



Πανεπιστήμιο Αιγαίου  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών  
Συστημάτων

Μελέτη του Διαδικτύου των Αντικειμένων σε Περιβάλλον  
Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς.  
(Study of the Internet of Things in a Fifth Generation  
Mobile Communication Environment)

Η Διπλωματική Εργασία  
παρουσιάστηκε ενώπιον  
του Διδακτικού Προσωπικού του  
Πανεπιστημίου Αιγαίου

---

Σε Μερική Εκπλήρωση  
των Απαιτήσεων για το Δίπλωμα του  
Μηχανικού Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

του  
Πλαστρά Στέφανου  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

---

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ  
ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΟΥ ΠΛΑΣΤΡΑ ΣΤΕΦΑΝΟΥ:

---

Σκούτας Δημήτριος, Επιβλέπων  
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και  
Επικοινωνιακών Συστημάτων

---

Σκιάνης Χαράλαμπος, Μέλος  
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και  
Επικοινωνιακών Συστημάτων

---

Βουγιούκας Δημοσθένης, Μέλος  
Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και  
Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019



## Περίληψη

Το Διαδίκτυο των Αντικειμένων αποτελεί μια υποσχόμενη τεχνολογία με στόχο την σύνδεση έξυπνων συσκευών στο παγκόσμιο δίκτυο. Η ολοένα αυξανόμενη κίνηση δεδομένων, καθώς και η αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών, εγείρουν νέες προκλήσεις για τα υπάρχοντα δίκτυα, όπως η υψηλή φασματική απόδοση, υψηλή συνδεσιμότητα, οι χαμηλές καθυστερήσεις μετάδοσης και το υψηλό εύρος ζώνης. Τα νέα δίκτυα πέμπτης γενιάς, αναμένεται να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις αυτές, διαμορφώνοντας ένα κυρίαρχο περιβάλλον ανάπτυξης του Διαδικτύου των Αντικειμένων. Συγκεκριμένα, η Μη-Ορθογώνια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, όπου πρόκειται για μια υποσχόμενη τεχνολογία στα 5G δίκτυα, μπορεί να υποστηρίξει μαζικές επικοινωνίες συσκευών, χαμηλού κόστος συσκευές και υψηλή φασματική απόδοση, με την παρουσία μιας νέας περιοχής πολύ-πλέξης, την ισχύ.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη των υπαρχουσών τεχνολογιών επικοινωνίας του διαδικτύου των αντικειμένων με έμφαση στις κυψελωτές τεχνολογίες, καθώς και η μετάβαση του διαδικτύου των αντικειμένων στο περιβάλλον δικτύων κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς. Επιπλέον, στα πλαίσια του 5G, αναδύεται μια νέα υποσχόμενη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, η Μη-Ορθογώνια τεχνική (NOMA) η οποία προσφέρει μαζική συνδεσιμότητα, κάτι που είναι αναγκαίο να αξιοποιήσει το διαδίκτυο των αντικειμένων στο περιβάλλον 5G. Στο πλαίσιο αυτό, έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο προσομοίωσης σε δικτυακό επίπεδο, προκειμένου να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα της Μη-Ορθογώνιας τεχνικής έναντι σε ορθογώνιο σύστημα που είναι σήμερα σε χρήση από το διαδίκτυο των αντικειμένων.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο μελετάται το δίκτυο πέμπτης γενιάς, οι λόγοι ανάπτυξης, οι απαιτήσεις του δικτύου καθώς οι νέες αρχιτεκτονικές αλλά και οι δυνατότητες που προσφέρει. Στη συνέχεια, αναλύονται οι καινοτόμες τεχνολογίες που αξιοποιεί το δίκτυο 5G προς παροχή νέων υπηρεσιών. Επιπλέον, το δεύτερο κεφάλαιο εμπεριέχει μια εισαγωγή στο διαδίκτυο των αντικειμένων, στις αρχιτεκτονικές του και στα πεδία εφαρμογής του. Ακόμη εξετάζονται τα μοντέλα επικοινωνίας του διαδικτύου των αντικειμένων, με ιδιαίτερη έμφαση στα κυψελωτά πρότυπα. Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μια αναφορά στη κατάσταση του διαδικτύου των αντικειμένων πάνω από την υπάρχουσα επικοινωνιακή υποδομή των δικτύων τέταρτης γενιάς, καθώς και των δυνατοτήτων που παρέχει η υποδομή αυτή. Επιπροσθέτως, αναλύεται η μετάβαση του διαδικτύου των αντικειμένων από το 4G στο δίκτυο κινητών επικοινωνιών 5G, αλλά και τεχνολογικές εξελίξεις που αφορούν αυτή τη μετάβαση. Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η Μη-Ορθογώνια τεχνική, οι βασικές αρχές της τεχνικής, και οι κατηγορίες της. Επίσης, εξηγείται η σημαντικότητα της τεχνικής αυτής με βάση τη περιοχή της ισχύος στην επικοινωνία του διαδικτύου των αντικειμένων. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης, αναλύεται στο τρόπο δόμησης του, και επεξηγούνται τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης που απορρέουν από αυτό. Καταληκτικά, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται ο επίλογος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζοντας τα συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα των σεναρίων, και προτείνοντας μελλοντικά ερευνητικά θέματα στη συγκεκριμένη περιοχή.

**Λέξεις κλειδιά:** Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς, 5G, Μη-Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (NOMA), Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση (OMA), Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT), Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανών (mMTC)

© 2019

του

ΠΛΑΣΤΡΑ ΣΤΕΦΑΝΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

## Abstract

The Internet of Things is a new promising technology aimed at connecting smart devices to the global network. The increased data traffic, as well as the increased number of connected devices, raises new challenges for existing networks, such as high spectral performance, high connectivity, low transmission delays and high bandwidth usage. The new fifth generation networks are expected to meet these requirements, creating a dominant environment for the development of the Internet of Things. In particular, the Non-Orthogonal multiple access technique, which is a promising technology in 5G networks, it can support mass communications devices, low cost devices and high spectral efficiency, with the presence of a new multiplexing area, the power. The purpose of this diploma thesis is to study the existing communications technologies of the internet of Things, with emphasis on cellular technologies, as well as the transition of internet of Things in the environment of fifth generation mobile communications networks. In addition, within the framework of the 5G, emerges a new promising multiple access technique, the Non-Orthogonal technique (NOMA) which offers massive connectivity, something that is necessary to utilize the Internet of Things in the 5G environment. In this context, it has developed a simulation model in a network level, in order to understand the advantages of the Non-Orthogonal technique compared to the orthogonal system that is currently in use by the internet of things. Initially, the first chapter examines the fifth generation network, the reasons for development, the requirements of the network as well as the new architectures and the possibilities offered. The innovative technologies used by the 5G network to provide new services are then analyzed. In addition, the second chapter contains an introduction to the Internet of Things, in its architectures and in its fields of application. Also examined are the communication models of the Internet of Things, with particular emphasis on cellular standards. In the third chapter, a reference is made to the state of the Internet of Things above the existing communication infrastructure of the fourth generation networks, as well as the possibilities offered by this infrastructure. In addition, the transition of the Internet of Things from 4G to the 5G mobile communications network is analyzed, as well as technological developments related to this transition. The fourth chapter examines Non-Orthogonal technique, the basic principles of technique, and its categories. Also explained the importance of this technique based on the area of power multiplexing in Internet of Things communication. In the fifth chapter, the simulation model is presented, analyzed the structure of, and explained the various simulation scenarios arising from this. Finally, in the sixth and last chapter, the epilogue of this thesis, presenting the conclusions based on the results of the scenarios, and proposing future research topics in this area.

**Keywords:** Fifth Generation Mobile Communications Networks, 5G, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), Orthogonal Multiple Access (OMA), Internet of Things (IoT), Massive Machine Type Communications (mMTC)

© 2019  
PLASTRAS STEFANOS  
Department of Information and Communication Systems Engineering  
UNIVERSITY OF THE AEGEAN

## **Υπεύθυνη Δήλωση Πρωτοτυπίας Διπλωματικής Εργασίας**

Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και δηλώνω ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη προπτυχιακή διπλωματική εργασία.

Στέφανος Πλαστράς



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της εργασίας κύριο Δημήτριο Σκούτα, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος για την βοήθεια του καθώς επίσης και για το χρόνο που μου αφιέρωσε. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου για την ενθάρρυνση, την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Βασίλειο Τάτση, Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος, για το χρόνο του, το ενδιαφέρον του και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

## Κατάλογος Περιεχομένων

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>10</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>11</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>12</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ</b> .....	<b>13</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.</b> .....	<b>15</b>
1.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ 5G ΔΙΚΤΥΩΝ.....	15
1.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ 5G ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	17
1.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ .....	22
1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G.....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ.</b> .....	<b>28</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	28
2.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ INTERNET OF THINGS .....	28
2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ .....	31
2.4 ΙΟΤ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	33
2.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΣΤΟ ΙΟΤ .....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 5G ΚΥΨΕΛΩΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ.</b> .....	<b>40</b>
3.1 ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ. ....	40
3.2 5G ΜΗ-ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΔΙΕΠΑΦΗ. ....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΗ-ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.</b> .....	<b>46</b>
4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ. ....	46
4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΝΟΜΑ.....	47
4.3 ΝΟΜΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΙΣΧΥ (POWER DOMAIN NOMA). ....	48
4.4 ΟΦΕΛΗ ΜΗ-ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΈΝΑΝΤΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ.....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ NARROWBAND – ΙΟΤ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ-ΟΡΘΟΓΩΝΙΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ.</b> .....	<b>52</b>
5.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. ....	52
5.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΜΑΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΡΗΣΤΩΝ (USER CLUSTERING). ....	54
5.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	55
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.</b> .....	<b>61</b>
6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ. ....	61
6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ.....	61
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>63</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά 5G τεχνολογιών .....	26
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά ES-GSM-IoT, LTE-Cat-M1, NB-IoT προτύπων. ....	38
Πίνακας 3: Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης.....	56

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Αύξηση συσκευών/συνδέσεων σε συνάρτηση με τον τύπο σύνδεσης.[1].....	15
Σχήμα 2: Διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων για χρήση από 5G NR δίκτυα.[2].....	16
Σχήμα 3: Συγκεντρωτική αρχιτεκτονική δικτύου 5G.[3].....	18
Σχήμα 4: Τομές δικτύου 5G για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης.[4] .....	19
Σχήμα 5: Επιλογές SA – NSA αρχιτεκτονικής.[6].....	20
Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική Virtualized RAN.[8].....	21
Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική Network Densification.[9].....	22
Σχήμα 8: Περιπτώσεις Χρήσης στο 5G.[11].....	23
Σχήμα 9: Ζεύξη καθόδου αποτελούμενη από δύο χρήστες σε NOMA δίκτυο.[15].....	26
Σχήμα 10: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων.[18] .....	29
Σχήμα 11: Αρχιτεκτονική Fog.[19].....	30
Σχήμα 12: Αρχιτεκτονική IoT βασισμένη σε Microservices.[20].....	31
Σχήμα 13: Εφαρμογές – Περιπτώσεις Χρήσης IoT.[23].....	34
Σχήμα 14: LTE-Cat-1, NB-IoT εξέλιξη στο 5G IoT.[33] .....	44
Σχήμα 15: Κατηγοριοποίηση NOMA.[42].....	47
Σχήμα 16: Ζεύξη Καθόδου, με σταθμό βάσης και δύο χρήστες.[44] .....	48
Σχήμα 17: Ζεύξη Ανόδου, με σταθμό βάσης και δύο χρήστες.[44].....	49
Σχήμα 18: Δίκτυο NB-IoT αποτελούμενο από ένα Base Station, και M IoT συσκευές. ....	52
Σχήμα 19: Ζώνες περιοχής χρηστών εντός κελιού.....	53
Σχήμα 20: Ομαδοποίηση χρηστών ανά δύο. Με μπλε οι χρήστες της ζώνης A, ενώ με κίτρινο οι χρήστες της ζώνης B. ....	55
Σχήμα 21: Ρυθμαπόδοση χρηστών στο ορθογώνιο NB-IoT. ....	56
Σχήμα 22: Ρυθμαπόδοση χρηστών συστήματος στο ορθογώνιο NB-IoT. ....	57
Σχήμα 23: Μέγεθος ουράς χρηστών στο ορθογώνιο NB-IoT. ....	58
Σχήμα 24: Συγκριτική ρυθμαπόδοση χρηστών με χρήση NOMA τεχνικής. ....	59
Σχήμα 25: Συγκριτική ρυθμαπόδοση χρηστών συστήματος με χρήση NOMA τεχνικής. ....	60
Σχήμα 26: Συγκριτικό μέγεθος ουράς χρηστών με χρήση NOMA τεχνικής. ....	60

## Κατάλογος Ακρωνυμίων

Ακρωνύμιο	Επεξήγηση
API	Application Programming Interface
BBU	Base Band Unit
BLE	Bluetooth Low Energy
CDMA	Code Division Multiple Access
CRAN	Cloud Radio Access Network
CSI	Channel State Information
D2D	Device To Device
eMBB	enhanced Mobile Broad Band
eMTC	enhanced Machine Type Communication
E2E	End To End
FDMA	Frequency Division Multiple Access
IoT	Internet Of Things
LTE	Long Term Evolution
mMTC	massive Machine Type Communication
mmWave	Millimeter-wave
MTC	Machine Type Communication
M2M	Machine To Machine
NB-IoT	Narrow Band – Internet of Things
NFV	Network Function Virtualization
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
NOMA CD	Non Orthogonal Multiple Access Code Domain
NOMA PD	Non Orthogonal Multiple Access Power Domain
NR	New Radio
NSA	Non Stand Alone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMA	Orthogonal Multiple Access
RAN	Radio Access Network
RRU	Remote Radio Unit
SA	Stand Alone
SBA	Service Based Architecture
SC	Superposition Coding
SDN	Software Defined Network
SIC	Successive Interference Cancelation
TDMA	Time Division Multiple Access

URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
Wi-Fi	Wireless Fidelity
5GC	Fifth Generation Core
5G-NGN	Fifth Generation – Next Generation Network

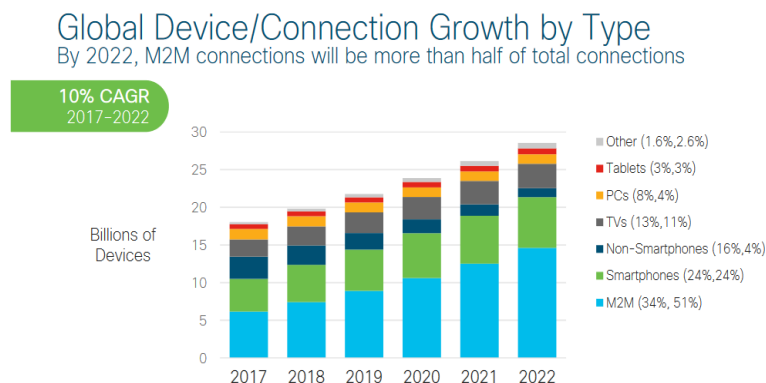
# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στα Δίκτυα Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς.

## 1.1 Αναγκαιότητα 5G Δικτύων

### 1.1.1 Λόγοι Ανάπτυξης 5G

Η κίνηση των δεδομένων που παράγονται από τις κινητές τηλεφωνικές συσκευές, αλλά και από τις διάφορες συσκευές που απαρτίζουν το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Internet of Things - IoT), εξυπηρετούνται από τα υπάρχοντα δίκτυα επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G). Τα δίκτυα αυτά έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις, καθώς καθιστούν δυνατή την επικοινωνία μεταξύ μηχανών (Machine Type Communication - MTC) του Διαδικτύου των Αντικειμένων, και εξυπηρετούν τις ευρύ-ζωνικές υπηρεσίες. Όμως, ο ολοένα αυξανόμενος όγκος των δεδομένων που διαχειρίζονται τα δίκτυα, εκτιμάται ότι το 2020 θα φθάσει τα 35 Exabytes. Επίσης, ο αριθμός των συσκευών του IoT, και των δεδομένων που απορρέουν από αυτές αναμένεται να αυξηθεί εκθετικά, καθώς ο αριθμός των μηχανών θα ξεπεράσει τα κινητά.

Έτσι, εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης ενός νέου δικτύου επικοινωνιών, το οποίο καλείται να καλύψει αυτές τις ανάγκες, δημιουργώντας καινούργιες απαιτήσεις. Το δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G) αναμένεται να αποτελέσει τη μελλοντική βάση δικτύων, αξιοποιώντας αναδυόμενες τεχνολογίες πρόσβασης και έναν συνδυασμό υπάρχοντων τεχνολογιών δικτύων. Παρακάτω παρουσιάζεται μια ετήσια αύξηση του αριθμού των κινητών και των συσκευών τύπου (Machine To Machine - M2M).



Σχήμα 1: Αύξηση συσκευών/συνδέσεων σε συνάρτηση με τον τύπο σύνδεσης.[1]

### 1.1.2 Απαιτήσεις 5G

Το δίκτυο 5G, καλείται να παρέχει αρκετά υψηλές συχνότητες σε συνδυασμό με τεράστιο εύρος ζώνης, μαζικό αριθμό κεραιών περισσότερο από ότι μπορεί να υποστηρίξουν τα υπάρχοντα δίκτυα, διαχείριση της πυκνότητας ετερογενών συσκευών, και ενεργοποίηση διαφορετικών υπηρεσιών δικτύου. Είναι αναγκαίο να επιτευχθεί μια ενιαία ολοκλήρωση σε όλα τα επίπεδα του 5G, με σκοπό την πλήρη σύνδεση του LTE (Long Term Evolution) δικτύου, Wi-Fi (Wireless Fidelity) δικτύου με το 5G για την παροχή υψηλών υπηρεσιών και καθολικής κάλυψης.

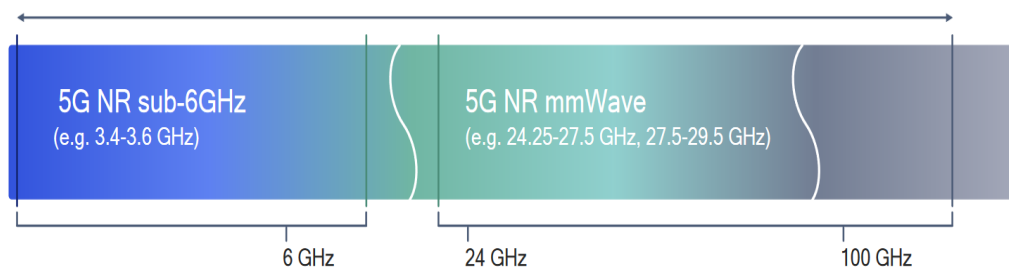
Οι απαιτήσεις ώστε να παρέχονται οι παραπάνω λειτουργίες περιγράφονται παρακάτω:

- Ρυθμός Δεδομένων (Data Rate).

Η δυνατότητα της συσκευής να μεταδώσει ή να λάβει δεδομένα σε ιδανικές συνθήκες με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Αναμένεται ο ρυθμός αιχμής, δηλαδή η βέλτιστη περίπτωση ρυθμού δεδομένων, να φθάσει την ταχύτητα των 20Gb/s.

- **Διαθέσιμο Εύρος Ζώνης (Available Bandwidth).**

Οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων που ήδη είναι σε χρήση σήμερα, τείνουν να φθάσουν σε κορεσμό. Νέες μπάντες έχουν ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του 5G New Radio (NR) προτύπου επιτρέποντας την αύξηση της απόδοσης των χρηστών, και την ταυτόχρονη εξυπηρέτησή τους. Γίνεται εμφανής και η ανάπτυξη της τεχνολογίας χιλιοστό-μετρικών μικρό-κυμάτων (Millimeter-wave – mmWave), η οποία σε υψηλές συχνότητες εγγυάται υπηρεσίες όπως παράδοση υψηλής ποιότητας βίντεο και περιεχόμενο πολυμέσων.



Σχήμα 2: Διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων για χρήση από 5G NR δίκτυα.[2]

- **Καθυστέρηση (Latency).**

Στα δίκτυα 4G οι υπηρεσίες εξυπηρετούνται με μια χρονική καθυστέρηση της τάξης των 10 ms, η οποία είναι επαρκής για ένα εύρος εφαρμογών. Όμως στο μέλλον, κρίσιμες κατηγορίες εφαρμογών, θα απαιτούν καθυστερήσεις μικρότερες του 1 ms, για γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία. Το όριο της καθυστέρησης θα πρέπει να τεθεί σε ένα αυστηρό πλαίσιο της τάξεως του 1 ms.

- **Χωρητικότητα Δικτύου (Network Capacity).**

Για να μπορεί να αυξηθεί η χωρητικότητα, θα πρέπει να εφαρμοσθούν νέες τοπολογίες κυψέλης, μικρότερης έκτασης και πολλαπλού αριθμού. Ακόμη, σε επίπεδο όγκου δεδομένων και συνδέσεων, θα πρέπει να υποστηρίζονται κάποιες εκατομμύρια συνδέσεις ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (km<sup>2</sup>), γεγονός που είναι ανάγκη για τις συσκευές του IoT. Το 5G δίκτυο θα είναι σε θέση να παρέχει 1000 φορές επιπλέον χωρητικότητα, καθώς και πλήθος συνδέσεων.

- **Συμβατότητα (Compatibility).**

Διαφορετικοί ρυθμοί δεδομένων και υπηρεσίες θα πρέπει να εξυπηρετηθούν από την υπάρχουσα μακρό-κυψέλη. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει γίνει μια αντίστοιχη διαδικασία στο πλάνο διαχείρισης του δικτύου αλλά και στον πυρήνα του. Έτσι, οι υποδομές ενός 5G δικτύου θα πρέπει να είναι σε θέση να συνεργάζονται με υποδομή των παλαιότερων δικτύων, για την παροχή κάλυψης και αδιάλειπτης επικοινωνίας και σύνδεσης.

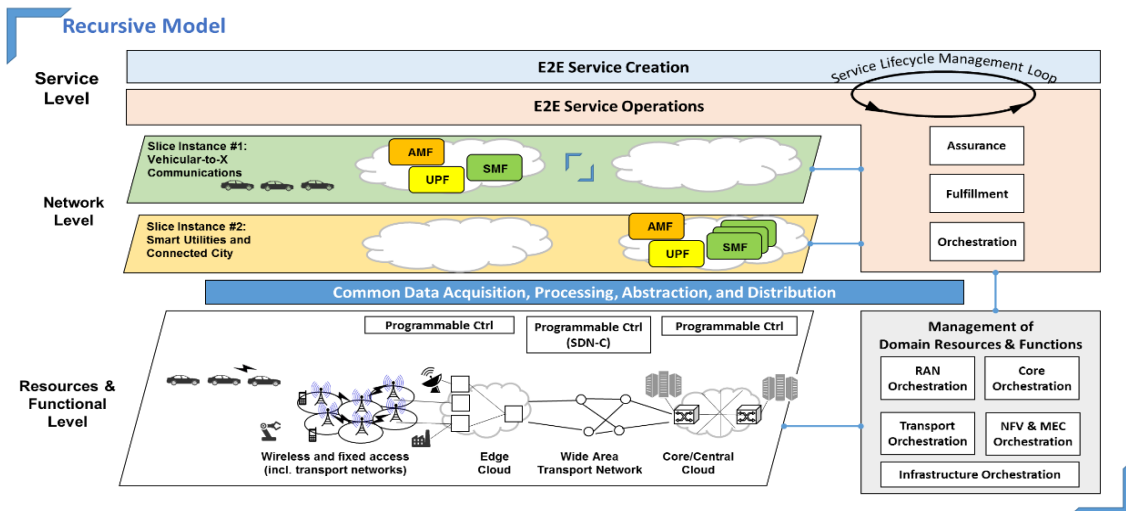


## 1.2 Αρχιτεκτονική 5G Συστημάτων

Τα δίκτυα 5G έχουν προταθεί ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις μιας κοινωνίας πλήρως συνδεδεμένης η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή κινητικότητα. Έτσι, η συνύπαρξη τόσο ανθρωποκεντρικών, όσο και εφαρμογών τύπου MTC αναμένεται να καθορίσουν ποικίλες λειτουργικές απαιτήσεις, και απαιτήσεις σε επίπεδο απόδοσης, τέτοιες που τα δίκτυα 5G πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξουν. Στα συστήματα 5G, η τομή δικτύου από άκρο σε άκρο (End-To-End Network Slicing), η αρχιτεκτονική βασισμένη στις υπηρεσίες (Service-based Architecture), η δικτύωση βασισμένη στο λογισμικό (Software Defined Radio - SDN), και η εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization - NFV) αποτελούν τα βασικά θεμέλια για να υποστηρίξουν όλες εκείνες τις ετερογενείς περιπτώσεις χρήσης με ένα τρόπο αποδοτικό.

