συνήθως χρησιμοποιούν μικρά πακέτα δεδομένων πληροφοριών για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η προσέγγιση του μοντέλου επικοινωνίας device-to-device απεικονίζει πολλές από τις προκλήσεις της λειτουργικότητας που θα συζητήσουμε παρακάτω. Αυτές οι συσκευές έχουν συχνά άμεση σχέση μεταξύ τους και έχουν συνήθως ενσωματωμένη ασφάλεια, αλλά χρησιμοποιούν επίσης μοντέλα δεδομένων για συγκεκριμένες συσκευές που απαιτούν προσπάθειες ανάπτυξης από τους κατασκευαστές τους. Αυτό σημαίνει ότι οι κατασκευαστές συσκευών θα πρέπει να επενδύσουν στην αναπτυξιακή προσπάθεια για την υλοποίηση των συσκευών με συγκεκριμένες μορφές δεδομένων και όχι ανοιχτές προσεγγίσεις που επιτρέπουν τη χρήση των τυποποιημένων μορφών δεδομένων. Από τη πλευρά του χρήστη, αυτό συχνά σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του μοντέλου device-to-device δεν είναι συμβατά, αναγκάζοντάς τον να επιλέξει μια οικογένεια συσκευών που χρησιμοποιούν ένα κοινό πρωτόκολλο. Στις μέρες μας είναι το παραπάνω δεν ισχύει αφού έχουν δημιουργηθεί ανοιχτού

κώδικα πλατφόρμες διασύνδεσης πολλαπλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Κάποιες από αυτές είναι το OpenHab το οποίο αναφέρθηκε παραπάνω.

### 1.3.2 Μοντέλο Device-to-Cloud

Σε ένα μοντέλο επικοινωνίας Device-to-Cloud, η IoT συσκευή συνδέεται απευθείας σε μια διαδικτυακή υπηρεσία cloud όπως ένας πάροχος υπηρεσιών εφαρμογής, ώστε να ανταλλάσει δεδομένα και να διαχειρίζεται την κίνηση μηνυμάτων. Αυτή η προσέγγιση συχνά εκμεταλλεύεται υπάρχοντες μηχανισμούς επικοινωνίας όπως η παραδοσιακή ενσύρματη Ethernet ή Wi-Fi συνδέσεις για να εγκαταστήσει μια σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του δικτύου IP, το οποίο τελικά συνδέεται με την υπηρεσία cloud, όπως φαίνεται παρακάτω.



*Εικόνα 1.4: Device to Cloud*

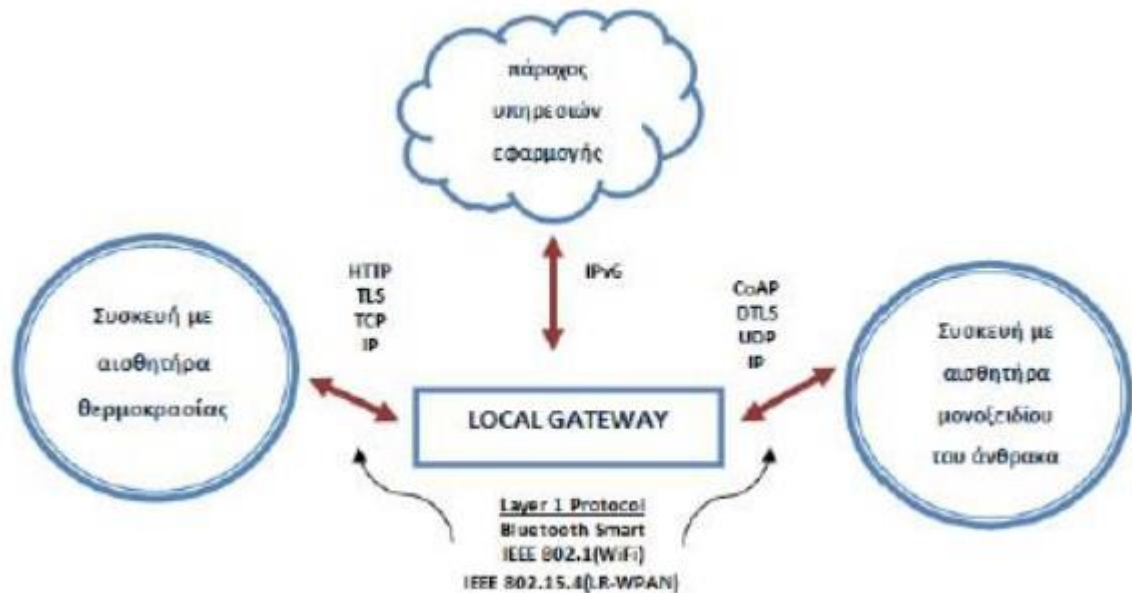
Αυτό το επικοινωνιακό μοντέλο χρησιμοποιείται από κάποιες διάσημες εμπορικές IoT συσκευές όπως το Learning Thermostat της Nest Labs και η Smart TV της Samsung. Στην περίπτωση του Learning Thermostat, η συσκευή μεταδίδει δεδομένα σε μια cloud βάση δεδομένων όπου τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλύουν την κατανάλωση της οικιακής ενέργειας. Επιπλέον, αυτή η σύνδεση με το cloud δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να αποκτήσει εξ'αποστάσεως πρόσβαση στον θερμοστάτη του, μέσω ενός Smartphone ή μέσω του ιστού (web), και επίσης υποστηρίζει αναβαθμίσεις λογισμικού. Παρομοίως με την τεχνολογία Smart TV της Samsung, η τηλεόραση χρησιμοποιεί μια διαδικτυακή σύνδεση για να μεταδίδει πληροφορίες προβολών του χρήστη στη Samsung για ανάλυση, και να ενεργοποιεί τις διαδραστικές λειτουργίες αναγνώρισης ομιλίας που διαθέτει η τηλεόραση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μοντέλο Device-to-Cloud προσθέτει αξία στον χρήστη. Τέλος, συχνά η συσκευή



και η υπηρεσία cloud είναι από τον ίδιο προμηθευτή. Αν χρησιμοποιούν πρωτόκολλα δεδομένων βιομηχανικής ιδιοκτησίας μεταξύ της συσκευής και της υπηρεσίας cloud, ο ιδιοκτήτης ή ο χρήστης της συσκευής ίσως να δεσμεύεται από συγκεκριμένη υπηρεσία cloud, περιορίζοντας ή αποτρέποντας τη χρήση εναλλακτικών πάροχων υπηρεσιών.

### 1.3.3 Μοντέλο Device-to-Gateway

Στο μοντέλο Device-to-Gateway, ή αλλιώς Device-to-application-level-Gateway, η συσκευή IoT συνδέεται μέσω μιας υπηρεσίας ALG ως αγωγός για να επιτευχθεί μια σύνδεση με την υπηρεσία cloud. Με πιο απλά λόγια, αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο Device-to-Gateway διαθέτει λογισμικό εφαρμογής, το οποίο δρα ως διαμεσολαβητής μεταξύ της συσκευής και της υπηρεσίας cloud και παρέχει ασφάλεια και άλλες λειτουργίες όπως δεδομένα ή μετάφραση πρωτοκόλλων.



Εικόνα 1.5: Device-to-Gateway

Αρκετές μορφές αυτού του αυτού του μοντέλου βρίσκονται στις συσκευές καταναλωτών. Σε πολλές περιπτώσεις, οι συσκευές που χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο επικοινωνίας είναι τα smartphones, τα οποία "τρέχουν" εφαρμογές για να επικοινωνήσουν με τις IoT συσκευές και να μεταφέρουν δεδομένα σε μια υπηρεσία cloud. Αυτό είναι συχνά το μοντέλο που χρησιμοποιείται σε δημοφιλή είδη ευρείας κατανάλωσης, όπως τα personal fitness trackers. Αυτές οι συσκευές δεν έχουν την ικανότητα να συνδεθούν απευθείας σε μια υπηρεσία cloud, έτσι συχνά βασίζονται σε εφαρμογές των smartphones οι οποίες λειτουργούν ως μεσάζοντες για να συνδεθεί η συσκευή εκγύμνασης στο cloud. Μια άλλη μορφή αυτού του μοντέλου επικοινωνίας Device-to-Gateway είναι η ανάδυση των συσκευών "Hub" σε εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού. Τα "Hub" είναι συσκευές που λειτουργούν ως Local Gateway μεταξύ μεμονωμένων IoT συσκευών μιας υπηρεσίας cloud, αλλά επίσης μπορούν να γεφυρώσουν το χάσμα της διαλειτουργικότητας μεταξύ των IoT συσκευών. Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται συχνά για την ενσωμάτωση νέων έξυπνων συσκευών σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα με συσκευές που είναι διαλειτουργικές. Ένα μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η συνεχής και απαραίτητη ανάπτυξη του συστήματος και του λογισμικού εφαρμογών το κάνει πολύπλοκο και με μεγάλο κόστος.

### **1.3.4 Μοντέλο Back-End Data-Sharing**

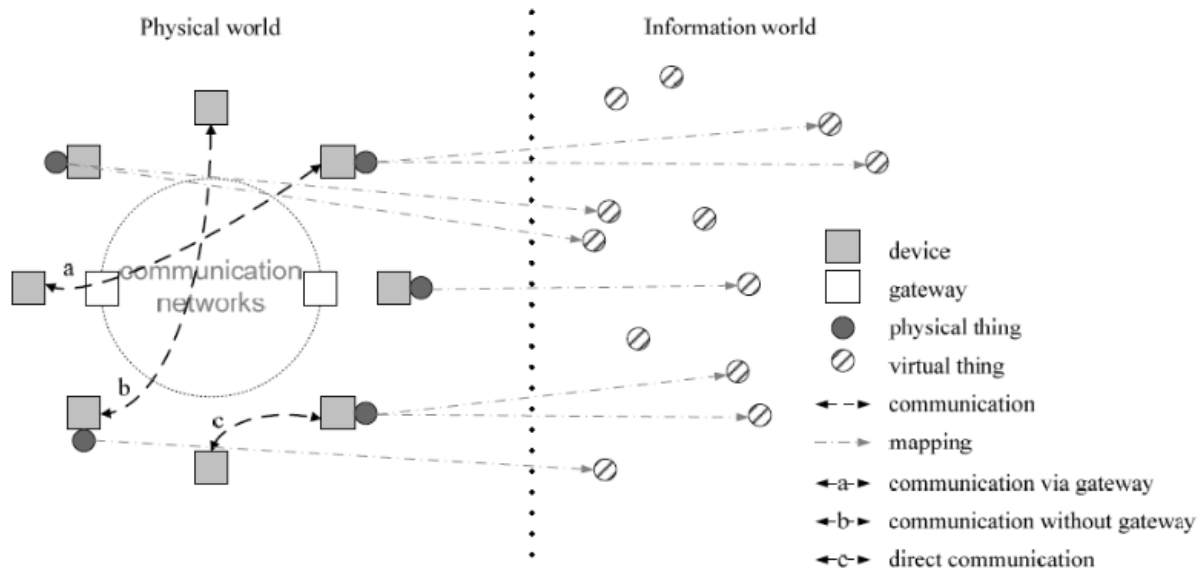
Το μοντέλο Back-End Data-Sharing είναι μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας η οποία επιτρέπει στους χρήστες να εξάγουν και να αναλύουν τα δεδομένα του έξυπνου αντικειμένου από μια υπηρεσία cloud, σε συνδυασμό με δεδομένα από άλλες πηγές. Αυτή η προσέγγιση είναι μια επέκταση του μοντέλου επικοινωνίας Device-to-cloud, η οποία επιτρέπει στις συσκευές IoT να ανεβάζουν τα δεδομένα μόνο για έναν πάροχο υπηρεσιών εφαρμογής. Η Back-End Data-Sharing αρχιτεκτονική επιτρέπει τα δεδομένα που συλλέγονται από μια IoT συσκευή να συγκεντρώνονται και να αναλύονται. Στο μοντέλο Device-to-Cloud, τα δεδομένα κάθε αισθητήρα ή συστήματος IoT αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων. Η Back-End-Data-Sharing αρχιτεκτονική επιτρέπει στους χρήστες να μετακινούν τα δεδομένα τους όταν ανταλλάσσουν IoT συσκευές, χωρίς να δημιουργείται κάποιο πρόβλημα.



*Εικόνα 1.6: Back-End Data-Sharing*

## 1.4 Η Αρχιτεκτονική του Internet of Things

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, το Internet of Things είναι μια τεχνολογία που βρίσκεται ακόμη σε στάδιο σχεδιασμού. Η αρχιτεκτονική του δεν έχει αποφασιστεί ακόμη πλήρως και προτάσεις και αναθεωρήσεις γίνονται συνεχώς. Παρόλα αυτά θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια γενική περιγραφή της αρχιτεκτονικής του και των επιμέρους στοιχείων. Θα δούμε μια τεχνική απεικόνιση του ΙοΤόπως αυτή περιγράφεται στο (ITU-T-Y.2060, 2016).



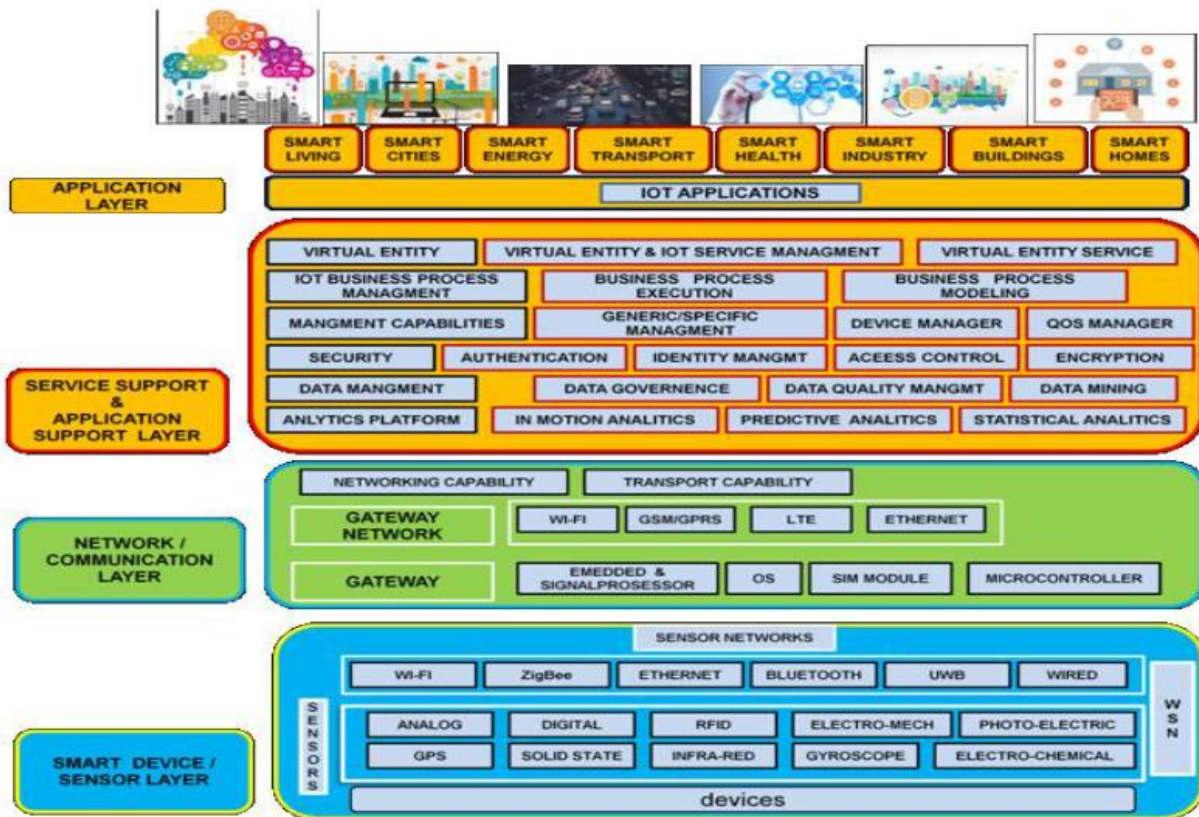
Εικόνα 1.7: Γενική τεχνική επισκόπηση του IoT. Πηγή : (ITU-T-Y.2060, 2016)

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε ότι έχουμε δύο πεδία που συνδέονται μεταξύ τους: τον πραγματικό κόσμο που έχει πραγματικές συσκευές και αντικείμενα και τον κόσμο της πληροφορίας που είναι ένας εικονικός κόσμος. Στον πραγματικό κόσμο η θέση του δικτύου μέσω του οποίου επιτυγχάνονται οι περισσότερες διασυνδέσεις από αντικείμενο σε αντικείμενο ή από αντικείμενο σε εικονικό στοιχείο. Το δίκτυο αυτό είναι ένα μεγάλο δίκτυο που ενώνει πολλά μικρότερα δίκτυα, όπως και στην περίπτωση του Internet. Ακόμη βλέπουμε πως ένα αντικείμενο από τον πραγματικό κόσμο μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα ή περισσότερα εικονικά αντικείμενα στον εικονικό. Ωστόσο, ένα εικονικό αντικείμενο μπορεί να υπάρχει και από μόνο του χωρίς να αντιστοιχεί σε κάποιο φυσικό αντικείμενο.

Στα κυκλάκια βλέπουμε τα αντικείμενα-χρήστες της τεχνολογίας που μπορεί να είναι άνθρωποι, μικρά και μεγάλα μηχανήματα κτλ. Στα γκρι τετραγωνάκια βλέπουμε τις συσκευές (devices) οι οποίες αποτελούν τον εξοπλισμό που φέρουν τα αντικείμενα (πχ ένα αυτοκίνητο) με τις απαραίτητες δυνατότητες επικοινωνίας και ενδεχομένως ανίχνευσης, ενεργοποίησης, συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων. Αυτές οι συσκευές συλλέγουν διάφορων μορφών πληροφορίες και τις διοχετεύουν στο δίκτυο για περαιτέρω επεξεργασία. Μερικές συσκευές μπορούν και να εκτελούν κάποια αυτοματοποιημένα tasks ανάλογα την πληροφορία που δέχονται.

Με άλλα λόγια οι συσκευές αυτές είναι τα εργαλεία που πρέπει να έχουν τα αντικείμενα (things) για να συμμετέχουν στον κόσμο του ΙοΤ. Οι επικοινωνίες μεταξύ των αντικειμένων μπορεί να γίνονται είτε άμεσα με απευθείας φυσική σύνδεση μεταξύ τους (direct communication-c), είτε μέσω ενός κοινού δικτύου (communication without gateway-b) είτε έμμεσα μέσω μιας δικτυακής πύλης (gateway) ή οποία αναλαμβάνει τον ρόλο του ενδιάμεσου, του ταχυδρόμου (communication via gateway -a). Είναι δυνατό επίσης να υπάρχουν και συνδυαστικά σενάρια επικοινωνίας. Το πιο συνηθισμένο βέβαια πρόκειται να είναι το σενάριο b, γιατί έτσι επιτυγχάνεται ταχύτητα, ελαστικότητα και επεκτασιμότητα γιατί η διαδικασία προσθήκης μιας ακόμη συσκευής που θα μπορεί να επικοινωνήσει με όλες τις συσκευές είναι άμεση. Το μόνο που χρειάζεται είναι να μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο και από εκεί και πέρα η επικοινωνία της με κάθε άλλο αντικείμενο γίνεται μέσω της πύλης.

Από πλευράς αρχιτεκτονικής, μια γενική απεικόνιση του μοντέλου αναφοράς του Internet of Things φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Patel et al., 2016).



Εικόνα 1.8: Τεχνολογική αρχιτεκτονική ΙοΤ.Πηγή :(Patel et al., 2016)

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την σύνδεση μεταξύ πραγματικού κόσμου που είναι το χαμηλότερο επίπεδο και του εικονικού κόσμου που είναι το ανώτερο επίπεδο. Για κάθε επίπεδο βλέπουμε και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται (Pateletal., 2016)(ITU-T-Y.2060, 2016).

