



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Ψηφιακός Πολιτισμός, Έξυπνες Πόλεις, IoT και Προηγμένες Ψηφιακές Τεχνολογίες»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Μελέτη σύγχρονων αρχιτεκτονικών ασύρματης δικτύωσης και αξιολόγηση αλγορίθμων κατανομής πόρων Study of modern architectures of wireless networking and evaluation of resource allocation algorithms.
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Ευσταθία Γκορίτσα
Πατρώνυμο	Λεωνίδας
Αριθμός Μητρώου	ΨΠΟΛ19012
Επιβλέπων	Εμμανουήλ Σκόνδρας, Διδάσκων ΠΜΣ

Ημερομηνία Παράδοσης **Ιούλιος 2023**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Δρ. Εμμανουήλ Σκόνδρας
Διδάσκων ΠΜΣ

Δημήτριος Δ. Βέργαδος
Καθηγητής

Χρήστος – Νικόλαος
Αναγνωστόπουλος
Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία σχετίζεται με την ανάλυση της 5^{ης} γενιάς ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας και των δυνατοτήτων που μπορεί να προσφέρει αυτή η εξέλιξη της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας καθώς τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G είναι οι υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, η χαμηλή καθυστέρηση, η μεγάλη χωρητικότητα και τέλος η υψηλή αξιοπιστία συνδεσιμότητας. Το παρόν σύγγραμμα χωρίζεται σε 6 κεφάλαια.

Το 1^ο κεφάλαιο αναλύει την πορεία των δικτύων στις τηλεπικοινωνίες. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή από την 1^η έως την 4^η γενιά με εμβάθυνση στις τεχνολογίες και την αρχιτεκτονική της 4^{ης} γενιάς καθώς και ελλείψεις αυτής που οδήγησαν στην αναζήτηση και κατ' επέκταση στην εξέλιξη της 5^{ης} γενιάς.

Το 2^ο κεφάλαιο κάνει μια εισαγωγή στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, αναφέρει την αρχιτεκτονική και τις τεχνολογίες των 5G δικτύων επιγραμματικά καθώς επίσης παραθέτει τις μελέτες και τα πειράματα που υλοποιήθηκαν στην πορεία προς την εξέλιξη αυτής της νέας γενιάς. Τέλος στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται οι υπηρεσίες αλλά και οι απαιτήσεις αυτής της γενιάς.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται οι τεχνολογίες των 5G δικτύων και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών.

Το 4^ο κεφάλαιο αναλύει την υλοποίηση της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μέσω αλγορίθμων κατανομής πόρων με χρήση κεραιών LTE – A PRO.

Το 5^ο κεφάλαιο αναφέρει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη και ανάλυση των 5G δικτύων και την προσομοίωση αυτών. Τέλος το 6^ο κεφάλαιο αφορά μια αναφορά στην μελλοντική έρευνα για την επόμενη γενιά δικτύων, τη γενιά 6G.

Συνολικά, το 5G δίκτυο προσφέρει εξαιρετική απόδοση και αυξημένες δυνατότητες σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων. Αναμένεται να επιτρέψει την ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών και εφαρμογών που θα επηρεάσουν τον τρόπο που επικοινωνούμε, εργαζόμαστε και ζούμε.

Abstract

The present thesis relates to the analysis of the 5th generation of wireless mobile telecommunications networks and the capabilities that this evolution of telecommunication technology can offer, as the key characteristics of 5G include high data transmission speeds, low latency, high capacity, and high reliability of connectivity. This manuscript is divided into 6 chapters.

Chapter 1 analyzes the evolution of networks in telecommunications. It provides a historical overview from the 1st to the 4th generation, with a focus on the technologies and architecture of the 4th generation and its shortcomings that led to the search and, consequently, the evolution of the 5th generation.

Chapter 2 introduces the concepts of 5th generation networks, outlining their architecture and technologies. It also presents the studies and experiments conducted along the way towards the development of this new generation. Finally, Chapter 2 analyzes the services and requirements of this generation.

Chapter 3 examines the technologies of 5G networks and their advantages and disadvantages.

Chapter 4 discusses the implementation of the simulation conducted in the context of this thesis using resource allocation algorithms with LTE-A PRO antennas.

Chapter 5 presents the conclusions derived from the study and analysis of 5G networks and their simulation. Finally, Chapter 6 provides a reference to future research for the next generation of networks, the 6G.