Οι προοπτικές της τομής δικτύου, δηλαδή της εκτέλεσης πολλαπλών κινητών δικτύων σε μια κοινή υποδομή, απαιτούν ένα συμβιβασμό από συμφωνητικά επιπέδου υπηρεσίας (Service Level Agreement - SLA) των πελατών με τις δυνατότητες της δικτυακής υποδομής. Στη γενική περίπτωση, πελάτες διαφόρων υπηρεσιών (Service Customers), αιτούνται τη δημιουργία υπηρεσιών επικοινωνίας παρέχοντας περιγραφές από τις απαιτήσεις αυτές κατ' απαίτηση στους παρόχους υπηρεσιών (Service Providers). Με έναν αυξημένο αριθμό από τέτοια αιτήματα πελατών ως αποτέλεσμα, ένα πλαίσιο από άκρο σε άκρο (E2E framework) για **δημιουργίες και λειτουργίες υπηρεσιών (Service Creations, Service Operations)**, θα πρέπει να παρουσιάσει σημαντικά αυξημένο επίπεδο αυτοματισμού για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των τομών δικτύου.

Στο **επίπεδο υπηρεσιών (Service Level)**, πρέπει να αυτοματοποιηθεί η διαχείριση του κύκλου ζωής με λειτουργίες όπως διασφάλιση υπηρεσιών (Service Assurance), εκπλήρωση υπηρεσιών (Service Fulfilment) και ενορχήστρωση υπηρεσιών (Service Orchestration), όπως απεικονίζονται στο σχήμα 3, καλύπτοντας έτσι όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής. Οι **λειτουργίες υπηρεσιών (E2E Service Operations)** αλληλοεπιδρούν με τις λειτουργίες της οντότητας **διαχείρισης πόρων περιοχών και λειτουργιών (Management of Domain Resources and Functions)**. Παραδείγματα περιοχών μπορεί να είναι το δίκτυο ράδιο-πρόσβασης (Radio Access Network - RAN), το δίκτυο πυρήνα (Core Network - CN), καθώς και οι τεχνολογίες NFV και η υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (Mobile Edge Computing - MEC). Η τεχνολογία SDN σε αυτό το πλαίσιο μπορεί να προγραμματισθεί ώστε να εκτελεί αποτελεσματικά πολιτικές και κανόνες στο επίπεδο πόρων και λειτουργιών (Resources and Functional Level).

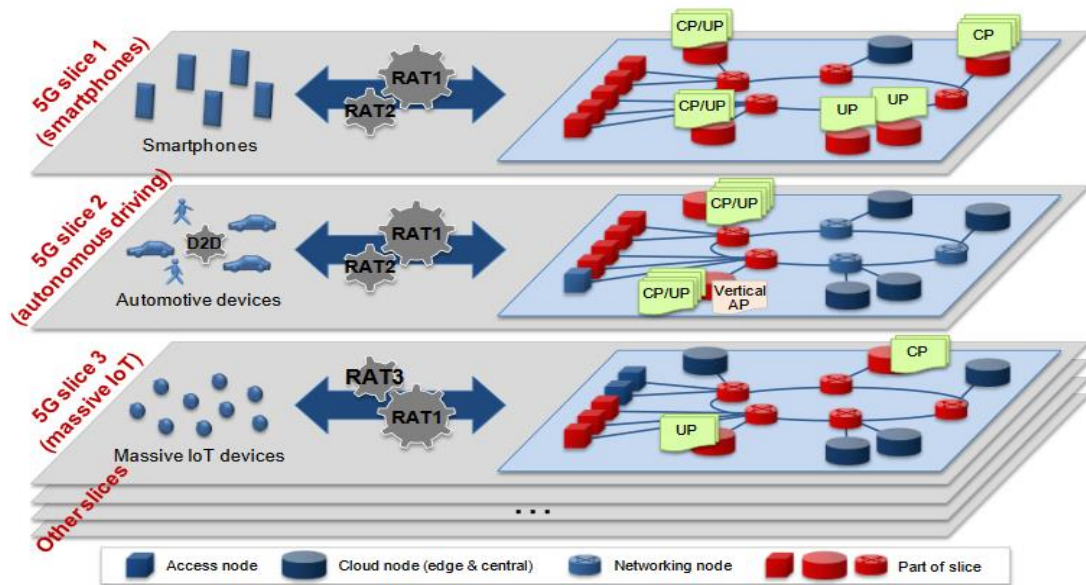


Σχήμα 3: Συγκεντρωτική αρχιτεκτονική δικτύου 5G.[3]

- **Network Slicing.**

Μια τομή δικτύου, μπορεί να υποστηρίξει την επικοινωνία ενός συγκεκριμένου τύπου σύνδεσης, με την κατάλληλη διαχείριση, των πλάνων C- και U- για αυτή την επικοινωνία. Σε αυτή τη προοπτική, μια τομή δικτύου 5G (5G slice) αποτελείται από μια συλλογή δικτυακών λειτουργιών 5G (5G network functions) και συγκεκριμένων ρυθμίσεων ράδιο-πρόσβασης όπου συνδυάζονται μαζί για συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης [4]. Επιπλέον, μια τομή δικτύου μπορεί να επεκταθεί σε όλες τις πτυχές του δικτύου 5G, όπως οι μονάδες λογισμικού που εκτελούνται σε κόμβους νέφους, καθώς επίσης στη διαχείριση ρυθμίσεων της συσκευής 5G. Επιπρόσθετα, δεν περιέχουν όλες οι τομές δικτύου τις ίδιες λειτουργίες, καθώς μερικές λειτουργίες που επιτελούν συγκεκριμένες διαδικασίες για ένα δίκτυο ίσως δεν εμπεριέχονται σε κάποιες τομές. Ο σκοπός μιας τομής είναι να διαχειρίζεται μόνο τη κίνηση που απαιτείται για τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης και να αποφεύγει όλη τη λειτουργικότητα που δεν χρειάζεται να έχει.

Στο σχήμα 4, απεικονίζεται μια ταυτόχρονη λειτουργία πολλαπλών τομών 5G στην ίδια φυσική υποδομή. Έτσι, για παράδειγμα, μια τομή για τα έξυπνα κινητά μπορεί να πραγματοποιηθεί ορίζοντας λειτουργίες που κατανέμονται σε όλο το δίκτυο. Ακόμη, για μια τομή όπως η αυτόνομη οδήγηση, όλες εκείνες οι απαραίτητες λειτουργίες μπορούν να αρχικοποιηθούν σε κόμβους νέφους. Αλλά και για μια τομή που υποστηρίζει μαζικές συσκευές IoT, μερικές βασικές διαδικασίες C- μπορούν να ρυθμισθούν με βάση τη κινητικότητα.



Σχήμα 4: Τομές δικτύου 5G για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης.[4]

Η χρήση, τόσο ειδικής υποδομής σε φυσικό επίπεδο για συγκεκριμένες τομές δικτύου, όσο και κοινόχρηστης υποδομής και λειτουργιών ανάμεσα στις τομές, απαιτείται [5]. Έτσι, για να πραγματοποιηθεί μια τέτοιου είδους αρχιτεκτονική 5G, οι λειτουργίες C-, U- θα πρέπει να διαχωρισθούν, με ανοιχτές διεπαφές ανάμεσα τους, σύμφωνα με τις αρχές της τεχνολογίας SDN.

### 1.2.1 Σενάρια Αρχιτεκτονικής

Η αρχιτεκτονική στα δίκτυα πέμπτης γενιάς ακολουθεί ένα υβριδικό σχήμα, όπου ανάλογα με την υπηρεσία, αναδιαμορφώνεται ώστε να παρέχει τη ποιότητα επικοινωνίας που απαιτείται στο κατάλληλο σενάριο χρήσης. Έτσι, γίνεται διάκριση μεταξύ των διαφόρων σεναρίων αρχιτεκτονικής.

- **Αρχιτεκτονική Λειτουργίας Δικτύου (Standalone & Non-standalone Network Architecture – SA & NSA).**

Ο 3GPP οργανισμός ορίζει ένα νέο δίκτυο πυρήνα 5G (5G Core Network – 5GC), καθώς και μια νέα τεχνολογία ράδιο-πρόσβασης, την 5G New Radio (5G NR). Έτσι, το 5G είναι πιθανό να ενοποιηθεί στοιχεία από διαφορετικές γενιές σε διαφορετικές ρυθμίσεις, όπως οι λειτουργίες:

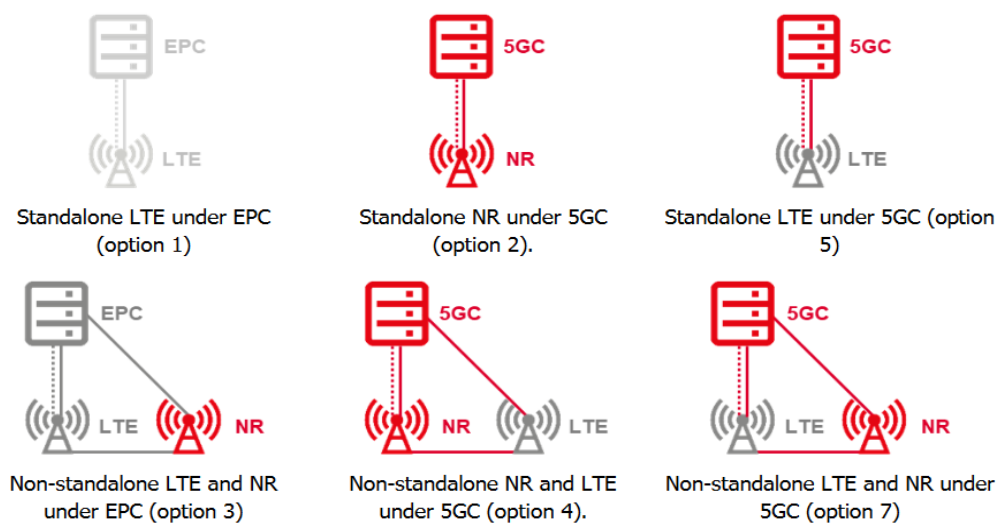
- Standalone (SA): Χρήση μιας τεχνολογίας ράδιο-πρόσβασης.
- Non-Standalone (NSA): Συνδυασμός πολλαπλών τεχνολογιών ράδιο-πρόσβασης.

Σε ένα σενάριο standalone, το δίκτυο 5G NR και ο πυρήνας δικτύου λειτουργούν αυτόνομα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το NR χρησιμοποιείται τόσο για το πλάνο ελέγχου όσο για το πλάνο χρηστών. Αυτό το σενάριο αποτελεί μια απλή λύση για διαχειριστές να λειτουργήσουν το δίκτυο ανεξάρτητα. Τρεις επιλογές αυτής της αρχιτεκτονικής έχουν καθορισθεί [6].

- Option 1. Γίνεται χρήση του Evolved Packet Core (EPC) και του σταθμού βάσης LTE.
- Option 2. Γίνεται χρήση του δικτύου πυρήνα 5G και του σταθμού βάσης 5G.
- Option 5. Γίνεται χρήση του δικτύου πυρήνα 5G και του σταθμού βάσης LTE.

Στο σενάριο non-standalone (NSA), οι σταθμοί βάσης του LTE και του NR συνυπάρχουν στο ίδιο δίκτυο, ώστε να παρέχουν ράδιο-πρόσβαση, όμως η ύπαρξη του δικτύου πυρήνα εξαρτάται από τον διαχειριστή του δικτύου. Αυτό το σενάριο, επιτρέπει την εκμετάλλευση του υπάρχοντος δικτύου LTE, δίνοντας την ευκαιρία στους παρόχους να αφήσουν την ίδια υποδομή χωρίς πολλαπλό κόστος και αλλαγές. Τρεις επιλογές αυτής της αρχιτεκτονικής έχουν καθορισθεί.

- Option 3. Γίνεται χρήση του δικτύου πυρήνα 4G (EPC) και ενός σταθμού βάσης LTE ο οποίος δρα ως κύριος, και ενός σταθμού βάσης NR δρώντας ως δεύτερος.
- Option 4. Γίνεται χρήση του δικτύου πυρήνα 5GC και σταθμού βάσης NR που δρα ως κύριος, και ενός σταθμού βάσης LTE δρώντας ως δεύτερος.
- Option 7. Γίνεται χρήση του 5GC και σταθμού βάσης LTE που δρα ως κύριος, και ενός σταθμού βάσης NR δρώντας ως δεύτερος.

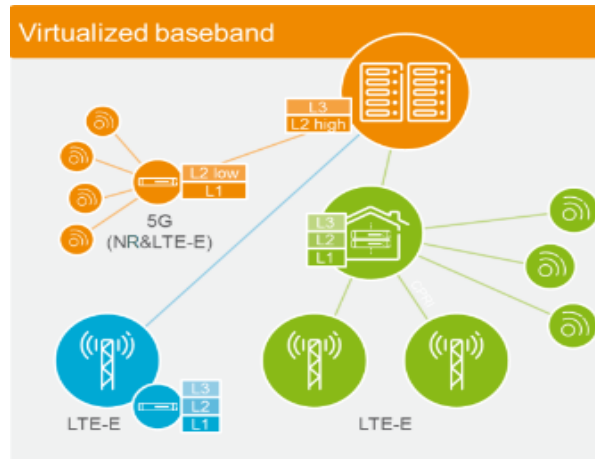


Σχήμα 5: Επιλογές SA – NSA αρχιτεκτονικής.[6]

- **Αρχιτεκτονική C-RAN (Cloud-Radio Access Network).**

Δίκτυο Ράδιο-Πρόσβασης (Radio Access Network - RAN), λέγεται το δίκτυο που παρέχει στους κινητούς χρήστες τη δυνατότητα σύνδεσης στον σταθμό βάσης και κατ' επέκταση στο Διαδίκτυο. Το C-RAN (Cloud-RAN), το οποίο μελετήθηκε πρώτη φορά από την IBM [7] αποτελεί μια βελτιωμένη έκδοση αυτού του δικτύου εκμεταλλευόμενο τις τεχνολογίες της κεντροποίησης και της εικονικοποίησης. Με την αξιοποίηση του νέφους, καθίσταται δυνατός ο διαμοιρασμός διαφορετικών τεχνολογιών ράδιο-πρόσβασης στην ίδια φυσική υποδομή δικτύου. Στο C-RAN σχήμα, η εκτέλεση των περισσότερων διαδικασιών του σταθμού βάσης πραγματοποιούνται στο νέφος, διαχωρίζοντας τις διαδικασίες αυτές στο επίπεδο δεδομένων και στο επίπεδο ελέγχου (Data – Control Plane). Έτσι, οι Data Plane διαδικασίες εκτελούνται στους σταθμούς βάσης, ενώ οι Control Plane διαδικασίες στο Cloud.

Η αρχιτεκτονική της ράδιο-πρόσβασης νέας γενιάς (C-RAN) εκμεταλλεύεται την τεχνική NFV και τις επεξεργαστικές ικανότητες του κέντρου δεδομένων και έτσι ενεργοποιεί συντονισμό και κεντροποίηση στα δίκτυα [8], όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική Virtualized RAN.[8]

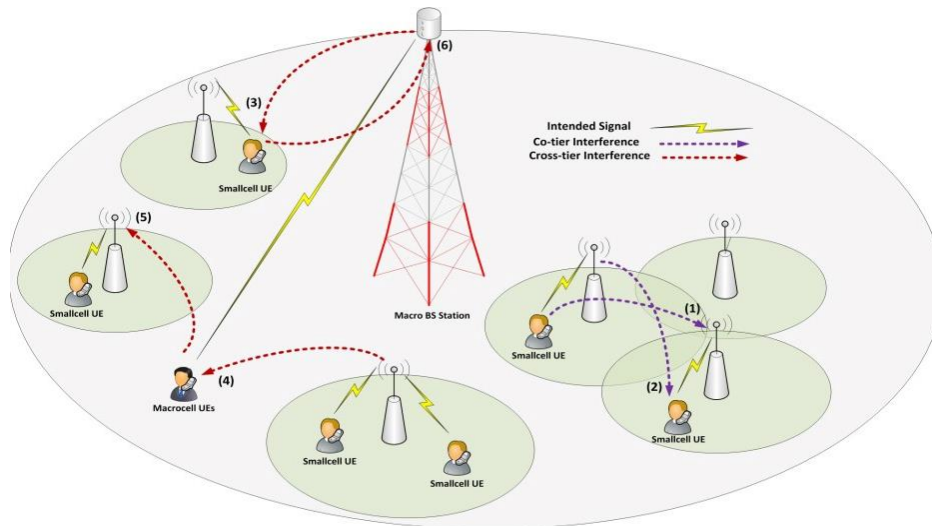
Το κύριο όφελος στο διαχωρισμό σε υψηλά και χαμηλά επίπεδα της αρχιτεκτονικής C-RAN σε ξεχωριστούς κόμβους σχετίζεται με την ανάγκη για στενή συνδεσιμότητα μεταξύ των διαφόρων μεγεθών κυψελών σε διαφορετικές συχνότητες. Ακόμη, η λειτουργικότητα που διαχωρίστηκε από τις μονάδες σημάτων (Base Band Unit - BBUs) έγινε εικονική, και εκτελείται πάνω σε πλατφόρμα γενικού σκοπού.

- **Αρχιτεκτονική SDN/NFV (Software Defined Radio / Network Function Virtualization).**

Μια άλλη όψη της αρχιτεκτονικής είναι αυτή που συνδυάζει τις τεχνολογίες SDN και NFV. Βασίζεται στο διαχωρισμό του επιπέδου των δεδομένων από το επίπεδο του ελέγχου έτσι ώστε ο δικτυακός εξοπλισμός να μπορεί να διαχειρισθεί εξωτερικά από λογισμικό διαχείρισης του παρόχου. Έτσι, το πραγματικό δίκτυο παραμένει στο επίπεδο της φυσικής υποδομής σύμφωνα με το Σχήμα 3, καθώς προωθεί την πραγματική κίνηση των δεδομένων. Η οντότητα που χρειάζεται να πάρει αποφάσεις για την κίνηση του δικτύου (SDN Controller), δέχεται αιτήματα από τις διάφορες εφαρμογές, και ανάλογα ελέγχει τα SDN μονοπάτια δεδομένων.

- **Αρχιτεκτονική Πυκνοποίησης Δικτύου (5G Network Densification).**

Η αρχιτεκτονική της πυκνοποίησης δικτύου, εισάγει πολλούς μικρούς σταθμούς βάσης, οι οποίοι εξυπηρετούν χρήστες, αλλά επάγονται σε ένα κεντρικό κελί και επικοινωνούν με έναν κεντρικό σταθμό βάσης. Οπότε, μια μεγάλη περιοχή (κελί), διαμερίζεται σε μικρότερες περιοχές, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί να επιτευχθεί ευρεία κάλυψη, καθώς οι χρήστες που βρίσκονται στην άκρη του δικτύου, μπορούν να συνδεθούν στους σταθμούς των κελιών που βρίσκονται κοντά τους.



Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική Network Densification.[9]

### 1.3 Περιπτώσεις Χρήσης και Υπηρεσίες Πέμπτης Γενιάς

Νέες υπηρεσίες και περιπτώσεις χρήσης προβλέπονται για το 5G, όπου θα παίξουν κυρίαρχο ρόλο στην τεχνολογία. Κάποιες περιπτώσεις χρήσης ίσως απαιτούν πολλαπλές διαστάσεις για βελτιστοποίηση ενώ άλλες εστιάζουν μόνο σε έναν δείκτη απόδοσης. Πάντως, μια από τις κύριες προκλήσεις για το 5G θα είναι να υποστηρίξει τέτοιες ποικίλες περιπτώσεις με έναν ευέλικτο και αξιόπιστο τρόπο.

Οι γενικές υπηρεσίες που αναμένεται να προσφερθούν κατηγοριοποιούνται ως αυξημένη κινητή ευρύ-ζωνικότητα (enhanced Mobility Broad Band - eMBB), μαζική επικοινωνία συσκευών (machine Massive Type Communication - mMTC) και αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (Ultra Reliable Low Latency Communication - URLLC) [10]. Ένας πιο αναλυτικός χαρακτηρισμός των υπηρεσιών αυτών μπορεί να επεξηγηθεί ως εξής:

- **eMBB.**

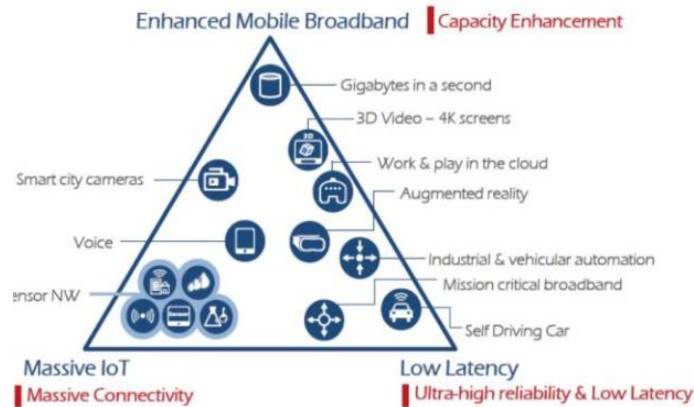
Η υπηρεσία κινητής ευρείας ζώνης μπορεί να υποστηρίξει σταθερές συνδέσεις με πολύ υψηλό ρυθμό δεδομένων, αλλά και αξιόλογους ρυθμούς για τους χρήστες σε οριακές συνθήκες κελιού.

- **mMTC.**

Η υπηρεσία μαζικής επικοινωνίας συσκευών τύπου μηχανής, είναι σε θέση να υποστηρίξει συσκευές του Internet of Things, που σποραδικά αναμεταδίδουν μόνο μικρά πακέτα πληροφορίας.

- **URLLC.**

Οι επικοινωνίες που απορρέουν από την παρούσα υπηρεσία υποστηρίζουν χαμηλές καθυστερήσεις για μεταδόσεις μικρών όγκων δεδομένων, με πολύ υψηλή αξιοπιστία.



Σχήμα 8: Περιπτώσεις Χρήσης στο 5G.[11]

Στα πλαίσια των παραπάνω υπηρεσιών, έχουν καθοριστεί ομάδες χρήσης [12], στις οποίες αναπτύσσονται οι κατηγορίες υπηρεσιών. Ομάδες χρήσης αποτελούν τα πυκνά περιβάλλοντα (Dense Urbans), τα διασυνδεδεμένα οχήματα (Connected Vehicles), τα μελλοντικά έξυπνα σπίτια (Smart Homes), δίκτυα IoT καθώς και το απτικό διαδίκτυο (Tactile Internet). Μια πιο τυπική κατάταξη των ομάδων χρήσης:

- Υπηρεσίες broadband
- Χαμηλό εύρος ζώνης για IoT
- Μελλοντικά έξυπνα γραφεία
- Διασυνδεδεμένα οχήματα
- Απτικό Διαδίκτυο

Η παραπάνω κατάταξη είναι βασισμένη σε μετρικές ανάλογα με την εμπειρία της υπηρεσίας για κάθε πελάτη [12], όπως:

- Πυκνότητα συσκευής (Device density)
- Κινητικότητα (Mobility)
- Αξιοπιστία (Reliability)
- Τύπος υπηρεσίας 5G (mMTC, URLLC, eMBB)
- Ρυθμός δεδομένων χρήστη (User data rate)

## 1.4 Τεχνολογίες 5G

Τα νέα δίκτυα πρόκειται να ενσωματώσουν ένα συνδυασμό από υπάρχοντες τεχνολογίες, αλλά και καινοτόμες τεχνολογίες προς επίτευξη των απαιτήσεων. Οι κύριες τεχνολογίες που πρόκειται να υιοθετηθούν είναι τα mmWave's, οι μικρό-κυψέλες (dense small cell), το Massive MIMO, και οι επικοινωνίες D2D, M2M. Ακόμη, σημαντική επίδραση στα δίκτυα θα έχουν νέες μορφές κυμάτων (waveforms), πολλαπλές τεχνολογίες ράδιο-πρόσβασης, και αποτελεσματικές τεχνικές κωδικοποίησης. Έτσι, ανάλογα με την απόδοση που έχουν οι τεχνολογίες στα 5G δίκτυα μπορούν

να κατηγοριοποιηθούν σε τεχνολογίες βελτίωσης της χωρητικότητας και ταχύτητας, μείωσης καθυστέρησης, αύξησης φασματικής απόδοσης [13].

#### **1.4.1 Αύξηση Χωρητικότητας Δικτύου και Ταχύτητας Δεδομένων.**

Προκειμένου να αυξηθούν οι ταχύτητες και η χωρητικότητα σε σχέση με τα 4G δίκτυα, αναμένονται τεχνολογίες όπως η ανάπτυξη dense small cells, Massive MIMO, beamforming αλλά και mmWave's.

- **Dense small cell**

Η τεχνολογία αυτή, εξυπηρετεί τα κελιά μεγαλύτερου μεγέθους όπως τα macrocells, μειώνοντας τον υπολογιστικό φόρτο και ενισχύοντας την ισχύ των σημάτων. Τοποθετούνται σε περιορισμένη απόσταση από τον σταθμό βάσης που συνδέονται είτε εξωτερικά, είτε εσωτερικά ώστε να επαναχρησιμοποιήσουν το διαθέσιμο φάσμα, και να αυξήσουν τη χωρητικότητα, παρά την αύξηση της κίνησης των κινητών. Έτσι, είναι δυνατή η μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης, αλλά και η μείωση των απωλειών μετάδοσης του χρήστη.