- **Device Layer (επίπεδο συσκευών):** Το χαμηλότερο επίπεδο είναι το επίπεδο των devices (σε άλλες πηγές αναφέρεται και ως Hardware Layer, δηλαδή το επίπεδο των πραγματικών αντικειμένων) οι οποίες αναλαμβάνουν την συλλογή δεδομένων και τη συνδεσιμότητα του αντικειμένου στο Internet (ITU-T-Y.2060, 2016). Οι αισθητήρες έχουν την ικανότητα να λαμβάνουν μετρήσεις όπως η θερμοκρασία, η ποιότητα του αέρα, η ταχύτητα, η υγρασία, η πίεση, η ροή, η κίνηση, η ηλεκτρική ενέργεια κ.λπ.
- **Network Layer (επίπεδο δικτύου):** Προσφέρει συνδεσιμότητα για την πρόσβαση υπηρεσιών και για τη μεταφορά των εφαρμογών αλλά και των πληροφοριών που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση και τον έλεγχο του δικτύου (control and management) (ITU-T-Y.2060, 2016). Ο τεράστιος όγκος δεδομένων που θα χρειάζεται να φορτώνεται κάθε στιγμή στο δίκτυο δημιουργεί την απαίτηση για ένα δίκτυο με πάρα πολύ υψηλές αποδόσεις. Απαιτείται η εξυπηρέτηση ενός ευρύτερου φάσματος υπηρεσιών και εφαρμογών IOT, όπως οι υπηρεσίες συναλλαγών υψηλής ταχύτητας, εφαρμογές συμβατές με το περιβάλλον κ.λπ.
- **Service support and application support layer (επίπεδο υποστήριξης υπηρεσιών και εφαρμογών):** Στην ουσία αυτό το επίπεδο αποτελεί ένα προκαταρκτικό επίπεδο για τις τελικές εφαρμογές που ανήκουν στο επόμενο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό παρέχει γενικές δυνατότητες που χρησιμοποιούνται από όλες τις εφαρμογές, όπως η επεξεργασία και η αποθήκευση δεδομένων. Στο ίδιο επίπεδο παρέχονται και πιο εξειδικευμένες δυνατότητες για την εξυπηρέτηση διαφοροποιημένων εφαρμογών (ITU-T-Y.2060, 2016). Μία από τις σημαντικότερες λειτουργίες αυτού του επιπέδου είναι η διαχείριση της παραγόμενης δικτυακής κίνησης (με τον όρο δικτυακή κίνηση εννοούμε το σύνολο των δεδομένων-data που μεταφέρονται). Ορισμένες από τις πληροφορίες απαιτούν φιλτράρισμα ή δρομολόγηση σε άλλα συστήματα για περαιτέρω επεξεργασία πληροφορίας. Επίσης, υπάρχουν εφαρμογές που λόγω κρισιμότητας απαιτούν άμεση αποκρισιμότητα και προτεραιότητα στην επεξεργασία έναντι των υπολοίπων, για παράδειγμα οι νοσοκομειακές εφαρμογές. Το επίπεδο αυτό έχει τη δυνατότητα να ελέγχει όλες αυτές τις ροές δεδομένων και να εφαρμόζει κανόνες προτεραιότητας,

δρομολόγησης και φιλτραρίσματος για την αποτελεσματικότερη συνολική εξυπηρέτηση. (Patel et al., 2016)

- **Application Layers (επίπεδο εφαρμογών):** Το ανώτερο επίπεδο του οικοδομήματος αποτελείται από τις IoT εφαρμογές. Αυτές είναι λογισμικά που εκτελούν συγκεκριμένες διεργασίες και θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι το τελικό αγαθό, η τελική υπηρεσία που ζητούν οι χρήστες.

## 1.5 Οιεφαρμογέςτου Internet of Things

Το IoT υπόσχεται πολλές εφαρμογές στην ανθρώπινη ζωή, καθιστώντας τη ζωή πιο εύκολη, πιο ασφαλή και πιο έξυπνη. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Εφαρμογές Internet of Things για έξυπνες πόλεις.** Οι εφαρμογές έξυπνων πόλεων είναι η καλύτερη λύση για τις σημερινές υπέρ-κατοικημένες και όχι τόσο φιλικές προς το περιβάλλον πόλεις. Σύμφωνα με την έρευνα Rick [14] σχετικά με τις έξυπνες πόλεις, η αγορά IoT των έξυπνων πόλεων εκτιμάται σε δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025. Αυτό θα προσελκύσει πολλούς προγραμματιστές του IoT. Με τις έξυπνες πόλεις οι άνθρωποι θα απαλλαγθούν από μερικά και ίσως από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν σήμερα. Πολλές μεγάλες πόλεις υποστηρίχθηκαν από έξυπνα έργα, όπως η Σεούλ, η Νέα Υόρκη, το Τόκιο, η Σαγκάη, η Σιγκαπούρη. Οι έξυπνες πόλεις μπορούν ακόμα να θεωρηθούν οι πόλεις του μέλλοντος. Σήμερα, με την αύξηση του ρυθμού καινοτομίας της δημιουργίας έξυπνων πόλεων, θα καταστεί εφικτό να εισέλθει η τεχνολογία του IoT στην ανάπτυξη τους. Οι απαιτήσεις των έξυπνων πόλεων απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό σε όλα τα στάδια και τη στήριξη των κυβερνήσεων και των πολιτών για την ενσωμάτωση του IoT σε κάθε πτυχή. Με το IoT, οι πόλεις μπορούν να βελτιωθούν σε πολλά επίπεδα. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών για έξυπνες πόλεις είναι το έξυπνο Parking, πολεοδομική «υγεία», χάρτες αστικού θορύβου, ανίχνευση μέσω smartphones, κυκλοφοριακή αποσυμφόρηση, έξυπνος φωτισμός, έξυπνοι δρόμοι και σύστημα διαχείρισης αποβλήτων. Ήδη οι Ινδοί χτίζουν την πρώτη Ινδική έξυπνη πόλη κοντά στην πρωτεύουσα Gandhinagar του Gujarat.

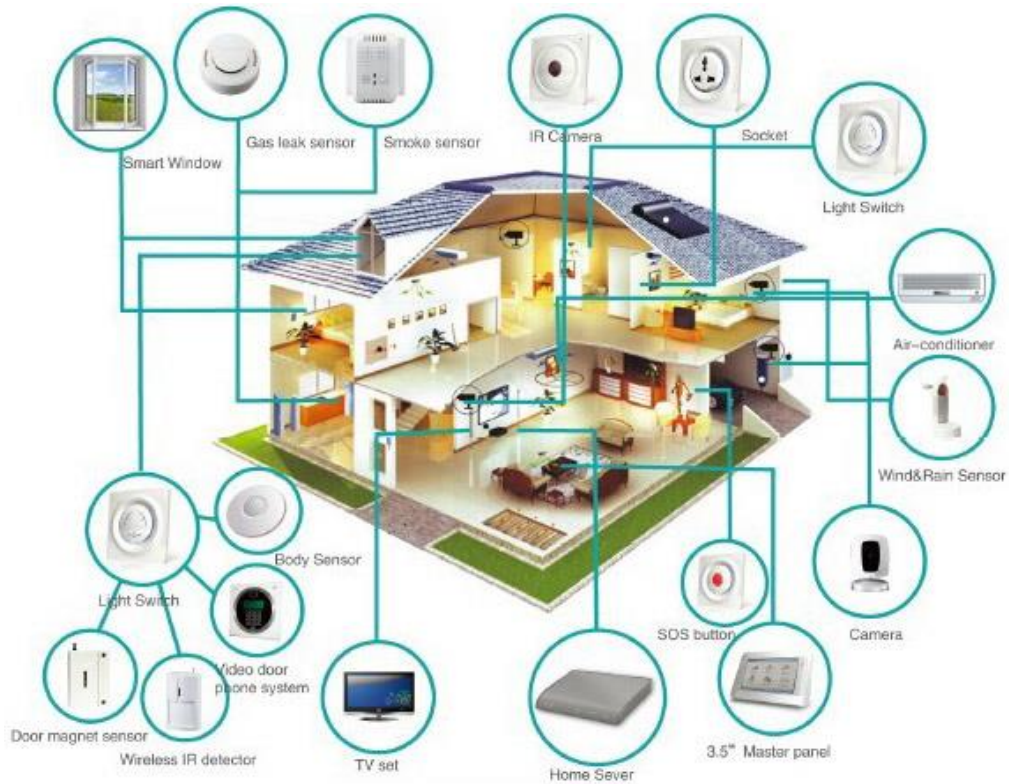


*Εικόνα 1.9: Μια μικρή ιδέα για την έξυπνη πόλη.*

- **Εφαρμογές του Internet of Things για αυτοματοποίηση λειτουργιών σε σπίτια και κτίρια.** Ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα του Internet of Things είναι το πιο κεντρικοποιημένο και ευκολότερο σε συντήρηση σύστημα ελέγχου για όλα τα σπίτια. Με την βοήθεια της πλατφόρμας του Internet of Things οι άνθρωποι θα μπορούν να μετρήσουν την κατανάλωση της ενέργειας και του νερού, που θα τους βοηθήσει να καταλάβουν πως χρησιμοποιούν τις πηγές και πως μπορούν να εξοικονομήσουν πόρους στο μέλλον. Αυτό θα περιλαμβάνει επίσης, ένα σύστημα συντήρησης προϊόντων τέχνης ώστε να μπορούν να ελέγχουν τις συνθήκες μέσα σε μουσεία και οίκους τέχνης. Είναι κατανοητό πόσο πολύ θα βοηθήσει ένα τέτοιο σύστημα.
- Επίσης, οι τεχνολογίες Wi-Fi στον οικιακό αυτοματισμό έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως λόγω της δικτυωμένης φύσης των ηλεκτρονικών εφαρμογών, όπου οι ηλεκτρονικές συσκευές όπως οι τηλεοράσεις, οι κινητές συσκευές κ.λπ. συνήθως υποστηρίζονται από το Wi-Fi (Farheen et al., 2015). Το Wi-Fi έχει αρχίσει να γίνεται μέρος του οικιακού δικτύου IP λόγω του αυξανόμενου ρυθμού υιοθέτησης φορητών υπολογιστικών συσκευών όπως τα έξυπνα τηλέφωνα, τα tablet κ.λπ. Για παράδειγμα, η δικτύωση για την παροχή υπηρεσιών ροής μέσω διαδικτύου ή δικτύου σε σπίτια, μπορεί να αποτελέσει μέσο για έλεγχο της λειτουργίας της συσκευής μέσω του δικτύου. Ταυτόχρονα, οι κινητές συσκευές εξασφαλίζουν ότι οι καταναλωτές έχουν πρόσβαση σε έναν φορητό



«ελεγκτή» για τις ηλεκτρονικές συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Και οι δύο τύποι συσκευών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πύλες για εφαρμογές IoT. Πολλές εταιρείες σκέφτονται να αναπτύξουν πλατφόρμες που ενσωματώνουν τον αυτοματισμό των κτιρίων με τη ψυχαγωγία, την παρακολούθηση της υγειονομικής περίθαλψης, την παρακολούθηση της ενέργειας και την παρακολούθηση των ασύρματων αισθητήρων στο περιβάλλον του σπιτιού και του κτιρίου (Suhonen, 2013). Υπό την έννοια του IoT, τα σπίτια και τα κτίρια μπορούν να έχουν πολλές έξυπνες συσκευές και αντικείμενα, αλλά οι πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές του είναι ο έξυπνος φωτισμός, το έξυπνο περιβάλλον και τα μέσα ενημέρωσης, και ο έλεγχος του αέρα και της κεντρικής θέρμανσης.



*Εικόνα1.10: Οι εφαρμογές για τα έξυπνα σπίτια και κτίρια.*

- **Εφαρμογές του Internet of Things σχετικές με την φροντίδα υγείας.** Το Internet of Things προσθέτει περισσότερη αξία στην βιομηχανία της υγειονομικής περίθαλψης. Λόγω του IoT, μερικά πλεονεκτήματα τα οποία θα προστεθούν στον τομέα της φροντίδας υγείας είναι: ανίχνευση πτώσης, ιατρικά ψυγεία, φροντίδα υγείας αθλητών, επιτήρηση ασθενών, υπερϊώδης ακτινοβολία κλπ. Αυτό θα βοηθήσει να

ζήσουν τις ζωές τους οι άνθρωποι πιο ευτυχισμένα χωρίς να έχουν πολλά ιατρικά προβλήματα. Για παράδειγμα η ανίχνευση πτώσης θα βοηθήσει τα ηλικιωμένα άτομα ή τα άτομα με αναπηρίες που ζουν μόνο τους δίνοντας τους βοήθεια. Όταν η ρύπανση της ατμόσφαιρας είναι στα υψηλότερα της επίπεδα οπότε δεν είναι πολύ ασφαλές να βγαίνουν έξω στο φως του ήλιου. Στο μέλλον οι άνθρωποι θα έχουν την δυνατότητα να μετρούν την Ultra Violet (UV) ακτινοβολία του ήλιου και θα γνωρίζουν αν θα τους επηρεάζει αρνητικά.

Η ιδιαίτερη προσοχή που απαιτείται σε νοσηλεύόμενους ασθενείς των οποίων η φυσιολογική κατάσταση πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς και μπορεί να γίνει συνεχώς με τη χρήση τεχνολογιών παρακολούθησης IoT. Οι έξυπνοι αισθητήρες υγείας συλλέγουν πληροφορίες για τους ασθενείς τους, χρησιμοποιούν τις πύλες και το cloud για να τις αναλύουν και να τις αποθηκεύουν και στη συνέχεια στέλνουν ασύρματα τα δεδομένα που έχουν αναλυθεί στους γιατρούς για περαιτέρω ανάλυση και ανασκόπηση (Niewolny, 2013). Η τεχνολογία IoT μπορεί να αντικαταστήσει έναν επαγγελματία στην υγεία που πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να ελέγχει τα ζωτικά σημεία του ασθενούς, αντί να παρέχει μια συνεχή αυτοματοποιημένη ροή πληροφοριών. Με αυτόν τον τρόπο, βελτιώνεται ταυτόχρονα η ποιότητα της φροντίδας και μειώνεται το κόστος της περίθαλψης μέσω της μείωσης του κόστους των παραδοσιακών τρόπων φροντίδας καθώς και της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων (Champerlin, 2016).



*Εικόνα 1.11: Η εφαρμογή στην υγεία.*

Παγκοσμίως, πολλοί άνθρωποι υποφέρουν από προβλήματα υγείας επειδή δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε αποτελεσματική παρακολούθηση. Οι μικρές, ισχυρές ασύρματες

λύσεις που συνδέονται μέσω του IoT παρέχουν τη δυνατότητα για παρακολούθηση αυτών των ασθενών. Αυτές οι λύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ασφαλή λήψη δεδομένων υγείας από διάφορους αισθητήρες, την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων για την ανάλυση των δεδομένων και στη συνέχεια την κοινοποίησή τους μέσω ασύρματης σύνδεσης σε επαγγελματίες υγείας ώστε να κάνουν τις κατάλληλες συστάσεις για την υγεία τους (Mohammed & Ahmed, 2017).



*Εικόνα 1.12: Η εφαρμογή στην υγεία.*

- **Εφαρμογές του Internet of Things σχετικά με την αυτοκίνηση.** Συνδεδεμένα αυτοκίνητα είναι αυτοκίνητα τα οποία έχουν πρόσβαση, καταναλώνουν, δημιουργούν, εμπλουτίζουν, κατευθύνουν και μοιράζονται ψηφιακές πληροφορίες με επιχειρήσεις, ανθρώπους, οργανισμούς, υποδομές και άλλα αντικείμενα. Αυτά τα αντικείμενα περιλαμβάνουν άλλα αυτοκίνητα. Δεδομένου ότι τα αυτοκίνητα γίνονται όλο και περισσότερο συνδεδεμένα, αποκτούν αυτό-επίγνωση και σταδιακά γίνονται αυτόνομα. Κατά πάσα πιθανότητα θα βιώσουν, οι περισσότεροι από τους ανθρώπους που ζουν σήμερα, την εμπειρία των αυτό-οδηγούμενων αυτοκινήτων αν και ίσως όχι και τις 3 φάσεις του. Δηλαδή από τα αυτοματοποιημένα, στα αυτόνομα και τέλος στα μη-επανδρωμένα αυτοκίνητα.

Η εξέλιξη των μεταφορών είναι ένας από τους παράγοντες που δείχνουν την ευημερία μιας χώρας. Μια εφαρμογή παρακολούθησης και προειδοποίησης σχετικά με την οδική κατάσταση είναι μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές μετασχηματισμού του Διαδικτύου (Mirzabeiki, 2010). Η βασική ιδέα της έννοιας της έξυπνης μεταφοράς και της κινητικότητας είναι η εφαρμογή των αρχών της συλλογής πηγών και της συμμετοχικής ανίχνευσης. Η διαδικασία άρχισε με τον χρήστη να προσδιορίζει τις επιθυμίες της διαδρομής και να σημειώνει ορισμένα σημεία ως ανωμαλία στην εφαρμογή του έξυπνου τηλεφώνου (Talasila et al., n.d). Η έξυπνη μεταφορά αντιπροσωπεύει την ανάλυση της πρόβλεψης της ζήτησης και της ανίχνευσης ανωμαλιών. Η δρομολόγηση των οχημάτων και ο έλεγχος της ταχύτητας εκτός από τη διαχείριση της κυκλοφορίας είναι όλοι γνωστοί ως έλεγχοι μεταφοράς, οι οποίοι σχετίζονται στενά με τον τρόπο σύνδεσης των οχημάτων (επικοινωνία V2X) και συνολικά διέπονται από τη διάδοση πολλαπλών τεχνολογιών.

Το IoT που μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στη μεταφορά είναι τα ηλεκτρικά οχήματα, που αποτελούν ένα σημαντικό μέσο για τη μείωση τόσο του κόστους καυσίμων όσο και των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Πολλές χώρες έχουν υποστηρίξει έρευνες σε συστήματα για την παρακολούθηση της απόδοσης της μπαταρίας ιόντων λιθίου (Li-ion) σε ένα ηλεκτρικό όχημα. Συστήματα σχεδιάζονται για να ανιχνεύουν τις λειτουργίες της μπαταρίας Lion σε ρεαλιστικές οδηγητικές συνθήκες, ώστε ο οδηγός να γνωρίζει την κατάσταση της μπαταρίας στην διαδρομή που διανύει. (Chatzimilioudis et al., 2011).

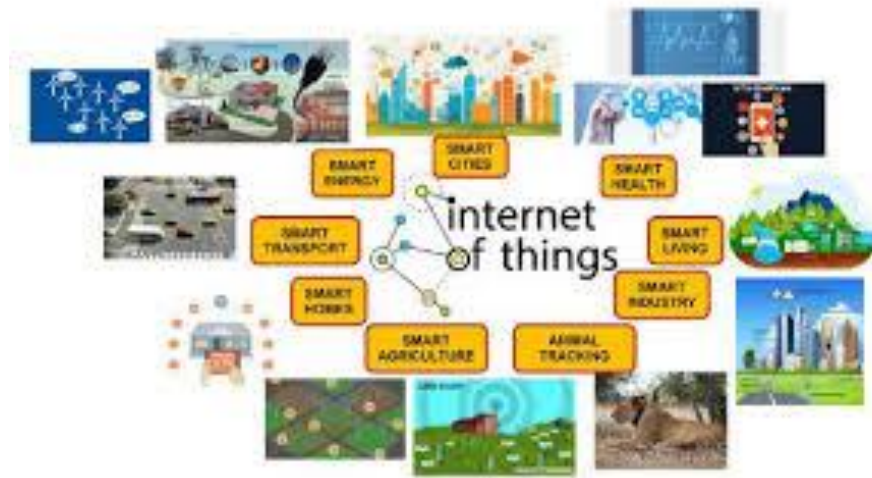
- **Έξυπνο περιβάλλον.** Το περιβάλλον παίζει σημαντικό ρόλο στην ανθρώπινη ζωή. Οι άνθρωποι, τα ζώα, τα πουλιά, τα ψάρια και τα φυτά μπορεί να επηρεαστούν από ένα ανθυγιεινό περιβάλλον. Υπήρξαν πολλές έρευνες που έχουν εκπονηθεί για την επίλυση των προβλημάτων της ρύπανσης του περιβάλλοντος και των αποβλήτων (Djajadi, 2016). Η δημιουργία ενός υγιούς περιβάλλοντος δεν είναι εύκολη λόγω των βιομηχανικών και μεταφορικών αποβλήτων, και των ανεύθυνων ανθρώπινων δραστηριοτήτων που καταστρέφουν το περιβάλλον (Bhattacharjee & Bera, 2014).



**Εικόνα 1.13: Το έξυπνο περιβάλλον.**

Η παρακολούθηση και η διαχείριση του περιβάλλοντος χρειάζεται έξυπνους τρόπους και νέες τεχνολογίες. Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος είναι σημαντική προκειμένου να εκτιμηθεί η τρέχουσα κατάσταση του ώστε να ληφθούν οι σωστές αποφάσεις για τη ζωή σύμφωνα με τα συλλεχθέντα δεδομένα από τα συστήματα παρακολούθησης και η διαχείριση του περιβάλλοντος είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική κατανάλωση και χρήση των πόρων και τη μείωση των αποβλήτων των εργοστασίων και των οχημάτων. Τόσο η παρακολούθηση όσο και η διαχείριση των αποβλήτων παρέχουν μεγάλη ποσότητα δεδομένων για την επιβολή ενός υγειονομικού προτύπου από τις κυβερνήσεις ή τους οργανισμούς περιβάλλοντος για την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος και για τη μείωση ή την αποφυγή φυσικών καταστροφών (*Jianget et al., 2009*).

Το έξυπνο περιβάλλον είναι μια σημαντική τεχνολογία στην καθημερινή μας ζωή, η οποία προσφέρει πολλές εγκαταστάσεις και λύσεις για πολλές περιβαλλοντικές εφαρμογές όπως η ρύπανση του νερού και της ατμόσφαιρας, η παρακολούθηση του καιρού και της ακτινοβολίας, η διαχείριση των αποβλήτων, οι φυσικές καταστροφές και πολλούς άλλους περιβαλλοντικούς δείκτες. Η ενσωμάτωση συσκευών έξυπνου περιβάλλοντος με την τεχνολογία IoT αναπτύσσεται για την ανίχνευση και την παρακολούθηση «αντικειμένων περιβάλλοντος», τα οποία παρέχουν δυνητικά οφέλη για την επίτευξη ενός πράσινου κόσμου και μιας βιώσιμης ζωής (Dlodlo, 2012).