Overall, the 5G network offers excellent performance and increased capabilities compared to previous generations of networks. It is expected to enable the development of innovative services and applications that will impact the way we communicate, work, and live.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πίνακας περιεχομένων

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	7
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	9
1.1. Εισαγωγή.....	9
1.2. Η ιστορική αναδρομή των δικτύων και η πορεία εξέλιξης τους	9
1.2.1. Δίκτυα 1 ^{ης} γενιάς	9
1.2.2. Δίκτυα 2 ^{ης} γενιάς	10
1.2.3. Δίκτυα 3 ^{ης} γενιάς	10
1.2.4. Δίκτυα 4 ^{ης} γενιάς	11
1.2.4.1. Εισαγωγικές έννοιες για τα 4G δίκτυα.....	11
1.2.4.2. Εμφάνιση και εξέλιξη των 4G δικτύων	11
1.2.4.3. Αρχιτεκτονική 4G δικτύων	13
1.2.4.4. Τεχνολογίες 4G δικτύων.....	14
1.2.4.5. Κλάσεις υπηρεσίας του LTE	18
1.2.4.6. Carrier Aggregation	20
1.2.4.7. Βασικές ελλείψεις 4G δικτύων.....	22
Κεφάλαιο 2 – Δίκτυα 5 ^{ης} γενιάς.....	23
2.1. Εισαγωγικές έννοιες για τα 5G δίκτυα.....	23
2.1.1. Εμφάνιση και εξέλιξη των 5G δικτύων	23
2.1.2. Αρχιτεκτονική 5G δικτύων	27
2.1.3. Τεχνολογίες 5G δικτύων.....	28
2.1.4. Μελέτες και πειράματα για τα 5G δίκτυα	28
2.2. Απαιτήσεις και δυνατότητες των 5G δικτύων	31
2.3. Υπηρεσίες των 5G δικτύων	34
2.4. Σύνοψη Γενεών	38
Κεφάλαιο 3 – Τεχνολογίες 5G	40
3.1. Massive MIMO	40
3.2. Millimeter Wave.....	42
3.3. Device To Device Communication.....	43
3.4. Energy Efficient Communications	45
3.5. Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα (HetNets).....	47

3.6.	Internet Of Things (IoT)	48
3.7.	Software Defined Networking (SDN)	50
3.8.	Network Function Virtualization (NFV)	51
3.9.	Big Data and Mobile Cloud Computing	53
3.9.1	Delivery Models του Cloud.....	55
3.10.	Cognitive Radio (CR).....	61
	Κεφάλαιο 4 – Πειραματικά αποτελέσματα	64
4.1.	Ο προσομοιωτής δικτύων NS-3	64
4.2.	Οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων	65
4.3.	Οι υπηρεσίες των χρηστών και οι παράμετροι αυτών	66
4.4.	Η ανάλυση των αλγορίθμων	67
4.1.	Conversational Voice.....	67
4.2.	Conversational Video	69
4.3.	Autonomous Navigation	71
4.4.	Web Browsing	73
	Κεφάλαιο 5 – Το 5G στο αστικό περιβάλλον	76
5.1	Η κάλυψη των κεραιών 5G μέσα σε μια πόλη.....	76
	Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα	77
	Κεφάλαιο 7 - Μελλοντική ερεύνα.....	78
7.1	Εισαγωγή στα 6G δίκτυα.....	78
7.2	Βασικά χαρακτηριστικά των 6G δικτύων.....	79
7.3	Η επικοινωνία Terahertz	80
7.4	Οι προκλήσεις για το φάσμα των Terahertz	81
7.5	Τα σενάρια εφαρμογής.....	81
	Βιβλιογραφία	83

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1G	Πρώτη γενιά (First Generation) κινητής τηλεφωνίας
2G	Δεύτερη γενιά (Second Generation) κινητής τηλεφωνίας
2.5G	2.5 γενιά (Second and a half Generation) κινητής τηλεφωνίας
2.75G	2.75 γενιά κινητής τηλεφωνίας
3D	3rd Definition
3G	Τρίτη γενιά (Third Generation) κινητής τηλεφωνίας
4G	Τέταρτη γενιά (Fourth Generation) κινητής τηλεφωνίας
5G	Πέμπτη γενιά (Fifth Generation) κινητής τηλεφωνίας
APIs	Application Program Interfaces
CDMA	Code Division Multiple Access
CR	Cognitive Radio
D2D	Device-to-Device
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GBR	Guaranteed Bit Rate
GPS	Global Positioning System
GSM	Groupe Special Mobile
IETF	Internet Engineering Task Force
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LAN	Local Area Networks
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MISO	Multiple-Input and Single-Output
MMS	Multimedia Messaging Service
NFV	Network Function Virtualization
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PDC	Personal Digital Cellular
PUs	Primary Users
QCI	Quality of Services Class Identifier
QoS	Quality of Services
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access