- **Χιλιοστό-μετρικά μήκη κύματος (mmWave's)**

Τα σημερινά συστήματα κινητών επικοινωνιών λειτουργούν στη μπάνα των μικρό-κυμάτων κάτω από τα 3GHz, λόγω των χαρακτηριστικών παρεμβολής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι συχνότητες σε αυτό το εύρος ζώνης να είναι ελάχιστες.

Όταν απαιτείται επιπλέον χωρητικότητα, και συνδεσιμότητα, αυτό σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερο φάσμα. Ακόμη, αυτό οδηγεί και σε βελτίωση της εμπειρίας των υπηρεσιών, διότι το φάσμα εμπεριέχει και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Έτσι, το 5G αναμένεται να χρησιμοποιήσει υψηλότερο φάσμα, ενσωματώνοντας τα milli-meter κύματα. Ήδη το φάσμα των 6 GHz έγινε διαθέσιμο το 2015 [13].

- **Massive MIMO – Τεχνική Μορφοποίησης Δέσμης (Beamforming Technique)**

Το massive MIMO εξοπλίζει τους σταθμούς βάσης με υψηλό αριθμό κεραιών, με σκοπό την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση των χρηστών βελτιώνοντας την φασματική απόδοση. Το beamforming αποτελεί τη συγκέντρωση της ισχύος σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση με περιορισμένη ακτίνα αλλά με μεγάλο κέρδος κατευθυντικότητας. Συνδυάζοντας τις δύο τεχνολογίες, μπορεί σημαντικά να βελτιωθεί η ισχύς του σήματος, με θετικές επιπτώσεις στην απόδοση σε περιπτώσεις cell-edge.

#### **1.4.2 Μείωση Καθυστέρησης.**

Ως καθυστέρηση ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για το σήμα να κάνει ένα πλήρη ταξίδι από άκρο-σε άκρο στο δίκτυο. Το παρόν 4G επιτρέπει καθυστερήσεις της τάξης των 15 ms, η οποία καλύπτει επαρκώς τις τρέχουσες εφαρμογές. Όμως οι εφαρμογές που θα αναπτυχθούν στα 5G, είναι φανερό ότι θα απαιτήσουν πιο αυστηρή καθυστέρηση, καθώς περιπτώσεις όπως το απτικό διαδίκτυο θα απαιτούν αξιοπιστία και ταχύτητα. Έτσι, το 5G θα είναι σε θέση να υποστηρίξει καθυστερήσεις μικρότερες του 1 ms. Οι τεχνολογίες που μπορούν να ικανοποιήσουν μια τέτοια απαίτηση είναι τα dense small cell's αλλά και οι επικοινωνίες D2D.

- **D2D**



Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών αναφέρεται σε μια ράδιο-τεχνολογία που επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνήσουν άμεσα, χωρίς να χρειάζεται η ενδιάμεση επικοινωνία με τον σταθμό βάσης ή το υπόλοιπο δίκτυο. Έτσι αν δύο συσκευές είναι σε κοντινή απόσταση, οι επικοινωνίες τους μπορούν να διαχειριστούν από την D2D τεχνική αποφεύγοντας την χρήση δικτυακών πόρων. Αυτό το γεγονός, δίνει τη δυνατότητα σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση να μπορούν να αναπτυχθούν.

### **1.4.3 Βελτίωση Φασματικής Απόδοσης.**

Η βελτίωση της φασματικής απόδοσης είναι ζωτικής σημασίας στο 5G, ώστε να μπορεί να παραδώσει γρήγορες ταχύτητες σε περισσότερα κινητά και συσκευές από ποτέ άλλοτε. Τεχνικές που οδηγούν στην αύξηση της φασματικής απόδοσης είναι η αύξηση του σχήματος διαμόρφωσης, οι D2D επικοινωνίες αλλά και η υιοθέτηση νέων μορφών κυμάτων μετάδοσης. Μια νέα τεχνολογία που αφορά την πολλαπλή πρόσβαση αναμένεται να ενσωματωθεί στο 5G, η μη-ορθογώνια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA).

- **Cognitive Radio Networks (CRN)**

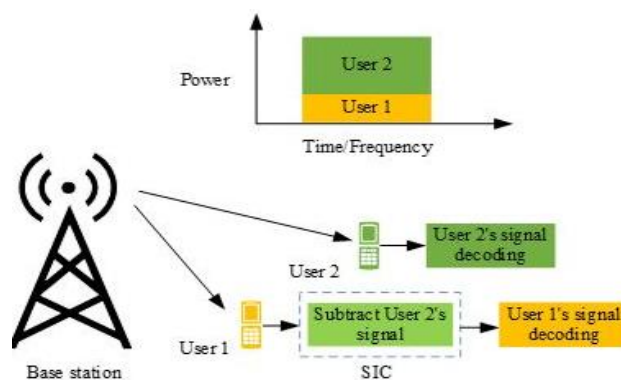
Τα γνωστικά ράδιο-δίκτυα, προσφέρουν μια πολύ καλή λύση στην αυξημένη φασματική χρήση. Η τεχνολογία αυτή, ενσωματώνεται με δυνατότητα νοημοσύνης, καθώς μπορεί να αισθανθεί, να μοιράσει και να χρησιμοποιήσει ευκαιρίες φάσματος των υπαρχόντων ασύρματων δικτύων, και τα κανάλια που δε χρησιμοποιούνται από τους αδειοδοτημένους χρήστες. Βασίζεται στο γεγονός, ότι οι αδειοδοτημένοι χρήστες δε χρησιμοποιούν πάντα τις μπάντες συχνοτήτων τους, οπότε το κενό αυτό, αξιοποιείται με έναν αποδοτικό τρόπο, σύμφωνα με ένα σχήμα πρόσβασης.

- **Full Duplex (FD)**

Οι πλήρης αμφίδρομες επικοινωνίες, αναμένεται να ενσωματωθούν στα δίκτυα πέμπτης γενιάς παρέχοντας τη τεχνολογία για αύξηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος, και της ρυθμαπόδοσης έως δύο φορές. Δηλαδή, επιτρέπει τη ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη δεδομένων σε ένα κανάλι πάνω από την ίδια μπάντα συχνοτήτων, αλλά και του χρόνου. Η τεχνολογία αυτή, αναμένεται να είναι εφικτή, αφού πλέον υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες ακύρωσης παρεμβολών.

- **NOMA**

Αρχικά η τεχνική NOMA είχε προταθεί από την εταιρία NTT DOCOMO ως ένας εμπλουτισμός στο πρότυπο LTE-advanced το 2013 [14], αλλά έχει αναγνωριστεί ως μια υποσχόμενη τεχνολογία στο 5G επειδή μπορεί να προσφέρει υψηλή φασματική απόδοση και μαζική συνδεσιμότητα. Η βασική αρχή του NOMA, είναι στην πλευρά του πομπού, δηλαδή πολλαπλά σήματα προστίθεται με διαφορετικές ισχύες (SC), σχηματίζοντας ένα σύνθετο σήμα. Από την πλευρά του δέκτη, για την εγγύηση της ποιότητας της υπηρεσίας ενός αδύναμου χρήστη, εφαρμόζεται μια τεχνική ακύρωσης παρεμβολής (SIC) ώστε να επανακτηθεί το σήμα κάθε χρήστη σειριακά από το σύνθετο σήμα.



Σχήμα 9: Ζεύξη καθόδου αποτελούμενη από δύο χρήστες σε NOMA δίκτυο.[15]

Η κύρια περιοχή που το NOMA υλοποιεί την πολύ-πλέξη είναι η περιοχή της ισχύος. Πρόκειται για ένα μη-ορθογώνιο πόρο, καθώς έτσι πραγματοποιείται μαζική σύνδεση κινητών ή και συσκευών, πάνω από τους ίδιους πόρους χρόνου/συχνότητας. Έτσι, η τεχνική NOMA δίνει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι της OFDMA η οποία λειτουργεί στα 4G δίκτυα [16]. Ακόμη η τεχνική NOMA έχει βελτιωμένη απόδοση σε μακρό-κυβέλες μέχρι και 30% έναντι σε ορθογώνιες τεχνικές [16].

Το 5G καλείται να αναπτύξει αυτές τις τεχνολογίες, καθώς οι απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες και χαμηλές καθυστερήσεις αυξάνουν δραματικά. Έτσι εκτός από την εξέλιξη ή την τροποποίηση του υπάρχοντος δικτύου 4G, θα πρέπει να εφαρμοσθούν οι παραπάνω τεχνολογίες.

### Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά 5G τεχνολογιών

Χαρακτηριστικά	Περιγραφές	Τεχνολογία
Ακραίοι ρυθμοί μετάδοσης (Gbps)	10-20 φορές μεγαλύτεροι ρυθμοί από το 4G	Millimeter-wave band Massive MIMO
Αριθμός συνδεδεμένων συσκευών (# device/m <sup>2</sup> )	Αισθητήρες, μηχανές, ιατρικοί αισθητήρες.	D2D Dense small cells IoT
Φασματική απόδοση (b/s/Hz)	Αυξημένη απόδοση φάσματος.	NOMA Massive MIMO CoMP
E2E καθυστέρηση (ms)	Το 5G θα υποστηρίξει χαμηλότερη καθυστέρηση από το 4G, της τάξεως του 1 ms.	D2D Dense small cells
Ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων	Το 5G θα μπορεί να διαχειρισθεί δεδομένα 100 φορές πιο γρήγορα από το 4G.	NFV Millimeter-wave band D2D Dense small cells

Ενέργεια (mJoule/bit)	Μεταφορά δεδομένων με σημαντικά λιγότερη ενέργεια.	Massive MIMO Millimeter-wave band
Κινητικότητα (m/s)	Γρηγορότερες ταχύτητες χρηστών θα υποστηρίζονται από το 5G.	Heterogeneous networks

## Κεφάλαιο 2 Διαδίκτυο των Αντικειμένων.

### 2.1 Εισαγωγή

Σήμερα το Internet έχει γίνει ευρέως διαδεδομένο, και έχει επηρεάσει τη ζωή των ανθρώπων σε όλες τις πτυχές τους. Η τεχνολογία όμως έχει εξελιχθεί καθώς υπάρχει μια διάχυτη συνδεσιμότητα όπου μια μεγάλη πληθώρα εφαρμογών θα συνδεθεί στον ιστό, οδηγώντας έτσι στην ανάπτυξη ενός Internet of Things. Το IoT μπορεί να ορισθεί ως ένα πρότυπο στο οποίο δυνατότητες δικτυακές και υπολογιστικές ενσωματώνονται σε οποιοδήποτε είδος αντικειμένου. Για αυτό το λόγο, οι IoT συσκευές εξοπλίζονται με αισθητήρες, επεξεργαστές και δέκτες. Η τεχνολογία IoT δεν αποτελεί μια ενιαία τεχνολογία αλλά αντιθέτως έναν συνδυασμό τεχνολογιών που πραγματοποιούνται μαζί.

Οι αισθητήρες αποτελούν συσκευές, που βοηθούν στην αλληλεπίδραση με το φυσικό περιβάλλον. Τα δεδομένα που συλλέγονται, αποθηκεύονται και επεξεργάζονται με ευφυή τρόπο από την συσκευή με σκοπό την παραγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων.

Η αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνει στην άκρη του δικτύου ή και σε ένα απομακρυσμένο εξυπηρετητή. Οι αποθηκευτικές και επεξεργαστικές ικανότητες ενός IoT αντικειμένου είναι συνήθως περιορισμένες από τους διαθέσιμους πόρους, οι οποίοι επηρεάζονται από τη μπαταρία και το μέγεθος του. Ακόμη, μια σημαντική παράμετρος αποτελεί η δυνατότητα δικτύωσης και επικοινωνίας των αντικειμένων, με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών. Η φύση της επικοινωνίας είναι ασύρματη λόγω των γεωγραφικά τοποθετημένων συσκευών, προσφέροντας ελευθερία στην μετάδοση δεδομένων.

Η διασύνδεση των ετερογενών αντικειμένων, στον παγκόσμιο ιστό, δημιουργεί ένα νέο σύνολο υπηρεσιών, βασιζομένων στο λεγόμενο Internet of Things.

### 2.2 Αρχιτεκτονική Internet of Things

Δεν υπάρχει μια καθολική και ενιαία αρχιτεκτονική για το IoT, αλλά έχουν προταθεί διάφορες μορφές αρχιτεκτονικών καλύπτοντας διαφορετικά επίπεδα [17].

#### 2.2.1 Αρχιτεκτονική Τριών και Πέντε Επιπέδων (Three & Five Layers).

Η βασικότερη αρχιτεκτονική είναι η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων. Αποτελείται από τα επίπεδα της αντίληψης, του δικτύου και της εφαρμογής.

- **Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer).**

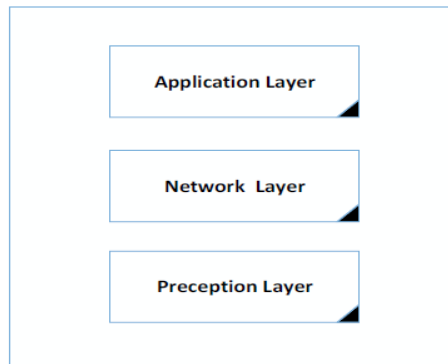
Ουσιαστικά πρόκειται για το φυσικό στρώμα, που περιέχει τους αισθητήρες που συγκεντρώνουν την απαραίτητη πληροφορία. Ανιχνεύουν φυσικές παραμέτρους ή αναγνωρίζουν αντικείμενα στο περιβάλλον.

- **Επίπεδο Δικτύου (Network Layer).**

Είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με άλλα αντικείμενα, δικτυακές συσκευές και εξυπηρετητές. Επίσης έχει τη δυνατότητα για μετάδοση και λήψη των δεδομένων αισθητήρα.

- **Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer).**

Αυτό το επίπεδο, είναι επιφορτισμένο με την παράδοση υπηρεσιών στον χρήστη. Μπορεί να καθορίσει αρκετές εφαρμογές στις οποίες μπορεί να τρέξει το IoT, όπως τα έξυπνα σπίτια.



Σχήμα 10: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων.[18]

Η παρούσα αρχιτεκτονική ορίζει την ιδέα ότι το IoT, αλλά αδυνατεί να εστιάσει σε πιο λεπτομερή επίπεδα. Για αυτό το λόγο έχει προταθεί επίσης [17] η αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων. Περιέχει πρόσθετα τα επίπεδα επεξεργασίας και επιχείρησης.

- **Επίπεδο Μεταφοράς (Transportation Layer).**

Μεταφέρει τα δεδομένα από τους αισθητήρες από το επίπεδο αντίληψης στο επίπεδο επεξεργασίας και αντίστροφα, μέσω προτύπων δικτύων.

- **Επίπεδο Επεξεργασίας (Processing Layer).**

Γνωστό και ως ενδιάμεσο λογισμικό (middleware), αποθηκεύει, αναλύει και επεξεργάζεται μεγάλες ποσότητες δεδομένων, που έρχονται από το επίπεδο μεταφοράς. Μπορεί να διαχειριστεί, ένα σύνολο διαφορετικών υπηρεσιών προς τα χαμηλότερα στρώματα.

- **Επίπεδο Επιχείρησης (Business Layer).**

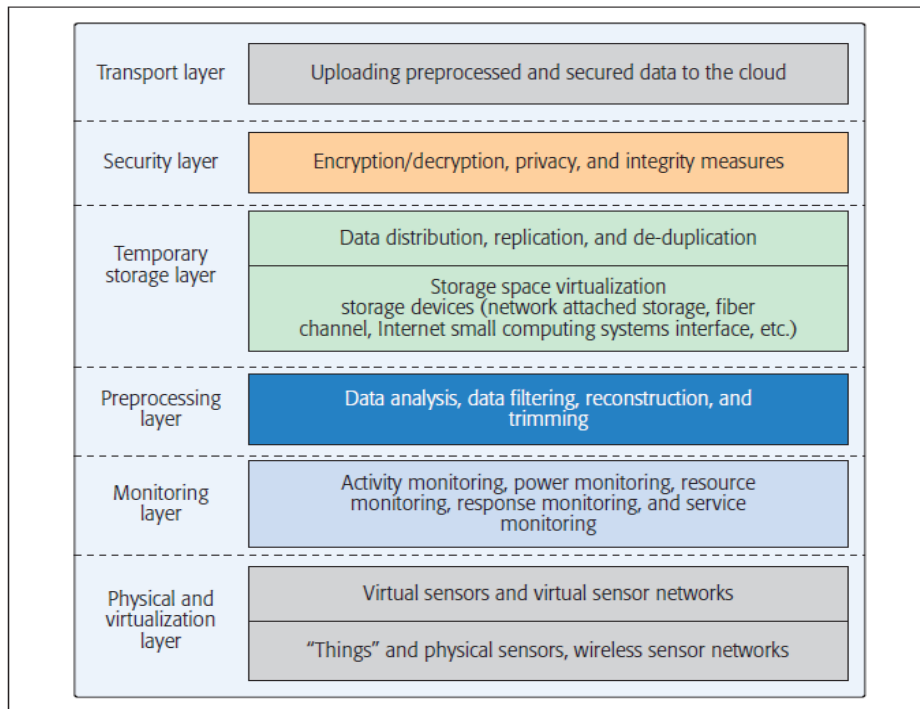
Διαχειρίζεται ολόκληρο το IoT σύστημα, συμπεριλαμβανομένου τις εφαρμογές και της ιδιωτικότητας του χρήστη.

## 2.2.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στα πρότυπα Cloud και Fog.

Η τεχνολογία υπολογιστική νέφους (Cloud computing), και το IoT αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα για τις υπηρεσίες και εφαρμογές επόμενης γενιάς. Ακόμη, η τεχνολογία υπολογιστική ομίχλης (Fog computing) έρχεται να επεκτείνει το Cloud, στην άκρη του δικτύου, δίνοντας ευελιξία τόσο στις συσκευές όσο και στο ίδιο το δίκτυο. Η βασική του ιδέα είναι να φέρει τους πόρους δικτύου, όπως η μνήμη και η επεξεργαστική ισχύς κοντά στις συσκευές που παράγουν τα δεδομένα [19]. Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζονται τα βασικά επίπεδα της αρχιτεκτονικής fog. Το φυσικό, και το επίπεδο εικονικοποίησης (Physical and virtualization layer) αποτελούν τα χαμηλότερα επίπεδα, τα οποία αλληλοεπιδρούν με οποιοδήποτε αντικείμενο που μπορεί να συνδεθεί στο διαδίκτυο και να παράξει δεδομένα. Στο επίπεδο παρακολούθησης (Monitoring layer), οι ενέργειες των συσκευών και των δικτύων καταγράφονται σύμφωνα με την ισχύ των συσκευών αλλά και των φόρτων που έχουν. Στο επίπεδο προ-επεξεργασίας (Preprocessing layer), πραγματοποιείται η διαχείριση των δεδομένων. Το επίπεδο αποθήκευσης (Storage layer) είναι υπεύθυνο για την διατήρηση των δεδομένων στο fog. Για δεδομένα που έχουν σκοπό να διατηρηθούν για μεγάλη χρονική διάρκεια, η τεχνολογία cloud είναι πιο κατάλληλη, παρέχοντας περισσότερους πόρους. Το επίπεδο ασφάλειας (Security layer) παρέχει

κατάλληλη ασφάλεια και λειτουργίες ιδιωτικότητας ώστε να μπορεί να προστατέψει τα δεδομένα πριν την αποστολή τους σε ευπαθή κανάλια επικοινωνίας.

Έτσι οι πόροι που ανήκουν στο σχήμα fog τοποθετούνται ανάμεσα στους κόμβους IoT και στο επίπεδο νέφους. Η αρχιτεκτονική αυτή, είναι ικανή να παρέχει χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλής ποιότητας επικοινωνίας.

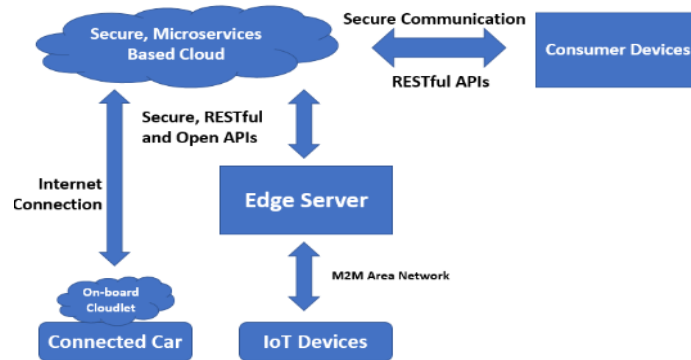


Σχήμα 11: Αρχιτεκτονική Fog.[19]

### 2.2.3 Αρχιτεκτονική IoT βασισμένη στις μικρό-υπηρεσίες (Micro-service's).

Τα συστήματα IoT επόμενης γενιάς απαιτούν επεκτασιμότητα, και ενοποίηση ετερογενών συσκευών και πρωτοκόλλων. Για να ικανοποιηθούν αυτές οι προκλήσεις, μια προχωρημένη αρχιτεκτονική προτάθηκε [20] βασισμένη στη τεχνολογία μικρό-υπηρεσιών (microservice's), αποτελούμενη από υπηρεσίες, δηλαδή ειδικές λειτουργίες που απορρέουν από το IoT επίπεδο, και δεδομένα.

Ο εξυπηρετητής Edge υποστηρίζει την επεξεργασία των δεδομένων των διαφόρων αισθητήρων. Αυτό το βήμα, εξοικονομεί εύρος ζώνης για την επικοινωνία με το νέφος, και συμβάλει στην αποσυμφόρηση του πυρήνα του δικτύου. Για αυτό το σκοπό, οι συσκευές IoT εικονοποιούνται ως μικρό-στοιχεία. Αυτά τα μικρό-στοιχεία (micro elements) περιέχουν έναν διαχειριστή για την επικοινωνία μεταξύ αυτών των στοιχείων και των μικρό-υπηρεσιών που βρίσκονται στο νέφος.



Σχήμα 12: Αρχιτεκτονική IoT βασισμένη σε Microservices.[20]

## 2.3 Χαρακτηριστικά και Απαιτήσεις

Τα κύρια χαρακτηριστικά του IoT, μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- **Διασύνδεση (Interconnectivity)**

Οποιοδήποτε αντικείμενο μπορεί να διασυνδεθεί στο Internet και στη παγκόσμια υποδομή επικοινωνιών.

- **Υπηρεσίες Things-related**

Το IoT, είναι ικανό να παρέχει things-related υπηρεσίες με τον περιορισμό των πραγμάτων, όπως προστασία της ιδιωτικότητας ανάμεσα στα φυσικά αντικείμενα και στα συσχετιζόμενα εικονικά αντικείμενα.

- **Ανομοιογένεια (Heterogeneity)**

Οι συσκευές στο IoT είναι ανομοιογενείς καθώς βασίζονται σε διαφορετικές πλατφόρμες υλικού, και δικτύου. Μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με άλλες συσκευές η υπηρεσίες μέσω διαφορετικών δικτύων.

- **Δυναμικές Αλλαγές**

Η κατάσταση των συσκευών αλλάζει δυναμικά, όπως με το sleeping, τη σύνδεση και την αποσύνδεση, καθώς και το περιεχόμενο των συσκευών που εμπεριέχει πληροφορίες θέσης και ταχύτητας. Επιπρόσθετα, μπορεί να αλλάζει δυναμικά και αριθμός των συσκευών.

- **Ασφάλεια**

Ένα ασφαλές IoT περιβάλλον, πρέπει να παρέχει ασφαλή επικοινωνία του αντικειμένου με τον έξω κόσμο, ταυτοποιώντας το αντικείμενο αλλά και τους χρήστες, για την εξασφάλιση της ιδιωτικότητας και της προστασίας των δεδομένων.

- **Ποιότητα της Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS)**

Η παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσίας σε περιπτώσεις εφαρμογών που πραγματεύονται real-time δεδομένα.

Το δίκτυο IoT, αλλά και τα ίδια τα αντικείμενα παρουσιάζουν κάποιες βασικές απαιτήσεις, προκειμένου να υπάρχει ένα γενικό πλαίσιο.

- **Διαλειτουργικότητα (Interoperability)**

Η διασύνδεση και επικοινωνία μεταξύ ετερογενών και κατανεμημένων συστημάτων για την αξιοποίηση υπηρεσιών.

- **Επεκτασιμότητα (Scalability)**

Το IoT πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει αρκετά απαιτητικά σενάρια τηλεπικοινωνιακής κίνησης, σε συνάρτηση με τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών.

- **Αυτόνομη Δικτύωση (Autonomous Networking)**

Κάποιες δυνατότητες που πρέπει να πληρούνται στην επικοινωνία, είναι η αυτονομία, η αυτό-προστασία και η αυτό-βελτίωση του δικτύου ώστε να γίνεται η προσαρμογή σε διαφορετικά συστήματα.

- **Αυτόνομη Παροχή Υπηρεσιών**

Οι υπηρεσίες που παρέχονται θα πρέπει να βασίζονται σε ορισμένους κανόνες από τους διαχειριστές του συστήματος.