*Εικόνα 1.14: Το έξυπνο περιβάλλον.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ LoRaWAN

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στις μέρες μας ο αριθμός των ηλεκτρονικών συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο ολοένα και αυξάνεται. Για να μπορέσουμε να υποστήριξουμε την επικοινωνία με αυτές τις συσκευές IoT μπορούμε να διαλέξουμε από ένα πλήθος τεχνολογιών. Το Wi-Fi είναι ευρέως διαδεδομένο, αλλά απαιτεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας και μεταδίδει μεγάλο όγκο δεδομένων. Το Bluetooth επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν, όμως έχει περιορισμένη εμβέλεια.

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

Για εξοικονόμηση ενέργειας οι ακραίες (end nodes) συσκευές LoRaWAN έχουν μικρή περίοδο εργασίας με duty cycle 1% και επίσης υπάρχουν σημαντικοί περιορισμοί ως προς τη συχνότητα των μεταδόσεων. Το διαθέσιμο μέγεθος πλαισίου είναι μικρό και η πληροφορία που μεταφέρεται δεν έχει τη μορφή πακέτων IP. Εκτός από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους που διαθέτουν δίκτυα βασισμένα σε τεχνολογία LoRaWAN, το The Things Network προσφέρει μια κοινόχρηστη crowd-sourced υποδομή NS για υλοποίηση εφαρμογών IoT.

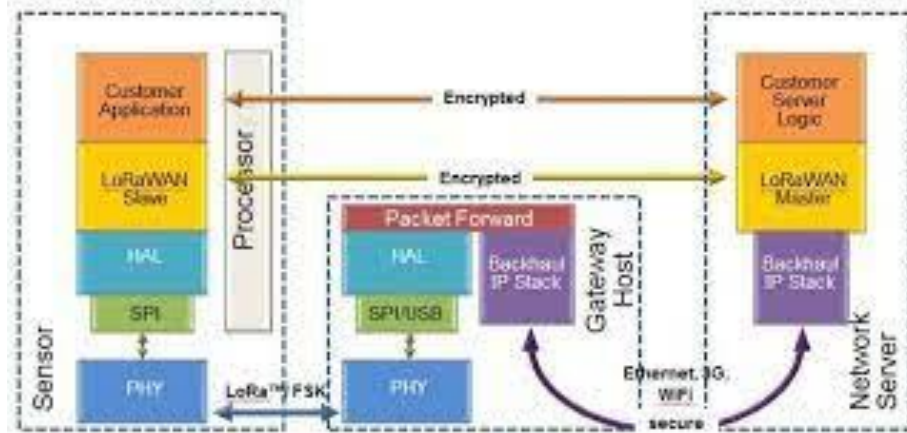
## 2.1 Τι είναι το LoRaWAN

Το LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο low-powerwide-area network (LPWAN). Το LPWAN είναι ένας τύπος δικτύου ασυρμάτων τηλεπικοινωνιών ευρείας περιοχής σχεδιασμένο να επιτρέπει μεγάλης εμβέλειας και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης επικοινωνία μεταξύ αντικειμένων, όπως αισθητήρες που λειτουργούν με μπαταρίες. Η χαμηλή κατανάλωση, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης και η επιδιωκόμενη χρήση, ξεχωρίζει αυτόν τον τύπο δικτύου από τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής που είναι σχεδιασμένα να συνδέουν χρήστες και επιχειρήσεις, να μεταφέρουν μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, χρησιμοποιώντας παραπάνω ενέργεια. Οι ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων των LPWAN κυμαίνονται από 0.3 kbit/s μέχρι 50 kbit/s ανά κανάλι.

Το LoRaWAN λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων όπως το Wi-Fi και είναι πολύ ασφαλές από τις τελικές συσκευές έως τον server όπως τα δίκτυα κινητής. Είναι ιδανικό για εσωτερικού και εξωτερικού χώρου εφαρμογές. Το πρωτόκολλο LoRaWAN και οι συσκευές LoRa συνδυάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά του Wi-Fi και του δικτύου κινητής για να προσφέρουν αποδοτική, ευέλικτη και οικονομική λύση συνδεσιμότητας ιδανική για εφαρμογές IoT. Απλοί αισθητήρες μπορούν να τροφοδοτούν με δεδομένα πλατφόρμες ανάλυσης, όπως αυτές της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης.

Δημόσια, ιδιωτικά και υβριδικά δίκτυα LoRaWAN είναι παγκοσμίως διαθέσιμα και προσβάσιμα σε πάρα πολλές χώρες. Αυτή η ήδη υπάρχουσα υποδομή επιτρέπει την εύκολη και άμεση υλοποίηση εφαρμογών. Το οικοσύστημα που υποστηρίζει τα LoRa και LoRaWAN περιέχει μια ολοκληρωμένη συλλογή από φορείς δικτύου, κατασκευαστές ηλεκτρονικού υλικού, σχεδιαστές προγραμμάτων, παρόχους υπηρεσιών και πανεπιστήμια, που έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στην δημιουργία συσκευών, δικτύων και εφαρμογών.





Εικόνα 2.1: Το LoRaWAN δίκτυο.

## 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος LoRaWAN

Η τεχνολογία της ευρείας περιοχής, χαμηλής ισχύος (LPWA) καλύπτει τις ανάγκες πολλών αγορών IoT για συσκευές χαμηλού κόστους που διατηρούν μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας και δίκτυα μεγάλης περιοχής χαμηλού κόστους που υποστηρίζουν μεγάλο αριθμό συνδέσεων.

Όπως αναφέραμε, το «διαδίκτυο των πραγμάτων» (IoT) έχει μεγάλη άνθηση. Μικρές συσκευές, π.χ αισθητήρες θερμοκρασίας μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο επιτρέποντας την ανάπτυξη εφαρμογών που διευκολύνουν την καθημερινή ζωή, π.χ. απομακρυσμένος έλεγχος θέρμανσης οικίας. Το διαθέσιμο μέγεθος πλαισίου είναι μικρό και η πληροφορία που μεταφέρεται δεν έχει τη μορφή πακέτων IP. Τα πλαίσια εκπέμπονται στον ραδιοδιάλυο με τεχνική ALOHA προς πύλες (gateways) οι οποίες τα προωθούν σε υποδομή backend και στη συνέχεια προς το διαδίκτυο. Οι πύλες είναι αντίστοιχες των σταθμών βάσης της κινητής τηλεφωνίας, με τη διαφορά ότι έχουν μεγαλύτερη εμβέλεια και μπορούν να εξυπηρετήσουν πολύ μεγάλο αριθμό τερματικών (λόγω της LoRa). Η υποδομή backend συνίσταται κατά κύριο λόγο από ένα NS (Network Server) και διεπαφές προς άλλους εξυπηρετητές εφαρμογών (applications servers) όπου αναπτύσσονται οι σχετικές με το IoT εφαρμογές των χρηστών. Η διαχείριση των ακραίων κόμβων και των πυλών (Gates) γίνεται κεντρικά από τον NS. Μεταξύ των λειτουργιών είναι η εγγραφή των κόμβων, η κρυπτογράφηση των δεδομένων, η ρύθμιση του ρυθμού μετάδοσης των κόμβων, κλπ.

Εκτός από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους που διαθέτουν δίκτυα βασισμένα σε τεχνολογία LoRaWAN, το The Things Network, προσφέρει μια κοινόχρηστη crowd-sourced υποδομή NS για υλοποίηση εφαρμογών IoT.

Το LoRaWAN, σε αντίθεση με άλλα συστήματα, επιτρέπει την κατασκευή ενός αυτόνομου, ξεχωριστού δικτύου αφιερωμένου στις ανάγκες ενός ιδιωτικού δικτύου.

Η συσκευή που διαθέτει μονάδα LoRa παραδίδεται με μια στοίβα πρωτοκόλλων LoRaWAN, ώστε να μπορεί εύκολα να συνδεθεί με την υπάρχουσα, ταχέως αναπτυσσόμενη υποδομή LoRaAlliance - τόσο σε ιδιωτικά δίκτυα τοπικής περιοχής (LAN) όσο και σε δημόσια δίκτυα τηλεπικοινωνιών για τη δημιουργία χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής WAN (LPWAN) σε εθνική κλίμακα. Η ενσωμάτωση στοίβας LoRaWAN επιτρέπει επίσης τη σύνδεση με οποιονδήποτε μικροελεγκτή, όπως η βιομηχανική συσκευή ModBerry από την TECHBASE.

**Πίνακας 2. 1: Χαρακτηριστικά του LoRaWAN**

<i>LoRaWAN</i>	
<b>Χαρακτηριστικά Παραμέτρων</b>	<b>LoRaWan</b>
Bandwidth=Εύρος Ζώνης	125 kHz
Εμβέλεια	≤ 800 m (αστικό περιβάλλον) ≤ 40 km (οπτική επαφή, αγροτική περιοχή)
Battery life=Διάρκεια ζωής της μπαταρίας	15+ years
Ρυθμός μετάδοσης	0.3kbps - 50 kbps
Latency= λανθάνοντας χρόνος	≤ 53 ms
Security=Ασφάλεια	AES 128 bit
Geolocation=Γεωγραφική Περιοχή	Yes (TDDA)
Cost Efficiency= Αποδοτικότητα Κόστους	Υψηλό
Εμπορική διαθεσιμότητα	Ναι
Εμπορική στρατηγική	Ανάπτυξη νέων δικτύων προσαρμοσμένα στις ανάγκες των πελατών
Τοποθέτηση στην αγορά	SPs (Cellular and Cable)Private Networks (Enterprise)

Στο LoRaWAN, οι συσκευές μπορούν να σταματήσουν για λίγο ή για όσο επιθυμεί η εφαρμογή, γιατί είναι ασύγχρονο, βασισμένο στο ALOHA πρωτόκολλο. Η μετάβαση από το LoRa σε ένα λειτουργικό ασύρματο σύστημα είναι ανάλογη με τη μετάβαση από ένα τσιπ ραδιοφώνου BPSK σε ένα δίκτυο Wi-Fi. Οι λειτουργίες OSI layer 2 και άνω των μεγάλων δικτύων που περιλαμβάνουν πύλες, επαναλήπτες, διευθύνσεις, προσαρμοστικούς ρυθμούς δεδομένων, επαναλήψεις μηνυμάτων, αναγνώριση μηνυμάτων και σήματα downlink OFDM υψηλής χωρητικότητας είναι η λειτουργία συστημάτων όπως το LoRaWAN και το Symphony Link.

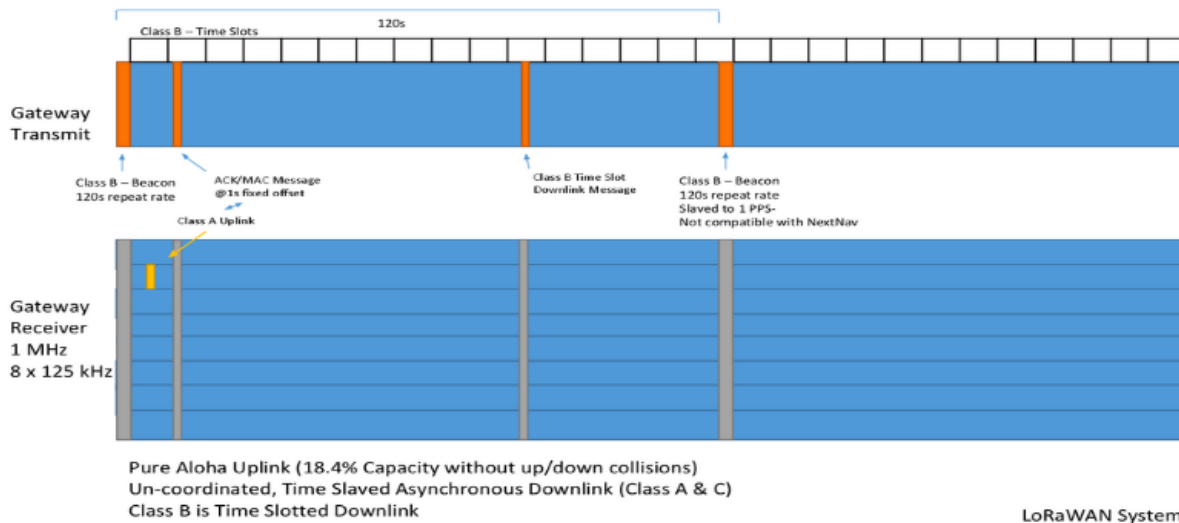
## 2.3 Πως λειτουργεί το LoRaWAN

Στο πιο θεμελιώδες επίπεδο, τα πρωτόκολλα σαν το LoRaWAN είναι αρκετά απλά. Ο τρόπος που επικοινωνεί μπορούμε να τον παρομοιάσουμε με αυτόν της επικοινωνίας ενός καθηγητή με τους μαθητές κατά την διάρκεια μια διάλεξης. Το gateway μιλάει στους τελικούς κόμβους, και αντίστροφα. Είναι μια ασύμμετρη σχέση με την έννοια ότι κάθε κόμβος προσπαθεί να επικοινωνήσει με το gateway την ίδια στιγμή, αλλά το gateway δεν μπορεί να ακούσει όλους τους κόμβους ταυτόχρονα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του LoRaWAN μέσα από ένα παράδειγμα. Έστω, λοιπόν ότι έχουμε τέσσερα gateways και έναν κόμβο. Ο κόμβος μεταδίδει τυφλά στο φάσμα συχνοτήτων και κάθε gateway που μπορεί να τύχει να ακούσει αυτή τη μετάδοση στη συνέχεια μπορεί να την αναμεταδώσει στο cloud. Είναι πιθανό όλα τα gateway να ακούσουν το μήνυμα και να το αναμεταδώσουν. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να μεταδοθούν μηνύματα από τον κόμβο ακόμα και αν υπάρχει πολύ ασθενής σύνδεση μεταξύ κόμβου και gateways.

Όταν το μήνυμα θα παραδοθεί, δεν υπάρχει επιβεβαίωση παραλαβής. Ωστόσο, οι κόμβοι στο LoRaWAN δίκτυο μπορούν να απαιτήσουν μήνυμα επιβεβαίωσης. Αν έχει ζητηθεί μήνυμα επιβεβαίωσης και όλα τα gateways έχουν παραλάβει το ίδιο μήνυμα, το cloud επιλέγει πιο από τα gateways θα απαντήσει σε συγκεκριμένο χρόνο, συνήθως μερικά δευτερόλεπτα

αργότερα. Όμως προκύπτει το εξής πρόβλημα: όταν το επιλεγμένο gateway μεταδίδει πίσω στον κόμβο, σταματάει να ακούει οτιδήποτε άλλο. Άρα, αν μια εφαρμογή χρειάζεται πολλά μηνύματα επιβεβαίωσης, είναι πολύ πιθανό να ξοδέψει περισσότερο χρόνο μεταδίδοντας μηνύματα επιβεβαίωσης από το να ακούει για μηνύματα, πράγμα το οποίο τελικά θα οδηγήσει στην κατάρρευση του δικτύου.



*Εικόνα 2.2: Το LoRaWAN σύστημα πως λειτουργεί.*

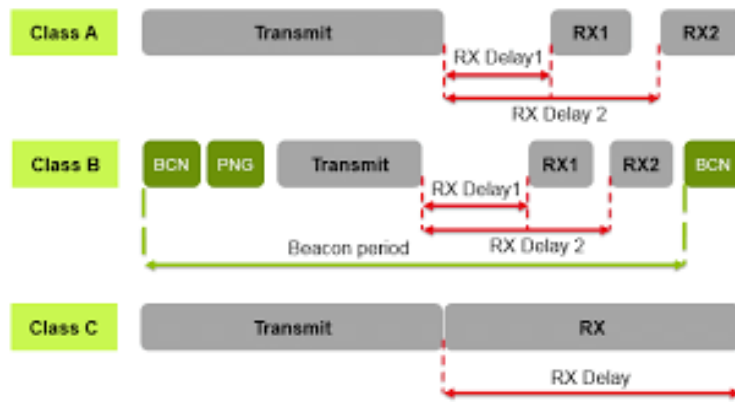
Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει πώς λειτουργεί το LoRaWAN. Η παραπάνω εικόνα δείχνει αν το gateway μεταδίδει ή όχι (αν είναι πορτοκαλί μεταδίδει, αν είναι μπλε δεν μεταδίδει). Η κάτω εικόνα παρουσιάζει τα κανάλια του δέκτη. Σχεδόν όλα τα δίκτυα LPWAN, συμπεριλαμβανομένου και του LoRaWAN, έχουν πολλαπλά κανάλια λήψης και τα περισσότερα LoRaWAN συστήματα μπορούν να δεχτούν οχτώ μηνύματα ταυτόχρονα.

## 2.4 LoRaWAN Classes A, B & C

Το LoRaWAN έχει 3 κλάσεις που μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα. Η πρώτη κλάση είναι η κλάση A που είναι πλήρως ασύγχρονη, είναι αυτό που αποκαλείται ALOHA σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι οι τελικοί κόμβοι δεν περιμένουν κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή για να μιλήσουν στο gateway, απλά μεταδίδουν όποτε χρειάζεται και παραμένουν σε αδράνεια μέχρι τότε. Αν έχουμε ένα τέλεια συγχρονισμένο δίκτυο σε οχτώ κανάλια, μπορούμε να γεμίσουμε κάθε παράθυρο χρόνου με ένα μήνυμα. Όταν ο κόμβος ολοκληρώσει την μετάδοση, ένας άλλος ξεκινάει αμέσως. Χωρίς κανένα κενό στην επικοινωνία, η μέγιστη θεωρητική χωρητικότητα ενός ALOHA δικτύου είναι περίπου το 18.4% αυτού του μέγιστου. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο σε συγκρούσεις, γιατί αν ένας κόμβος μεταδίδει και εκείνη τη στιγμή κάποιος άλλος αποφασίσει να ξυπνήσει και να μεταδώσει στην ίδια συχνότητα και με τις ίδιες ρυθμίσεις, θα υπάρξει σύγκρουση.

Η δεύτερη κλάση είναι η κλάση B, που επιτρέπει στα μηνύματα να μεταδίδονται σε κόμβους που λειτουργούν με μπαταρίες. Κάθε 128 δευτερόλεπτα, το gateway εκπέμπει ένα μήνυμα beacon. Όλα τα LoRaWAN gateways εκπέμπουν μηνύματα beacon την ίδια χρονική στιγμή. Σε όλους τους κόμβους που ανήκουν στη κλάση B ορίζεται παράθυρο χρόνου μέσα στο κύκλο των 128 δευτερολέπτων και προσδιορίζεται πότε θα το ακούνε.

Και τέλος η κλάση C που επιτρέπει στους κόμβους να ακούν συνεχώς και μπορούν οποιαδήποτε στιγμή να στέλνονται downlink μηνύματα. Αυτή η κλάση χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές που δεν λειτουργούν με μπαταρίες, επειδή απαιτείται πολύ ενέργεια για να παραμένει ο κόμβος ενεργός και να λαμβάνει μηνύματα κάθε στιγμή.



Εικόνα 2.3: ToLoRaWAN Classes A,B &C.

## 2.5 Ασφάλεια του LoRaWAN

Η ασφάλεια των δικτύων αποτελεί σημαντική πτυχή οποιουδήποτε δικτύου, για αυτό τα δίκτυα LoRaWAN μπορούν και ορίζουν δύο επίπεδα κρυπτογραφίας. Ένα μοναδικό κλειδί σύνδεσης δικτύου 128 bit το οποίο μοιράζεται μεταξύ τερματικών συσκευών και διακομιστή δικτύου και ένα μοναδικό κλειδί σύνδεσης εφαρμογής 128 bit που χειρίζεται την ασφάλεια από άκρο σε άκρο σε επίπεδο εφαρμογής.

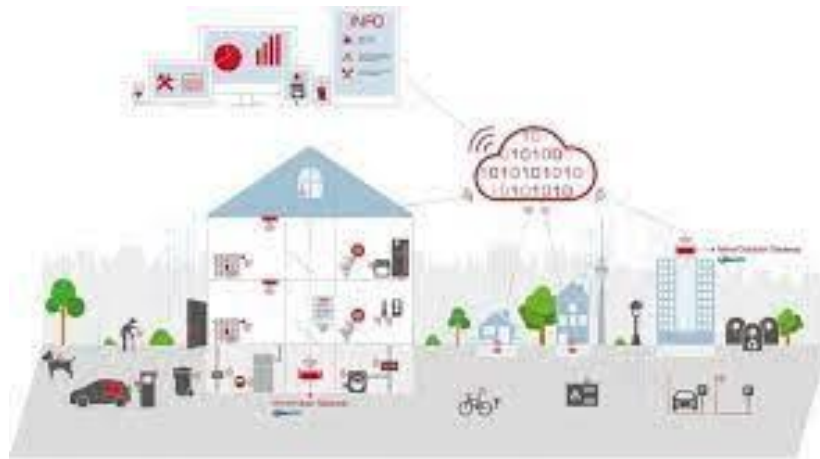
Η μετάδοση σήματος στον αέρα υπόκειται σε επιθέσεις εμπλοκής, πακετάρισμα πακέτων, υποκλοπή και ποικιλία επιθέσεων. Αφ' ετέρου, οι τεχνολογίες (4G, 5G) υποστηρίζουν την επαλήθευση από άκρο σε άκρο και την ασφάλεια του χρήστη χρησιμοποιώντας τη Μονάδα Ταυτοποίησης Συνδρομητών (SIM). Ωστόσο, αυτό έρχεται με το υψηλό κόστος των κυψελοειδών συσκευών και πιο περίπλοκη σχεδιασμό συσκευής. Η ανάγκη για ασφαλή επικοινωνία είναι απαραίτητη στις τεχνολογίες LPWAN. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η ενημέρωση του λογισμικού over the air και επομένως είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η ασφάλεια των συσκευών LPWAN. Δεδομένου ότι το LPWAN είναι βασική τεχνολογία που οδηγεί το IoT, απαιτείται εκτεταμένη μελλοντική έρευνα για τη μελέτη της ασφάλειας του LPWAN.