SDN	Software Defined Networking
SIMO	Single-Input and Multiple-Output
SISO	Single-Input and Single-Output
SMS	Short Message Service
SUs	Secondary Users
TDMA	Time Division Multiple Access
UDN	Ultra-Dense Network
UE	User Equipment
VM	Virtual Machine
VNFs	Virtual Network Functions
WiFi	Wireless Fidelity

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή

Στην εποχή που διανύουμε τα 5G δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι ευρέως γνωστά και αποτελούν σπουδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, γίνονται αναφορές για αυτά σε έρευνες, επιστημονικά άρθρα και συνέδρια παγκοσμίως. Τα 5G δίκτυα πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο τόσο στην καθημερινότητα των ανθρώπων τις επόμενες δεκαετίες όσο και στην επιστημονική κοινότητα σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η καινοτομία αυτή είναι πολυδιάστατη και εξελίσσεται σημαντικά διότι τα οφέλη της θα είναι τεράστια τόσο στις υπηρεσίες προς τους πολίτες όσο και σε διάφορους τομείς όπως είναι η εκπαίδευση, η έρευνα, ο πολιτισμός κ.α., επίσης χάρη στην 5G τεχνολογία δημιουργούνται προοπτικές ανάπτυξης σε επενδύσεις και σε νέες θέσεις εργασίας. Σύμφωνα με έρευνες που διεξάγονται, τα 5G κινητά δίκτυα πρόκειται να προσφέρουν πολλές νέες υπηρεσίες στο μέλλον με υψηλές ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση. Επιπλέον εκτός από τις υπάρχουσες συσκευές όπως smartphones, υπολογιστές και tablets υποστηρίζουν και νέες «έξυπνες» συσκευές καθώς επίσης και την διασύνδεση μεταξύ τους (Machine-to-Machine) αλλά και το Internet of Things (IoT).

Επιπρόσθετα, η 5G τεχνολογία προσφέρει και άλλες καινοτομίες με την έλευση της, κάποιες από αυτές είναι η πολύ καλή κάλυψη σήματος, η ομοιόμορφη συνδεσιμότητα η οποία έχει σπουδαία βαρύτητα σε βιομηχανικές χρήσεις και η προσαρμογή όπου απαιτείται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το συμπέρασμα που προκύπτει από όλα τα παραπάνω είναι πως αυτή η νέα τεχνολογία είναι χρήσιμη σε πολλά φάσματα της ζωής μας και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τομείς της καθημερινότητας και της εξέλιξης μας.

Έτσι τόσο στην καθημερινότητα όσο και στην επαγγελματική ζωή ενός ανθρώπου τα δίκτυα 5G κατέχουν σημαντικό ρόλο στην ομαλότερη, ευκολότερη και αρμονικότερη διεξαγωγή δραστηριοτήτων και άλλων ενασχολήσεων.

1.2. Η ιστορική αναδρομή των δικτύων και η πορεία εξέλιξης τους

1.2.1. Δίκτυα 1^{ης} γενιάς

Τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς (1G) εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ήταν αναλογική τεχνολογία και σχεδιάστηκε αποκλειστικά για φωνητικές κλήσεις, χωρίς σχεδόν καμία αναφορά σε υπηρεσίες δεδομένων. Αρχικά η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε στο Τόκιο το 1979 όπου και αναπτύχθηκε το πρώτο εμπορικό κινητό δίκτυο επικοινωνίας. Στη συνέχεια το 1981 αναπτύχθηκε στις Σκανδιναβικές χώρες και μετέπειτα το 1983 στην Αμερική. [1]

Η αμερικανική εταιρεία βιομηχανικής έρευνας και επιστημονικής ανάπτυξης Bell Labs, η οποία ανήκει στην φινλανδική εταιρεία NOKIA ανέπτυξε το 1984 μια σύγχρονη εμπορική κυψελοειδή τεχνολογία, χρησιμοποίησε κεντρικά ελεγχόμενους σταθμούς βάσης (κυψέλες) ο καθένας από τους οποίους παρείχε υπηρεσίες σε μία μικρή περιοχή (κελί). Σε ένα κυψελοειδές σύστημα, ένα σήμα, μεταξύ ενός σταθμού βάσης (σημείο κυψέλης) και ενός τερματικού (τηλεφώνου), το μόνο που χρειάζεται είναι να είναι αρκετά ισχυρό για να φτάσει μεταξύ των δύο, έτσι ώστε το ίδιο κανάλι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα για ξεχωριστές συνομιλίες σε διαφορετικά κελιά.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της 1G τεχνολογίας είναι η χαμηλή ποιότητα μετάδοσης της φωνής με πολλά προβλήματα σύνδεσης, το χαμηλό επίπεδο ασφάλειας, η έλλειψη υπηρεσιών, η χαμηλή διάρκεια μπαταρίας της κινητής συσκευής, η περιορισμένη χωρητικότητα και οι ογκώδεις και βαριές συσκευές.