- **Χαμηλό Κόστος Συσκευής (Low Device Cost)**

Η συνδεσιμότητα IoT αναμένεται να εξυπηρετήσει χαμηλά έσοδα ανά χρήστη, σε σύγκριση με την παραγωγή εσόδων με της κινητής τηλεφωνίας. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση στη πολυπλοκότητα της συσκευής θα οδηγήσει στην ανάπτυξη εφαρμογών μεγάλου όγκου.

- **Χαμηλό Κόστος Ανάπτυξης (Low Deployment Cost)**

Για την επίτευξη εφαρμογών massive IoT, το δίκτυο θα πρέπει να διατηρηθεί σε ένα ελάχιστο κόστος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αναβαθμίσεις λογισμικού στα υπάρχοντα δίκτυα.

- **Μεγάλη Διάρκεια Μπαταρίας (Long Battery Life)**

Η ενεργειακή απόδοση, ίσως είναι η πιο σημαντική πλευρά στο IoT, και αυτό επειδή οι περισσότερες συσκευές λειτουργούν με μπαταρίες. Συνήθως το περισσότερο μέρος της ενέργειας δαπανάται στην επικοινωνία της συσκευής, οπότε θα πρέπει η ενεργειακή απόδοση να σχεδιασθεί τόσο στο υλικό όσο και στο λογισμικό με σκοπό τη μέγιστη διάρκεια ζωής της συσκευής.

- **Κάλυψη (Extended Coverage)**

Η επαρκής κάλυψη είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις όπως οι έξυπνοι μετρητές στα υπόγεια με ανεπαρκή κάλυψη. Ένα επιθυμητό σενάριο είναι η αύξηση του υπάρχοντος προτύπου απώλειας ζεύγους (Maximum Coupling Loss) ανάμεσα στη συσκευή και τον σταθμό στο μέγιστο επίπεδο των 164 dB.

- **Υποστήριξη για Τεράστιο Αριθμό Συσκευών (Massive Number of Devices)**



Μέχρι το 2025, ο αριθμός των συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών θα φθάσει τα επτά δισεκατομμύρια. Έτσι, θα πρέπει να βελτιωθούν τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα δικτύων επικοινωνιών.

## 2.4 ΙοΤ Εφαρμογές

Με την ανάπτυξη διαφορετικών εφαρμογών ΙοΤ για ετερογενή περιβάλλοντα, η ποιότητα της καθημερινής ζωής των ανθρώπων έχει βελτιωθεί σημαντικά. Όμως δεν υπάρχει μια ειδική κατηγορία εφαρμογών που να λύνει όλα τα προβλήματα, αλλά κάθε εφαρμογή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και υπηρεσίες. Έτσι, οι διάφορες εφαρμογές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους.

- **Έξυπνο Σπίτι (Smart Home)**

Η ιδέα του έξυπνου σπιτιού είναι συσκευές με δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο όπου μπορούν αυτόνομα να σκεφθούν και να λάβουν αποφάσεις με βάση αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο σπίτι, γεγονός που οδηγεί στη βελτίωση της καθημερινότητας των χρηστών. Υπάρχει η δυνατότητα για παρακολούθηση από απόσταση, ο έλεγχος των οικιακών συσκευών, καθώς και η απομακρυσμένη επικοινωνία. Τα έξυπνα σπίτια αναμένεται να επικοινωνούν με το εσωτερικό τους αλλά και με το εξωτερικό περιβάλλον. Ως εσωτερικό περιβάλλον, θεωρείται το περιβάλλον που ενσωματώνει όλες τις συσκευές εντός οικίας που συνδέονται στο διαδίκτυο. Ενώ, το εξωτερικό περιβάλλον αναφέρεται σε οντότητες που δεν ελέγχονται από το έξυπνο σπίτι όπως το έξυπνο ενεργειακό πλέγμα.

- **Έξυπνη Πόλη (Smart City)**

Υπάρχει μεγάλος αριθμός συσκευών που σκοπεύει να βελτιώσει την ποιότητα και τον τρόπο ζωής για τους κατοίκους της πόλης συλλέγοντας πληροφορίες σχετικές με τις ανάγκες τους. Σαν τα έξυπνα σπίτια, οι συσκευές επικοινωνίας σε αυτές τις εφαρμογές απευθύνονται για λειτουργίες χαμηλής ισχύος, αλλά μπορούν επίσης να εξαπλωθούν σε πολύ μεγάλη περιοχή, απαιτώντας και μεγαλύτερα εύρη επικοινωνίας έναντι των συσκευών στο έξυπνο σπίτι.

- **Έξυπνο Σύστημα Μεταφοράς (Smart Transportation System)**

Το έξυπνο σύστημα μεταφοράς συνήθως διασφαλίζει ότι το δίκτυο μεταφοράς παρακολουθείται και ελέγχεται αποτελεσματικά. Αποτελείται από δικτυακό εξοπλισμό όπως το GPS, τον αναγνώστη RFID καθώς και πληθώρα υποσυστημάτων που ενισχύουν την ασφάλεια του.

- **Έξυπνη Υγεία (Smart Healthcare)**

Το ΙοΤ αναμένεται να επηρεάσει δυνατά τα συστήματα υγείας και τις υπηρεσίες που παρέχονται από αυτά. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει το δρόμο για νέες ευκαιρίες για τη συνδεδεμένη υγεία, όπου εξειδικευμένοι αισθητήρες ενσωματώνονται στους ασθενείς για να συλλέξουν ιατρικά δεδομένα όπως καρδιακοί ρυθμοί, θερμοκρασία σώματος και να εκτελέσουν έγκαιρη διάγνωση χωρίς καθυστερήσεις [21]. Αυτή η διαδικασία, απλοποιεί την συλλογή ιατρικών δεδομένων από τους ασθενείς, παρέχοντας ποσότητα δεδομένων για επιστημονικές μελέτες στη θεραπεία σπάνιων ασθενειών.

- **Έξυπνη Βιομηχανία (Smart Industrial)**

Σε αυτή τη περίπτωση, η αξιοπιστία των δεδομένων στο industrial IoT πρέπει να είναι υψηλή. Για τις ασύρματες επικοινωνίες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, τα δεδομένα είναι συνήθως ντετερμινιστικά καθώς περιέχουν αυστηρές προδιαγραφές στο χρόνο, και χαρακτηρίζονται από χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές όπως έλεγχος κίνησης. Όμως, σε αντίθεση με τις άλλες εφαρμογές, ο τομέας της βιομηχανίας είναι γνωστός για ιδιωτικές λύσεις όπου περιορίζουν τη διαλειτουργικότητα.

- **Έξυπνο Περιβάλλον (Smart Environment)**

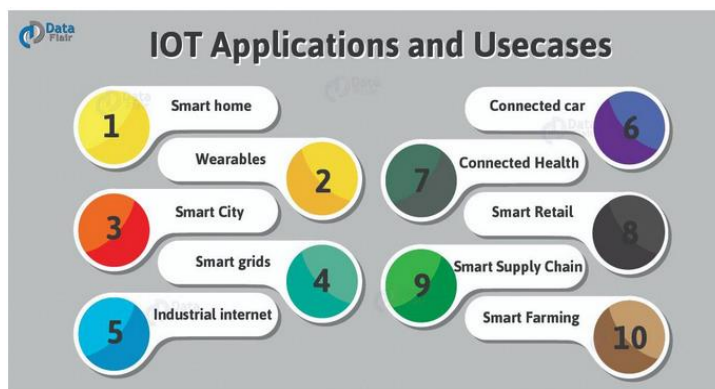
Το έξυπνο περιβάλλον αξιοποιεί τη τεχνολογία IoT, με στόχο την παρακολούθηση του χώρου, την ανίχνευση των αντικειμένων ή φυσικών μεγεθών που υπάρχουν στο χώρο αυτό, και με βάση αυτές τις πληροφορίες έγκαιρη διάγνωση της κατάστασης του περιβάλλοντος. Μια περιοχή εφαρμογής στο έξυπνο περιβάλλον είναι η πρόβλεψη πυρκαγιάς στο δάσος. Οι IoT αισθητήρες, θα ανιχνεύσουν τη φωτιά, με την ακριβή τοποθεσία, και θα στείλουν τα δεδομένα στο σταθμό πυροσβεστικής, ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες,

- **Έξυπνο Ενέργεια (Smart Energy)**

Η έξυπνη ενέργεια, αναφέρεται στη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε οικιακό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο περιβάλλοντος. Στο οικιακό επίπεδο, υποδομή IoT εγκαθίστανται στη πλευρά του σπιτιού, με κύρια λειτουργία τη μέτρηση, καταγραφή της ενέργειας και αποστολή της στο προμηθευτή ενέργειας.

- **Έξυπνη Γεωργία (Smart Agriculture)**

Η αυτοματοποίηση στο τομέα της γεωργίας, έχει μειώσει την ανθρώπινη παρέμβαση, αλλά και έχει αυξήσει την απόδοση. Είναι φανερό, ότι ένα μεγάλο μέρος ομάδων του πληθυσμού κάθε χώρας εξαρτάται από την γεωργία, και συνεπώς διαδικασίες που αυτοματοποιούν κρίσιμους παραμέτρους στο τομέα αυτό, μεγιστοποιούν το κέρδος [22]. Έτσι, αγροτικά συστήματα που βασίζονται στο IoT, αποτελούν βασικά συστήματα για κάθε χώρα που στηρίζεται στον αγροτικό τομέα. Στο γενικό πλαίσιο, η περίπτωση IoT agriculture χρησιμοποιεί αισθητήρες για να συλλέξει δεδομένα στο περιβάλλον.



Σχήμα 13: Εφαρμογές – Περιπτώσεις Χρήσης IoT.[23]

## 2.5 Μοντέλα Επικοινωνίας στο IoT

Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνιών οι οποίες έχουν προταθεί και που είναι σε λειτουργία αυτή τη στιγμή, υποστηρίζοντας έναν αριθμό από συσκευές IoT παγκοσμίως. Τόσο τα μη κυψελωτά όσο και τα κυψελωτά πρότυπα επικοινωνιών θα χρησιμοποιηθούν για τις περισσότερες συνδέσεις προς επίτευξη του mMIoT (Massive IoT), και του κρίσιμου IoT (Critical IoT). Αυτή τη στιγμή, οι μελλοντικές απαιτήσεις της συνδεσιμότητας στο Internet των συσκευών έχουν εγείρει τη κυψελωτή τεχνολογία για να εισάγει το δικό της πλαίσιο στις επικοινωνίες του IoT.

### 2.5.1 Μη Κυψελωτά Δίκτυα (Non Cellular IoT)

#### 2.5.1.1 Δίκτυο LoRa (Long Range)

Η τεχνολογία LoRa αποτελεί ένα πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου [24], που παρουσιάζεται ως μια υποσχόμενη τεχνολογία για χαμηλού κόστους, χαμηλής ισχύος και χαμηλού πεδίου επικοινωνία. Το δίκτυο αυτό είναι βασισμένο στη τοπολογία start-to-star όπου κάθε κόμβος έχει απευθείας σύνδεση σε μια πύλη δικτύου LoRa. Η αρχιτεκτονική LoRa αποτελείται από τερματικές συσκευές, εξυπηρετητές, πύλη δικτύου και ένα απομακρυσμένο τερματικό. Το σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιεί ένα απλωμένο φάσμα (Chirp Spread Spectrum), με διαφορετικά εύρη ζώνης όπως 7.8 kHz, 10.4 kHz, 500 kHz, και παρέχει αμφίδρομη επικοινωνία. Για τη μείωση της παρεμβολής, το LoRa χρησιμοποιεί τη τεχνική εναλλαγής συχνοτήτων (Frequency Hopping Spread Spectrum), όπου επιτρέπει τη πρόσβαση στα διαθέσιμα κανάλια. Επιπλέον, οι επικοινωνίες σε μεγάλη απόσταση, έως και 15 χιλιόμετρα, μπορούν να επιτευχθούν σε αστικά περιβάλλοντα.

#### 2.5.1.2 SigFox

Η τεχνολογία SigFox προσφέρει μια ολοκληρωμένη συνδεσιμότητα από άκρο σε άκρο που βασίζεται στη τεχνολογία υπερ στενής ζώνης (ultra-narrowband). Ικανοποιεί συνήθως τις απαιτήσεις των συσκευών M2M οι οποίες απαιτούν τη μεταφορά δεδομένων μικρού όγκου σε χαμηλό εύρος ζώνης. Στηρίζεται στην ανάπτυξη ιδιωτικών σταθμών βάσης που διαχειρίζονται με ειδικό λογισμικό συνδέοντας τους σε εξυπηρετητές με χρήση του δικτύου IP. Οι τερματικές συσκευές συνδέονται στους σταθμούς βάσης με χρήση του σχήματος διαμόρφωσης αλλαγής φάσης (Binary Phase Shift Keying) [25] σε υπερ στενή-ζώνη των 100Hz. Με αυτά τα χαρακτηριστικά, το SigFox μπορεί να παρέχει πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος, και επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας. Το δίκτυο SigFox χρησιμοποιεί το μη αδειοδοτημένο φάσμα ISM (Industrial Scientific and Medical band), με αποτέλεσμα οι συχνότητες λειτουργίας του να είναι ανάμεσα από τα 868 MHz και τα 915 MHz, επιτρέποντας ευρεία κάλυψη της επικοινωνίας. Ακόμη το δίκτυο αυτό υποστηρίζει μέχρι 12 bytes μέγεθος πακέτου στη ζεύξη καθόδου, ενώ στη ζεύξη ανόδου το πακέτο φθάνει μέχρι τα 140 μηνύματα από πακέτα μεγέθους 12 bytes.

#### 2.5.1.3 ZigBee

Το ZigBee είναι ένα από τα δημοφιλή βιομηχανικά πρότυπα δικτύωσης για τη διασύνδεση συσκευών IoT, στοχεύοντας σε ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλών ρυθμών. Μαζί με το πρότυπο IEEE 802.15.4 μπορεί να αξιοποιήσει τρεις μπάντες συχνοτήτων, 868 MHz, 914 MHz και 2.4 GHz, υποστηρίζοντας 1, 10 και 16 κανάλια, με εύρος 2 MHz το κάθε ένα. Ο μέγιστος

ρυθμός δεδομένων που υποστηρίζεται από το ZigBee είναι τα 250 kbps [26]. Ένα χαρακτηριστικό του είναι ότι πολλές εφαρμογές, δαπανούν το περισσότερο μέρος του χρόνου τους σε κατάσταση sleep. Ως αποτέλεσμα, οι ZigBee συσκευές είναι ικανές να τρέχουν για αρκετά χρόνια πριν οι μπαταρίες τους χρειασθεί να αντικατασταθούν. Το ZigBee χρησιμοποιεί το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο συνδέσμου δεδομένων όπως αυτά ορίζονται από το IEEE 802.15.4, και δημιουργεί πάνω σε αυτό ένα δικτυακό επίπεδο. Όμως ένα μειονέκτημα του προαναφερθέντος προτύπου IEEE είναι ότι η επικοινωνία γίνεται σε ένα στατικό κανάλι, οπότε και είναι ευαίσθητο σε παρεμβολές. Μειονέκτημα που σε περιπτώσεις επικοινωνιών IoT, είναι αρκετά σημαντικό μίας και ένας τεράστιος αριθμός συσκευών θα προσπαθήσουν να επικοινωνήσουν ταυτόχρονα.

#### **2.5.1.4 Wi-Fi**

Η πρώτη έκδοση του Wi-Fi προτάθηκε από την IEEE για επικοινωνία σε ασύρματο τοπικό δίκτυο χωρίς πολλές σκέψεις για τα σύγχρονα IoT δίκτυα. Οι προδιαγραφές ήταν το υψηλό εύρος ζώνης ανάμεσα σε συσκευές σε κοντινή απόσταση με υψηλό ρυθμό δεδομένων. Η τεχνολογία αυτή επίσης λέγεται ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network) και ανήκει στο πρότυπο IEEE 802.11. Με σκοπό την παροχή συνδεσιμότητας στο Internet μέσω σημείων πρόσβασης, το δίκτυο λειτουργεί μέσα σε μη αδειοδοτημένο φάσμα από 2.4 GHz έως και 5 GHz [27]. Τα σημεία πρόσβασης μπορούν να εξυπηρετήσουν μια περιοχή έκτασης έως και 1 Km, φθάνοντας ακόμη μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης με χρήση αναμεταδοτών. Προκειμένου να επεκταθούν οι εφαρμογές που βασίζονται στο Wi-Fi, σε δίκτυα IoT, προτάθηκε το Wi-Fi χαμηλής ισχύος, IEEE 802.11 ah [24], ως μια τροποποίηση στο στάνταρ πρότυπο. Έτσι, με αυτή τη τροποποίηση, το νέο πρότυπο στοχεύει σε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε εκατοντάδες milliwatts όπου απαιτείται για τις συσκευές IoT, σε μεγαλύτερες περιοχές κάλυψης, και σε ρυθμούς δεδομένων μέχρι και 347 Mbps.

#### **2.5.1.5 Bluetooth**

Το Bluetooth σχεδιάστηκε με βάση το ασύρματο προσωπικό δίκτυο IEEE 802.15.1 με στόχο να χρησιμοποιηθεί για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας ανάμεσα στις συσκευές, σε μόνιμες συχνότητες στα 2.4 GHz και με ρυθμούς δεδομένων σε χαμηλά bps. Το Bluetooth Low Energy (BLE), που επίσης αποκαλείται Bluetooth 4.0, παρουσιάστηκε με σκοπό τη βελτίωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Η πιο πρόσφατη τροποποίηση αυτής της τεχνολογίας αξιοποιεί 40 κανάλια με εύρος 2 MHz το κάθε ένα. Όμως για να μπορεί το Bluetooth να αντιμετωπίσει αποτελεσματικότερα τις παρεμβολές και τις πολύ-διαδρομικές διαλείψεις, χρησιμοποιεί το σχήμα μετατόπισης συχνότητας (Frequency Hopping Spread Spectrum), όπου το σήμα αλλάζει τους φορείς σε προκαθορισμένα κανάλια [24]. Αν και το Bluetooth αρχικά αναπτύχθηκε για να αντικαταστήσει τα καλώδια στα κινητά τηλέφωνα, εξελίχθηκε ώστε να χρησιμοποιηθεί από πολλές εφαρμογές. Ένα μειονέκτημα όμως, είναι ο περιορισμός της επικοινωνίας μόνο ανάμεσα σε δύο συσκευές κάθε φορά. Έτσι, προτάθηκε το Bluetooth Smart Mesh προτείνοντας μια νέα αρχιτεκτονική για το Bluetooth Low Energy όπου θα ενισχύσει την εμβέλεια επικοινωνίας και θα επιτρέψει την εφαρμογή του σε IoT περιβάλλοντα.

## 2.5.2 Κυψελωτά Δίκτυα (Cellular IoT)

### 2.5.2.1 EC-GSM-IoT

Το GSM είναι μία από τις πιο κυρίαρχες τεχνολογίες κυψελωτών δικτύων για την ανάπτυξη των εφαρμογών IoT, εξαιτίας του παγκόσμιου οικοσυστήματος του. Η 3GPP στην έκδοση 13 (Release 13) ανακοίνωσε το πρότυπο EC-GSM-IoT, ως μια τεχνολογία ασύρματου δικτύου χαμηλής ισχύος με στόχο την υψηλή χωρητικότητα, μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή ενέργεια και χαμηλή πολυπλοκότητα κυψελωτού συστήματος βασιζόμενη στο αναβαθμισμένο GPRS (enhanced General Packet Radio Service) [28].

Τα υπάρχοντα GSM δίκτυα μπορούν να αναβαθμισθούν με τη χρήση εφαρμογών λογισμικού προκειμένου να διασφαλίσουν ότι επαρκής κάλυψη και γρήγορος χρόνος ανάπτυξης αποφασίζονται με βέλτιστες τεχνικές. Για την ανάπτυξη massive IoT εφαρμογών, νέα λογικά κανάλια δημιουργήθηκαν ώστε να υποστηρίξουν την εκτεταμένη κάλυψη στη EC-GSM-IoT τεχνολογία, τα EC-Channels [24]. Αυτά τα κανάλια μπορούν να ενσωματωθούν στο φάσμα του υπάρχοντος συστήματος GPRS ώστε να εξυπηρετήσουν EC-GSM συσκευές για υπηρεσίες IoT. Τελικά, θεωρώντας το GSM ως ένα τα πιο ευρέως διαδομένα ασύρματα δίκτυα σε παγκόσμια κλίμακα, η τεχνολογία EC-GSM-IoT έχει αναβαθμίσει το υπάρχον GSM δίκτυο ώστε να διασφαλίσει ότι μπορεί να υποστηρίξει την μαζική ανάπτυξη IoT εφαρμογών στο μέλλον.

### 2.5.2.2 LTE Cat-M1

Το πρότυπο LTE Cat-M1 είναι μια υποσχόμενη κυψελωτή τεχνολογία η οποία ξεκίνησε από τη 3GPP Release 13 και ουσιαστικά αποτελεί ένα εμπλουτισμό για τα LTE δίκτυα με σκοπό την υποστήριξη MTC επικοινωνιών στο IoT.

Οι συσκευές που επικοινωνούν με το δίκτυο LTE Cat-M1 λειτουργούν με περιορισμένο εύρος των 1.08 MHz από το διαθέσιμο φάσμα του 1.4 MHz, χρησιμοποιώντας μόνο έξι φυσικά LTE resource blocks από τα οχτώ διαθέσιμα των 180 kHz. Έτσι, προκειμένου να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο της παρεμβολής, τα δύο εναπομείναντα φυσικά resource blocks αξιοποιούνται ως ζώνες προστασίας. Με την υποστήριξη των 1.08 MHz (κανάλι στενής-ζώνης) τόσο στις ραδιο-συχνότητες όσο και στη βασική ζώνη συχνοτήτων, οι Cat-M1 συσκευές έχουν μειώσει περεταίρω το επίπεδο πολυπλοκότητας τους, το κόστος και την ισχύ τους σε σχέση με τις Cat-0 συσκευές. Οι Cat-M1 συσκευές αναμένεται να πετύχουν μέγιστο ρυθμό απόδοσης μέχρι και 1 Mbps τόσο στη ζεύξη καθόδου, όσο στη ζεύξη ανόδου [24]. Για μηνύματα ελέγχου, το μέγιστο μέγεθος ενός block μεταφοράς (Transport Block Size - TBS), μειώνεται επιπλέον σε 1000 από 2216 bits, που ήταν στις Cat-0 συσκευές, επιτρέποντας επιπρόσθετη εξοικονόμηση στην επεξεργασία και στη μνήμη.

Σύμφωνα με την LTE, η τεχνολογία LTE Cat-M1 μπορεί να αναπτυχθεί στο υπάρχον δίκτυο LTE με εύρος ζώνης 20 MHz και επίσης να συν-υπάρξει με άλλες υπηρεσίες LTE. Έτσι, εξαιτίας του μειωμένου εύρους ζώνης για τις συσκευές, η τεχνολογία αυτή απαιτεί ότι ένα νέο σύνολο λογικών καναλιών ελέγχου, MTC Physical Downlink Control Channel (MPDCCH), που χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει τα υπάρχοντα λογικά κανάλια ελέγχου που δεν είναι πλέον κατάλληλα. Ακόμη, η τεχνολογία αυτή έχει σχεδιασθεί με αυξημένη ζεύξη προϋπολογισμού στα 15 dB με μέγιστη απώλεια ζεύγους (MCL) 155.7 dB που υπερβαίνει το όριο του LTE στα 140.7 dB, προκειμένου να διασφαλισθεί η επαρκής κάλυψη για τις IoT συσκευές που βρίσκονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες.

Το πρότυπο αυτό διασφαλίζει ότι για ανάπτυξη και κάλυψη του IoT δικτύου, μπορεί να υποστηρίξει μακρά διάρκεια ζωής της μπαταρίας περίπου 5 χρόνια με κατανάλωση μπαταρίας στα 5 Watt ανά ώρα.

### 2.5.2.3 NB-IoT

Το πρότυπο NB-IoT (NarrowBand-IoT), ξεκίνησε από τη 3GPP Release-13 ως μια εξέλιξη στο LTE Cat-M1 [24].

Η τεχνολογία NB-IoT αναμένεται να διευκολύνει την μαζική ανάπτυξη του IoT επιτρέποντας σε υπάρχοντες διαχειριστές να εισάγουν τη τεχνολογία αυτή στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα και στο διαθέσιμο φάσμα. Έχει σχεδιασθεί ώστε να διασφαλίσει ότι ευαίσθητες εφαρμογές όπως οι απομακρυσμένοι αισθητήρες, τα έξυπνα σπίτια και οι έξυπνοι μετρητές μπορούν να υποστηριχθούν. Ακόμη, μπορεί να συν-υπάρξει με τα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα GSM, GPRS και με τις LTE τεχνολογίες με αποδοτικό τρόπο. Έτσι, λειτουργεί με ελάχιστο εύρος ζώνης των 180 kHz τόσο στη ζεύξη καθόδου όσο και στη ζεύξη ανόδου.