## 2.6 Εφαρμογές του LoRaWAN

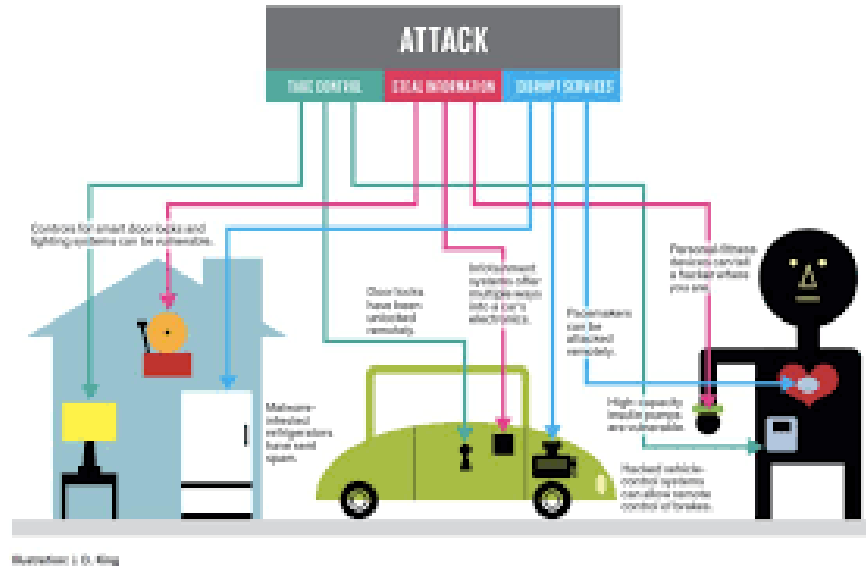
Τα LPWAN ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πληθώρα εφαρμογών, μερικές κατηγορίες εφαρμογών είναι οι εξής και παρουσιάζονται παρακάτω:



- **Παρακολούθηση υποδομών.** Μετρήσεις νερού, ηλεκτρισμού, αερίου κ.α. ώστε να είναι γνωστό σε τι κατάσταση βρίσκεται μια υποδομή (κτίρια, γέφυρες, κτλ.)
- **Μεταφορά.** Τα LPWAN μπορούν να προσφέρουν την εγκατάσταση μιας απευθείας επαφής μεταξύ των οχημάτων και των κέντρων πληροφοριών. Έτσι μπορεί για παράδειγμα να γίνει πιο εύκολη η διαχείριση της κίνησης.



- **Παρακολούθηση παραγωγής.** Τα LPWAN προσφέρουν φθηνές και αξιόπιστες λύσεις στη παρακολούθηση της παραγωγής. Γίνεται έλεγχος της γραμμής παραγωγής σε πραγματικό χρόνο, ταυτόχρονος έλεγχος ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής και ευκολότερη διαχείρισή της.



- **Ασφάλεια.** Οι υπηρεσίες ασφάλειας είναι επιτακτικές για να ελαχιστοποιήσουν οι χρήστες τις προσωπικές τους απώλειες και να προβλέψουν τυχόν ρίσκο.
- **Ιατρική Περίθαλψη.** Τα LPWAN μπορούν να προσφέρουν λύσεις που θα μειώσουν το κόστος για την υγεία.

## 2.7 Αρχιτεκτονική του LoRaWAN

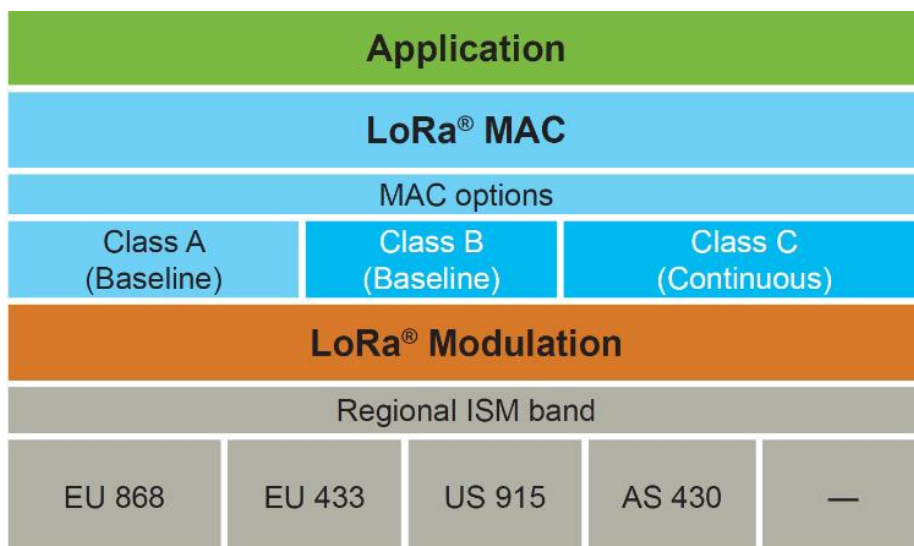
### 2.7.1 Στοιβά Πρωτοκόλλων

Η στοιβά πρωτοκόλλων του δικτύου LoRa αποτελείται από 4 επίπεδα, κάθε ένα από τα οποία πραγματοποιεί συγκεκριμένες λειτουργίες χωρίς να παρεμβαίνει στις λειτουργίες του άλλου. Πιο συγκεκριμένα, διαχωρίζονται ως εξής:

- Επίπεδο εφαρμογής (LoRa Application Layer)
- Επίπεδο Ελέγχου Προσπέλασης Μέσων (LoRa MAC Layer)
- Επίπεδο Φυσικό (LoRa PHY Layer)
- Επίπεδο Ραδιοσυχνότητων (LoRa RF Layer)



Τα επίπεδα είναι διαχωρισμένα μεταξύ τους, ενώ αξιοποιούν τις υπηρεσίες του κατώτερου επιπέδου τους και προσφέρουν υπηρεσίες στο ανώτερό τους. Με αυτόν τον τρόπο, διευκολύνεται τόσο η μελέτη, όσο και η σωστή σχεδίασή τους. Κάθε επίπεδο υλοποιεί καθορισμένα πρωτόκολλα, με κυρίαρχο στόχο την αυξημένη διάρκεια ζωής των τελικών συσκευών (End-Nodes) αλλά και την ανθεκτικότητα του σήματος. Μία τυπική μορφή της στοίβας πρωτοκόλλων του δικτύου (LoRa) φαίνεται παρακάτω, ενώ στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει αναλυτική περιγραφή κάθε επιπέδου.



*Εικόνα 2.4: Η δομή του δικτύου LoRa της στοίβας πρωτοκόλλων.*

## 2.8 Διαμόρφωση LoRa

Η διαμόρφωση LoRa βασίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης διασποράς φάσματος Chirp Spread Spectrum (CSS). Γι' αυτό τον λόγο δεν υπάρχει σαφής περιγραφή της τεχνικής διαμόρφωσης, παρά μερικά έγγραφα που δίνουν ορισμένες πληροφορίες.

### 2.8.1 Διαμόρφωση LoRa - Υλοποίηση του σήματος chirp

Ένα chirp αποτελεί ένα σήμα, του οποίου η συχνότητα αυξάνεται ή μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται είτε γραμμικά είτε εκθετικά. Τα δεδομένα κωδικοποιούνται σε ημιτονοειδές γραμμικά μεταβαλλόμενης συχνότητας παλμούς για την περίπτωση της διαμόρφωσης LoRa, το λογικό '1' και το λογικό '0' παριστάνονται από τον

ίδιο σήμα με αντίθετη φάση. Ο παλμός είναι γραμμικά μεταβαλλόμενης συχνότητας, σταθερής διάρκειας, μπορεί για τη διάδοση της πληροφορίας να καταλάβει ευρύτερο φάσμα από ότι θα καταλάμβανε κανονικά. Η ομοιόμορφη κατανομή οποιουδήποτε συμβόλου σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης παρέχει διάφορα πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, αφού χρησιμοποιεί όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τη μετάδοση του σήματος, το κάνει πιο ανθεκτικό στο θόρυβο του καναλιού. Το σημαντικό είναι ότι αποτελεί μία καλή λύση σε σχέση με τις τυπικές διαμορφώσεις διασποράς φάσματος (όπως Direct-sequence spread spectrum), καθώς επιτυγχάνει καλές επιδόσεις με χαμηλό κόστος και πολυπλοκότητα.

### **2.8.2 Διαμόρφωση LoRa - Παράγοντας διασποράς (Spreading Factor)**

Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια συμβόλου, τόσο πιθανότερη είναι η αξιόπιστη μεταφορά της πληροφορίας, μιας και το διαμορφωμένο σήμα έχει υψηλότερη ανθεκτικότητα σε παρεμβολές και θόρυβο. Κατά συνέπεια, η αύξηση του παράγοντα διασποράς αυξάνει την ευαισθησία του δέκτη και μεγαλώνει την ακτίνα κάλυψης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να αναλογιστούμε ότι όσο περισσότερα σύμβολα στέλνουμε, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να μεταδώσουμε λανθασμένη πληροφορία (αυξάνεται η πιθανότητα για λανθασμένη μετάδοση συμβόλων), αλλά και μεγαλύτερη πιθανότητα για να υπάρξουν τυχόν συγκρούσεις μηνυμάτων. Οπότε, γενικά προτείνεται η αποστολή μικρής έκτασης μηνυμάτων ακόμα και όταν επιλέγεται μεγάλος παράγοντας διασποράς.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι ο παράγοντας διασποράς πρέπει να είναι γνωστός τόσο στον πομπό, όσο και στο δέκτη, διότι διαφορετικοί παράγοντες διασποράς είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους. Επίσης, ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) πρέπει να είναι μεγαλύτερος από μία ελάχιστη τιμή για να μπορεί ο δέκτης να λάβει ικανοποιητικά το σήμα, ώστε να προχωρήσει στην αποδιαμόρφωσή του.

Τέλος, ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ο σωστός συγχρονισμός των δύο. Εξαιτίας της γραμμικότητας των chirp παλμών, συχνотικές αντισταθμίσεις (frequency offsets) μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ισοδύναμες με αντίστοιχες χρονικές αντισταθμίσεις (timing offsets), οι οποίες εύκολα εξαλείφονται στον αποδιαμορφωτή. Επομένως, η διαμόρφωση είναι εξίσου καλή στην αντιμετώπιση του φαινομένου Doppler.

## 2.9 Τεχνικές Κωδικοποίησης

Για την μετάδοση της πληροφορίας τα δεδομένα υπόκεινται σε μια σειρά από τεχνικές κωδικοποίησης, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη μεταφορά τους. Αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Data Whitening:** είναι ένας γραμμικός μετασχηματισμός που εφαρμόζεται στα δεδομένα με σκοπό την τυχαιοποίηση αυτών. Τα δεδομένα (σ.σ. σύμβολα) έχουν στην αρχική τους μορφή αυτοσυσχέτιση μεταξύ τους, την οποία άρει αυτός ο μετασχηματισμός μετατρέποντάς τα σε ασυσχέτιστα. Επομένως, με τη βοήθεια μίας whitening ακολουθίας (τυχαία ακολουθία), η οποία είναι γνωστή τόσο στον δέκτη όσο και στον πομπό, η πληροφορία κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος ζώνης του καναλιού.
- **Gray Indexing:** τα κωδικοποιημένα σύμβολα διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε δύο διαδοχικά σύμβολα να διαφέρουν κατά μέγιστο 1 bit. Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπονται one-by-one σφάλματα κατά την ανάκτηση των συμβόλων, συνεπώς αυξάνονται οι πιθανότητες να διορθωθούν σφάλματα από την κωδικοποίηση του καναλιού.
- **Forward Error Correction (FEC):** η προς τα εμπρός διόρθωση σφαλμάτων αποτελεί από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές για τον έλεγχο σφαλμάτων κατά την ψηφιακή μετάδοση της πληροφορίας σε ένα θορυβώδες τηλεπικοινωνιακό κανάλι. Στη διαμόρφωση LoRa εφαρμόζεται με τη μορφή κώδικα Hamming (M,N). Για την ακρίβεια, το μήκος της λέξης του κώδικα πληροφορίας (μήκους N) είναι συγκεκριμένο και ίσο με 4 bits, ενώ η κωδική λέξη (μήκους M) αποτελεί παράμετρο που ρυθμίζεται από το σύστημα με μήκος [5:8] bits. Οπότε, λόγω της συγκεκριμένης απαραίτητης υλοποίησης επηρεάζεται ο ρυθμός bit του σήματος πληροφορίας.
- **Interleaving:** Η χρήση αναδιατάκτη στις ψηφιακές τηλεπικοινωνίες είναι συχνή, διότι βελτιώνει την επίδοση των FEC κωδίκων. Ουσιαστικά, αναδιατάσσει την έξοδο του FEC κωδικοποιητή, καθιστώντας τον κώδικα πιο ανθεκτικό σε 'λάθη κατά ριπές' (burst errors). Τα σφάλματα αυτά εμφανίζονται κατά ομάδες σε μεμονωμένα χρονικά διαστήματα και δεν είναι ίσο-κατανεμημένα με τυχαίο τρόπο σε όλη τη διάρκεια του

μηνύματος. Άρα η χρήση ενός αναδιατάκτη που αναδιατάσσει τα bits πληροφορίας μπορεί να αποσυσχετίσει το μήνυμα από το χρόνο, δηλαδή τα λάθη που προκύπτουν σε χρονικά συνεχόμενα bits να μην είναι συνεχόμενα μέσα στο πραγματικό σήμα. Στη διαμόρφωση LoRa χρησιμοποιείται διαγώνιος αναδιατάκτης με τα δύο πιο σημαντικά δυαδικά ψηφία να αντιστρέφονται. Κάθε διαγώνια λέξη πληροφορίας είναι μετατοπισμένη ή έχει περιστραφεί από έναν αυθαίρετο αριθμό bits, ενώ τα bits μέσα σε κάθε κωδική λέξη είναι ανεστραμμένα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ Narrow-Band IoT

Η Third Generation Partnership Project (3GPP) (τρίτη γενιά επικοινωνιών) δημιούργησε μια ομάδα εργασίας με σκοπό την ολοκλήρωση της τεχνολογίας IoT της Huawei, η οποία τυποποιήθηκε από την συνεργασία της Neul και της Vodafone, και της τεχνολογίας LTE που συστήθηκε από τις Nokia, Ericsson και Intel. Το αποτέλεσμα ήταν το NarrowBand – IoT. Το πρώτο NB-IoT (NarrowBand – IoT) ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2017.

Η 3GPP καθόρισε 5 στόχους οι οποίοι είναι:

- α) βελτίωση της εσωτερικής κάλυψης σε περιοχές με υψηλές απώλειες
- β) την δυνατότητα να αυξάνεται συνεχώς ο αριθμός των IoT συσκευών
- γ) τη μείωση του κόστους των διαδικασιών και των μονάδων
- δ) τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας
- ε) την υποστήριξη χαρακτηριστικών καθυστέρησης

Το NB – IoT στοχεύει στο να παρέχει εφαρμογές του IoT με χαμηλή διακίνηση δεδομένων. Σχεδιάστηκε να έχει καλύτερη κάλυψη και ελάχιστο κόστος σε σχέση με άλλες κυψελοειδείς τεχνολογίες, υποστηρίζει τη σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών και χαρακτηρίζεται από χαμηλή διακίνηση και μετάδοση δεδομένων.

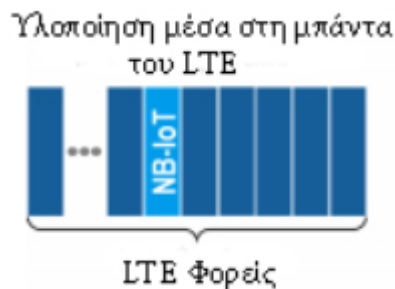
#### 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος Narrow-Band IoT

Η υλοποίηση του NB – IoT είναι βασισμένη στο LTE. Το εύρος ζώνης του φυσικού επιπέδου του NB – IoT είναι 200 kHz. Στη καθοδική ζεύξη το NB-IoT υιοθετεί την QPSK διαμόρφωση και την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) με απόσταση υποφορέων 15 kHz. Στην ανοδική ζεύξη, χρησιμοποιείται BPSK ή QPSK διαμόρφωση και η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) συμπεριλαμβάνοντας έναν υποφορέα ή πολλαπλούς υποφορείς.

Εφαρμόζεται τεχνολογία πολλαπλών υποφορέων με απόσταση μεταξύ γειτονικών υποφορέων 3.75 kHz ή 15 kHz στα IoT τερματικά με πολύ χαμηλό ρυθμό και πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Για τη περίπτωση απόστασης μεταξύ υποφορέων 15 kHz, καθορίζονται 12 συνεχόμενοι υποφορείς. Αναλόγως, καθορίζονται 48 υποφορείς για απόσταση μεταξύ υποφορέων 3.75 kHz.

Η κάλυψη που επιτυγχάνεται με χρήση υποφορέων των 3.75 kHz είναι μεγαλύτερη από αυτή των 15 kHz γιατί έχει μεγαλύτερη φασματική πυκνότητα ισχύος. Το NB-IoT προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης στην ανοδική ζεύξη έως 67 kbps ενώ στη καθοδική ζεύξη έως 30 kbps. Το NB-IoT υποστηρίζει αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (FDD) με εύρος ζώνης 180 kHz και υλοποιείται με ένα από τα 3 σενάρια που ακολουθούν:

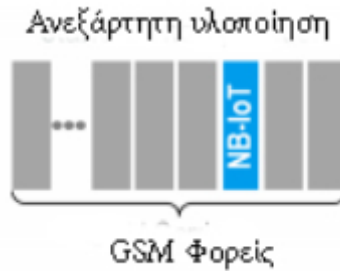
- **Ανεξάρτητη υλοποίηση (Stand-alone mode)**, κατά την οποία χρησιμοποιούνται ανεξάρτητες συχνότητες που δεν επικαλύπτουν το LTE.



- **Υλοποίηση σε ζώνη φύλαξης (Guard-bandmode)**, κατά την οποία δεσμεύεται μια περιοχή στην άκρη της μπάνας συχνοτήτων του LTE.



- **Υλοποίηση μέσα στη ζώνη συχνοτήτων του LTE (In-bandmode)**, κατά την οποία χρησιμοποιεί ίδιες ζώνες συχνοτήτων με το LTE.



Στην υλοποίηση μέσα στις ζώνες συχνοτήτων του LTE (in-band) η διανομή των μπλοκ πόρων (resource blocks) στο LTE και στο NB-IoT δεν είναι προκαθορισμένη.

Όταν πραγματοποιείται υλοποίηση στη ζώνη φύλαξης (guard-band), τότε ο εξοπλισμός του χρήστη συγχρονίζεται μόνο στα σήματα των οποίων οι ζώνες συχνοτήτων ανήκουν εξ' ολοκλήρου στη ζώνη φύλαξης. Επίσης, χρησιμοποιείται η FDD (αμφιδρόμηση με διαίρεση στη συχνότητα) half duplex type-B. Αυτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός του χρήστη είτε λαμβάνει είτε μεταδίδει αλλά όχι ταυτόχρονα. Επίσης μεταξύ κάθε εναλλαγής από λήψη σε μετάδοση και το αντίστροφο υπάρχει ένα υπο-πλαίσιο φύλαξης. Για την καθοδική ζεύξη αλλά και για την ανοδική το NB-IoT χρησιμοποιεί κάποια κανάλια και κάποια σήματα.

Για τη καθοδική ζεύξη υπάρχουν 5 κανάλια:

- NPBCH, Narrow band Physical Downlink Broadcast Channel**, το οποίο μεταφέρει ζωτικής σημασίας πληροφορίες για το σύστημα.

- NPDCCH, Narrow band Physical Downlink Control Channel**, το οποίο μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου για τη καθοδική ζεύξη.

- NPDSCH, Narrow band Physical Downlink Shared Channel**, το οποίο μεταφέρει δεδομένα που υποδεικνύονται από τις πληροφορίες ελέγχου καθοδικής ζεύξης που μεταφέρονται από το κανάλι ελέγχου.

- NRS, Narrow band Reference Signal**, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του καναλιού και τη διόρθωση των λαμβανόμενων σημάτων.