1.2.2. Δίκτυα 2^{ης} γενιάς

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάγκη που προέκυψε για βελτιστοποίηση του 1G, δημιουργήθηκαν τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς (2G), εμφανίστηκαν αρχικά το 1991 στην Φινλανδία έχοντας το GSM πρότυπο, το οποίο ακολουθεί την κυψελωτή λογική δικτύου. Σε σύγκριση με τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς, αυτά της 2^{ης} γενιάς είναι δίκτυα ψηφιακής τεχνολογίας, υποστηρίζουν ψηφιακή μετάδοση φωνής και δεδομένων καθώς επίσης παρέχουν αποδοτικότερη χρήση του φάσματος συχνοτήτων και χαμηλή ταχύτητα δεδομένων (από 9,6 kbps έως 19,2 kbps). Εκτός όμως από την ψηφιακή μετάδοση φωνής τα 2G δίκτυα προσφέρουν και υπηρεσία μηνυμάτων κειμένου (SMS – Short Message Service) και εικόνας (MMS – Multimedia Messaging Service).

Κάποια πλεονεκτήματα των 2G δικτύων είναι αρχικά ότι τα ψηφιακά σήματα απαιτούν λιγότερη ενέργεια και κατά συνέπεια μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της κινητής μπαταρίας, επίσης βελτιώνεται η σαφήνεια της φωνής και μειώνεται ο θόρυβος της γραμμής χάρη στην ψηφιακή κωδικοποίηση, τέλος ένα σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ότι παρέχουν μυστικότητα και ασφάλεια στις κλήσεις φωνής αλλά και δεδομένων. Τα 2G δίκτυα είναι πολύ αποτελεσματικότερα ως προς το φάσμα, κάτι το οποίο επιτρέπει πολύ υψηλότερα επίπεδα διείσδυσης της κινητής τηλεφωνίας.

Οι 2G τεχνολογίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Time Division Multiple Access (TDMA)
- Code Division Multiple Access (CDMA) με βάση τα πρότυπα ανάλογα με τον τύπο πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα 2G δίκτυα έχουν ως κύριο πρότυπο το GSM (Global Systems for Mobile Communication), το οποίο είχε χρήση αρχικά στην Ευρώπη, πλέον όμως χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις χώρες του κόσμου. Η χρήση της 2^{ης} γενιάς δικτύων ξεπερνάει παγκοσμίως το 80% των συνδρομητών. Υπάρχουν και άλλα πρότυπα των 2G δικτύων όμως έχουν πολύ μικρότερη χρήση σε παγκόσμιο επίπεδο, κάποια από αυτά είναι το Interim Standard-95 (IS-95) aka cdmaOne, το οποίο λειτουργεί με βάση το CDMA 2000 και το PDC (Personal Digital Cellular) που βασίζεται στο TDMA.

Τα 2G δίκτυα έχουν κάποιες μεταβατικές γενιές οι οποίες προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες, αυτές είναι η 2,5G και η 2,75G. Το πρώτο βήμα προς την εξέλιξη της τεχνολογίας 3G επετεύχθη στα τέλη της δεκαετίας του 1990 με την ανάπτυξη της τεχνολογίας 2,5G, η οποία εισήγαγε για πρώτη φορά την υπηρεσία GPRS (General Packet Radio Service), ένα ασύρματο πρότυπο δεδομένων. Χάρη στην 2,5G τεχνολογία βελτιώθηκε η ταχύτητα δεδομένων και δόθηκε πρόσβαση στο πρωτόκολλο ασύρματων εφαρμογών (WAP), στα μηνύματα πολυμέσων (MMS) και σε υπηρεσίες επικοινωνίας μέσω Internet όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail). Αργότερα η γενιά 2,75G βασίστηκε στην τεχνολογία EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution), ένα εξαιρετικά σημαντικό πλεονέκτημα αυτής τεχνολογίας είναι η δυνατότητα ταχείας μετάδοσης δεδομένων και ταχύτητας πληροφοριών (έως 384 Kbit/s). [1]

Δύο σημαντικά μειονεκτήματα των 2G δικτύων είναι πως αν σε μια περιοχή δεν υπάρχει κάλυψη δικτύου τότε τα κινητά τηλέφωνα δεν λειτουργούν, επίσης δεν υποστηρίζουν πολυμεσικά δεδομένα όπως βίντεο.