Επιπλέον, το NB-IoT επιτρέπει ευέλικτη ανάπτυξη massive IoT στους παρόχους δικτύων ως:

- **In-band**

Τα δεδομένα ελέγχου μεταδίδονται στο κανάλι των δεδομένων σαν μέρος των πόρων που χρησιμοποιούνται συχνά για την επικοινωνία με το σταθμό βάσης.

- **Guard band**

Εδώ, γίνεται αξιοποίηση από μη χρησιμοποιημένες μπάντες συχνοτήτων των 180 kHz ανάμεσα από το τελευταίο φυσικό resource block που χρησιμοποιήθηκε και την άκρη του channelization.

- **Standalone system**

Είναι βασισμένο σε επαναχρησιμοποιημένες συχνότητες και κανάλια ενός υπάρχοντος δικτύου, όπως το GSM/GPRS.

Για να διασφαλισθεί ότι η πολυπλοκότητα των συσκευών και το κόστος της τεχνολογίας NB-IoT είναι σε χαμηλό επίπεδο, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων για τη ζεύξη καθόδου μειώθηκε επιπλέον, στα 32 kbps για το in-band σενάριο, και στα 34 kbps για το standalone, ενώ στη ζεύξη ανόδου, ο μέγιστος ρυθμός περιορίστηκε στα 66 kbps και στα 16.9 kbps για τις multi-tone και single-tone μεταδόσεις [29].

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά ES-GSM-IoT, LTE-Cat-M1, NB-IoT προτύπων.

	EC-GSM-IoT	eMTC(LTE Cat M1)	NB-IoT
Λειτουργία	In-band GSM	In-band LTE	In-band & Guard-band LTE
Κάλυψη	164 dB – 33 dBm power 154 dB – 23 dBm power	155.7 dB	164 dB

Ζεύξη καθόδου	TDMA/FDMA	OFDMA, 15 kHz spacing, 16 QAM, 1 Rx	OFDMA, 15 kHz spacing, 1 Rx
Ζεύξη ανόδου	TDMA/FDMA	SC-FDMA, 16 QAM, 15 kHz	SC-FDMA, 15 & 3.75 kHz spacing
Εύρος ζώνης	200 kHz / channel. BW of 2.4 MHz	1.08 MHz	180 kHz
Ρυθμός δεδομένων	70 kbps (GMSK), 240 kbps (8PSK)	1 Mbps	Downlink: 50 kbps Uplink: 50 kbps
Πολύπλεξη	HD, FDD	FDD & TDD	FDD
Κατηγορία ισχύος	23, 33 dBm	20, 23 dBm	23 dBm

## **Κεφάλαιο 3 5G Κυψελωτό Διαδίκτυο των Αντικειμένων.**

Οι κυψελωτές τεχνολογίες για το IoT έχουν ως στόχο, την υποστήριξη των αντικειμένων στις απαιτήσεις ενός περιβάλλοντος επικοινωνίας παρέχοντας όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας, με τη μέγιστη δυνατή κάλυψη. Όμως, οι απαιτήσεις ενός περιβάλλοντος επικοινωνίας δεν μπορούν να καλυφθούν από όλες τις τεχνολογίες επικοινωνίας. Τα μη - κυψελωτά πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία στο IoT, αδυνατούν να υποστηρίξουν πλήρως ένα δίκτυο αντικειμένων, δημιουργώντας κενά στη παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας. Μια κύρια διαφορά είναι ότι τα κυψελωτά συστήματα έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν μέσα σε αδειοδοτημένο εύρος συχνοτήτων, εμπεριέχοντας τις ήδη υπάρχουσες μπάντες GSM και LTE, οι οποίες προσφέρουν υψηλή ασφάλεια, αποφυγή παρεμβολών αλλά και εγγύηση παροχής υπηρεσιών [24].

Ακόμη, τα κυψελωτά πρότυπα είναι ικανά να υποστηρίξουν ανταλλαγή της χωρητικότητας δικτύου και της κάλυψης δικτύου, ως χαμηλότερο κόστος σε υποδομή, αφού αποτελούν ένα ολοκληρωμένο και παγκόσμιο δίκτυο που υποστηρίζει χιλιάδες συσκευές [24].

Πολλές από τις επικοινωνίες του έξυπνου αλλά και του κρίσιμου IoT, πρέπει συχνά να ικανοποιούν αυστηρές απαιτήσεις στο χρόνο και στην αξιοπιστία. Τυπικά, η πληροφορία που ανταλλάσσεται είναι κρίσιμη προκειμένου να διασφαλισθεί μια σωστή και ασφαλή συμπεριφορά των λειτουργιών. Για αυτό το λόγο, το δίκτυο επικοινωνίας πρέπει να είναι σε θέση να, ικανοποιεί αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, να είναι ανθεκτικό σε απώλειες πακέτων και να είναι ασφαλή σε καταστροφές. Τα κυψελωτά συστήματα 3G και 4G αποτελούν ένα ελκυστικό πλαίσιο για τη συνδεσιμότητα του IoT. Μπορούν να προσφέρουν ευρεία κάλυψη, σχετικά χαμηλό κόστος ανάπτυξης, και ένα πλάνο διαχείρισης. Όμως, σχεδιασμένα πάνω στον άξονα των ευρύ-ζωνικών επικοινωνιών, δε μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τις MTC επικοινωνίες.

Η έλευση του 5G μπορεί να δημιουργήσει ένα πλαίσιο για τα IoT's, φέρνοντας δραματικές αλλαγές στις τεχνολογίες του δικτύου. Ο αυξημένος ρυθμός δεδομένων, η μειωμένη καθυστέρηση, και η βελτίωση κάλυψης αναμένεται να καλύψουν τις πιο απαιτητικές εφαρμογές του IoT σε επικοινωνιακές ανάγκες.

### **3.1 Μετάβαση του Διαδικτύου των Αντικειμένων.**

Η έρευνα έχει δείξει ότι το μελλοντικό δίκτυο κινητών επικοινωνιών 5G θα πρέπει να υποστηρίξει τη ανάπτυξη του μαζικού IoT με δισεκατομμύρια συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών και αισθητήρων που θα αποτελούν μια παγκόσμια αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου. Το δίκτυο 5G NR που βρίσκεται υπό ανάπτυξη αναμένεται να υποστηρίξει τόσο τη περίπτωση του μαζικού όσο και του κρίσιμου IoT καθώς οι απαιτήσεις για επικοινωνίες MTC συνεχίζουν να μεγαλώνουν ραγδαία.

Το διαδίκτυο των αντικειμένων στο δίκτυο LTE (LTE IoT) αρχικά μελετήθηκε από τον οργανισμό 3GPP, στην έκδοση 13 (Rel. 13). Σε αυτό το πρότυπο, οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για επικοινωνία στο IoT, είναι τα πρότυπα LTE-Cat M1, και NB-IoT. Τα πρότυπα αυτά εντάσσονται στο LTE και αποτελούν κυψελωτές τεχνολογίες, οι οποίες παρέχουν μια ενιαία πλατφόρμα συνδεσιμότητας στο IoT, εξασφαλίζοντας επικοινωνία σε πληθώρα περιπτώσεων όπως οι έξυπνες πόλεις και τα διασυνδεδεμένα κτήρια με υψηλό εύρος κάλυψης, μεγάλο πλήθος συνδέσεων και αποτελεσματική απόδοση ισχύος των συσκευών.



Οι τεχνολογίες αυτές εξελίσσονται και συνεχώς βελτιώνονται οι αποδόσεις τους, ώστε σίγουρα να γίνουν το 5G μαζικό διαδίκτυο των Πραγμάτων (5G massive IoT). Το 5G-NR, η νέα ραδιο-διεπαφή για τα δίκτυα 5G θα έχει υποστήριξη μέσα στις μπάντες συχνοτήτων του για το δίκτυο LTE. Αυτό σημαίνει ότι το σημερινό LTE IoT θα δουλέψει απρόσκοπτα όταν τα δίκτυα αναβαθμισθούν στα 5G-NR.

Από την πλευρά των standards, τα περισσότερα δίκτυα είναι βασισμένα στα χαρακτηριστικά της έκδοσης 13, του 3GPP. Οι εκδόσεις 14, 15 περιέχουν βελτιώσεις στο LTE IoT, και η έκδοση 16 θα καθορίσει το 5G IoT, τόσο το μαζικό όσο και το κρίσιμο διαδίκτυο των πραγμάτων (massive – critical IoT). Η έκδοση 17 αναμένεται να επιφέρει περαιτέρω βελτίωση στην απόδοση.

### 3.1.1 Εξέλιξη του LTE-M (eMTC)

Το πρότυπο LTE-M ή eMTC αρχικά μελετήθηκε από τον οργανισμό 3GPP στην έκδοση 13, για επικοινωνία ευρείας περιοχής κυβελωτής τεχνολογίας, που εκμεταλλεύεται το πρότυπο LTE.

Στην έκδοση 14, οι κύριες βελτιώσεις που εισήχθησαν:

- **Βελτιώσεις της υπηρεσίας VoLTE (Voice over LTE) και άλλων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.**

Οι συσκευές χρήστη Cat-M1 υποστηρίζουν VoLTE ήδη στην έκδοση 13, αλλά στην 14 έχουν αρκετές βελτιώσεις.

- Νέοι παράγοντες επανάληψης του καναλιού ανόδου PUSCH (Physical Uplink Shared Channel): Δύο νέοι παράγοντες επανάληψης υπό πλαισίων (subframes) 12 και 24 εισήχθησαν ώστε να επιτραπεί αποτελεσματικότερη χρήση των διαθέσιμων υπό-πλαισίων [30].
- Περιορισμός της τάξης διαμόρφωσης: Εισάχθηκε η δυνατότητα στον σταθμό (eNB) να περιορίσει τη τάξη διαμόρφωσης για δεδομένα καναλιού ανόδου και καθόδου [30]. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την απόδοση της ζεύξης επικοινωνίας όταν η επανάληψη (repetition) χρησιμοποιείται.

- **Μη αυστηρός έλεγχος για επανεπιλογή κελιού.**

Όταν αυτό το χαρακτηριστικό ενεργοποιείται, το κινητό μπορεί να μειώσει τις μετρήσεις των γειτονικών του κελιών κάθε 24 ώρες [30]. Αυτό μπορεί να μειώσει τη κατανάλωση ισχύος στα κινητά, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η κάλυψη είναι πρόκληση.

- **Βελτιώσεις κάλυψης.**

- Νέοι παράγοντες επανάληψης του καναλιού PUCCH: Νέοι παράγοντες επανάληψης 64 και 128 για μετάδοση της ανατροφοδότησης HARQ-ACK (Hybrid Automatic Repeat Request – Acknowledgment) ενσωματώθηκε για να βελτιώσει τη κάλυψη.
- Επιλογή κεραίας μετάδοσης κινητού: Δυνατότητα του σταθμού eNB να ελέγχει την επιλογή κεραίας μετάδοσης του κινητού για κινητά που υποστηρίζουν δύο κεραίες μετάδοσης.
- Βελτίωση κάλυψης μέσω σημάτων αναφοράς ήχου (SRS- Sounding Reference Signal): Υποστήριξη για επανάληψη σημάτων αναφοράς ήχου στο ειδικό υπό-πλαίσιο, προκειμένου να βελτιώσει τη λειτουργία link adaption [30].

Στην έκδοση 15, οι κύριες βελτιώσεις που εισήχθησαν:

- **Κατηγορία ισχύος 6 (14 dBm).**

Για τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος για τις κατηγορίες χρηστών, μια νέα κατηγορία ισχύος με μέγιστη ισχύς μετάδοσης στα 14 dBm εισάχθηκε μαζί με υποστήριξη σηματοδότησης.

- **Βελτίωση φασματικής απόδοσης.**

Αυξημένη φασματική απόδοση επιτυγχάνεται μέσω υψηλότερων τάξεων διαμόρφωσης, πιο αποτελεσματικής διαχείρισης πόρων και μειωμένης παρεμβολής εντός κελιού.

- Υποστήριξη διαμόρφωσης 64QAM: Η συγκεκριμένη διαμόρφωση ενσωματώθηκε για μετάδοση καναλιού καθόδου χωρίς επαναλήψεις ώστε να αυξηθεί η φασματική απόδοση στη ζεύξη καθόδου. Ο ρυθμός δεδομένων του κινητού δεν αυξάνεται.
- Πίνακας CQI (Channel Quality Indicator) με μεγάλο εύρος: Ο νέος πίνακας CQI χρησιμοποιείται από τα κινητά με ή χωρίς τάξη διαμόρφωσης 64QAM [30].
- Δέσμευση στη ζεύξη ανόδου υπό φυσικών ράδιο-πόρων: Η φασματική απόδοση στην άνοδο αυξάνεται, με την εισαγωγή της δέσμευσης πόρων σε λειτουργία σύνδεσης.

### 3.1.2 Εξέλιξη του NB-IoT

Το πρότυπο NB-IoT αρχικά μελετήθηκε από τον οργανισμό 3GPP στην έκδοση 13, για επικοινωνία ευρείας περιοχής κυψελωτής τεχνολογίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά του και οι λειτουργίες του ολοκληρώθηκαν τον Ιούνιο του 2016 (3GPP Release 13). Επιπλέον βελτιώσεις εισήχθησαν στην έκδοση 14, όπου ολοκληρώθηκαν τον Ιούνιο του 2017, ενώ βελτιώσεις που εισήχθησαν στην έκδοση 15 ολοκληρώθηκαν τον Ιούνιο του 2018.

Στην έκδοση 14, οι κύριες βελτιώσεις που εισήχθησαν:

- **Υπηρεσίες τοποθεσίας βασισμένες στις τεχνολογίες Enhanced Cell-ID (E-CID) και διαφοράς χρόνου άφιξης (Observed Time Difference of Arrival - OTDOA).**

Με βάση τη τεχνολογία Cell-ID, εκτιμάται η τοποθεσία της συσκευής βασισμένη σε γεωγραφικές συντεταγμένες του κελιού που εξυπηρετεί τη συσκευή. Ενώ η τεχνολογία E-CID χρησιμοποιεί πρόσθετη πληροφορία όπως το σήμα αναφοράς λαμβανόμενης ισχύος (Narrowband Reference Signal Received Power - NRSRP), και σήμα αναφοράς λαμβανόμενης ποιότητας (Narrowband Reference Signal Received Quality - NRSRQ) [31] [32].

- **Πολύ-εκπομπή (Multicast) στη ζεύξη καθόδου βασισμένη σε σημείο προς πολλά σημεία (point-to-multipoint).**

Η υποστήριξη multicast για τις IoT συσκευές είναι ωφέλιμη για περιπτώσεις χρήσης όπως αναβαθμίσεις στο firmware ή στο λογισμικό και στη παράδοση μηνυμάτων μιας ομάδας. Η χρήση όμως του point-to-multipoint μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει τα κανάλια δεδομένων και ελέγχου του NB-IoT [32].

- **Υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων για τις συσκευές NB-IoT.**

Μια νέα κατηγορία κινητού εξοπλισμού (Category NB2) δημιουργήθηκε με υποστήριξη για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Αυτή η νέα κατηγορία μπορεί να υποστηρίξει μέγιστο μέγεθος μεταφοράς ενός block (transport block size - TBS) έως 2536 bits για τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου [31].

Στην έκδοση 15, οι κύριες βελτιώσεις που εισήχθησαν:

- **Πρόωρη μετάδοση δεδομένων (Early Data Transmission - EDT).**

Σε λειτουργία αδράνειας (idle mode) ένα κινητό μπορεί να μεταδώσει δεδομένα στη μορφή Msg3 της διαδικασίας τυχαίας πρόσβασης (random access procedure - RAP). Μετά την παραλαβή του μηνύματος από τον σταθμό, η διαδικασία τυχαίας πρόσβασης τερματίζεται και το κινητό δεν μεταβαίνει σε λειτουργία σύνδεσης εκτός αν ο σταθμός αποφασίσει να αλλάξει το κινητό σε λειτουργία σύνδεσης. Τότε το κινητό αιτείται για πρόωρη μετάδοση δεδομένων αν έχει δεδομένα προς μετάδοση με μέγεθος μικρότερο από ένα προκαθορισμένο από τον σταθμό. Ο σταθμός μπορεί να επιτρέψει στο κινητό να μεταδώσει μικρότερη ποσότητα δεδομένων από ότι το μέγιστο που έχει ορίσει, έτσι ώστε να μειωθεί η ισχύς που δαπανάται στη μετάδοση επιπλέον bits.

- **Υποστήριξη μικρό-κελιών.**

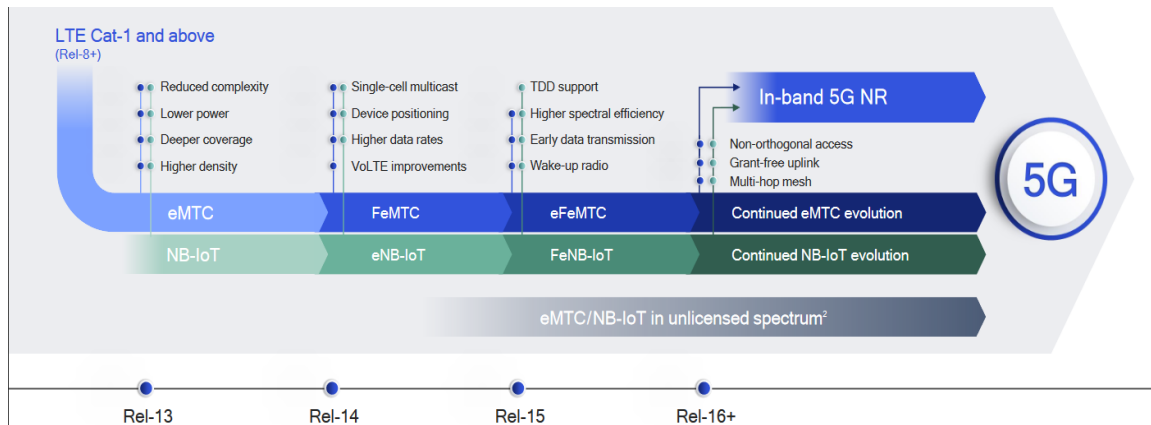
Οι τάξεις ισχύος του σταθμού βάσης έχουν ορισθεί στο NB-IoT ώστε να επιτρέπουν την ανάπτυξη των σταθμών βάσης ως μικρό-κελιά, πίκo-κελιά, που χρησιμοποιούν χαμηλότερη μέγιστη ισχύ μετάδοσης από τους σταθμούς ως μακρό-κελιά [32].

- **Υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων για τις συσκευές NB-IoT.**

Μια νέα κατηγορία κινητού εξοπλισμού (Category NB2) δημιουργήθηκε με υποστήριξη για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Αυτή η νέα κατηγορία μπορεί να υποστηρίξει μέγιστο μέγεθος μεταφοράς ενός block (transport block size - TBS) έως 2536 bits για τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου.

### 3.1.3 Εξέλιξη προς το 5G IoT

Η εξέλιξη του LTE IoT, συνεχίζεται με τις εκδόσεις 14, 15 και 16, όπου νέες τεχνολογίες και βελτιώσεις ενσωματώνονται, όπως υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων, χρονική πολυπλεξία, και υψηλή φασματική απόδοση. Επίσης, σύμφωνα με τις εξελίξεις στις εκδόσεις, η τεχνολογία eMTC (LTE-Cat M1) αποκαλείται επιπλέον εμπλουτισμένη επικοινωνία μεταξύ μηχανών (FeMTC – Further eMTC) στην έκδοση 14, και eFeMTC (even Further enhanced MTC) στην έκδοση 15. Παρόμοια, η τεχνολογία NB-IoT αποκαλείται eNB-IoT και FeNB-IoT, στις εκδόσεις 14 και 15 αντίστοιχα.



Σχήμα 14: LTE-Cat-1, NB-IoT εξέλιξη στο 5G IoT.[33]

Ο στόχος των βελτιώσεων αυτών των τεχνολογιών στοχεύει σε:

- Μειωμένο κόστος
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας
- Μεγαλύτερη κάλυψη
- Υψηλότερη χωρητικότητα

Οι βελτιώσεις στην έκδοση 16 για το LTE IoT, σκοπεύουν να ικανοποιήσουν τις κρίσιμες απαιτήσεις του 5G IoT που είναι να υποστηρίξει επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης, και γρήγορων ρυθμών δεδομένων.

Έτσι, οι τεχνολογίες LTE-Cat M1, και NB-IoT θα συνυπάρξουν με το 5G NR IoT δίκτυο για τα αντικείμενα, δημιουργώντας ένα περιβάλλον επικοινωνίας, που θα εκμεταλλεύεται πλήρως το ήδη υπάρχον δίκτυο LTE IoT [34].

### 3.2 5G Μη-Ορθογώνια Ασύρματη Διεπαφή.

Η επόμενη γενιά των κυβελωτών δικτύων πέμπτης γενιάς, θα χαρακτηριστεί από υπερ-υψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση και υποστήριξη τεράστιου αριθμού συνδέσεων. Ο οργανισμός 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) πρόσφατα έχει προτυποποιήσει τα χαρακτηριστικά για το πρότυπο New Radio (NR) ράδιο-πρόσβασης για τα δίκτυα πέμπτης γενιάς [35]. Ουσιαστικά, τα δίκτυα 5G θα αποτελέσουν έναν συνδυασμό από ήδη υπάρχοντες τεχνολογίες ραδιο-πρόσβασης, τόσο σε αδειοδοτημένο όσο και σε μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων, για διαφορετικά σενάρια. Η τεχνολογία που ενσωματώνει το New Radio, είναι η τεχνολογία OFDMA που είναι ήδη σε χρήση από τα δίκτυα 4G, αλλά με επιπρόσθετες βελτιώσεις [36] για μεταβλητό εύρος ζώνης προς παροχή νέων υπηρεσιών.

Λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές τεχνολογίες ράδιο-πρόσβασης στο 2020 και έπειτα, η περαιτέρω βελτίωση για την επίτευξη σημαντικού κέρδους στη χωρητικότητα και στην απόδοση συστήματος αποτελεί μια υψηλής προτεραιότητας απαίτηση. Έτσι, νέες τεχνολογίες πρέπει να αναγνωρισθούν και να εφαρμοσθούν στις μελλοντικές προκλήσεις. Στη τεχνική OFDMA το φάσμα δεσμεύεται στους χρήστες με ορθογώνιο τρόπο. Παρόλα αυτά, μοιράζοντας το φάσμα στους χρήστες, με κατάλληλες τεχνικές, η φασματική απόδοση μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Σε αυτή τη κατεύθυνση, η μη-ορθογώνια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης προτείνεται όπου

επιτρέπει στους χρήστες ή και στις συσκευές να στείλουν τη πληροφορία στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων με χαμηλή παρεμβολή. Η τεχνική μη-ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης έχει μελετηθεί και προταθεί στα 5G NR δίκτυα στην έκδοση 16 (Rel. 16) [37].

Οι επικοινωνίες M2M αναμένεται να αποτελέσουν την κύρια υπηρεσία στο περιβάλλον 5G IoT. Σε αυτό το περιβάλλον, οι προκλήσεις που εμφανίζονται για την ανάπτυξη του mIoT περιλαμβάνουν το κόστος συσκευής, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τη κάλυψη του δικτύου καθώς και την επεκτασιμότητα του δικτύου. Σε αυτή τη κατεύθυνση κινούνται πλέον, τα πρότυπα LTE-Cat-M1 και το NB-IoT τα οποία βρίσκονται στην μετάβαση από το LTE στο 5G NR IoT. Για την εκπλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων η αναμενόμενη τεχνική μη-ορθογώνιας πρόσβασης (NOMA) αποτελεί καινοτομία που θα αξιοποιηθεί στο 5G IoT, δίνοντας τη δυνατότητα της επικοινωνίας μερικών εκατομμυρίων συσκευών σε περιπτώσεις IoT. Ακόμη, θα επιτρέψει στις συσκευές, την μετάδοση των δεδομένων σε ασύγχρονο τρόπο, καθώς θα εξαλείψει το κόστος σηματοδότησης για την απόδοση πόρων. Στο πλαίσιο αυτό, το 5G IoT θα ενσωματώσει την τεχνική μη-ορθογώνιας πρόσβασης, ως μια προοπτική ανάδυσης νέων υπηρεσιών mIoT [37].