- NPSS και NSSS, Narrow band Primary/Secondary Synchronization Signals**. Το primary Synchronization Signal χρησιμοποιείται για να ευθυγραμμιστεί (περίπου) στο χρόνο η σύνδεση της NB-IoT συσκευής με το σταθμό βάσης. Το Secondary Synchronization Signal για να

ανακτηθεί η φυσική ταυτότητα (ID) της κυψέλης. Επίσης το Secondary Synchronization Signal χρησιμοποιείται για να ανακτηθούν πληροφορίες για το συγχρονισμό του πλαισίου συστήματος.

Για την ανοδική ζεύξη υπάρχουν 3 φυσικά κανάλια:

• **NPUSCH, Narrow band Physical Uplink Shared Channel**, το οποίο έχει δύο μορφές. Κατά τη πρώτη χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ανοδικής ζεύξης και χρησιμοποιεί τον ίδιο turbo κώδικα με το LTE για την διόρθωση σφαλμάτων, το μέγιστο μέγεθος του μπλοκ είναι 1000 bits. Στη δεύτερη μορφή χρησιμοποιείται για σηματοδότηση HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) και χρησιμοποιεί έναν επαναληπτικό κώδικα για απασφαλμάτωση.

• **NPRACH, Narrow band Physical Random Access Channel**, σ' αυτό το κανάλι μεταδίδεται ένα προοίμιο που κάνει γνωστό στη κυψέλη ότι ένα τερματικό θέλει να αποκτήσει πρόσβαση.

• **DMRS, Demodulation Reference Signal**, πολυπλέκεται με τα δεδομένα ώστε να μεταδίδεται μόνο όταν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση. Ανάλογα με τη μορφή του NPUSCH μεταδίδεται με 1 ή 3 SC-FDMA σύμβολα ανά θυρίδα.

### 3.2 Αρχιτεκτονική δικτύου του Narrow-Band IoT

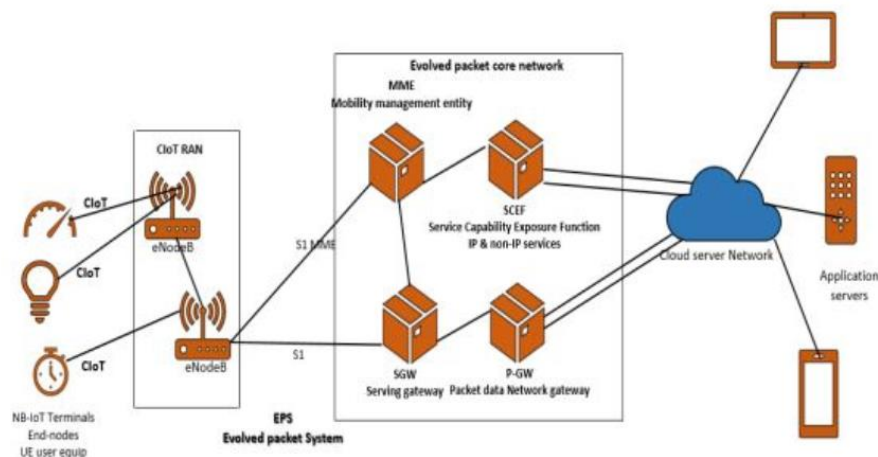
Η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου δικτύου χωρίζεται σε 5 κύρια τμήματα τα οποία είναι:

- **Τερματικές συσκευές:** Οι περισσότερες IoT συσκευές, χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς σκοπούς, και τους προσφέρεται πρόσβαση στο NB-IoT δίκτυο εάν έχουν μια κατάλληλη κάρτα SIM από κάποιο πάροχο NB-IoT υπηρεσιών.
- **Σταθμός βάσης:** Ανήκει στον πάροχο και υποστηρίζει όλες τις μεθόδους υλοποίησης. Αποκαλείται και εξελιγμένος (evolved) σταθμός βάσης (eNodeB).
- **Δίκτυο κορμού:** Είναι η “γέφυρα” μεταξύ των σταθμών βάσης και του NB-IoT νεφελώματος (cloud). Προέρχεται από το EPS (Evolved Packet System) που χρησιμοποιείται στο LTE αλλά προσαρμοσμένο ώστε να ταιριάζει στο NB-IoT. Αυτές οι τροποποιήσεις περιλαμβάνουν δύο βελτιστοποιήσεις για το κυψελοειδές IoT (CIoT):
- **Βελτιστοποίηση σε επίπεδο ελέγχου.** Το μονοπάτι για τη μετάδοση δεδομένων από τις τερματικές συσκευές ως το νεφέλωμα περνάει από τους eNode B στο MME (Mobility



Management Entity) του LTE. Στη συνέχεια μεταφέρεται είτε μέσω του SGW (Serving Gateway) προς το PEW (Packet Data Network Gateway) είτε μέσω του SCET (Service Capability Exposure Function) που είναι ένας νέος κόμβος ειδικά σχεδιασμένος για το MTC (Machine Type Communication) για να μεταφέρει δεδομένα non-IP στο επίπεδο ελέγχου. Το NB-IoT νεφέλωμα συνδέεται απευθείας με τα παραπάνω (SGW, PGW) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα δεδομένα στέλνονται πάνω στον φορέα σηματοδότησης αντί να εγκαθίσταται ένας φορέας από πριν, κάτι το οποίο επιτρέπει σπάνιες μεταδόσεις και μικρότερα πακέτα δεδομένων.

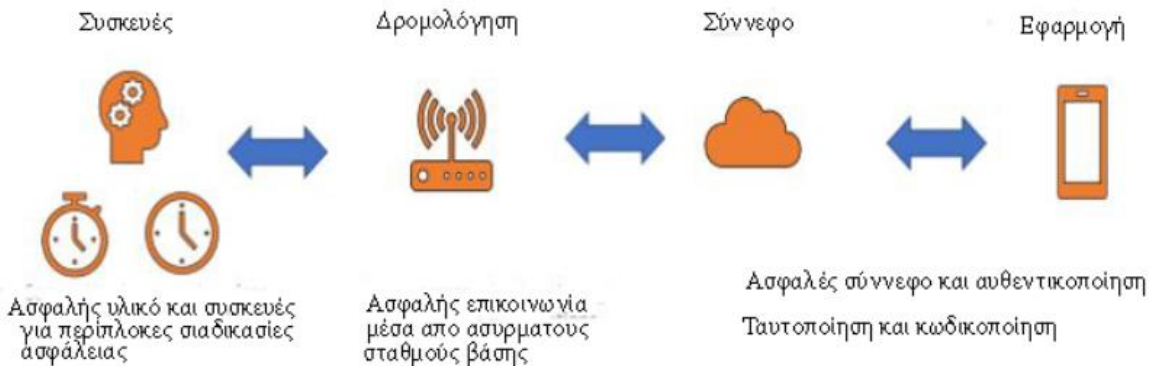
- **Βελτιστοποίηση σε επίπεδο χρήστη.** Τα πακέτα παίρνουν το ίδιο μονοπάτι από το SWG και PGW χωρίς όμως να περνούν από το SCEF. Αυτό μπορεί να προσθέτει κάποια δεδομένα, αλλά απλοποιεί την μετάδοση των ακολουθιών δεδομένων.
- **NB-IoT νεφέλωμα:** Η πλατφόρμα που επεξεργάζεται όλους τους διαφορετικούς τύπους δεδομένων και εφαρμογών, αντί αυτό να γίνεται στις τερματικές συσκευές, κάτι που σημαίνει εξοικονόμηση ενέργειας και αφαίρεση πολυπλοκότητας στις τερματικές συσκευές.
- **Εφαρμογές:** Χρησιμοποιούνται από τον τελικό χρήστη για τη συλλογή δεδομένων από τους κόμβους ή τους ασύρματους αισθητήρες.



*Εικόνα 3.1: Αρχιτεκτονική δικτύου NB-IoT*

### 3.3 Ασφάλεια του Narrow-Band IoT

Οι συμβατικές IoT τεχνολογίες περιέχουν περίπλοκα πρωτόκολλα μετάδοσης και ισχυρές τεχνολογίες ασφαλείας τα οποία απαιτούν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Οι συσκευές του NB-IoT ωστόσο είναι χαμηλής κατανάλωσης και δε μπορούν να χειριστούν πολύπλοκους αλγορίθμους ασφαλείας. Το NB-IoT ανταπεξέρχεται στις απαιτήσεις ασφαλείας μέσω μιας δομής αποτελούμενη από 3 επίπεδα.



*Εικόνα 3.2: Ασφάλεια στο NB-IoT.*

- **Επίπεδο αντίληψης**

Το επίπεδο αντίληψης είναι αντίστοιχο με το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων (datalink) του μοντέλου OSI. Ωστόσο αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει τερματικά όπως συσκευές μέτρησης, αισθητήρες θερμοκρασίας κ.α. Σ' αυτό το επίπεδο γίνεται κρυπτογράφηση δεδομένων, έλεγχος ακεραιότητας και ταυτοποίηση. Αυτοί οι αλγόριθμοι περιέχουν τυχαία και ντετερμινιστικά κλειδιά και συνθηματικά ασφαλείας. Στο NB- IoT ένα ελαφρύ συνθηματικό χρησιμοποιείται λόγω των περιορισμών στη κατανάλωση ενέργειας. Τα τερματικά είναι απευθείας συνδεδεμένα στον σταθμό βάσης στη κυψέλη κάτι το οποίο αποτρέπει προβλήματα ασφαλείας λόγω δρομολόγησης.

- **Επίπεδο Μετάδοσης**

Από ένα δίκτυο NB-IoT μπορεί να εξυπηρετηθεί ένας τεράστιος αριθμός από τερματικούς κόμβους. Αυτό οδηγεί σε μια μεγάλη πρόκληση για το πώς θα γίνει η ταυτοποίηση σε

πραγματικό χρόνο χιλιάδων συσκευών. Μια άλλη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι το πώς θα προστατευθεί το ασύρματο δίκτυο από παρεμβολές κακόβουλων χρηστών (hacking). Στο IoT εφαρμόζεται ένας μηχανισμός key-agreement και ένας μηχανισμός end-to-end ταυτοποίησης, σαν πρότυπα ασφάλειας, αλλά στο NB-IoT οι βελτιστοποιήσεις στους μηχανισμούς αυτούς είναι πεδίο επιστημονικής ανάπτυξης.

- **Επίπεδο Εφαρμογής**

Σ' αυτό το επίπεδο τα δεδομένα αποθηκεύονται, αναλύονται κτλ. Το NB-IoT εκτελεί μεθόδους επαλήθευσης ακεραιότητας και συγχρονισμού.

### **3.4 Εφαρμογές του Narrow-Band IoT**

Το NB-IoT μπορεί να εξυπηρετήσει εφαρμογές που απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ευρεία κάλυψη και μεγάλη χωρητικότητα αλλά είναι δύσκολο να ανταπεξέλθει σε εφαρμογές που υποστηρίζουν μεγάλη κινητικότητα. Γι' αυτό το NB-IoT χρησιμοποιείται περισσότερο σε εφαρμογές που δεν απαιτούν κινητικότητα ή συνεχή κίνηση, που δεν απαιτούν πολύ μικρή χρονοκαθυστέρηση και μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Κάποιες εφαρμογές που μπορεί να καλύψει το NB-IoT είναι οι εξής:

- Αυτόνομα συστήματα αναφοράς, όπως είναι οι ανιχνευτές καπνού και οι έξυπνοι μετρητές νερού, αερίων κτλ.
- Εφαρμογές έξυπνης πόλης, όπως είναι η διαχείριση απορριμμάτων, διαχείριση των θέσεων στάθμευσης, διαχείριση φωτισμού κτλ.
- Εφαρμογές έξυπνων κτηρίων.
- Γεωργία και περιβάλλον, όπως μετρήσεις μόλυνσης, εντοπισμός ζώων κτλ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

#### ΤΟΥ LoRa ΚΑΙ ΤΟΥ Narrow-Band IoT

Όπως, αναφέραμε και στα προηγούμενα κεφάλαια και τα δύο συστήματα συνήθως υποστηρίζουν την γεωγραφική κάλυψη (εμβέλεια) στον ίδιο περίπου βαθμό, βέβαια όμως υπάρχουν και κάποιες διαφορές μεταξύ τους. Το LoRa καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από το NB-IoT, καθιστώντας το πιο ιδανικό για κάθε έργο που δεν απαιτεί γρήγορους ρυθμούς ανανέωσης. Η μπαταρία των συσκευών LoRa μπορεί να διαρκέσει έως και δεκαπέντε χρόνια, σε σύγκριση με τα δέκα χρόνια της μπαταρίας του NB-IoT. Ωστόσο, το τελευταίο έχει καλύτερη ρυθμοαπόδοση δεδομένων από το πρώτο.

Ένα πράγμα που προκύπτει στο LoRa έναντι του NB-IoT είναι η διαφορά στην ασφάλεια δεδομένων. Το NB-IoT είναι επίσης πολύ πιο ασφαλές λόγω της ανώτερης κρυπτογράφησης και έχει μικρότερη καθυστέρηση. Η καθυστέρηση στο LoRaWAN εξαρτάται από τις προδιαγραφές της κάθε συσκευής που χρησιμοποιείται ανάλογα με την περίπτωση.

Πολλοί είναι οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται κατά την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας LoRa ή NB-IoT. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι παράγοντες:

- **Quality of Service – Ποιότητα της Υπηρεσίας:** Το LoRa χρησιμοποιεί μη αδειοδοτημένο φάσμα και μη συγχρονισμένα (asynchronous) πρωτόκολλα επικοινωνίας. Ωστόσο, δεν μπορεί να προσφέρει το ίδιο QoS, που παρέχεται από το NB-IoT. Αντίθετα, το NB-IoT χρησιμοποιεί ένα αδειοδοτημένο φάσμα και ένα συγχρονισμένο (time slotted synchronous) πρωτόκολλο βασισμένο σε LTE, που είναι βέλτιστα για QoS.
- **Battery life & Latency – Διάρκεια ζωής μπαταρίας & Καθυστέρηση:** Οι τελικές συσκευές των LoRa και NB-IoT βρίσκονται σε λειτουργία ύπνου (sleep mode) -κατά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου είναι εκτός λειτουργίας, γεγονός που εξοικονομεί ενέργεια, δηλαδή αυξάνει τη διάρκεια ζωής των συσκευών που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες. Ωστόσο, η συσκευή ενός χρήστη που χρησιμοποιεί το NB-IoT καταναλώνει πρόσθετη ενέργεια, λόγω της συγχρονισμένης επικοινωνίας και του χειρισμού QoS. Επιπλέον, οι μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης OFDMA / SC-FDMA απαιτούν περισσότερη ενέργεια κατά την αιχμή της σύνδεσης (peak current). Αυτή η

πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του NB- IoT, σε σύγκριση με το LoRa.

- **Scalability & Payload length – Επεκτασιμότητα & Μήκος ωφέλιμου φορτίου:** Η υποστήριξη τεράστιου αριθμού συσκευών είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνολογιών LoRa και NB-IoT, καθώς ανταποκρίνονται σε εφαρμογές που απαιτούν αυξανόμενο αριθμό και πυκνότητα των συνδεδεμένων συσκευών. Το NB-IoT προσφέρει επίσης το πλεονέκτημα του μέγιστου μήκους ωφέλιμου φορτίου, επιτρέποντας μετάδοση δεδομένων μέχρι 1600 bytes. Το LoRa επιτρέπει την αποστολή έως και 243 bytes δεδομένων.
- **Network coverage & Range – Κάλυψη & Εμβέλεια δικτύου:** Από την άποψη της κάλυψης και της εμβέλειας δικτύου το LoRa υπερτερεί, έχοντας εμβέλεια 5 χλμ σε αστικές και 15 χλμ σε αγροτικές περιοχές και απαίτηση εγκατάστασης τριών (3) σταθμών βάσης, για να καλύψει μια ολόκληρη πόλη, όπως η πόλη της Βαρκελώνης. Το NB-IoT έχει μικρότερες δυνατότητες εμβέλειας και κάλυψης (1 χλμ σε αστικές και 10 χλμ σε αγροτικές περιοχές). Επικεντρώνεται κυρίως στην κατηγορία των συσκευών, που είναι εγκατεστημένες σε μέρη μακριά από την τυπική εμβέλεια των κυψελοειδών δικτύων (π.χ. βαθιά εσωτερικούς χώρους), προσφέροντας τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων περιπτώσεων χρήσης.
- **Deployment model – Μοντέλο ανάπτυξης:** Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του οικοσυστήματος LoRa είναι η ευελιξία του. Σε αντίθεση με το NB-IoT, το LoRa προσφέρει τοπική ανάπτυξη δικτύου (local network deployment), καθώς και λειτουργία δημόσιου δικτύου (public network). Στο βιομηχανικό τομέα, ένα υβριδικό λειτουργικό μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός τοπικού δικτύου LoRa για περιοχές εντός εργοστασίου και ενός δημοσίου δικτύου LoRa για να καλύψει τις εξωτερικές περιοχές.
- **Cost - Κόστος:** Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορες πτυχές κόστους, όπως το κόστος του φάσματος (άδεια χρήσης), το κόστος ανάπτυξης δικτύου και το κόστος συσκευής. Γενικά το κόστος των LoRa και NB-IoT. Είναι φανερό ότι το LoRa είναι πιο οικονομικά αποδοτικό, σε σχέση με το NB-IoT.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ LoRa και NB-IoT

#### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του LoRa για το Internet of Things και του Narrow-Band για το Internet of Things (NB-IoT) σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

Ο κώδικας για το Lora, συγκρίνει την απόδοση των παραγόντων διασποράς SF (spreading factor) για το εύρος ζώνης 125kHz. Δημιουργεί καμπύλες ρυθμού εσφαλμένων bits BER (Bit Error Rate) σε σχέση με τον σηματοθορυβικό λόγο SNR (Signal to Noise Ratio). Στο συγκεκριμένο μοντέλο συστήματος Lora χρησιμοποιήσαμε μοντέλο καναλιού Προσθετικού Λευκού Γκαουσιανού Θορύβου AWGN, εύρος ζώνης του ασύρματου διαύλου BW=125 kHz και συντελεστή διασποράς SF=7-12. Αυτό μπορούμε να το δούμε και στο συγκεκριμένο κομμάτι του κώδικα που παρατίθεται παρακάτω:

```
10 %% SF and BW initializing
11 - SF = 8 ;
12 - M = 2^SF ;
13 - Ts = M ;
14 - BW = 125e3 ;
```

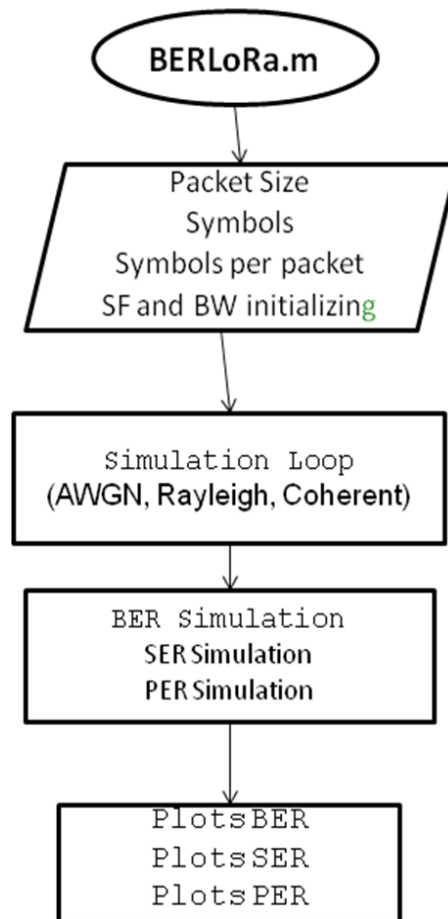
Για την κωδικοποίηση δεδομένων σε σύμβολο φάσματος διασποράς chirp CSS (Chirp Spread Spectrum), τα bit μεταδίδονται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα εκκίνησης του σήματος τσιρπ. Για την αποκωδικοποίηση του συμβόλου CSS στο δέκτη, χρησιμοποιείται η συσχέτιση με αντίγραφο ενός βασικού CSS. Το σύμβολο χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των bit με βάση τη μετατόπιση φάσης του σήματος.

Οι κώδικες για το NB-IoT που χρησιμοποιήθηκαν, στο περιβάλλον προσομοίωσης του Matlab, συνδέουν ένα εικονικό σταθμό βάσης και τον εικονικό εξοπλισμό χρήστη με τη χρήση δύο διαμορφώσεων (QPSK και 16-QAM). Το κανάλι χρειάζεται δεδομένα εισόδου σε μορφή μπλοκ που πρόκειται να μεταδοθεί και στη συνέχεια επισυνάπτεται τους σωστούς CRC (Cyclic

Redundancy Check), κωδικούς χρησιμοποιώντας τον καθορισμένο κωδικοποιητή. Ο ρυθμός ταιριάζει με το κωδικοποιημένο μπλοκ ανάλογα με την περίπτωση, αναδιατάσσει το μπλοκ και στη συνέχεια δημιουργεί χρόνο- πλέγματα συχνοτήτων σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές του NB-IoT.