1.2.3. Δίκτυα 3^{ης} γενιάς

Η ζήτηση για υπηρεσίες δεδομένων άρχισε να αυξάνεται εξαιτίας της χρήσης κινητών τηλεφώνων στην καθημερινότητα των ανθρώπων και επίσης οι σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες ήταν απαραίτητες στους χρήστες, έτσι κατέστη σαφές πως η τεχνολογία των 2G δικτύων δεν επαρκούσε πλέον. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε η επόμενη γενιά τεχνολογίας γνωστή ως 3G.

Η 3^η γενιά κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκε το 1998 με σκοπό να προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και καλύτερη ποιότητα φωνητικών κλήσεων, συνδυάζει internet, ασύρματη επικοινωνία και άλλες πολυμεσικές επικοινωνίες. Χάρη στα 3G δίκτυα αναπτύχθηκαν

εφαρμογές όπως το GPS (Global Positioning System), Mobile TV κ.α. Η ταχύτητα μεταφοράς πληροφοριών στα 3G δίκτυα είναι τουλάχιστον 200Kbps και αργότερα αναπτύσσεται σε 3,5G και 3,75G.

Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι τα υψηλά έξοδα που απαιτούνται για τις άδειες των 3G υπηρεσιών, η απαίτηση εύρους ζώνης καθώς επίσης τα ακριβά κινητά τηλέφωνα που υποστηρίζουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία.

1.2.4. Δίκτυα 4^{ης} γενιάς

1.2.4.1. Εισαγωγικές έννοιες για τα 4G δίκτυα

Με στόχο να προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μεγάλη χωρητικότητα (εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών ταυτόχρονα ανά κυψέλη) και περισσότερες εφαρμογές και υπηρεσίες τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς αναπτύχθηκαν κατά τις αρχές της δεκαετίας του 2010. Με την ανάπτυξη αυτών των δικτύων οι χρήστες είναι σε θέση να χρησιμοποιούν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες όπως videoconference, 3D games, αποστολή και λήψη αρχείων μεγάλου μεγέθους σε λιγότερο χρόνο, HD video κ.α.

Η διαφορά των 4G δικτύων με τις προηγούμενες γενιές είναι η διαφοροποίηση στην υπηρεσία τηλεφωνίας, η οποία δεν γίνεται με κυκλώματα μεταγωγής αλλά με επικοινωνία βασισμένη στο πρωτόκολλο Internet (IP). Επίσης τα 4G δίκτυα ενσωματώνουν στο συνολικό δίκτυο τηλεφωνίας ασύρματα LANs (Local Area Networks). Ως δίκτυο LAN θεωρούμε ένα σύνολο συνδεδεμένων υπολογιστών, σε περιορισμένη γεωγραφική περιοχή π.χ. ενός κτηρίου ή κοντινών κτηρίων. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιείται για να συνδέει προσωπικούς υπολογιστές και σταθμούς εργασίας σε επιχειρήσεις με στόχο την ανταλλαγή πληροφοριών και την κοινή χρήση συσκευών.

1.2.4.2. Εμφάνιση και εξέλιξη των 4G δικτύων

Η 4η γενιά κινητής τηλεφωνίας (4G) αναφέρεται σε μια τεχνολογική γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές κινητής τηλεφωνίας, όπως η 2G και η 3G. Η τεχνολογία 4G επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες, ιδίως για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης όπως βίντεο, streaming και κινητά δεδομένα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 4G (4th Generation) κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνουν:

- Υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων: Το 4G προσφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, που επιτρέπουν γρήγορη πρόσβαση σε διαδικτυακές εφαρμογές, βίντεο, streaming και άλλες υπηρεσίες υψηλής ευρυζωνικής απόδοσης.
- Υψηλή απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση: Το 4G προσφέρει βελτιωμένη απόδοση και χαμηλή καθυστέρηση (latency) σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, επιτρέποντας ομαλή και απρόσκοπτη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.
- Μεγάλη χωρητικότητα δικτύου: Η τεχνολογία 4G διαθέτει αυξημένη χωρητικότητα δικτύου, επιτρέποντας τη συνδυασμένη μετάδοση φωνής, δεδομένων και πολυμέσων με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.
- Υποστήριξη IP-βασισμένων υπηρεσιών: Το 4G χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Internet Protocol (IP) για τη μετάδοση δεδομένων, επιτρέποντας την ομαλή συνέργεια με το διαδίκτυο.