## Κεφάλαιο 4 Μη-Ορθογώνια Τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης.

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών έχουν ενσωματώσει επαναστατικές τεχνικές στη τεχνολογία της πολλαπλής πρόσβασης. Συγκεκριμένα, για τα 1G, 2G, 3G και 4G ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA), διαίρεσης χρόνου (TDMA), διαίρεσης κώδικα (CDMA) και ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) χρησιμοποιήθηκε. Από τη πλευρά των σχεδιαστικών αρχών, αυτές οι τεχνικές ανήκουν στη κατηγορία της ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Orthogonal Multiple Access - OMA), όπου οι ασύρματοι πόροι δεσμεύονται σε πολλούς χρήστες στο χρόνο, συχνότητα, κώδικα ή και σε συνδυασμό αυτών. Με αυτό το τρόπο τα σήματα πληροφορίας των χρηστών μπορούν εύκολα να διαχωρισθούν με χαμηλή πολυπλοκότητα, εφαρμόζοντας αποδοτικούς μηχανισμούς στο δέκτη. Όμως, ο αριθμός των υποστηριζόμενων χρηστών είναι περιορισμένος από τον αριθμό των διαθέσιμων ορθογώνιων πόρων. Παραμένει πρόκληση έτσι για τα ορθογώνια συστήματα να υποστηρίξουν φασματική απόδοση και μαζική συνδεσιμότητα για το 5G-IoT.

### 4.1 Βασικές Αρχές.

Η καινοτόμα ιδέα της μη-ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA), έχει προταθεί προκειμένου να υποστηρίξει περισσότερους χρήστες από ότι ο αριθμός των ορθογώνιων ραδιο-πόρων. Η βασική ιδέα του, είναι να υποστηρίξει μη-ορθογώνια πολύπλεξη στους χρήστες, με το κόστος της αυξημένης πολυπλοκότητας από πλευράς του δέκτη, όπου είναι απαραίτητο για τον διαχωρισμό των μη-ορθογώνιων σημάτων.

Οι αρχές λειτουργίας της τεχνικής αυτής βασίζονται στην εφαρμογή της κωδικοποίησης υπέρθεσης (Superposition Coding – SC) στον πομπό, και στην τεχνολογία επαναληπτικής ακύρωσης θορύβου (Successive Interference Cancelation – SIC) στον δέκτη. Οι προαναφερθείσες τεχνικές έχουν ήδη βασιστεί σε παλαιότερες έρευνες [38]. Οι κύριες τεχνολογίες είναι:

- **Κωδικοποίηση Υπέρθεσης (Superposition Coding - SC)**

Η κωδικοποίηση αυτή αποτελεί μια τεχνική ταυτόχρονης μετάδοσης πληροφορίας σε πολλαπλούς παραλήπτες από μια ενιαία πηγή. Δηλαδή, επιτρέπει στο πομπό να μεταδώσει πολλαπλές πληροφορίες χρηστών την ίδια χρονική στιγμή [39]. Αρχικά, η ιδέα της κωδικοποίησης υπέρθεσης SC, θεωρείται από τα πιο σημαντικά μη ορθογώνια σχήματα κωδικοποίησης σχετικά με την επίτευξη της χωρητικότητας ενός γκαουσιανού καναλιού (Gaussian Channel) [40]. Η κύρια έννοια της κωδικοποίησης υπέρθεσης, επιτρέπει τη κωδικοποίηση του μηνύματος για ένα χρήστη συσχετισμένο με κακές συνθήκες καναλιού σε ένα χαμηλότερο ρυθμό και έπειτα την υπέρθεση του σήματος ενός χρήστη που έχει καλές συνθήκες καναλιού πάνω σε αυτό.

- **Επαναληπτική Ακύρωση Θορύβου (Successive Interference Cancelation - SIC)**

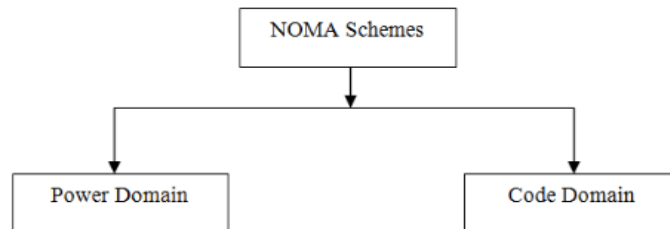
Για να αποκωδικοποιηθεί η συνολική (superposed) πληροφορία σε κάθε δέκτη, η τεχνική SIC εκμεταλλεύεται ιδιαιτερότητες στις διαφορές της ισχύος των σημάτων που λήφθηκαν. Εδώ, η βασική ιδέα, είναι ότι τα σήματα του χρήστη αποκωδικοποιούνται επαναληπτικά. Μετά από την αποκωδικοποίηση ενός σήματος χρήστη, αυτό αφαιρείται από το σύνθετο σήμα πριν το επόμενο

σήμα του χρήστη αποκωδικοποιηθεί και αυτό. Όταν εφαρμόζεται το SIC, ένα από τα σήματα χρήστη αποκωδικοποιείται, αντιμετωπίζοντας το άλλο σήμα ως παρεμβολή, αλλά το τελευταίο τότε αποκωδικοποιείται με το κέρδος ότι το πρώτο σήμα έχει ήδη αφαιρεθεί ως παρεμβολή. Όμως, σύμφωνα με το SIC, οι χρήστες ταξινομούνται σύμφωνα με την ισχύ των σημάτων τους, ώστε ο δέκτης να μπορεί να αποκωδικοποιήσει το ισχυρότερο σήμα πρώτα, αφαιρώντας το από το σύνθετο σήμα, και απομονώνοντας το ασθενέστερο από το υπόλοιπα σήματα [39].

Ως μια τεχνική ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών (Multi User Detection - MUD), ένα σημαντικό όφελος είναι ότι η διαδικασία SIC είναι ικανή να προσεγγίσει τη χωρητικότητα τόσο των καναλιών μετάδοσης όσο και των καναλιών πολλαπλής πρόσβασης (Broadcast Channel – Multiple Access) [41].

## 4.2 Κατηγορίες Noma.

Η οικογένεια τεχνικών NOMA μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, στο πεδίο ισχύος και στο πεδίο κώδικα (Power-Domain, Code-Domain) [15].



Σχήμα 15: Κατηγοριοποίηση NOMA.[42]

Το σύστημα NOMA με βάση την ισχύ (NOMA Power-domain) επιτρέπει την δέσμευση διαφορετικών επιπέδων ισχύος σε διαφορετικούς χρήστες, σύμφωνα με τις συνθήκες καναλιού τους, ώστε να αποκτήσουν το μέγιστο κέρδος στην απόδοση του συστήματος. Τέτοια δέσμευση ισχύος είναι ωφέλιμη και διότι μπορεί να διαχωρίσει διαφορετικούς χρήστες ακυρώνοντας τη παρεμβολή μεταξύ τους.

Από την άλλη πλευρά, μια άλλη μορφή του NOMA, η οποία βασίζεται στη πολύ-πλέξη ενός κώδικα έχει προταθεί. Η ιδέα του συστήματος NOMA με βάση τον κώδικα, προέρχεται από τα κλασσικά συστήματα CDMA, στα οποία πολλαπλοί χρήστες μοιράζονται τους ίδιους πόρους στο χρόνο-συχνότητα, αλλά υιοθετούν μοναδικές (user-specific) ακολουθίες εξάπλωσης. Όμως, η κύρια διαφορά με τα CDMA συστήματα είναι ότι οι ακολουθίες εξάπλωσης είναι περιορισμένες σε αραιές ακολουθίες ή μη-ορθογώνιες χαμηλού συσχετισμού ακολουθίες στο NOMA [16]. Η αρχική μορφή του συστήματος NOMA με κώδικα, έχει βασιστεί σε αραιές ακολουθίες εξάπλωσης, και ονομάζεται χαμηλής πυκνότητας εξάπλωση CDMA (Low Density CDMA – LDS-CDMA). Σε αυτό το σχήμα, η παρεμβολή μπορεί αποτελεσματικά να μειωθεί ανάμεσα στους χρήστες με κατάλληλο σχεδιασμό ακολουθιών εξάπλωσης (spreading sequences).

Όμως σε περιβάλλοντα IoT, η ανάγκη για μαζική υποστήριξη συσκευών είναι κρίσιμη, ώστε οι υπηρεσίες που βασίζονται στην επικοινωνία να μπορούν να ικανοποιούνται με τη μέγιστη δυνατή ποιότητα. Έτσι, προτείνεται το NOMA με βάση την ισχύ, για μεγιστοποίηση του πλήθους των συνδεδεμένων συσκευών [43].

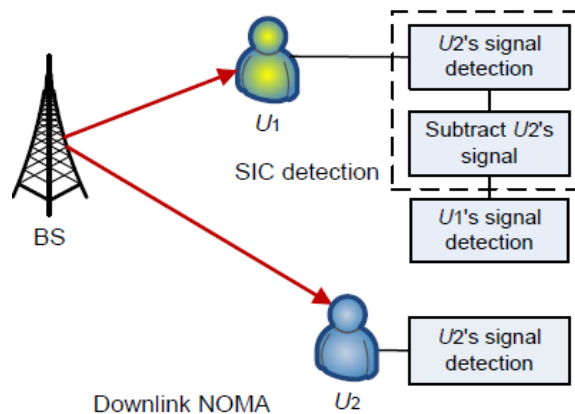
### 4.3 NOMA με βάση την ισχύ (Power Domain NOMA).

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης που βασίζονται στο χρόνο, συχνότητα και στον κώδικα ή και σε ένα συνδυασμό αυτών, η NOMA μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα καινούργιο πεδίο, αυτό της ισχύος. Στη πλευρά του πομπού, διαφορετικά σήματα παράγονται από διαφορετικούς χρήστες, όπου υπερθέτονται το ένα με το άλλο ύστερα από μια τυπική κωδικοποίηση καναλιού και διαμόρφωση. Έτσι, πολλαπλοί χρήστες μοιράζονται τους ίδιους πόρους χρόνου – συχνότητας, και έπειτα ανιχνεύονται από τους δέκτες από αλγορίθμους MUD, όπως για παράδειγμα η διαδικασία SIC. Σε αυτή τη κατεύθυνση, η φασματική απόδοση μπορεί να βελτιωθεί με το κόστος βέβαια της αυξημένης πολυπλοκότητας στο δέκτη σε σύγκριση με την τυπική ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση.

#### 4.3.1 Επίπεδα ζεύξης.

- **Επίπεδο Καθόδου (Downlink - DL)**

Γενικά, το NOMA επιτρέπει την υπέρθεση των σημάτων των μηνυμάτων των χρηστών σε μια ομάδα NOMA. Τα επιθυμητά σήματα έπειτα εντοπίζονται και αποκωδικοποιούνται στον δέκτη. Έτσι, ο σταθμός βάσης μεταδίδει το σύνθετο σήμα  $x = \sum_{i=1}^U \sqrt{p_i} x_i$ , όπου το  $x_i$  είναι το σήμα μηνύματος του χρήστη  $i$ ,  $p_i$ , αναπαριστά την ισχύ που έχει δεσμευτεί για τον χρήστη  $i$ , και το  $U$  συμβολίζει τον συνολικό αριθμό χρηστών που ανήκουν στην ομάδα NOMA. Η ισχύς που δεσμεύεται σε έναν χρήστη, εξαρτάται από την ισχύ των υπολοίπων χρηστών εξαιτίας του περιορισμού συνολικής ισχύος του σταθμού,  $P_t = \sum_{i=1}^U p_i$ , όπου  $P_t$  είναι η συνολική ισχύς που διαθέτει ο σταθμός βάσης. Στη συνέχεια, το λαμβανόμενο σήμα κατά τον  $i$ -οστό χρήστη, δίνεται από  $y = h_i x + w_i$ , όπου  $h_i$  αναπαριστά το κέρδος καναλιού ανάμεσα στον σταθμό βάσης και τον χρήστη  $i$ , και  $w_i$  συμβολίζει τον Γκαουσιανό θόρυβο στον δέκτη.



Σχήμα 16: Ζεύξη Καθόδου, με σταθμό βάσης και δύο χρήστες.[44]

Έτσι στο παραπάνω σχήμα, σε μια ζεύξη καθόδου, δύο χρήστες επικοινωνούν με τον σταθμό μέσω NOMA τεχνικής. Περισσότερη ισχύς δεσμεύεται στον δεύτερο χρήστη (U2) που τοποθετείται πιο μακριά από τον άλλο χρήστη, και λιγότερη ισχύς στον πρώτο χρήστη (U1) που είναι πιο κοντά στον σταθμό. Στο δίκτυο, όλοι οι χρήστες θα λάβουν το ίδιο σήμα το οποίο περιέχει την πληροφορία αυτών. Κάθε χρήστης αποκωδικοποιεί το δυνατότερο σήμα πρώτα, και έπειτα αφαιρεί το αποκωδικοποιημένο σήμα από το λαμβανόμενο σήμα. Ο μηχανισμός SIC στον δέκτη επαναλαμβάνει την αφαίρεση μέχρι να εντοπίσει το δικό του σήμα. Δηλαδή, ο χρήστης που βρίσκεται πιο κοντά στον σταθμό, μπορεί να ακυρώσει τα σήματα των μακρινών χρηστών,

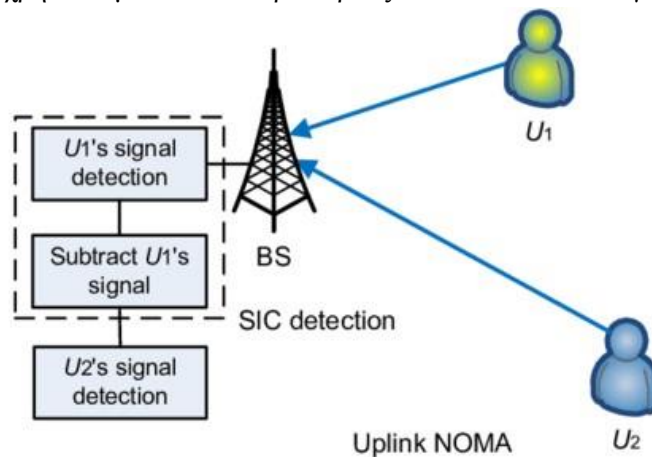


εφόσον αυτά τα σήματα αποτελούν το περισσότερο μέρος του λαμβανόμενου σήματος, και συνεπώς να αποκωδικοποιήσει το δικό του σήμα πρώτα.

Στη περίπτωση των δύο χρηστών, υποθέτοντας ότι  $\frac{|h_1|^2}{N_{0,1}} > \frac{|h_2|^2}{N_{0,2}}$ , ο χρήστης U2 δεν θα εκτελέσει ακύρωση παρεμβολών αφού έρχεται πρώτος στη σειρά αποκωδικοποίησης, αλλά θα αποκωδικοποιήσει πρώτα το  $x_2$  και θα αφαιρέσει το περιεχόμενο του από το λαμβανόμενο σήμα  $y_1$ . Έτσι, ο ρυθμός απόδοσης του χρήστη UE-I,  $R_i$ , μπορεί να αναπαρασταθεί ως  $R_1 = \log_2\left(1 + \frac{P_1 * |h_1|^2}{N_{0,1}}\right)$ ,  $R_2 = \log_2\left(1 + \frac{P_2 * |h_2|^2}{P_1 * |h_2|^2 + N_{0,2}}\right)$ .

- **Επίπεδο Ανόδου (Uplink - UL)**

Στη ζεύξη ανόδου, κάθε χρήστης μεταδίδει το δικό σήμα  $x_i$  μαζί με ισχύ μετάδοσης  $p_i$  τέτοια ώστε το λαμβανόμενο σήμα στο σταθμό βάσης ορίζεται ως  $y = \sum_{i=1}^U \sqrt{p_i} h_i x_i + w$ , όπου  $w$ , συμβολίζει τον θόρυβο του δέκτη στο σταθμό βάσης. Η μεταδιδόμενη ισχύς ανά χρήστη περιορίζεται από την μέγιστη ισχύ της μπαταρίας που διαθέτει ο χρήστης. Έτσι, σε αντίθεση με το NOMA Καθόδου, όλοι οι χρήστες μπορούν ανεξάρτητα να χρησιμοποιήσουν τις μπαταρίες τους σε μέγιστη ισχύ εφόσον τα κέρδη καναλιών των είναι αρκετά διακριτά μεταξύ τους. Αν τα κέρδη καναλιών, είναι αρκετά κοντά, τότε μπορεί να εφαρμοσθεί έλεγχος ισχύος ώστε να ενισχύσει την απόδοση του χρήστη με το καλύτερο κέρδος καναλιού, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση των χρηστών με ασθενέστερο κέρδος καναλιού σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο.



Σχήμα 17: Ζεύξη Ανόδου, με σταθμό βάσης και δύο χρήστες.[44]

### 4.3.2 Διαφορές Downlink - Uplink

Οι δύο αυτές ζεύξεις διαφέρουν ως προς τις απαιτήσεις και τις τεχνολογίες του δικτύου.

1. Πολυπλοκότητα Υλοποίησης (Implementation Complexity): Το NOMA καθόδου, απαιτεί τον σχεδιασμό και υλοποίηση ενός σύνθετου μηχανισμού εντοπισμού και ακύρωσης παρεμβολής στη συσκευή κάθε δέκτη. Πρόκειται για μια απαιτητική διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψιν την περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ των χρηστών. Ενώ, στην άνοδο, είναι πιο εύκολο να υλοποιηθεί ένας τέτοιος μηχανισμός σε ένα κεντρικό σταθμό βάσης.
2. Ενδο-κυψελική Παρεμβολή (Intra-cell Interference): Η παρεμβολή εντός κυψέλης, στη κάθοδο για έναν χρήστη, εμφανίζεται στο δικό του κανάλι. Έτσι, ένας χρήστης με

δυνατό κανάλι καθόδου δέχεται και υψηλή παρεμβολή. Παρόμοια, ένας χρήστης με αδύναμο κανάλι καθόδου, αντιμετωπίζει χαμηλή παρεμβολή λόγω των χαμηλών ισχύων μετάδοσης για τους χρήστες με δυνατό κανάλι. Ως αποτέλεσμα, οι χρήστες με δυνατό κανάλι καθόδου, είναι πιο ευάλωτοι σε παρεμβολές εντός της κυψέλης.

Αντίθετα, στην άνοδο, ο σταθμός λαμβάνει ταυτόχρονα όλες τις μεταδόσεις των χρηστών. Έτσι, η παρεμβολή σε έναν χρήστη είναι συνάρτηση των στατιστικών του καναλιού των υπολοίπων χρηστών. Επομένως, η μετάδοση των χρηστών με αδύναμο κανάλι, είναι πιο ευάλωτη σε ισχυρές παρεμβολές που φθάνουν από τις μεταδόσεις των χρηστών με δυνατό κανάλι [45].

### **4.3.3 Ομαδοποίηση Χρηστών και Δέσμευση Ισχύος (User Pairing & Power Allocation)**

Στη τεχνική NOMA στο πεδίο της ισχύος, η διαφορά του κέρδους καναλιού ανάμεσα στους χρήστες μεταφράζεται σε διαφορετικά κέρδη πολυπλεξίας [45][47]. Γι' αυτό, και η ομαδοποίηση χρηστών καθώς και η δέσμευση ισχύος έχουν σημαντικές επιδράσεις στον επιτευξιμό ρυθμό απόδοσης. Έτσι, θα πρέπει να βρεθεί ένα κριτήριο βελτιστοποίησης με το οποίο και η ομαδοποίηση χρηστών, και η δέσμευση ισχύος θα μπορούν να βελτιστοποιηθούν.

Ένας τυπικός προγραμματιστής πόρων (Scheduler), ο proportional fair (FR), είναι γνωστό ότι μπορεί να ισορροπήσει ικανοποιητικά τη χωρητικότητα αλλά και τη δικαιοσύνη. Συνεπώς, έχει αξιοποιηθεί στα ορθογώνια συστήματα 3G και 4G, και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ένα αποτελεσματικό κριτήριο βελτιστοποίησης [46] σε συστήματα NOMA. Ειδικότερα, τόσο ο προγραμματισμός πολλαπλών χρηστών όσο και η δέσμευση πόρων σε κάθε block συχνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί μεγιστοποιώντας το γινόμενο του μέσου όρου του ρυθμού απόδοσης όλων των χρηστών στο σύστημα [48]. Στη ζεύξη ανόδου, η ισχύς μετάδοσης αποφασίζεται ανεξάρτητα για τους χρήστες, έτσι ώστε ο προγραμματισμός ενός συνόλου χρηστών να ρυθμίζεται σε ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος. Στη ζεύξη καθόδου, με τον περιορισμό της μέγιστης ισχύος, ο προγραμματισμός χρηστών και η δέσμευση ισχύος, θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν συγκεντρωτικά.

## **4.4 Οφέλη Μη-Ορθογώνιας έναντι Ορθογώνιας Πολλαπλής Πρόσβασης.**

- **Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και Χαμηλό κόστος σηματοδότησης (Low Transmission Latency and Signaling Cost)**

Τα τυπικά ορθογώνια συστήματα βασίζονται σε αιτήματα πρόσβασης (access-granted), στα οποία ένας χρήστης πρέπει πρώτα να στείλει ένα αίτημα επικοινωνίας προς το σταθμό βάσης. Έπειτα, όταν ο σταθμός λάβει αυτό το αίτημα, επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων του χρήστη στη ζεύξη ανόδου, στέλνοντας του ειδικό σήμα στο κανάλι καθόδου. Αυτό το γεγονός έχει σημαντικό αντίκτυπο στο χρόνο μετάδοσης και σηματοδοσία, καθώς εισάγει επιπλέον καθυστέρηση, κατάσταση που σε περιβάλλον 5G είναι μη αποδεκτή.

Σε αντίθεση, στα συστήματα NOMA, μια διαδικασία δυναμικού προγραμματισμού των χρηστών (dynamic scheduling), μπορεί να μην απαιτείται. Έτσι, μεταδόσεις επιπέδου ανόδου χωρίς ειδικά αιτήματα επικοινωνίας (grant-free), μπορούν να πραγματοποιηθούν στα συστήματα NOMA, μειώνοντας το χρόνο μετάδοσης και σηματοδοσίας.

- **Ελεύθερη ανατροφοδότηση πληροφορίας καναλιού (Relaxed channel feedback).**

Η ανάγκη για ανατροφοδότηση πληροφορίας σχετικά με το κανάλι επικοινωνίας, θα πραγματοποιηθεί σε πιο ελεύθερα πλαίσια, στα συστήματα NOMA PD, επειδή ο δείκτης κατάστασης καναλιού (CSI – Channel State Information), χρησιμοποιείται μόνο για τη δέσμευση ισχύος. Έτσι, δεν απαιτείται ακριβής γνώση του δείκτη CSI. Οπότε, ανεξάρτητα από το εάν κινητοί ή σταθεροί χρήστες υποστηρίζονται, έχοντας περιορισμένης ακρίβειας δείκτη καναλιού, δεν θα επηρεαστεί η απόδοση του συστήματος, εφόσον το κανάλι δεν αλλάζει ραγδαία.

## Κεφάλαιο 5 Προσομοίωση δικτύου Narrowband – IoT με χρήση Μη-Ορθογώνιας Τεχνικής.

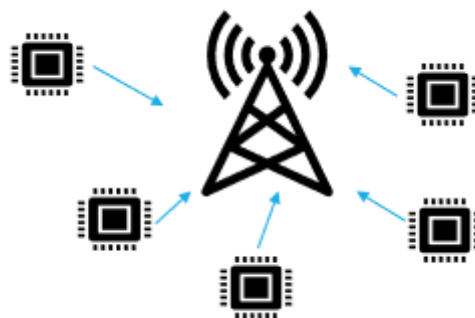
Στα πλαίσια των δικτύων κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς, το διαδίκτυο των αντικειμένων έχει θέσει νέες απαιτήσεις επικοινωνιών, όπως η τεράστια συνδεσιμότητα συσκευών mMTC. Προκειμένου να υπάρξει υποστήριξη για επικοινωνίες mMTC για τις επόμενες γενιές δικτύου, μια νέα τεχνολογία, Narrowband – IoT (NB-IoT) έχει προτυποποιηθεί. Η τεχνολογία αυτή παρέχει επικοινωνίες ενεργειακά αποδοτικές για συσκευές χαμηλής ισχύος, εκμεταλλεύομενη το χαμηλό εύρος ζώνης και τη δέσμευση πόρων στο φυσικό επίπεδο. Ο στόχος του NB-IoT, είναι η διατήρηση της διάρκειας ζωής για περίπου 10 χρόνια και η παροχή μαζικής συνδεσιμότητας των συσκευών.

Αλλά, η κύρια πρόκληση στη παροχή μαζικής συνδεσιμότητας MTC συσκευών στα 5G δίκτυα δε μπορεί να λυθεί αποδοτικά με βάση τις υπάρχουσες NB-IoT τεχνολογίες.

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται ένα μοντέλο προσομοίωσης το οποίο βασίζεται στο πρότυπο NB-IoT, και έχει ως στόχο την παροχή επικοινωνίας IoT συσκευών σε περιβάλλον με ένα σταθμό βάσης. Το μοντέλο στο πρώτο σενάριο λειτουργεί με διαφορετικό πλήθος χρηστών αλλά πάντα με ορθογώνιο τρόπο. Ενώ, στο δεύτερο σενάριο, υλοποιείται η μη-ορθογώνια πρόσβαση με βάση την ισχύ των διαφορετικών χρηστών. Στο δεύτερο σενάριο, θα αναλυθεί η τεχνική ομαδοποίησης χρηστών, καθώς και η επίδραση της, στην ολική απόδοση του συστήματος. Σκοπός της προσομοίωσης είναι η ανάδειξη του NB-IoT με χρήση μη-ορθογώνιας τεχνικής, έναντι του ορθογώνιου NB-IoT, προς υποστήριξη mMTC επικοινωνίας σε περιβάλλον δικτύου πέμπτης γενιάς (5G).