## 5.2 Προσομοίωση του συστήματος LoRa με το Matlab

Σε αυτήν την ενότητα του κεφαλαίου 5, θα προσομοιάσουμε το πρωτόκολλο LoRa (παράρτημα I) με το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Χρησιμοποιήσαμε functions που προσφέρει η μαθηματική βιβλιοθήκη του Matlab. Παρακάτω γίνεται μια παρουσίαση μέσω του block diagram για το συγκεκριμένο κώδικα.



**Εικόνα 5.1: Block διάγραμμα LoRa**

Το παραπάνω block διάγραμμα, είναι μια απεικόνιση περιληπτική του κώδικα μας στο Matlab. Στον συγκεκριμένο κώδικα στην αρχή ορίζουμε το μέγεθος των πακέτων και των συμβόλων, τον παράγοντα διασποράς όπου και αλλάζουμε την τιμή κάθε φορά και το εύρος συχνοτήτων που θέλουμε. Ακόμη ορίζουμε το SNR (λόγος ισχύος σήματος προς την ισχύ του θορύβου), το  $E_b/N_0$  (λόγος ενέργειας bit προς την φασματική πυκνότητα θορύβου). και το  $E_s/N_0$  (λόγος ενέργειας συμβόλου προς την φασματική πυκνότητα θορύβου). Αυτά τα κάνουμε για να μπορέσουμε στο κυρίως σώμα του κώδικα να κάνουμε συγκεκριμένους υπολογισμούς και να εξάγουμε στο τέλος τις συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις που θέλουμε. Οι γραφικές παραστάσεις που θέλουμε να εξάγουμε είναι το BER (Bit Error Rate, ρυθμός εσφαλμένων bit), SER (Symbol Error Rate, ρυθμός εσφαλμένων συμβόλων) και το PER (Packet Error Rate, ρυθμός εσφαλμένων πακέτων δεδομένων). Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι το BER, το SER και το PER συσχετίζονται με μαθηματικούς τύπους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις και γίνεται μια μικρή αναφορά στο τι απεικονίζει η κάθε γραφική παράσταση.

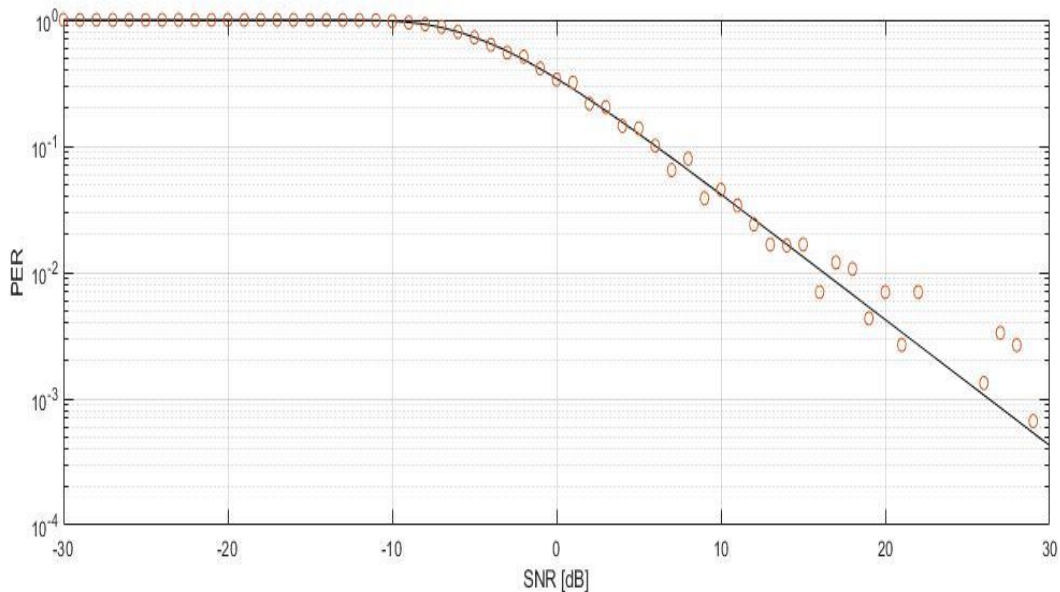
Το πρώτο διάγραμμα αφορά το PER προς το SNR(dB). Είναι το ποσοστό σφάλματος πακέτων (PER) σε σχέση με το σηματοθορυβικό λόγο (SNR) [dB].

Το SNR είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου και η μονάδα έκφρασής του είναι συνήθως ντεσιμπέλ (dB). Επίσης, μια αναλογία μεγαλύτερη από 0 dB ή μεγαλύτερη από 1:1, σημαίνει ότι η ισχύς του σήματος είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του θορύβου. Το δεύτερο διάγραμμα αφορά το SER προς το  $E_s/N_0$ (dB). Είναι το ποσοστό σφάλματος συμβόλων σε σχέση με τον λόγο φασματικής ενέργειας συμβόλου προς την φασματική πυκνότητα θορύβου. Το τρίτο διάγραμμα αφορά το BER προς το  $E_b/N_0$ (dB). Το BER είναι ο ρυθμός σφάλματος bit. Το BER χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό ενός καναλιού που μεταφέρει δεδομένα μετρώντας τον ρυθμό σφαλμάτων σε μια συμβολοσειρά δεδομένων. Το BER είναι μια βασική παράμετρος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση συστημάτων που μεταδίδουν ψηφιακά δεδομένα από τη μία θέση στην άλλη. Το  $E_b/N_0$ (dB) είναι ο λόγος φασματικής ενέργειας ανά bit προς την φασματική πυκνότητα ενέργειας του θορύβου και είναι μια κανονικοποιημένη μέτρηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), επίσης γνωστή ως "SNR ανά bit". Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν επιθυμούμε να συγκρίνουμε την απόδοση του ποσοστού σφάλματος bit (BER) διαφορετικών σχημάτων ψηφιακής διαμόρφωσης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το εύρος ζώνης του σήματος.

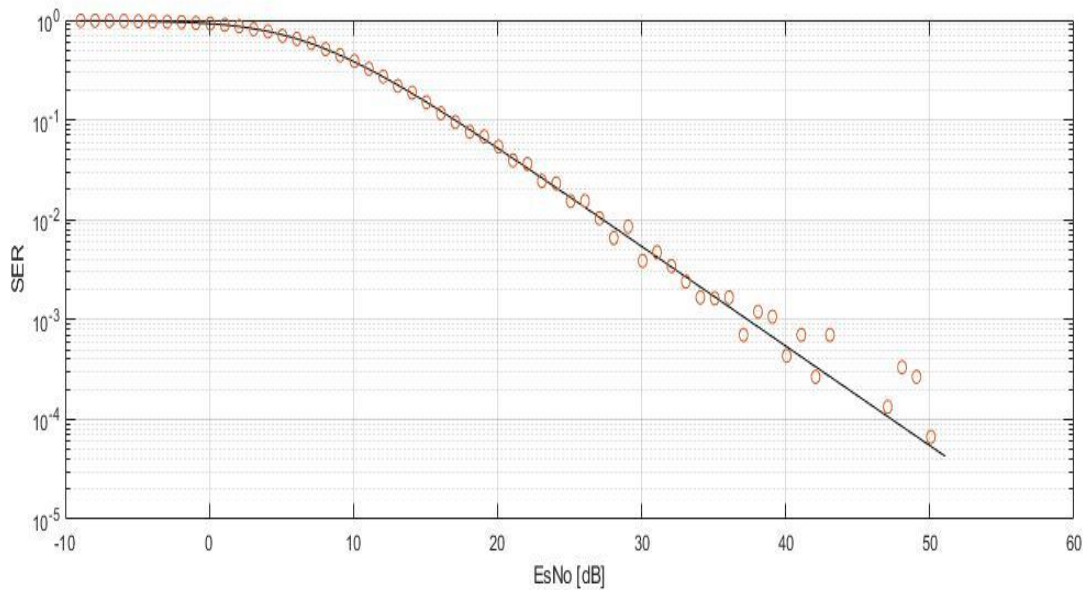


Στις προσομοιώσεις που τρέξαμε χρησιμοποιήσαμε ως παράμετρο τον παράγοντα διασποράς του σήματος (Spreading Factor) με SF=7, 8 και 9. Ο παράγοντας διασποράς είναι μια παράμετρος που καθορίζει το πόσα chirp χρειάζονται για την αναπαράσταση ενός συμβόλου, όσο μικρότερο είναι το spreading factor τόσο λιγότερα chirp χρειάζονται για την μετάδοση ενός χαρακτήρα. Στην ουσία το spreading factor χαρακτηρίζει το χρόνο που βρίσκεται ένα σύμβολο στον αέρα, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο περισσότερο χρόνο διαρκεί η μετάδοση ενός συμβόλου και κατά συνέπεια ελαττώνεται ο ρυθμός μετάδοσης (bit-rate).

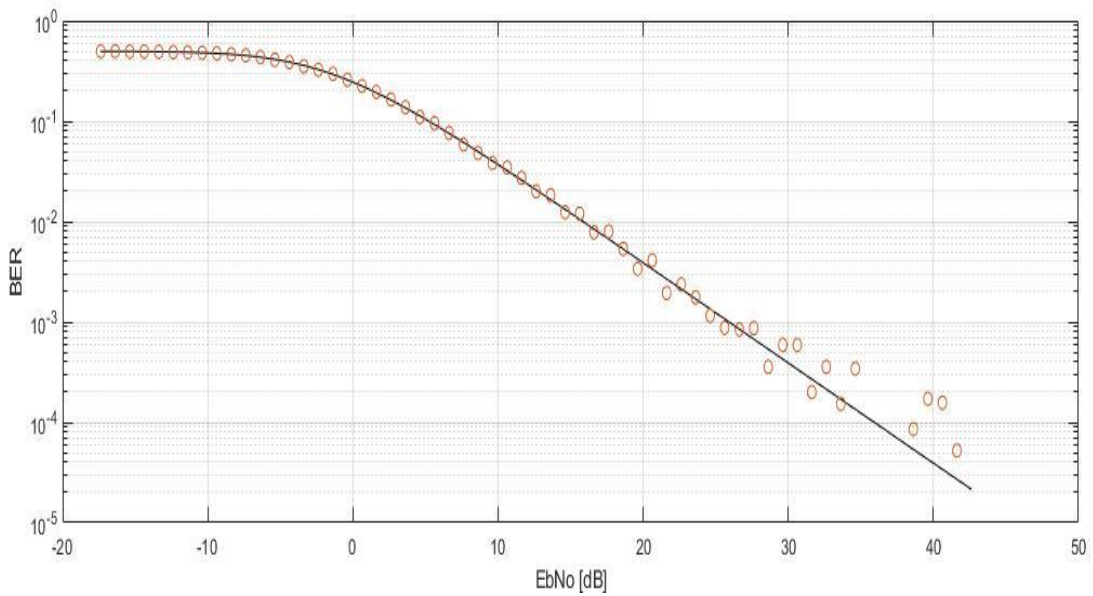
Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για SF=7, SF=8 και SF=9. Στα γραφήματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια με γραμμή δίνεται η θεωρητική τιμή του PER, SER και BER και με κύκλους τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



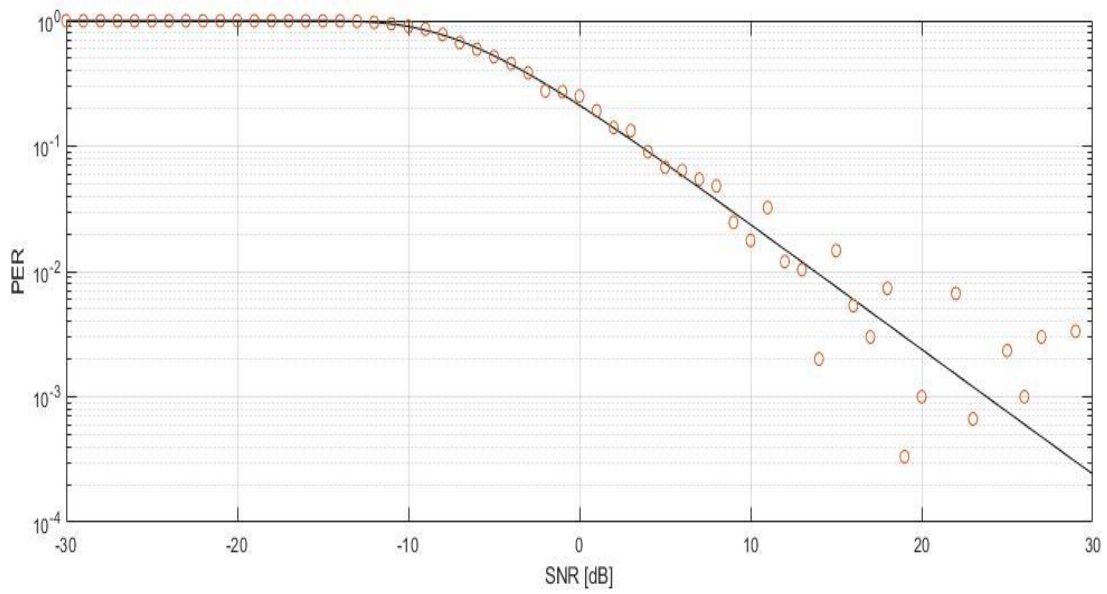
**Εικόνα 5.2: Προσομοίωση LoRa για SF=7, PER σε σχέση με το SNR(dB)**



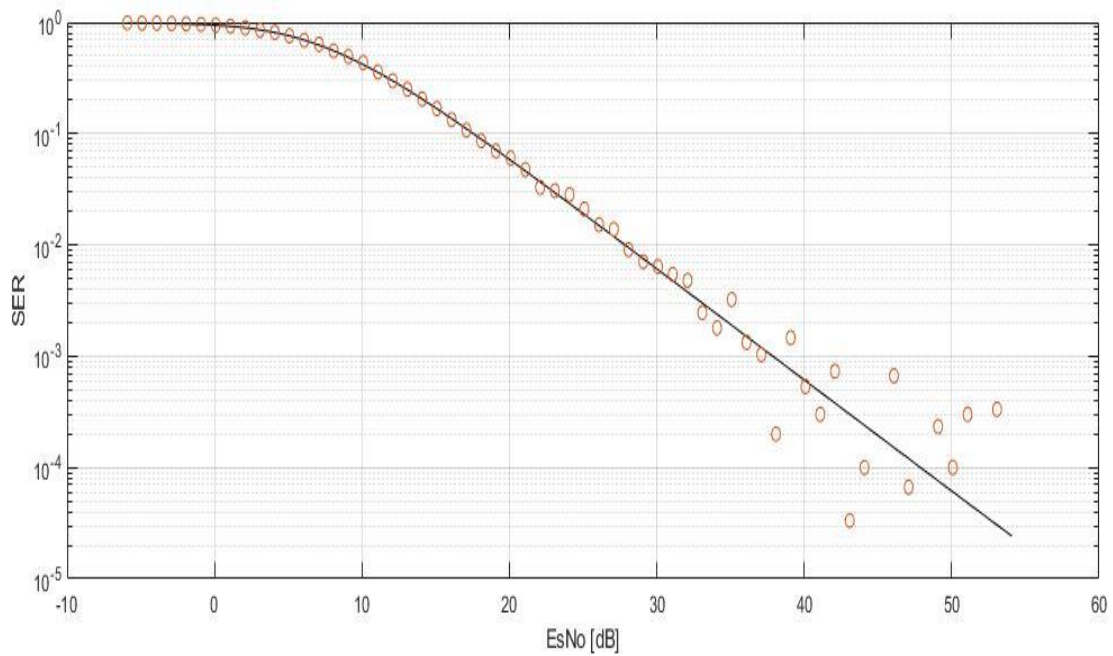
**Εικόνα 5.3: Προσομοίωση LoRa για SF=7, SER σε σχέση με το Es/No(dB)**



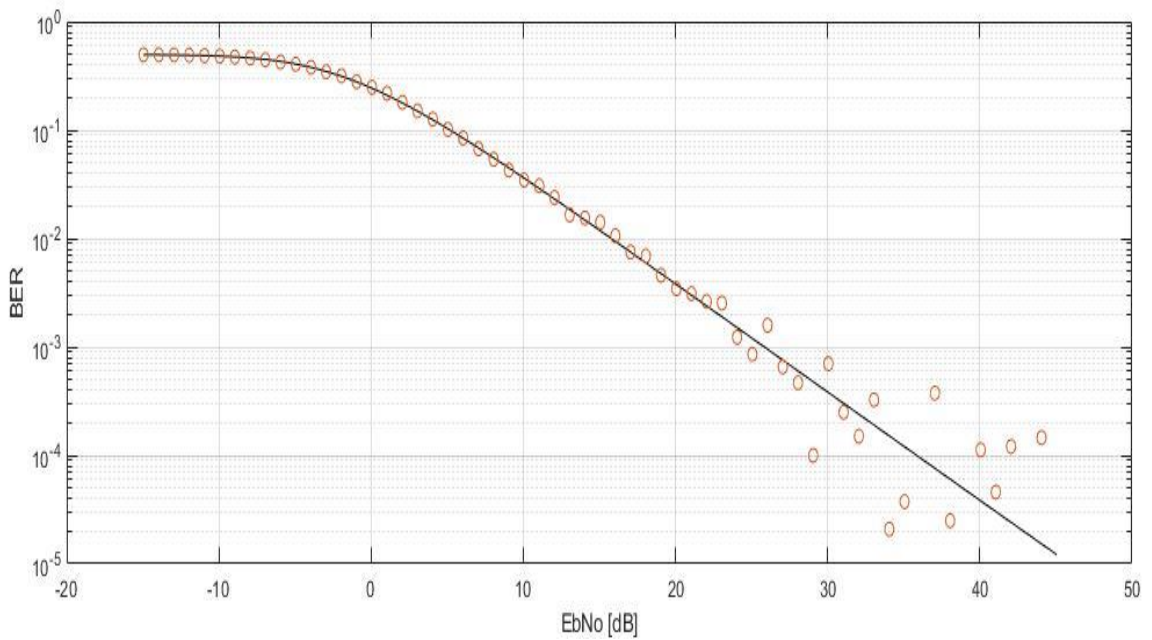
**Εικόνα 5.4: Προσομοίωση LoRa για SF=7, BER σε σχέση με το Eb/No(dB).**



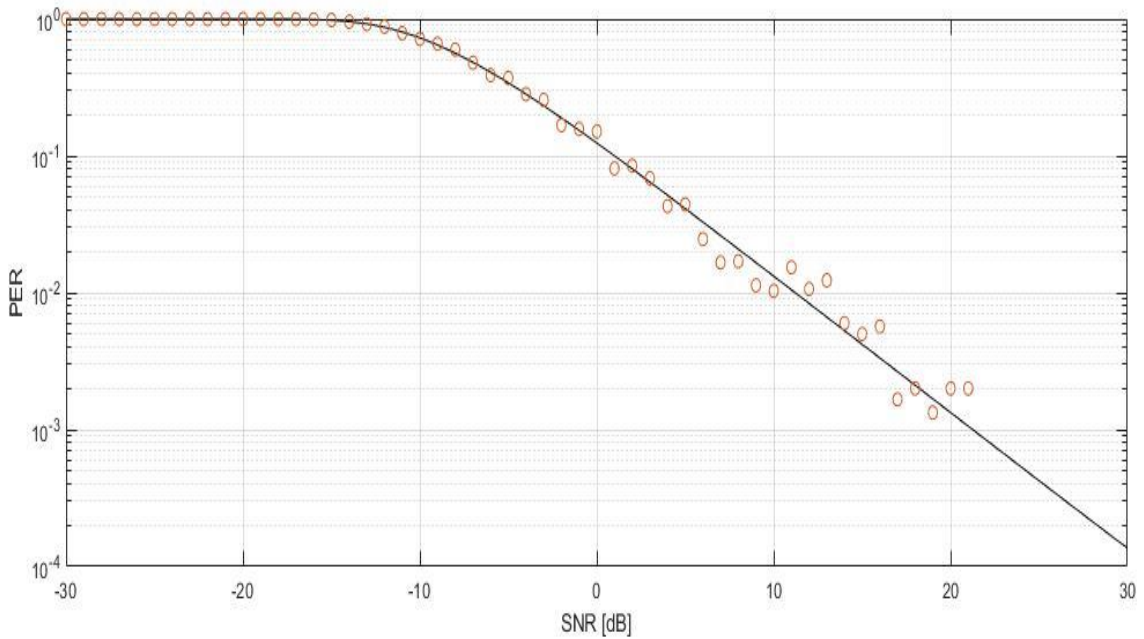
**Εικόνα 5.5: Προσομοίωση LoRa για SF=8, PER σε σχέση με το SNR(dB).**