Η πορεία εξέλιξης του 4G περιλαμβάνει την ανάπτυξη και υιοθέτηση πρόσθετων τεχνολογικών προτύπων, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου και την παροχή νέων υπηρεσιών. Οι βασικές εξελίξεις που έχουν συμβεί στο πλαίσιο του 4G περιλαμβάνουν τα εξής:

- LTE (Long-Term Evolution): Το πρωτόκολλο LTE αποτελεί το βασικό πρότυπο της τεχνολογίας 4G. Η εισαγωγή του LTE βελτίωσε σημαντικά τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και την απόδοση του δικτύου.
- LTE-Advanced (LTE-A): Το LTE-Advanced αποτελεί μια προηγμένη έκδοση του LTE και προσφέρει ακόμα υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μεγαλύτερη χωρητικότητα και βελτιωμένη απόδοση σε πολυσύνθετα περιβάλλοντα.
- LTE-Advanced Pro (LTE-A Pro): Το LTE-Advanced Pro είναι μια περαιτέρω εξέλιξη του LTE και προσφέρει προηγμένες λειτουργίες, όπως υποστήριξη για τη σύνδεση των πραγματικών χρονοπρογραμμάτων (Real-Time Communication), χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία.

Η μελέτη της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) έδειξε τα εξής για την πρόσβαση κινητών τηλεφώνων σε 4G δίκτυα παγκοσμίως από το 2016 και μετά:

- Αύξηση του αριθμού των ανθρώπων με πρόσβαση σε 4G: Σύμφωνα με τη μελέτη, μέχρι τα τέλη του 2016, περίπου 3,6 δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο είχαν πρόσβαση σε κινητά δίκτυα επικοινωνίας. Αυτός ο αριθμός αναμενόταν να αυξηθεί ακόμα περισσότερο στα επόμενα έτη.
- Αύξηση της προβολής ιστοσελίδων από κινητές συσκευές: Τον Φεβρουάριο του 2017, οι κινητές συσκευές αντιπροσώπευαν το 49,7% των προβολών ιστοσελίδων παγκοσμίως. Αυτό δείχνει την αυξημένη χρήση κινητών συσκευών για πρόσβαση στο διαδίκτυο.
- Κινητές αγορές με υψηλή κίνηση στο Internet: Η μελέτη αποκάλυψε ότι η Κένυα κατέγραψε το υψηλότερο ποσοστό κίνησης στο Internet από κινητές συσκευές, ακολουθούμενη από τη Νιγηρία, την Ινδία, τη Σιγκαπούρη, την Ινδία, την Ινδονησία και την Γκάνα.
- Η Αμερική και η Ευρώπη έχουν το υψηλότερο ποσοστό διείσδυσης στην αγορά ευρυζωνικών συνδρομών, περίπου 78,2% και 76,6% αντίστοιχα, ενώ το 2016 ο παγκόσμιος μέσος όρος ήταν σχεδόν 50%. [2], [3]

Η χρήση του Internet πρόκειται να έχει ένα πολλά υποσχόμενο μέλλον, καθώς προβλέπεται ότι η παγκόσμια κίνηση κινητών δεδομένων θα αυξηθεί σχεδόν 7 φορές μεταξύ 2016 και 2021. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Ιανουαρίου 2018, ο παγκόσμιος κινητός πληθυσμός ανήλθε σε 5,09 δισεκατομμύρια χρήστες. Το 2019 ο πληθυσμός αυτός ήταν 5,64 δισεκατομμύρια και το 2020, 6,05 δισεκατομμύρια. Το 2021 ο κινητός πληθυσμός ανήλθε σε 6,37 δισεκατομμύρια και αναμένεται ως το 2025 να φτάσει τα 7,51 δισεκατομμύρια [4],[5].