### 5.1 Μοντέλο συστήματος.

Αρχικά, το περιβάλλον στο οποίο το μοντέλο έχει σχεδιασθεί, είναι ένα περιβάλλον IoT συσκευών οι οποίες βρίσκονται γεωγραφικά σε μια ακτίνα 2 km με κέντρο το σταθμό βάσης. Σημασία, στο περιβάλλον αυτό έχει η ζεύξη ανόδου (uplink), δηλαδή η επικοινωνία από τις συσκευές προς το σταθμό βάσης. Ακόμη, έχει σημασία διότι με χρήση μη-ορθογώνιας τεχνικής θα υπάρξει σημαντικό όφελος στο πλήθος IoT συσκευών που προσπαθούν να στείλουν δεδομένα προς το σταθμό βάσης. Οι χρήστες που κάθε φορά επικοινωνούν με NB-IoT αλλάζουν, οπότε υπάρχουν  $M$  χρήστες στο κελί.



Σχήμα 18: Δίκτυο NB-IoT αποτελούμενο από ένα Base Station, και  $M$  IoT συσκευές.

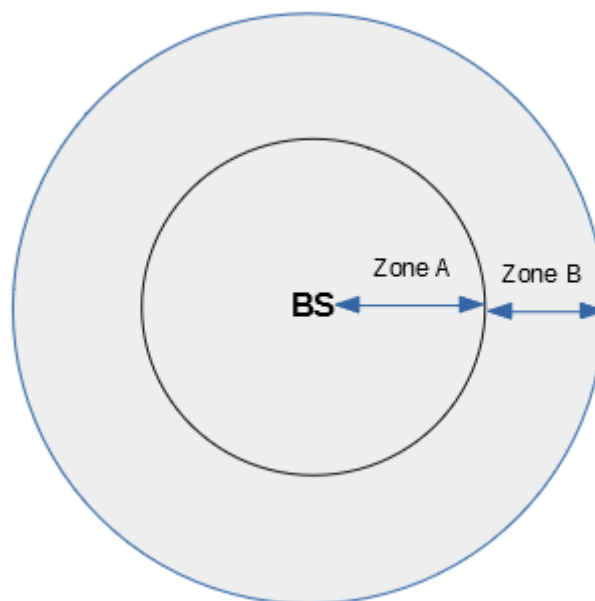
Οι χρήστες χρησιμοποιούν το διαθέσιμο εύρος ζώνης 180 kHz [32] για την επικοινωνία με το σταθμό βάσης, καθώς έχουν ισχύ μετάδοσης δεδομένων (UE Power transmission) στα 20 dBm. Η βασική υπηρεσία δεδομένων, όπου δεδομένα παράγονται στις συσκευές (αισθητήρας συσκευής), και κατά συνέπεια στέλνονται τα δεδομένα από τη συσκευή στο σταθμό είναι στα 15Kbps. Επιπρόσθετα, στο σύστημα, κάθε υπό φορέας σήματος (sub-carrier) δε μπορεί να αξιοποιηθεί από παραπάνω από ένα χρήστη. Σε συνδυασμό με το διαχωρισμό των υπό-φορέων που είναι στα 3.75 kHz (180 kHz / 3.75 kHz), το σύστημα εξυπηρετεί μόνο μέχρι 48 χρήστες ταυτόχρονα, καθώς δεσμεύει κάθε υπό-φορέα μόνο σε ένα χρήστη.

- **Μοντέλο Απωλειών Διαδρομής (Path Loss Model)**

Το μοντέλο απωλειών διάδοσης που υλοποιεί το σύστημα είναι το COST-HATA-231 [49]. Αποτελεί μια επέκταση του μοντέλου Okumura-Hata Model και λειτουργεί για συχνότητες μεγαλύτερες των 1500 MHz και μικρότερες των 2000 MHz. Εκφράζει την απώλεια διαδρομής κάθε χρήστη, σε συνάρτηση με την απόσταση του από το σταθμό, αλλά και τη συχνότητα φέροντος του σήματος του [50]. Μπορεί να καλύψει το παρόν κελί του συστήματος που έχει ακτίνα 2 km ως μια ημι-αστική περιοχή (suburban area).

- **Διαχωρισμός Χρηστών σε Ζώνες**

Οι χρήστες μέσα στο κελί, παράγονται τυχαία, αλλά όχι τυχαία στο σύνολο του κελιού. Διαχωρίζονται οι μισοί χρήστες (50% των χρηστών), και κατανέμονται τυχαίως στη πρώτη ζώνη (A), ενώ οι άλλοι μισοί χρήστες (το υπόλοιπο 50% χρηστών) κατανέμονται τυχαίως στη δεύτερη ζώνη (B). Οι δύο ζώνες A και B, ουσιαστικά διαμερίζουν το κελί. Η ζώνη A καλύπτει το πρώτο χιλιόμετρο (0m – 1km), ενώ η δεύτερη ζώνη B καλύπτει το δεύτερο χιλιόμετρο (1km – 2km).



Σχήμα 19: Ζώνες περιοχής χρηστών εντός κελιού.

Ο διαχωρισμός του κελιού σε δύο ζώνες περιοχής, εξυπηρετεί την ομαδοποίηση των χρηστών με την εφαρμογή της μη-ορθογώνιας τεχνικής. Έτσι, οι χρήστες στη ζώνη A θα έχουν διακριτές συνθήκες καναλιού από τους χρήστες με ζώνη B. Ακόμη, η ομαδοποίηση των χρηστών γίνεται

πιο εύκολη και αποδοτική όταν πρόκειται να δημιουργηθεί ζεύγος δύο χρηστών. Δηλαδή, ένα ζεύγος δύο χρηστών, ένας χρήστης από τη ζώνη A και ο δεύτερος χρήστης τη ζώνη B, μπορεί να υπάρξει εκμεταλλεζόμενο τις διαφορετικές συνθήκες καναλιού, λόγω των διαφορετικών αποστάσεων.

Αν στο σύστημα δοθεί σαν είσοδος M, 10 χρήστες, τότε οι 5 χρήστες θα κατανεμηθούν τυχαίως στη ζώνη A, ενώ οι υπόλοιποι 5 στη ζώνη B.

## 5.2 Τεχνική ομαδοποίησης χρηστών (User Clustering).

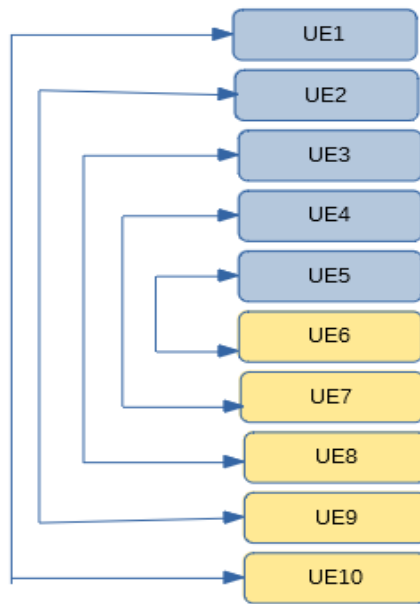
Το σύστημα NOMA είναι ένα σύστημα που επηρεάζεται αρκετά από την παρεμβολή, και συνεπώς είναι πρακτικά αδύνατο να μπορέσουν όλοι οι χρήστες του δικτύου να εκτελέσουν NOMA συγκεντρωτικά. Σε αυτό το πλαίσιο, οι χρήστες μπορούν να διαιρεθούν σε πολλές ομάδες, όπου το NOMA υλοποιείται μέσα σε κάθε ομάδα, και οι διαφορετικές ομάδες δεσμεύονται ορθογώνια. Έτσι, η απόδοση ενός NOMA συστήματος εξαρτάται από το ποιοι χρήστες πρόκειται να ομαδοποιηθούν.

Επειδή ο οργανισμός 3GPP έχει μελετήσει το σχήμα NOMA με δύο χρήστες, η ομαδοποίηση στο παρόν μοντέλο πραγματοποιείται ανά δύο χρήστες. Έτσι, για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του παραλήπτη που προκαλείται από το μηχανισμό SIC, και για να μειωθεί και η καθυστέρηση για τις IoT συσκευές με καλύτερες συνθήκες καναλιού, μπορεί να υποθεθεί ότι υπάρχουν το μέγιστο δύο συσκευές σε μια ομάδα [51].

### • Ταξινόμηση χρηστών (Sorting UE channels based channel gain's)

Σε μια ομάδα NOMA, τα σήματα των δύο χρηστών αντιμετωπίζουν διακριτά κέρδη καναλιού. Έτσι, για να μπορέσει ο δέκτης, δηλαδή ο σταθμός βάσης να εκτελέσει τη διαδικασία SIC, για την αποκωδικοποίηση των σημάτων των χρηστών, πρέπει να διατηρηθεί η διακριτότητα των ληφθέντων σημάτων [52]. Οπότε, γίνεται ταξινόμηση στις συνθήκες καναλιού των χρηστών στη ζώνη A, και ταξινόμηση στους χρήστες στη ζώνη B. Θεωρώντας 10 χρήστες στο σύστημα, από τους οποίους οι πρώτοι 5 ανήκουν στη ζώνη A και οι υπόλοιποι πέντε ανήκουν στη ζώνη B (Σχήμα 18).

Ο αλγόριθμος ομαδοποίησης χρηστών που προτείνεται και υλοποιείται από το μοντέλο προσομοίωσης, ταξινομεί τους χρήστες της ζώνης A με βάση τα κέρδη των καναλιών τους ως:  $UE1 > UE2 > UE3 > UE4 > UE5$ , και τους χρήστες της ζώνης B ως:  $UE6 > UE7 > UE8 > UE9 > UE10$ . Έτσι, ο χρήστης UE1 θα έχει το υψηλότερο κέρδος καναλιού στη ζώνη A, ο χρήστης UE2 το αμέσως επόμενο υψηλότερο κέρδος καναλιού, μέχρι τον χρήστη UE5 ο οποίος έχει το χαμηλότερο κέρδος καναλιού από τους χρήστης της ζώνης A. Αντίστοιχα, για τη ζώνη B. Ο χρήστης UE6 έχει το υψηλότερο κέρδος καναλιού στη ζώνη B, ενώ ο χρήστης UE10 έχει το χαμηλότερο κέρδος καναλιού στη ζώνη B. Οπότε, η πρώτη ομάδα (cluster) αποτελείται από τους χρήστες {UE1, UE10}, η δεύτερη ομάδα {UE2, UE9}, η τρίτη ομάδα {UE3, UE8}, η τέταρτη ομάδα {UE4, UE7} και τέλος η πέμπτη ομάδα {UE5, UE6}. Ο αριθμός των ομάδων συνεπώς είναι  $Ομάδες (clusters) = \frac{Πλήθος συσκευών}{2}$ . Οι ομάδες που δημιουργούνται απεικονίζονται στο σχήμα 19.



Σχήμα 20: Ομαδοποίηση χρηστών ανά δίο. Με μπλε οι χρήστες της ζώνης Α, ενώ με κίτρινο οι χρήστες της ζώνης Β.

### 5.3 Σενάρια προσομοίωσης.

Το μοντέλο προσομοίωσης αξιοποιεί τη μετρική της ρυθμαπόδοσης (Throughput) των χρηστών, και το μέγεθος ουράς (Buffer) του κάθε χρήστη, για το συνολικό χρόνο προσομοίωσης του δικτύου. Στο πρώτο σενάριο το δίκτυο NB-IoT λειτουργεί με ορθογώνια δέσμευση πόρων, και έτσι εισάγεται ο περιορισμός στη ταυτόχρονη εξυπηρέτηση 48 χρηστών. Ενώ, στο δεύτερο σενάριο, το πλήθος των συνδεδεμένων χρηστών μπορεί να διπλασιαστεί σεβόμενο τον αριθμό των χρηστών του συστήματος, βελτιώνοντας τη συνολική ρυθμαπόδοση του συστήματος. Αναλυτικά, οι παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης βρίσκονται στο παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Ορισμός	Τιμή
BW	Εύρος Ζώνης	180 kHz
Pt	Ισχύ Μετάδοσης UE	20 dBm
Cell radius	Ακτίνα κελιού	2 km
Path Loss	Μοντέλο Απωλειών Διαδρομής	COST-HATA-231 Model
$f_c$	Συχνότητα φέροντος σήματος	1700 MHz
M Users	Πλήθος Χρηστών	[12, 24, 36, 48, 64, 96]
PRB (subcarriers)	Διαθέσιμοι υπό-φορείς	48

No	AWGN – Λευκός Προσθετικός Θόρυβος	-173 dBm / Hz
----	-----------------------------------	---------------

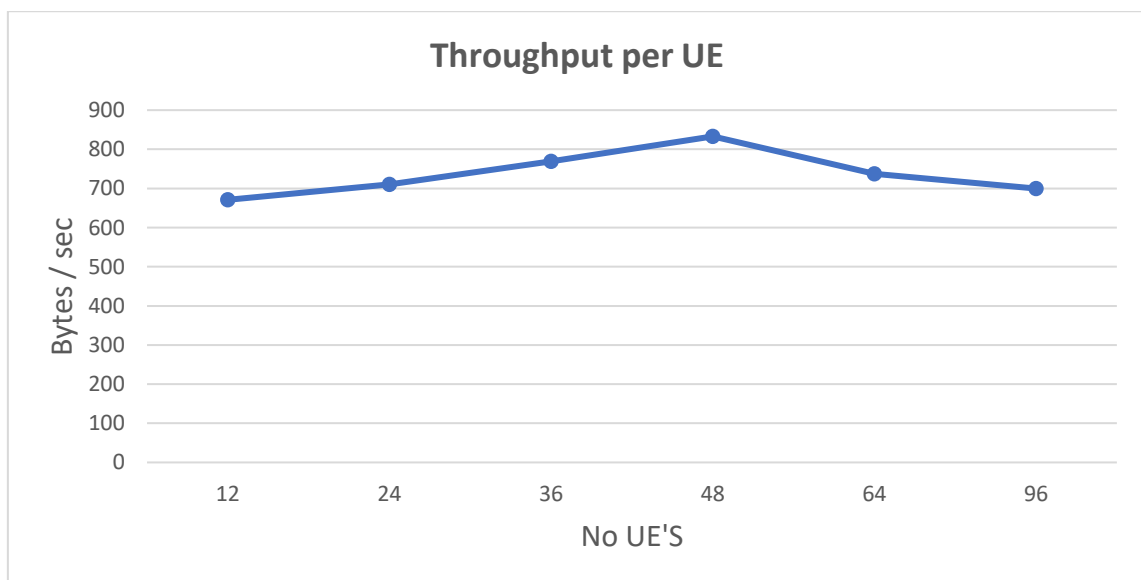
Πίνακας 3: Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης.

### 5.3.1 Σενάριο με ορθογώνια δέσμευση πόρων.

Σε αυτό το σενάριο, το σύστημα λειτουργεί με ορθογώνια δέσμευση πόρων. Αυτό συνεπάγεται ότι η τεχνολογία NB-IoT, μπορεί σε κάθε χρόνο-θυρίδα (Timeslot) να αποδώσει 48 διαθέσιμους υπό-φορείς μέχρι και σε 48 χρήστες, αφού γίνεται ανάθεση ενός υπό-φορέως σε ένα χρήστη. Παρακάτω απεικονίζονται διαγράμματα ρυθμαπόδοσης χρηστών, συστήματος καθώς και το μέσο μέγεθος ουράς των χρηστών στο συνολικό χρονικό διάστημα προσομοίωσης στο σύστημα, με αριθμό χρηστών 12, 24, 36, 48, 64 και 96. Όταν στο σύστημα δοθεί αριθμός χρηστών ως είσοδος μεγαλύτερος από 48, αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι οι μετρικές θα αρχίσουν να σταθεροποιούνται ή ελαφρώς να μειώνονται, γεγονός που εξηγείται από την ανάθεση πόρων του NB-IoT.

#### 5.3.1.1 Ρυθμαπόδοση Χρηστών – Throughput Per User.

Ξεκινώντας τη προσομοίωση, και δίνοντας κάθε φορά ως είσοδο διαφορετικό αριθμό χρηστών (12, 24, 36, 48, 64, 96), η ρυθμαπόδοση καθώς οι χρήστες αυξάνονται, αυξάνεται για κάθε είσοδο. Αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι τους 48 χρήστες, δηλαδή να τους δώσει ρυθμό δεδομένων, ώστε να στείλουν τα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Ενδιαφέρον όμως, έχει η περίπτωση όπου το σύστημα αντιμετωπίζει χρήστες περισσότερους από τα φυσικούς ράδιο-πόρους που έχει, όπως για 64 και 96 χρήστες. Εκεί, παρατηρείται μια μικρή πτώση της ρυθμαπόδοσης τόσο στους 64 όσο και στους 96 χρήστες.

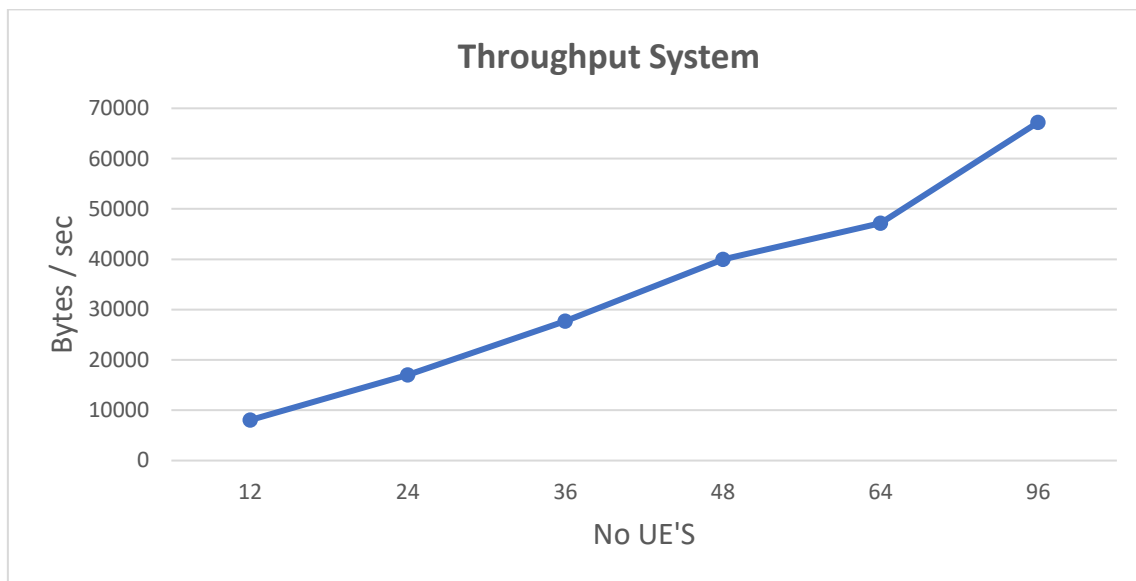


Σχήμα 21: Ρυθμαπόδοση χρηστών στο ορθογώνιο NB-IoT.



### 5.3.1.2 Ρυθμαπόδοση Χρηστών Συστήματος – Throughput System.

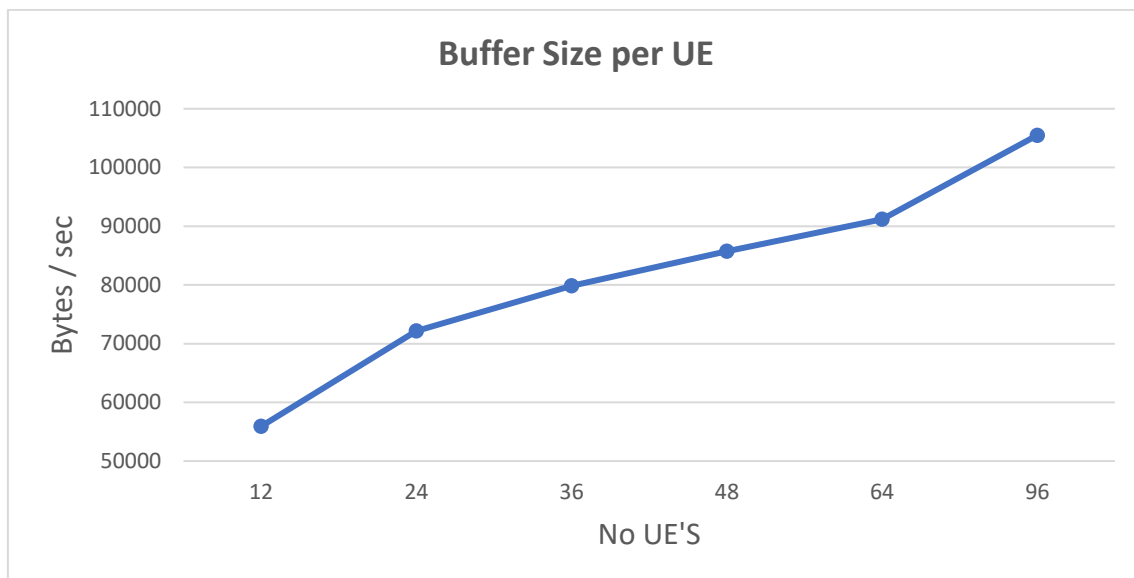
Για τον ίδιο αριθμό χρηστών, η ρυθμαπόδοση του συστήματος, πάντα αυξάνεται, καθώς περισσότεροι χρήστες συνδέονται στο δίκτυο. Ακόμη και για 64, 96 χρήστες, όπου είναι ένας αριθμός που το σύστημα δε μπορεί να εξυπηρετήσει, παρατηρείται αύξηση και εκεί στη ρυθμαπόδοση. Αν και η ρυθμαπόδοση 64 και 96 χρηστών σύμφωνα με το σχήμα 20, εμφανίζεται ελαφρώς μειωμένη, αυτό δεν οδηγεί αντίστοιχα σε μείωση και της ρυθμαπόδοσης συστήματος, επειδή λαμβάνεται υπόψιν ο συνολικός αριθμός των χρηστών στο σύστημα, ακόμη και δεν εξυπηρετούνται όλοι οι χρήστες.



Σχήμα 22: Ρυθμαπόδοση χρηστών συστήματος στο ορθογώνιο NB-IoT.

### 5.3.1.3 Μέγεθος Ουράς Χρηστών – Buffer Size Per UE.

Για τον ίδιο αριθμό χρηστών, το μέσο μέγεθος χωρητικότητας του buffer κάθε χρήστη, πάντα αυξάνεται, καθώς περισσότεροι χρήστες συνδέονται στο δίκτυο. Ακόμη και για 64, 96 χρήστες, όπου είναι ένας αριθμός που το σύστημα δε μπορεί να εξυπηρετήσει, παρατηρείται αύξηση και εκεί στο μέγεθος του buffer. Η συμπεριφορά για τους χρήστες αυτούς, είναι χειρότερη σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα, διότι δε μπορούν όλοι οι χρήστες να εξυπηρετηθούν, ώστε να αποκτήσουν ένα ρυθμό δεδομένων, και συνεπώς να στείλουν δεδομένα προς το σταθμό βάσης, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση δεδομένων ως bytes, στην ουρά μνήμης. Έτσι για πλήθος χρηστών μεγαλύτερο του 48, το μέγεθος της ουράς αρχίζει να μεγαλώνει με εκθετικό ρυθμό, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα στο σενάριο αυτό.



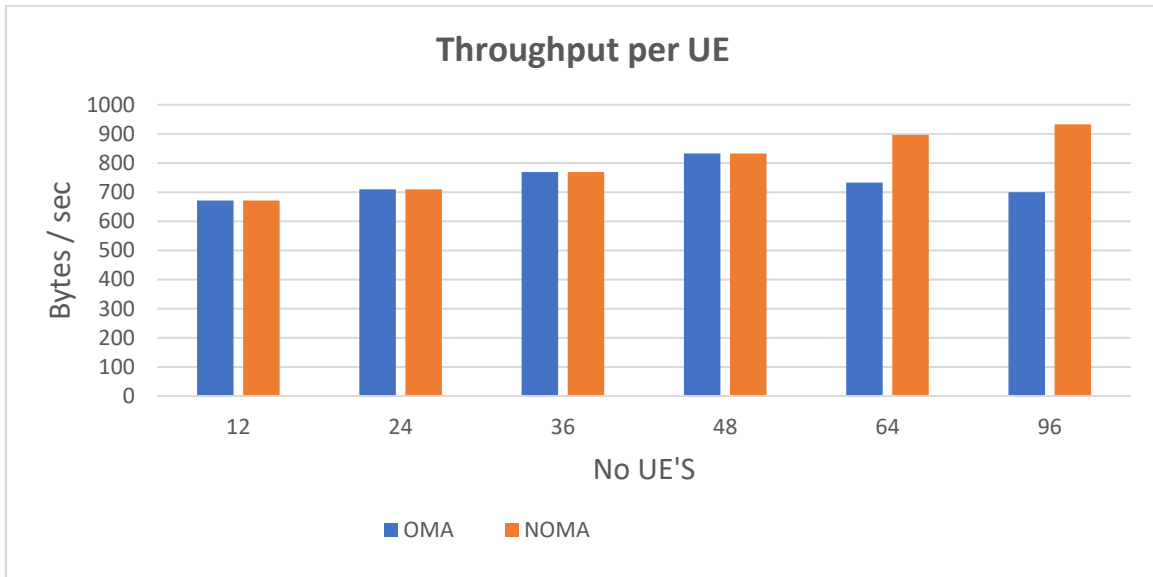
Σχήμα 23: Μέγεθος ουράς χρηστών στο ορθογώνιο NB-IoT.