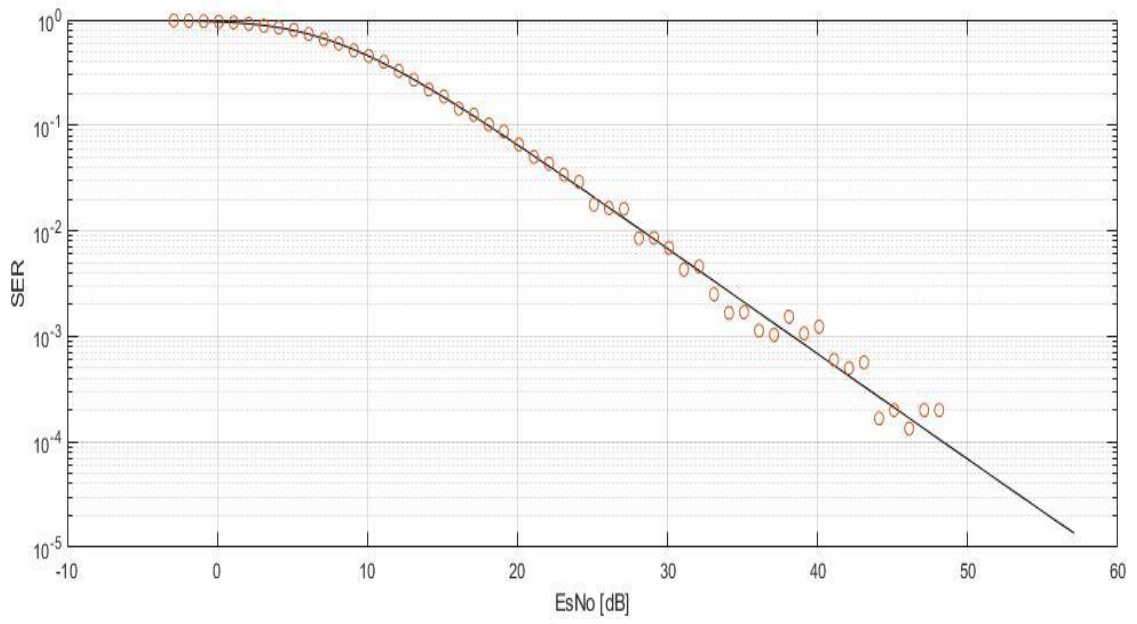
**Εικόνα 5.6: Προσομοίωση LoRa για SF=8, SER σε σχέση με το Es/No(dB) .**



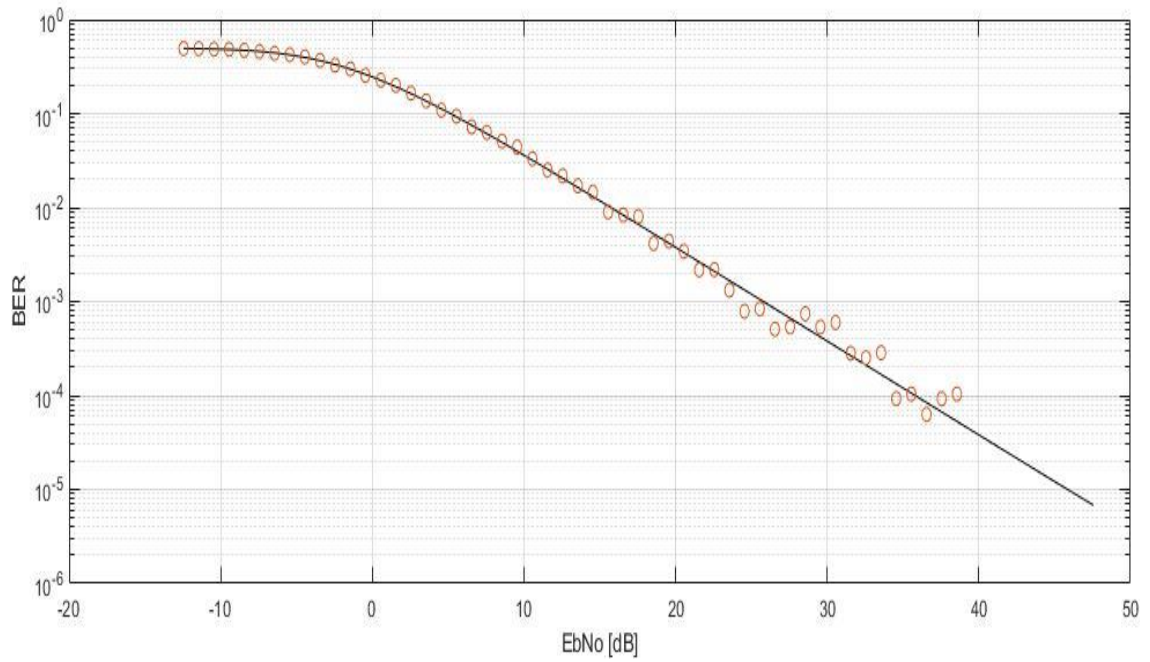
**Εικόνα 5.7: Προσομοίωση LoRa για SF=8, BER σε σχέση με το Eb/No(dB).**



**Εικόνα 5.8: Προσομοίωση LoRa για SF=9, PER σε σχέση με το SNR(dB).**



**Εικόνα 5.9: Προσομοίωση LoRa για SF=9, SER σε σχέση με το Es/No(dB).**



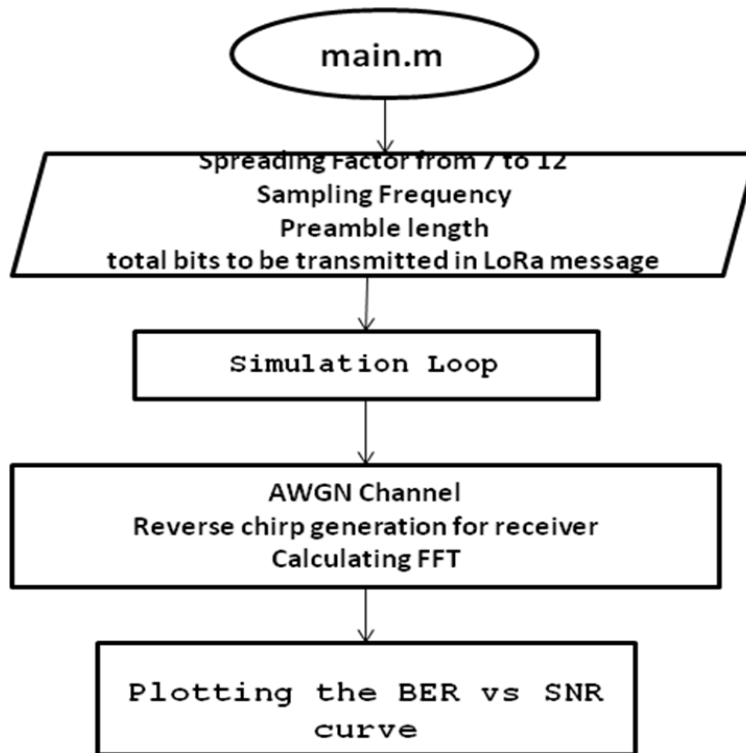
**Εικόνα 5.10: Προσομοίωση LoRa για SF=9, BER σε σχέση με το Eb/No(dB).**

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε ότι για  $SNR > 15$  dB οι προσομοιώσεις για το PER (SF=7, 8 και 9) αποκλείουν από τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες. Για υψηλές τιμές SNR έχουμε χαμηλό ρυθμό εσφαλμένων πακέτων. Για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα PER για υψηλές τιμές SNR θα έπρεπε να ορίσουμε ένα μεγαλύτερο αριθμό πακέτων, το οποίο όμως δεν ήταν εφικτό επειδή ο υπολογιστής που χρησιμοποιήσαμε είχε περιορισμένη υπολογιστική δυνατότητα. Το ίδιο ισχύει στις γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζουν τις προσομοιώσεις του ρυθμού εσφαλμένων συμβόλων SER για  $E_s/N_o > 37$  dB. Επίσης, στις γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζουν τον ρυθμό εσφαλμένων bit BER τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποκλείουν από τις θεωρητικές καμπύλες για  $E_b/N_o > 30$  dB.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση έχουμε και τα αποτελέσματα για SF=7-12 όπου στο ασύρματο κανάλι δεν έχουμε εξασθένιση αλλά μόνο Προσθετικό Λευκό Γκαουσιανό Θόρυβο (AWGN, Additive White Gaussian Noise). Τα δεδομένα που ορίσαμε στο Matlab για να πάρουμε το παρακάτω διάγραμμα παρατίθεται παρακάτω:

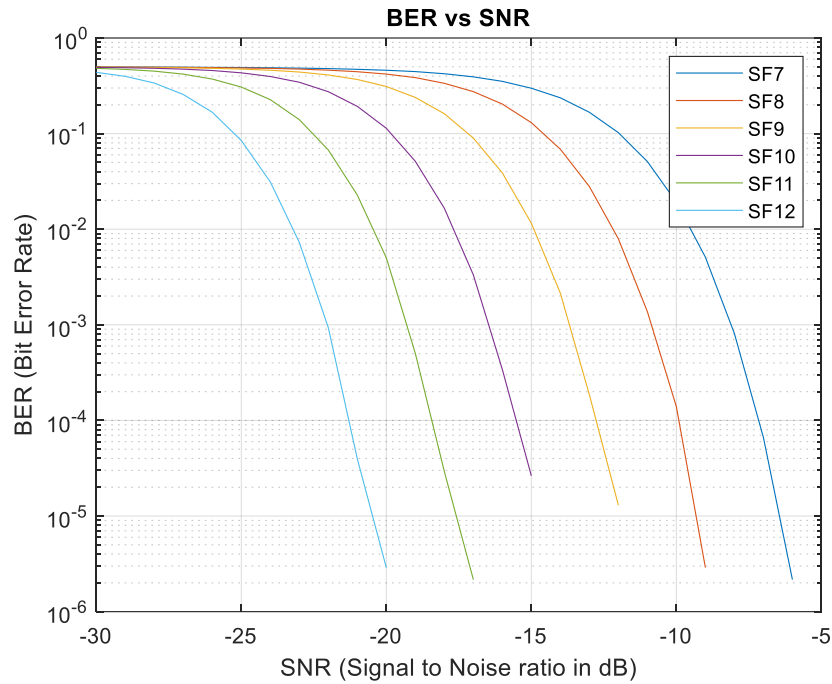
```
1 - SF = 7:1:12; % Spreading Factor from 7 to 12
2 - BW = 125000; % 125kHz
3 - Fs = 125000; % Sampling Frequency
4 - preamble_len = 8; % Preamble length
5 - sync_len = 2; % Sync length
6 - total_bits = 27720; % total bits to be transmitted in LoRa message
7 - SNR_dB = -40:1:00; % SNR in DB
8 - SNR = 10.^(SNR_dB/10); % SNR
9 - Total_iterations = 100;
10 - BER = zeros (Total_iterations,length (SNR_dB) );
```

Παρακάτω παραθέτουμε και ένα block diagram του συγκεκριμένου κώδικα.



**Εικόνα 5.11: Block διάγραμμα LoRa με AWGN κανάλι.**

Το παραπάνω block διάγραμμα, είναι μια περιληπτική απεικόνιση του κώδικα στο Matlab. Στον συγκεκριμένο κώδικα στην αρχή ορίζουμε τον παράγοντα διασποράς SF όπου καθώς τρέχει ο κώδικας κάθε φορά θα αλλάζει, και το εύρος συχνοτήτων που θέλουμε. Ακόμη ορίζουμε το SNR και το BER σε τι κλιμακα το θέλουμε. Αυτά τα κάνουμε για να μπορέσουμε στο κυρίως σώμα του κώδικα να κάνουμε συγκεκριμένους υπολογισμούς και να εξάγουμε στο τέλος τις συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις που θέλουμε. Έδω εξάγουμε μια συγκεκριμένη γραφική παράσταση που απεικονίζει το BER έναντι του SNR. Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική παράσταση.



**Εικόνα 5.12: Προσομοίωση LoRa για SF=7-12, BER σε σχέση με το Eb/No(dB).**

Στην εικόνα 5.12, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερο είναι το SF το οποίο συμβολίζει τον παράγοντα διασποράς (spreading factor) τόσο μικρότερο λόγο SNR (dB) χρειαζόμαστε για να επιτύχουμε τον ίδιο ρυθμό σφαλμάτων bit. Το γράφημα της εικόνας 5.12 αποκαλύπτει ότι κινούμενοι από δεξιά προς τα αριστερά απαιτείται μικρότερο SNR (καθώς αυξάνεται το SF), το οποίο με τη σειρά του σημαίνει ότι σε ένα ασύρματο κανάλι με μόνο AWGN και υψηλή τιμή SF μπορούμε να έχουμε χαμηλή τιμή BER.



### 5.3 Προσομοίωση του συστήματος NB-IoT με Matlab

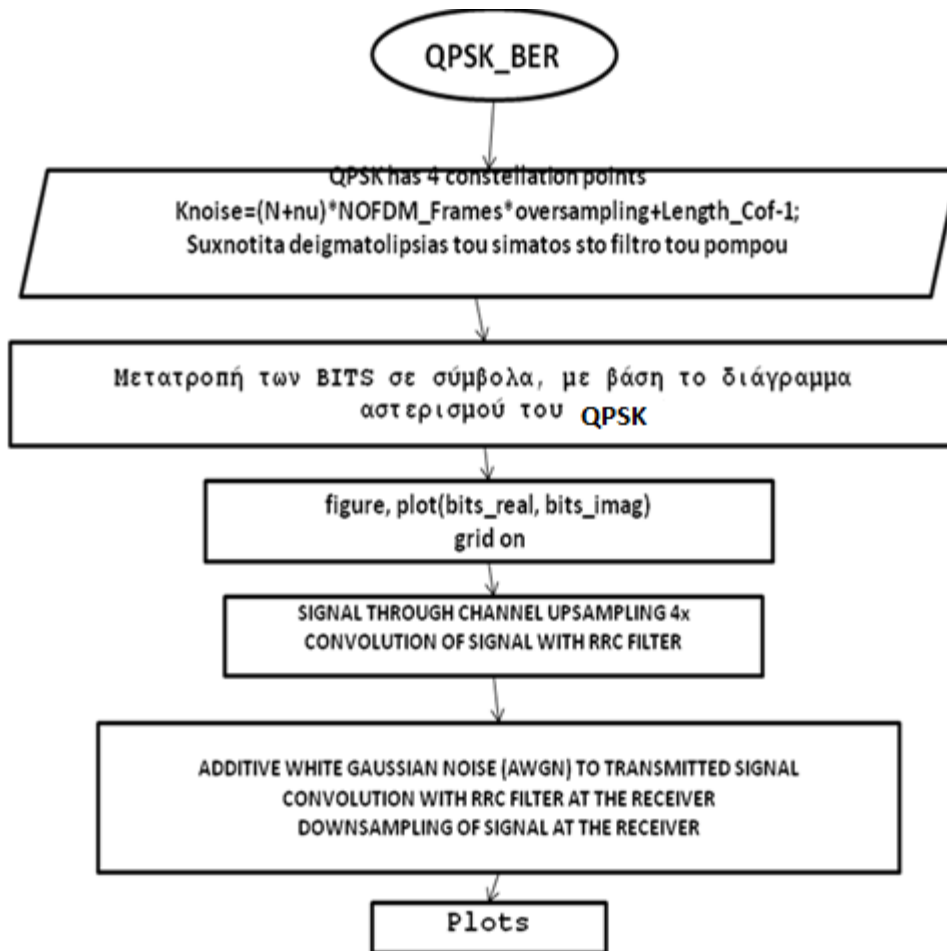
Σε αυτήν την ενότητα του κεφαλαίου 5, παρουσιάζεται η προσομοίωση του NB-IoT σε προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Χρησιμοποιήσαμε δύο ψηφιακές διαμορφώσεις QPSK και 16-QAM για να υπολογίσουμε το BER για το σύστημα NB-IoT.

Το BER όπως αναφέραμε και παραπάνω είναι ο ρυθμός εσφαλμένων bit. Το BER χρησιμοποιείται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της επίδοσης ενός δέκτη ενός ασύρματου συστήματος μετρώντας τον ρυθμό σφαλμάτων σε μια συμβολοσειρά δεδομένων.

Η διαμόρφωση QPSK είναι μια τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης στην οποία δύο διαδοχικά bits στην ακολουθία δεδομένων ομαδοποιούνται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση εύρους ζώνης. Καθώς τα bit ομαδοποιούνται για να σχηματίσουν σύμβολα, ο ρυθμός bit (fb) μειώνεται το οποίο μειώνει το εύρος ζώνης του καναλιού.

Η διαμόρφωση 16-QAM είναι QAM: Quadrature Amplitude Modulation συνδυάζει πλάτος και αλλαγές φάσης για να δώσει επιπλέον χωρητικότητα και χρησιμοποιείται ευρέως για επικοινωνία δεδομένων. Το QAM παρέχει υψηλά επίπεδα αποτελεσματικότητας χρήσης του φάσματος.

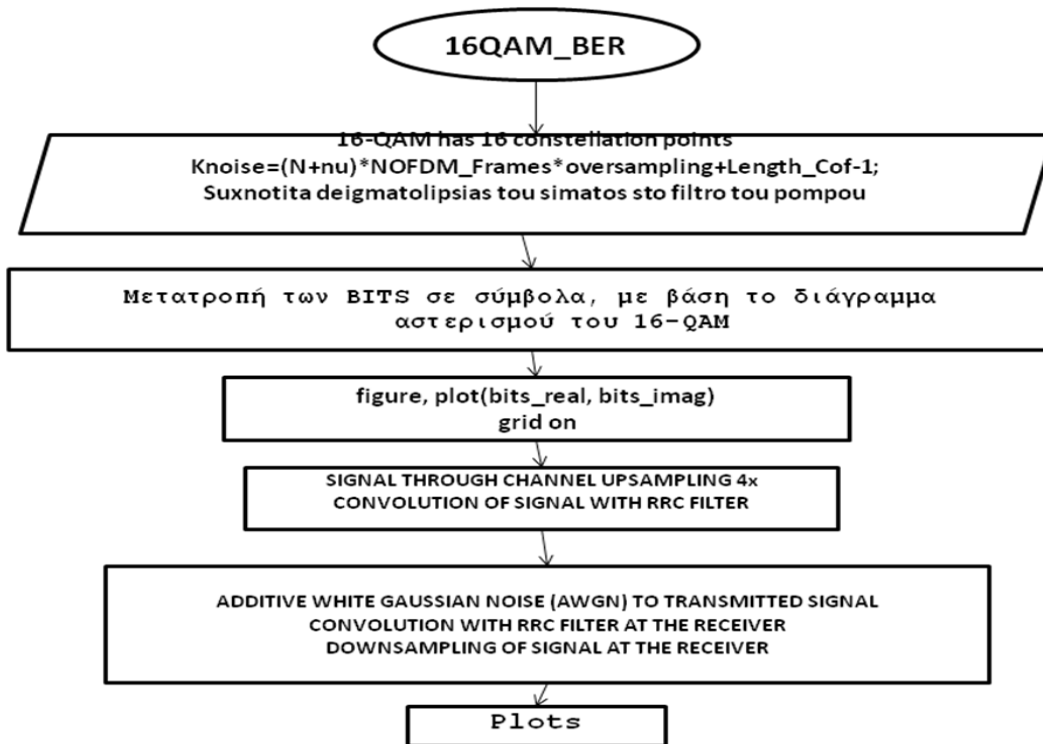
Παρακάτω παραθέτουμε και ένα block diagram για τον κώδικα του QPSK και 16-QAM αντίστοιχα.



**Εικόνα 5.13: Block διάγραμμα NB-IoT με διαμόρφωση QPSK**

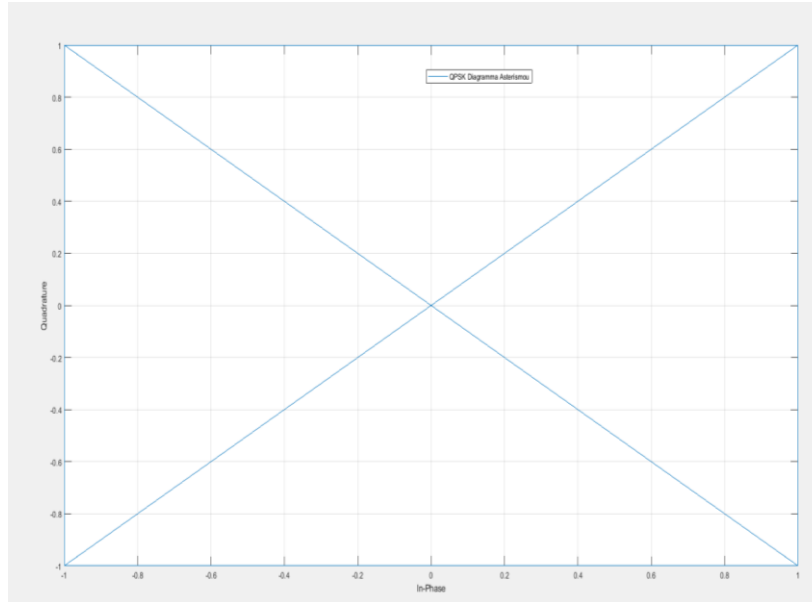
Το παραπάνω block διάγραμμα, είναι μια περιληπτική απεικόνιση του κώδικα μας στο Matlab. Στον συγκεκριμένο κώδικα στην αρχή ορίζουμε κάποιες βασικές παραμέτρους με αποτέλεσμα στο κυρίως σώμα του κώδικα μας να κάνουμε συγκεκριμένους υπολογισμούς και να εξάγουμε στο τέλος τις συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις που θέλουμε. Επίσης ορίζουμε και την συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος για το φίλτρο του πομπού. Ακόμη γίνονται και οι κατάλληλες μετατροπές των bits σε σύμβολα με βάση το διάγραμμα του αστερισμού 16-QAM. Οι παραστάσεις που θέλουμε να εξάγουμε είναι το διάγραμμα του αστερισμού για την διαμόρφωση QPSK, και το φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού. Τέλος, απεικονίζουμε το BER σε σχέση με το SNR (dB) για NB-IoT με την διαμόρφωση QPSK. Παρακάτω

παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις και γίνεται μια μικρή αναφορά στο τι απεικονίζει η κάθε γραφική παράσταση.