### 5.3.2 Σενάριο με μη-ορθογώνια δέσμευση πόρων.

Σε αυτό το σενάριο, το σύστημα λειτουργεί με Μη-Ορθογώνια (NOMA) δέσμευση πόρων. Αυτό συνεπάγεται ότι η τεχνολογία NB-IoT πλέον, μπορεί να υποστηρίξει περαιτέρω συνδεδεμένες συσκευές αναθέτοντας πολλές συσκευές σε κάθε υπό-φορέα, και συγκεκριμένα δύο συσκευές. Παρακάτω απεικονίζονται διαγράμματα ρυθμαπόδοσης χρηστών, συστήματος καθώς και το μέσο μέγεθος ουράς των χρηστών στο συνολικό χρονικό διάστημα προσομοίωσης στο σύστημα, με αριθμό χρηστών 12, 24, 36, 48, 64 και 96. Το ενδιαφέρον σε αυτό το σημείο, είναι η διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος όταν οι συνδεδεμένοι χρήστες ξεπεράσουν τους 48, καθώς αναμένεται εξυπηρέτηση των παραπάνω χρηστών, με αύξηση στη ρυθμαπόδοση και μείωση του μεγέθους ουράς των χρηστών.

#### 5.3.2.1 Ρυθμαπόδοση Χρηστών – Throughput Per User.

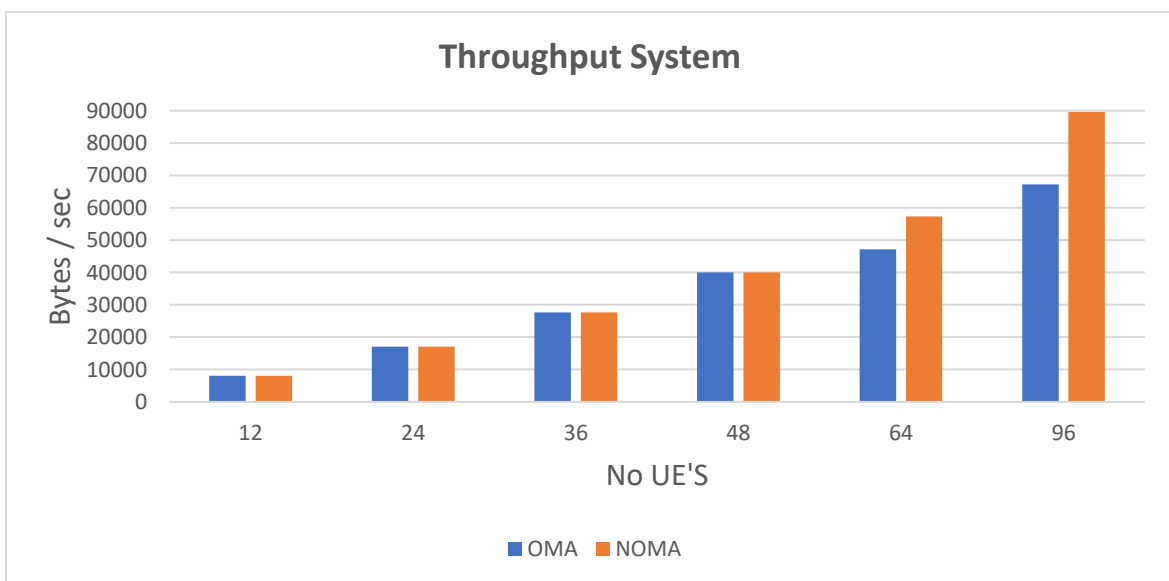
Ξεκινώντας τη προσομοίωση, και δίνοντας κάθε φορά ως είσοδο διαφορετικό αριθμό χρηστών (12, 24, 36, 48, 64, 96), η ρυθμαπόδοση καθώς οι χρήστες αυξάνονται, αυξάνεται για κάθε είσοδο. Αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι τους 48 χρήστες, δηλαδή να τους δώσει ρυθμό δεδομένων, ώστε να στείλουν τα δεδομένα στο σταθμό βάσης. Εδώ, το ενδιαφέρον είναι στους 64 και 96 χρήστες, επειδή πλέον το σύστημα μπορεί να τους εξυπηρετήσει, οπότε στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται και αύξηση στη ρυθμαπόδοση των 64 χρηστών σε σύγκριση με την OMA τεχνική, αλλά και των 96 χρηστών. Ενώ στο OMA σύστημα, πέρα των 48 χρηστών, η ρυθμαπόδοση είχε μια μικρή πτώση, στο παρόν σύστημα, η ρυθμαπόδοση των χρηστών αυξάνεται.



Σχήμα 24: Συγκριτική ρυθμαπόδοση χρηστών με χρήση NOMA τεχνικής.

### 5.3.2.2 Ρυθμαπόδοση Χρηστών Συστήματος – Throughput System.

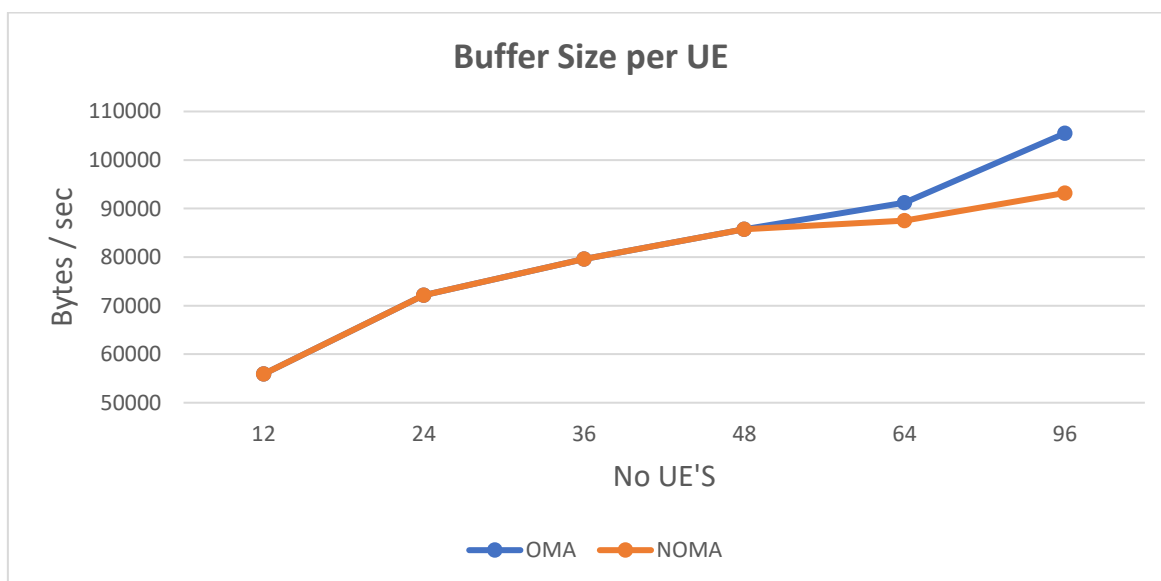
Για τον ίδιο αριθμό χρηστών, η ρυθμαπόδοση του συστήματος, πάντα αυξάνεται, καθώς περισσότεροι χρήστες συνδέονται στο δίκτυο. Στο προηγούμενο σύστημα, στο σχήμα 21, ακόμη και για 64, 96 χρήστες, όπου είναι ένας αριθμός που το σύστημα δε μπορούσε να εξυπηρετήσει, παρατηρείται αύξηση και εκεί στη ρυθμαπόδοση. Διότι, συμπεριλαμβάνεται και ο συνολικός αριθμός των συνδεδεμένων χρηστών στο δίκτυο. Η διαφορά με το NOMA σύστημα, μπορεί να διακριθεί όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ότι για 64 χρήστες η ρυθμαπόδοση είναι μεγαλύτερη από ότι στο ορθογώνιο σύστημα, καθώς τώρα το σύστημα μπορεί να αποδώσει πόρους σε 64 συνδεδεμένους χρήστες, οδηγώντας σε αύξηση της ρυθμαπόδοσης. Το αντίστοιχο συμβαίνει και όταν στο σύστημα συνδεθούν 96 χρήστες.



Σχήμα 25: Συγκριτική ρυθμαπόδοση χρηστών συστήματος με χρήση NOMA τεχνικής.

### 5.3.2.3 Μέγεθος Ουράς Χρηστών – Buffer Size Per UE stem.

Για τον ίδιο αριθμό χρηστών, το μέσο μέγεθος χωρητικότητας του buffer κάθε χρήστη, πάντα αυξάνεται, καθώς περισσότεροι χρήστες συνδέονται στο δίκτυο. Ακόμη και για 64, 96 χρήστες, όπου είναι ένας αριθμός που το ορθογώνιο σύστημα δε μπορεί να εξυπηρετήσει, παρατηρείται αύξηση και εκεί στο μέγεθος του buffer. Όμως, με την εφαρμογή του NOMA στο δίκτυο, το σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει συνδεδεμένους χρήστες περισσότερους από 48, και συνεπώς θα αυξηθεί η ρυθμαπόδοση των συνδεδεμένων χρηστών. Αυτό θα οδηγήσει σε μείωση του μέσου μεγέθους της ουράς αυτών των χρηστών. Όπως παρατηρείται και στο παρακάτω σχήμα, εξυπηρετούνται και οι 64 αλλά και οι 96 χρήστες με αποστολή δεδομένων προς το σταθμό, οπότε ο buffer τους θα έχει διατηρήσει λιγότερα δεδομένα. Οπότε η εκθετική αύξηση που υπήρχε στο ορθογώνιο σύστημα, στο σύστημα αυτό μειώνεται από τους 48 χρήστες και έπειτα. Έτσι, ακόμη και όταν συνδεθούν 64, ή και 96 χρήστες, το NOMA σύστημα μπορεί να τους συνδέσει επιτυχώς, επιτρέποντας τους να στέλνουν δεδομένα, ώστε να μειωθεί η συσσώρευση των buffer τους. Αυτή η μείωση της συσσώρευσης απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα από το σημείο των 48 χρηστών και έπειτα.



Σχήμα 26: Συγκριτικό μέγεθος ουράς χρηστών με χρήση NOMA τεχνικής.

## **Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.**

### **6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων.**

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς αναμένεται να αποτελέσουν το κυρίαρχο περιβάλλον δικτύωσης, όπου οι υπάρχουσες επικοινωνίες αλλά και οι επικοινωνίες του διαδικτύου των αντικειμένων θα αξιοποιηθούν. Χρησιμοποιεί την ήδη υπάρχουσα υποδομή, αλλά ενσωματώνει νέες καινοτόμες τεχνολογίες, όπως η μορφοποίηση δέσμης, και η Μη-Ορθογώνια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν αναδυθεί νέες υπηρεσίες και περιπτώσεις χρήσης όπως η βελτιωμένη ευρύ-ζωνικότητα (eMBB), η μαζική συνδεσιμότητα συσκευών τύπου μηχανών (mMTC), και οι υπέρ αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (URLLC). Ένα μεγάλο εύρος υπηρεσιών όπου μπορεί να αξιοποιηθεί από τις ευρύ-ζωνικές συνδέσεις αλλά και από το διαδίκτυο των αντικειμένων.

Από τη πλευρά του διαδικτύου των αντικειμένων, σήμερα οι τεχνολογίες δικτύωσης που χρησιμοποιεί για την ανταλλαγή δεδομένων στηρίζονται στο πρότυπο 4G IoT, με τεχνολογίες όπως το eMTC, και το NarrowBand-IoT. Με την ανάπτυξη του δικτύου 5G όμως, το διαδίκτυο των αντικειμένων θα μεταβεί στα δίκτυα πέμπτης γενιάς. Πρακτικά, οι δύο αυτές τεχνολογίες επικοινωνίας, θα συνεχίσουν να εξελίσσονται στη πορεία προς το 5G, σε κάθε έκδοση (Release) της 3GPP. Έτσι, στο μέλλον πλέον όλες οι επικοινωνίες mMTC θα αξιοποιούν το πλέον σύγχρονο πρότυπο 5G-IoT NR. Στη προοπτική αυτή, η νέα Μη-Ορθογώνια ασύρματη διεπαφή που αναμένεται να ενσωματωθεί στα δίκτυα πέμπτης γενιάς, προσφέρει μαζική συνδεσιμότητα συσκευών καθώς και αυτόνομη λειτουργία μετάδοσης, με δυνατότητες εφαρμογής στο 5G-IoT. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε μια μελέτη του διαδικτύου των αντικειμένων, στο περιβάλλον κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν, προσομοίωση σε δικτυακό επίπεδο του προτύπου NB-IoT σε περιβάλλον 5G, με χρήση της Μη-Ορθογώνιας τεχνικής με σκοπό τη ανάδειξη χρησιμότητας αυτής της τεχνικής στο 5G-IoT, για την αύξηση και υποστήριξη του μαζικού πλήθους συσκευών. Μέσω της υλοποίησης της εργασίας, παρατηρείται ότι επικοινωνία των συσκευών IoT με ορθογώνιους πόρους περιορίζεται στην εξυπηρέτηση στους 48 χρήστες, ενώ με χρήση Μη-Ορθογώνιας τεχνικής, ο αριθμός μπορεί να διπλασιαστεί, προς υποστήριξη ενός mMTC σεναρίου με αύξηση της ρυθμισμένης των συσκευών.

Σημαντική παράμετρος του Μη-Ορθογώνιου συστήματος, αποτελεί η τεχνική ομαδοποίησης χρηστών, σχηματίζοντας ομάδες των δύο μεταξύ τους. Είναι αδύνατο όλοι χρήστες στο δίκτυο να υλοποιήσουν τη Μη-Ορθογώνια τεχνική, επειδή κάτι τέτοιο θα προκαλούσε φαινόμενα παρεμβολής μεγάλης έντασης. Έτσι, η μέθοδος User Clustering, μειώνει τις δυνατές παρεμβολές εφαρμόζοντας τη Μη-Ορθογώνια τεχνική μόνο στους χρήστες κάθε ομάδας, ενώ οι ομάδες δεσμεύονται με ορθογώνιους πόρους. Σημαντική βελτίωση υπήρξε έπειτα από την εφαρμογή της ομαδοποίησης χρηστών ανά δύο, καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων χρηστών μπόρεσε και αυξήθηκε ικανοποιώντας την απαίτηση για mMTC IoT περιβάλλον.

### **6.2 Μελλοντική έρευνα.**

Τα αποτελέσματα της παρούσα διπλωματικής εργασίας μπορούν να επεκταθούν και να μελετηθούν μελλοντικά. Η έκδοση 17 (3GPP Release 17) που αναμένεται να ολοκληρωθεί μετά το 2020, θα φέρει νέες τεχνολογικές αλλαγές στα πρότυπα επικοινωνιών που θα αποτελέσουν το μελλοντικό 5G-IoT, καθώς θα μεταβούν στη μάντα του 5G NR δικτύου. Οπότε θα υπάρξουν

νέα σενάρια ή και μοντέλα, με βάση τις νέες εξελίξεις των προτύπων. Ακόμη αναμένεται περαιτέρω βελτιστοποίηση της NOMA τεχνικής με βάση την ισχύ, μιας και δεν έχει πλήρως προτυποποιηθεί ακόμη από τους διεθνείς και ερευνητικούς φορείς. Στη συνέχεια, θα μπορούσε να μελετηθεί η ομαδοποίηση χρηστών για παραπάνω από 2 χρήστες, σχηματίζοντας ομάδες πολλών χρηστών. Κάτι τέτοιο θα είχε επίπτωση στο ρυθμό απόδοσης της κάθε ομάδας, οπότε θα αποτελούσε ενδιαφέρουσα μελέτη. Επιπλέον, μια περαιτέρω μελέτη όσο αφορά το πρότυπο IoT, θα μπορούσε να είναι η προσομοίωση της τεχνολογίας eMTC του 4G-IoT στη πορεία προς το 5G-IoT.

## Βιβλιογραφία

- [1] T. Barnett, S. Jain, U. Andra, and T. Khurana, “Cisco VNI Global Complete Forecast Update,” no. December, pp. 2017–2022, 2018.
- [2] Qualcomm, “Designing 5G NR”, *The 3GPP Release 15 global standard for a unified, more capable 5G air interface*, @qualcomm\_tech, September 2018.
- [3] 5GPPP Architecture Working Group, “view on 5G architecture,” *White Pap.*, no. June, 2019.
- [4] Next Generation Mobile Networks Alliance 5G Initiative, “5G White Paper,” *A Deliv. by NGMN Alliance*, p. 124, 2015.
- [5] A. Neal, “5G End-to-End Architecture Framework by NGMN Alliance Project: P1-Requirements and Architecture Editor / Submitter,” 2017.
- [6] GSMA, “Road to 5G : Introduction and Migration,” *Gsma*, no. April, p. 54, 2018.
- [7] Y. Lin, L. Shao, Z. Zhu, Q. Wang, and R. K. Sabhikhi, “Wireless network cloud: Architecture and system requirements,” *IBM J. Res. Dev.*, vol. 54, no. 1, 2010.
- [8] W. Paper, “Cloud RAN Architecture for 5G Cloud RAN Architecture for 5G A Telefónica White Paper Prepared in collaboration with Ericsson WHITE PAPER Cloud RAN Architecture for 5G,” pp. 1–24.
- [9] Architecture Network Densification image based IEEE Paper, <https://www.semanticscholar.org/paper/Network-densification%3A-Challenges-and-opportunities-Romanous-Bitar/1bd9b4086fcbd9432b423f6a0bcfdcb555b3273d/figure/0>
- [10] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, and G. Durisi, “5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55765–55779, 2018.
- [11] P. Arnold and D. Von Hugo, “Future integrated communication network architectures enabling heterogeneous service provision,” *Adv. Radio Sci.*, vol. 16, pp. 59–66, 2018.
- [12] G. Architecture and W. Group, “View of 5G Architecture,” no. December, p. 140, 2017.
- [13] N. Al-Falahy and O. Y. Alani, “Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities,” *IT Prof.*, vol. 19, no. 1, pp. 12–20, 2017.
- [14] A. Benjebbour, Y. Kishiyama, Y. Okumura, “Field Trials of Improving Spectral Efficiency by Using a Smartphone-sized NOMA Chipset”, NTT DOCOMO, Technical Journal Vol. 20, No. 1, 2018.
- [15] S. M. R. Islam, M. Zeng, and O. A. Dobre, “NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency,” vol. 1, no. 2, pp. 1–6, 2017.
- [16] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, “A survey of non-orthogonal multiple access for 5G,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 2018.
- [17] P. Sethi and S. R. Sarangi, “Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications,” *J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2017, 2017.
- [18] M. Bilal, “A Review of Internet of Things Architecture, Technologies and Analysis Smartphone-based Attacks Against 3D printers”, Submitted on 2017.
- [19] M. Aazam, S. Zeadally, and K. A. Harras, “Fog Computing Architecture, Evaluation, and Future Research Directions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 5, pp. 46–52, 2018.
- [20] S. K. Datta and C. Bonnet, “Next-Generation, Data Centric and End-to-End IoT Architecture Based on Microservices,” *2018 IEEE Int. Conf. Consum. Electron. - Asia, ICCE-Asia 2018*, pp. 206–212, 2018.

- [21] C. F. Pasluosta, H. Gassner, J. Winkler, J. Klucken, and B. M. Eskofier, “An emerging era in the management of Parkinson’s disease: Wearable technologies and the internet of things,” *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, vol. 19, no. 6, pp. 1873–1881, 2015.
- [22] A. A. R. Madushanki, M. N. Halgamuge, W. A. H. S. Wirasagoda, and A. Syed, “Adoption of the Internet of Things (IoT) in agriculture and smart farming towards urban greening: A review,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 10, no. 4, pp. 11–28, 2019.
- [23] IoT Applications and Use Cases image, <https://medium.com/@rinu.gour123/top-10-uses-of-the-internet-of-things-e93e021e0cad>
- [24] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, “A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619–3647, 2017.
- [25] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, “Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis under Large-Scale, High-Density Conditions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816–35825, 2019.
- [26] Manpreet and J. Malhotra, “ZigBee technology: Current status and future scope,” 2015 Int. Conf. Comput. Comput. Sci. ICCCS 2015, pp. 163-169, 2015.
- [27] S. Surendra Tambe, “Wireless Technology in Networks,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 5, no. 7, pp. 1–3, 2015.
- [28] 3GPP, “Cellular System Support for Ultra Low Complexity and Low Throughput Internet of Things”, TR 45.820, V13.1.0, 2015.
- [29] M. Madhumitha, “A survey on LPWAN technologies in content to IoT applications,” vol. 5, no. February, pp. 153–159, 2019.
- [30] GSMA, “LTE-M DEPLOYMENT GUIDE TO BASIC FEATURE SET REQUIREMENTS”, JUNE 2019.
- [31] GSMA, “NB-IOT DEPLOYMENT GUIDE TO BASIC FEATURE SET REQUIREMENTS”, JUNE 2019.
- [32] C. B. Mwakwata, H. Malik, M. M. Alam, Y. Le Moullec, S. Parand, and S. Mumtaz, “Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives,” *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 11, 2019.
- [33] Qualcomm, “Expanding the 5G NR ecosystem”, *5G NR roadmap in 3GPP Release 16 and beyond*, @qualcomm\_tech, September 2018.
- [34] 3GPP, “Study on Cellular Internet of Things (IoT) support and evolution for the 5G System”, TR 23.724, V16.1.0, 06-2019.
- [35] 3GPP TS 38.300, “5G; NR; Overall description; Stage-2,” *Etsi Ts 138 300 - V15.3.1*, vol. 15.3.1, p. 89, 2018.
- [36] M. Polese, M. Giordani, and M. Zorzi, “3GPP NR: the standard for 5G cellular networks,” pp. 1–10.
- [37] 3GPP, “Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR”, TR 38.812, V16.0.0, 2018.
- [38] T. M. Cover, “Broadcast channels,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-18, pp. 2–14, Jan. 1972.
- [39] S. Singh, “Analysis of NOMA for Future Cellular Communication,” *2019 3rd Int. Conf. Trends Electron. Informatics*, no. Icoei, pp. 389–395, 2019.
- [40] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of information theory*, John Wiley & Sons, 2012.
- [41] D. Tse and V. Pramod, “Fundamentals of wireless communication,” *Fundam. Wirel. Commun.*, vol. 9780521845, pp. 1–564, 2005.



- [42] Karuna Gayatri K., Loshni T., Malaravan A., Darwin R., “A REVIEW ON POTENTIAL SOLUTIONS OF NOMA”, Vol. 117, No. 22, 2017.
- [43] C. Wang, Y. Wu, Y. Chen, and A. Bayesteh, “Comprehensive Study of NOMA Schemes,” *2019 IEEE Int. Conf. Commun. Work. (ICC Work.*, pp. 1–5, 2019.
- [44] L. Lv, J. Chen, Q. Ni, Z. Ding, and H. Jiang, “Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 4, pp. 188–195, 2018.
- [45] H. Tabassum, M. S. Ali, E. Hossain, M. J. Hossain, and D. I. Kim, “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in Cellular Uplink and Downlink: Challenges and Enabling Techniques,” pp. 1–8, 2016.
- [46] K. Higuchi, A. Benjebbour, and S. Member, “Non-orthogonal Multiple Access ( NOMA ) with Successive,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. Vol. E98-B, no. 3, pp. 403–414, 2015.
- [47] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroglu, and S. M. Sait, “A Survey of Rate-optimal Power Domain NOMA Schemes for Enabling Technologies of Future Wireless Networks,” vol. XX, no. Xx, pp. 1–25, 2019.
- [48] J. Umehara, Y. Kishiyama, and K. Higuchi, “Enhancing user fairness in non-orthogonal access with successive interference cancellation for cellular downlink,” *2012 IEEE Int. Conf. Commun. Syst. ICCS 2012*, pp. 324–328, 2012.
- [49] D. J. Cichon, I. B. P. P. Gmbh, T. Kürner, and E. M. Gmbh, “Propagation Prediction Models.”
- [50] Y. Singh, “Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 59, no. 11, pp. 37–41, 2012.
- [51] X. Shao, C. Yang, D. Chen, N. Zhao, and F. Richard Yu, “Dynamic IoT Device Clustering and Energy Management with Hybrid NOMA Systems,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 10, pp. 4622–4630, 2018.
- [52] M. S. Ali, H. Tabassum, and E. Hossain, “Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6325–6343, 2016.