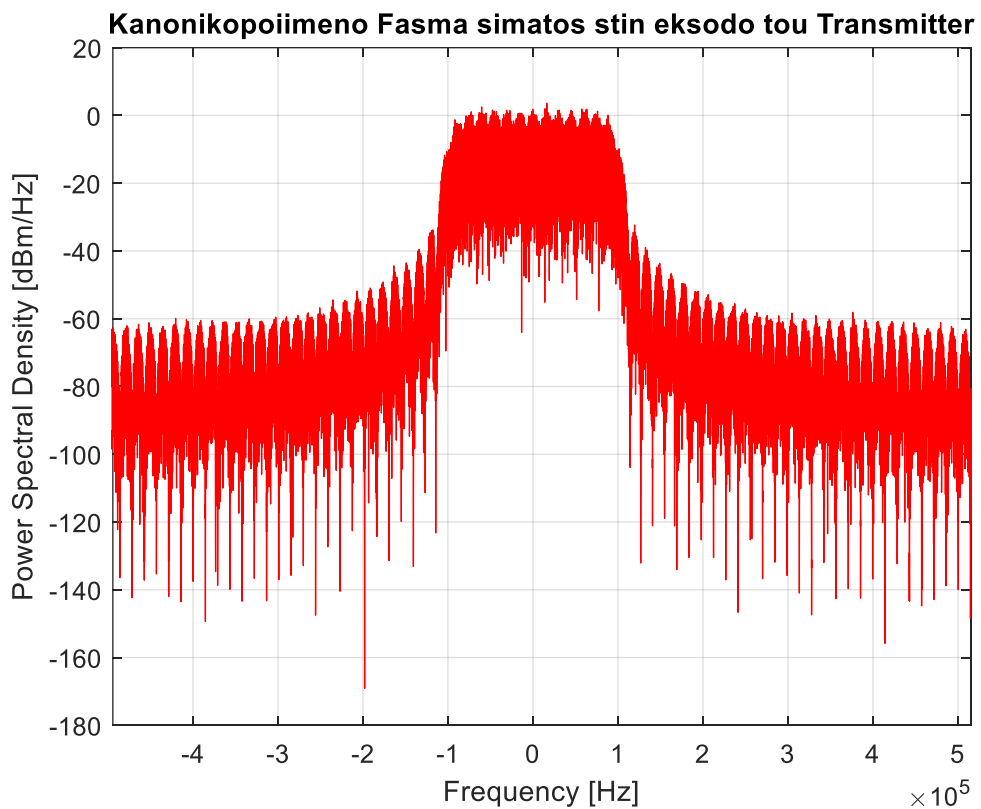


**Εικόνα 5.13: Block διάγραμμα NB-IoT με διαμόρφωση 16-QAM**

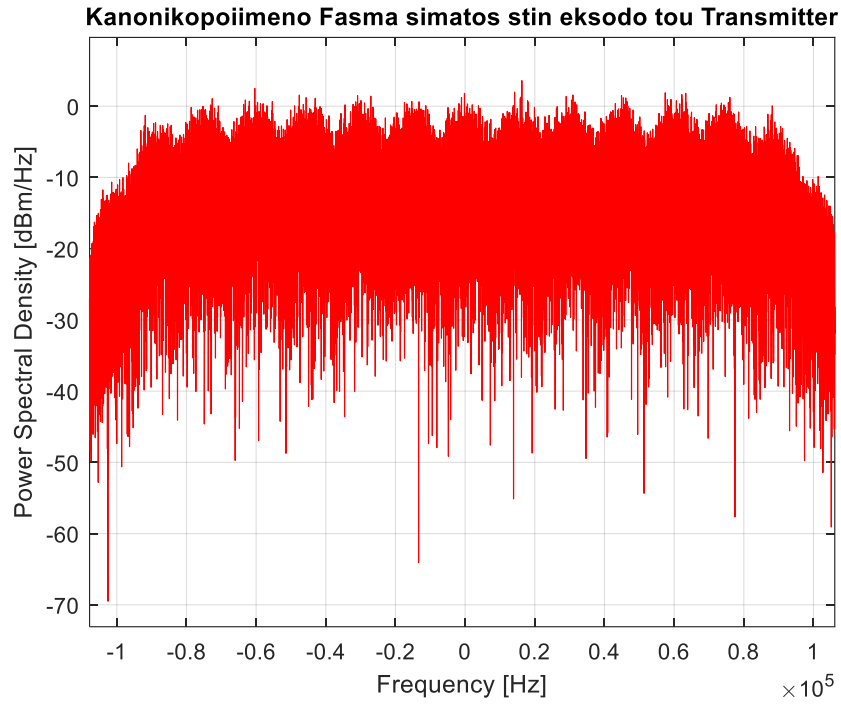
Το παραπάνω block διάγραμμα, είναι μια περιληπτική απεικόνιση του κώδικα μας στο Matlab. Στον συγκεκριμένο κώδικα στην αρχή ορίζουμε κάποιες βασικές παραμέτρους με αποτέλεσμα στο κυρίως σώμα του κώδικα μας να κάνουμε συγκεκριμένους υπολογισμούς και να εξάγουμε στο τέλος τις συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις που θέλουμε. Επίσης ορίζουμε και την συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος για το φίλτρο του πομπού. Ακόμη γίνονται και οι κατάλληλες μετατροπές των bits σε σύμβολα με βάση το διάγραμμα αστερισμού του 16-QAM. Οι παραστάσεις που θέλουμε να εξάγουμε είναι το διάγραμμα του αστερισμού για την διαμόρφωση 16-QAM, το φάσμα του σήματος στην βασική ζώνη του πομπού. Τέλος, απεικονίζουμε το BER σε σχέση με το SNR (dB) για NB-IoT με την διαμόρφωση 16-QAM και το φάσμα εξόδου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις και γίνεται μια μικρή αναφορά στο τι απεικονίζει η κάθε γραφική παράσταση.



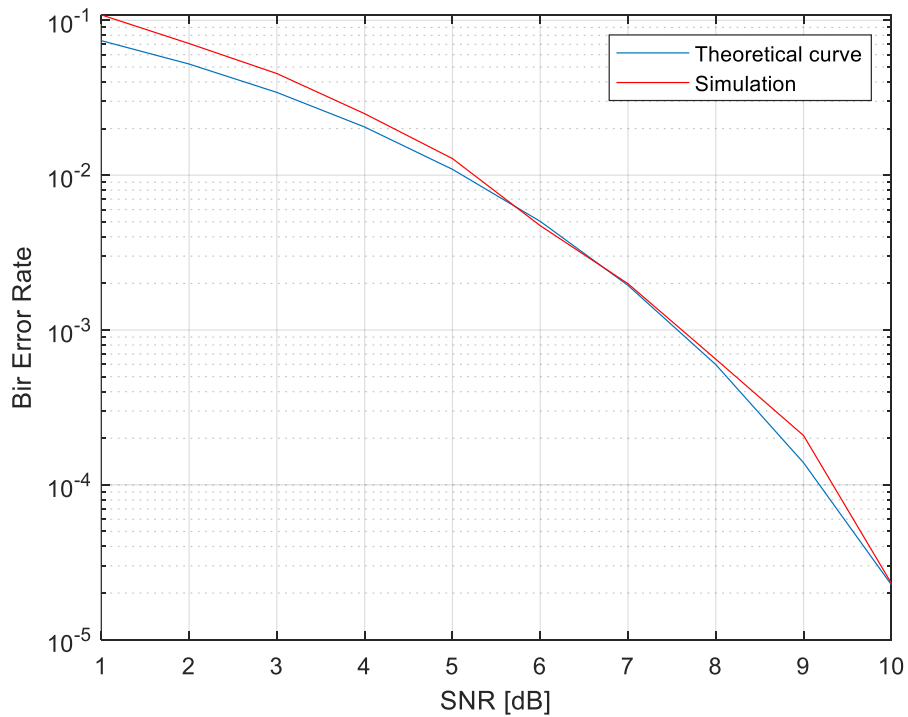
**Εικόνα 5.14: Διάγραμμα αστερισμού QPSK.**



**Εικόνα 5.15: NB-IoT με διαμόρφωση QPSK (φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού).**

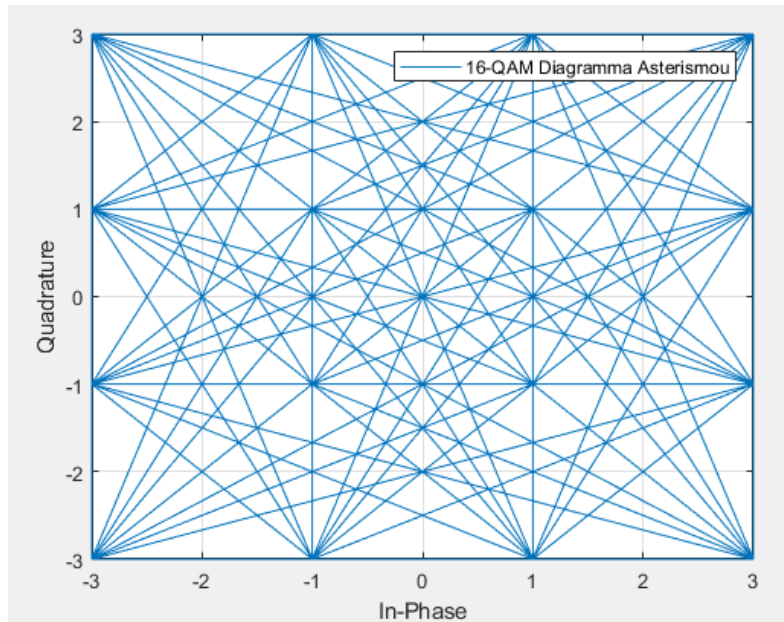


**Εικόνα 5.16: Διαμόρφωση QPSK, το φάσμα του σήματος στην βασική ζώνη του πομπού (Zoom της εικόνας 5.15)**

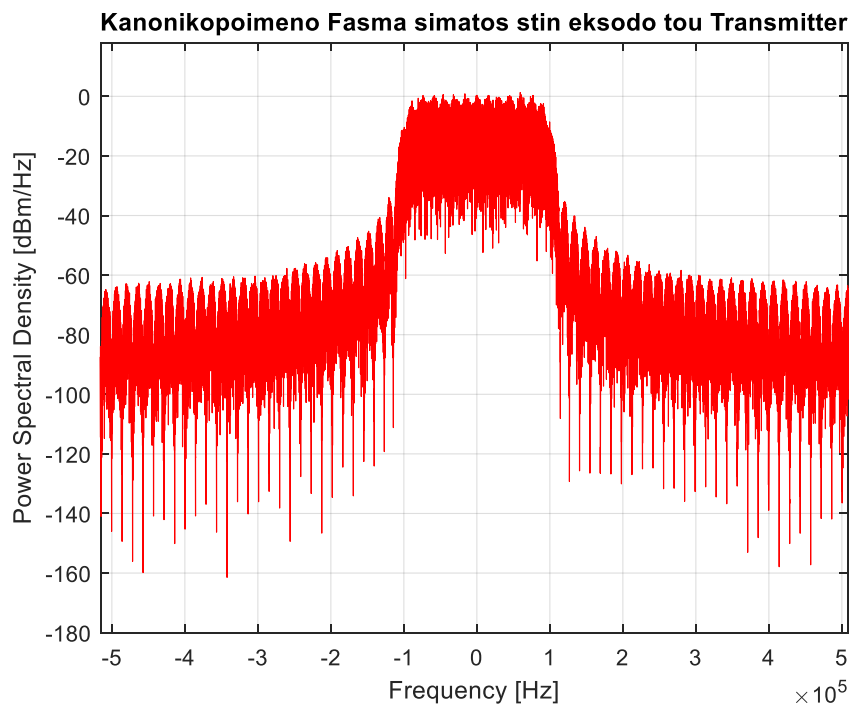


**Εικόνα 5.17: BER σε σχέση με το SNR (dB) για NB-IoT με διαμόρφωση QPSK.**

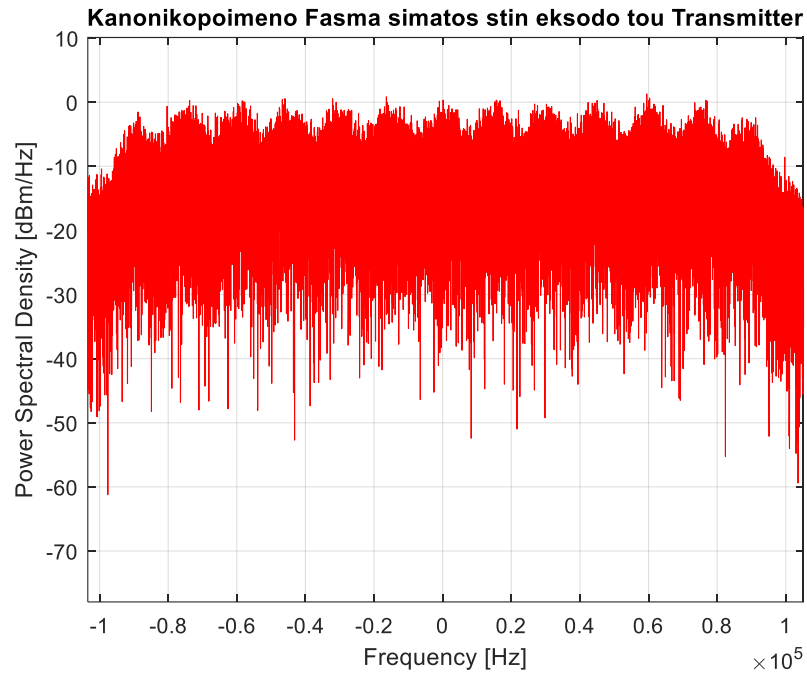
Παρακάτω παίρνουμε τα διαγράμματα για την προσομοίωση με διαμόρφωση 16-QAM.



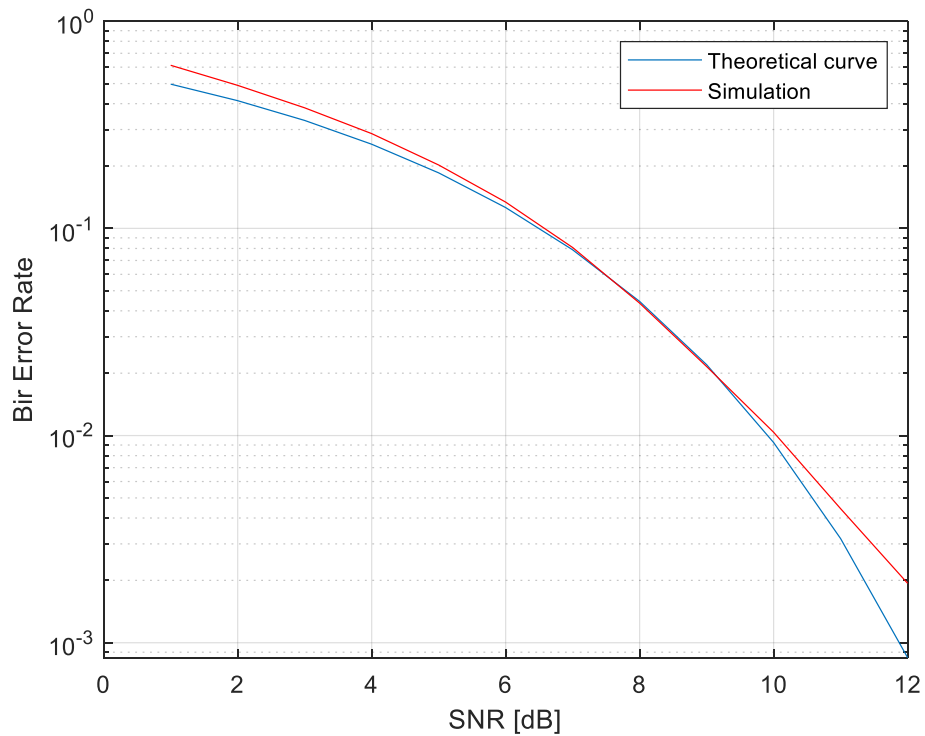
**Εικόνα 5.18: Διάγραμμα αστερισμού 16-QAM.**



**Εικόνα 5.19: NB-IoT με διαμόρφωση 16-QAM (φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού)**



**Εικόνα 5.20: Διαμόρφωση 16-QAM, το φάσμα στην βασική ζώνη του πομπού (Zoom της εικόνας 5.19).**



**Εικόνα 5.21: BER σε σχέση με το SNR (dB) για NB-IoT με διαμόρφωση 16-QAM.**

## 5.4 Συμπεράσματα και μελλοντική επέκταση της εργασίας

Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα της προσομοίωσης για το Narrow-Band IoT, συμπεραίνουμε είναι ότι για να έχει την ίδια BER επίδοση με το LoraWAN χρειάζεται υψηλότερες τιμές του SNR. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο σηματοθορυβικός λόγος SNR μειώνεται το ποσοστό εσφαλμένων Bit. Για το σύστημα LoRa παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής διασποράς SF τόσο μικρότερο σηματοθορυβικό λόγο SNR (dB) χρειαζόμαστε για να επιτύχουμε τον ίδιο ρυθμό σφαλμάτων bit. Επίσης σε ένα ασύρματο κανάλι με μόνο AWGN και υψηλή τιμή SF μπορούμε να έχουμε χαμηλή τιμή BER.

Μελλοντικά, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα μπορούσε να επεκταθεί εξετάζοντας και συγκρίνοντας την BER επίδοση των δύο πρωτοκόλλων LoRa και NB-IoT σε ασύρματο κανάλι με διάλεια επιλεκτικής συχνότητας (frequency selective fading).



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ammar Rayes και Samer Salam, «Internet of Things From Hype to RealityThe Road to Digitization »
- [2] Μούρτου Αλεξία και Κυράνας Αναστάσιος , «Internet of Things», πτυχιακή εργασία, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων, 2016.
- [3] Keertikumar M . , Shubham M. , R.M. Banakar «Evolution of IoT in Smart Vehicles: An Overview », School of Electronics and Communication Engineering BVB Campus, KLE Technological University Hubli, India .
- [4] i-tech4u.gr «Internet Of Things σεαπλάελληνικά» ,Νοέμβριος 2014.
- [5] Schneider Elecric «IoT Business Report», 2016.
- [6] Abbas Jamalipur, Marina Ruggieri, Homayoun Nikookar «Digitising the Industry – Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Words» 2016, River Oublishers.
- [7] D.P Acharjya, M. Kalaiselvi «Internet of Things : Advances and Envisioned Applications», Springer International Publishing, 2017.
- [8] Καστρινός Δημήτριος «To InternetofThings και οι εφαρμογές του στην εφοδιαστική αλυσίδα και τα Logistics», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πειραιά, 2018.
- [9] Παπασταθοπούλου Αλεξάνδρα, «InternetOfThings» , Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Τμήμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη Φεβρουάριος 2017
- [10] Kais Mekkia, Eddy Bajica, Frederic Chaxela, Fernand Meyerb , “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment” Δεκέμβριος 2017,Research Centre for Automatic Control of Nancy, Campus Sciences,Γαλλία, Διαθέσιμο :  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>
- [11] SIGFOX, SIGFOX White Paper Security, Φεβρουάριος 2017, Διαθέσιμο :  
[https://www.sigfox.com/sites/default/files/1701-SIGFOX-White\\_Paper\\_Security.pdf](https://www.sigfox.com/sites/default/files/1701-SIGFOX-White_Paper_Security.pdf)
- [12] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT” , Μάρτιος 2017 , Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University-Seoul, Republic of Korea, Διαθέσιμο :  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>
- [13] LishanBao, LeiWei, ChenglingJiang, WeiweiMiao, BoGuo, WeiLi, XiangdongCheng, RuiLiu,  
JunZou, “Coverage Analysis on NB-IoT and LoRa in Power Wireless Private Network” , 2018

,8th International Congress of Information and Communication Technology (ICICT-2018) ,

Διαθέσιμο : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187705091830632X>

[14]Vejlgaard, B., Lauridsen, M., Nguyen, H. C., Kovács, I., Mogensen, P. E., &Sørensen, M.

(2017). Coverage andCapacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT. In 2017 IEEE 85th

Vehicular Technology Conference(VTC Spring) IEEE. I E E E V T S Vehicular Technology

Conference. Proceedings<https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108666>

[15] Konstas Nikolas, ”Internet of things, LoraWan VS Nb-Iot”, Αυγουστος 2017 ,

ΠανεπιστήμιοΠειραιώς, Διαθέσιμο : Information Technology Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Sweden, Διαθέσιμο:

<https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8950859>

[http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/10549/Konstas\\_Nikolaos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/10549/Konstas_Nikolaos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[16] Tsavalos Nikolaos, Ahmad Adu Hashem, “Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Technologies for Industrial IoT Applications”, Ιούνιος 2018 , Department Of Electrical and