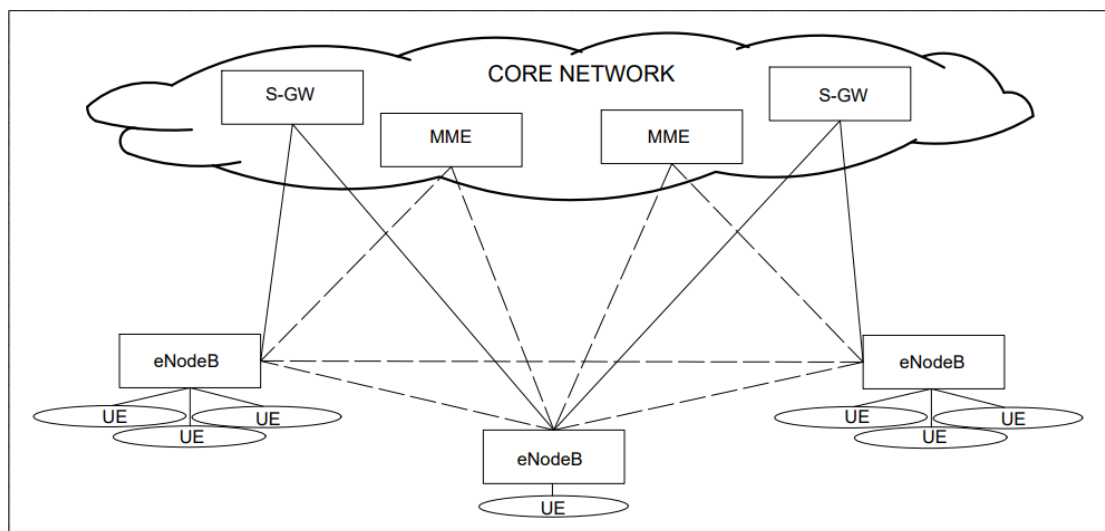
Είναι γεγονός ότι η βιομηχανία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει επιτύχει σημαντική ανάπτυξη, ξεκινώντας από το 1G, φτάνοντας στο σημερινό 4G με παγκόσμια χρήση και με συνεχή αναζήτηση να επιτευχθεί το μελλοντικό 5G. Το μόνο σίγουρο είναι ότι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελούν πλέον έναν σημαντικό δίαυλο επικοινωνίας για τους χρήστες και ότι η εξέλιξή τους μπορεί να προσφέρει ακόμα πιο καινοτόμες και βελτιωμένες υπηρεσίες στο μέλλον.

1.2.4.3. Αρχιτεκτονική 4G δικτύων

Η κύρια αρχιτεκτονική ενός 4G δικτύου είναι το LTE (Long Term Evolution), πρόκειται για μια τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και δικτύωση των κινητών συσκευών, με υψηλές ταχύτητες. Στα βασικά χαρακτηριστικά της είναι η χαμηλότερη καθυστέρηση, η καλύτερη απόδοση και η βελτιωμένη διαχείριση στην κυκλοφορία των δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική ενός LTE-4G κινητού δικτύου επικοινωνίας απαρτίζεται από τρία επιμέρους στοιχεία, τα οποία είναι :

- Εξοπλισμός του χρήστη (User Equipment) : είναι οι συσκευές που χρησιμοποιούν οι χρήστες για να αποκτήσουν πρόσβαση στο κινητό δίκτυο επικοινωνίας. Αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν Κινητά τηλέφωνα (Smartphones), Φορητούς υπολογιστές (Laptops, Tablets), Έξυπνα ρολόγια και άλλες φορητές συσκευές (Smartwatches, Wearable Devices) τα οποία μπορούν να παρέχουν επικοινωνία μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη.
- Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): αναφέρεται στο ασύρματο τμήμα ενός LTE (Long-Term Evolution) δικτύου επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, το E-UTRAN αποτελεί το μέρος του δικτύου που είναι υπεύθυνο για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των τερματικών συσκευών (όπως κινητά τηλέφωνα) και των σταθμών βάσης, επίσης παρέχει έλεγχο για την επικοινωνία μεταξύ του User Equipment και του EPC.
- Evolved Packet Core (EPC): αναφέρεται στον πυρήνα του δικτύου σε ένα σύστημα LTE (Long-Term Evolution) ή 4G. Αποτελεί ένα σύνολο δικτυακών στοιχείων και πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση και την παροχή υπηρεσιών δεδομένων στο δίκτυο. Επίσης είναι ο δίαυλος για την επικοινωνία με τα δίκτυα πακέτων δεδομένων και με το IP υποσύστημα. [7]



Σχήμα 1.1. Σχεδιάγραμμα για το LTE

1.2.4.4. Τεχνολογίες 4G δικτύων

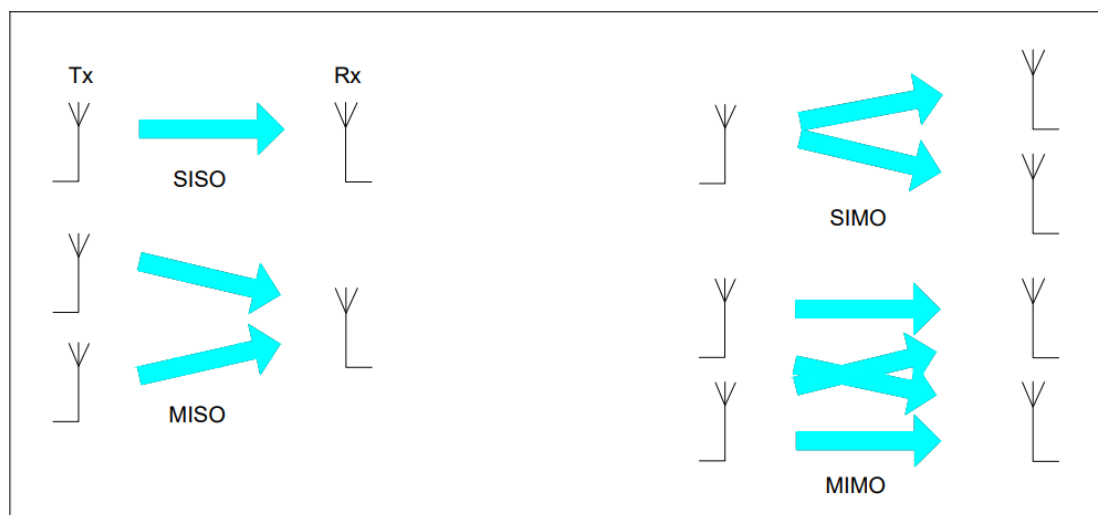
Οι διάφορες τεχνολογίες των ασύρματων 4G δικτύων είναι:

- *MIMO (Smart Antennas for Multiple-Input and Multiple-Output)*

MIMO είναι το ακρωνύμιο των λέξεων Multiple-Input Multiple-Output, που στα ελληνικά μεταφράζεται ως Πολλαπλή Είσοδος-Πολλαπλή Έξοδος. Αναφέρεται σε μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημάτων από πολλαπλές κεραιές ταυτόχρονα.

Η τεχνολογία MIMO εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα, όπως τα κινητά δίκτυα (π.χ. 4G, 5G), WiFi και άλλα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Οι κεραιές MIMO διαθέτουν πολλαπλά ζεύγη κεραιών για την αποστολή και λήψη δεδομένων, επιτρέποντας την εκμετάλλευση του περιβάλλοντος μετάδοσης μέσω των πολλαπλών μονοπατιών και των καταστάσεων διαλείψεων.

Για καλύτερη απόδοση σήματος και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιείται η τεχνολογία MIMO, μέσω αυτής της μεθόδου καθίσταται εφικτό να πολλαπλασιάζεται η χωρητικότητα μιας ραδιοζεύξης χάρη στις κεραιές εκπομπής και λήψης με στόχο την εκμετάλλευση της πολλαπλής διάδοσης. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στην ίδια συχνότητα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους χρήστες χωρίς να προκύπτει ανησυχία παρεμβολής. Η διαδικασία έχει ως εξής, στέλνει η κεραιά ραδιοσήματα απευθείας στον χρήστη και όσο αυτός κινείται ακολουθείται από τα ραδιοσήματα αυτά. Διευκρινίζεται ότι ο δέκτης και ο πομπός διαθέτουν πολλαπλές κεραιές και έτσι έχουν την ευχέρεια να χρησιμοποιούν διαφορετικές διαδρομές μεταξύ τους ώστε να βελτιώνουν τον ρυθμό μετάδοσης σήματος. Ουσιαστικά, η τεχνολογία MIMO είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται για την αποστολή και την λήψη περισσότερων από ένα σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα, μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού. [8], [9]



Σχήμα 1.2. Η υπεροχή της MIMO στο LTE

Το LTE υποστηρίζει 8 διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης οι οποίοι αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα και στην συνέχεια αναλύονται βάση των κεραιών που τους υποστηρίζουν.

Πίνακας 1. Τρόποι μετάδοσης του LTE

Transmission Mode	Downlink transmission Scheme
Mode 1	Single Antenna Port (SISO or SIMO)
Mode 2	Transmit Diversity
Mode 3	Open-Loop Spatial Multiplexing
Mode 4	Closed-Loop Spatial Multiplexing
Mode 5	Multi-User MIMO
Mode 6	Closed-Loop Rank-1 Spatial Multiplexing
Mode 7	Single Antenna Port Beamforming
Mode 8	Dual-Layer Beamforming

Οι Τρόποι μετάδοσης του LTE

Υποστηρίζονται έως και 4 TX-RX κεραίες.

Τα modes 2,3,4 και 6 είναι Single-User MIMO (SU-MIMO). Περισσότερες από μια κεραίες στο eNB επικοινωνούν με περισσότερες από μια κεραίες σε ένα UE.

- Mode 1 → Single Antenna

Χρησιμοποιείται μόνο μια TX κεραία (SISO ή SIMO).

- Mode 2 → Transmit Diversity

Αποστέλλεται η ίδια πληροφορία από πολλές κεραίες, ενώ σε κάθε κεραία εφαρμόζεται διαφορετική κωδικοποίηση. Επίσης το single layer transmission βελτιώνει το SNR ενώ δεν βελτιώνει το data rate.

- Mode 3 → Open-Loop Spatial Multiplexing

2 stream πληροφορίας μεταδίδονται από 2 ή περισσότερες κεραίες σε ένα UE, φτάνει έως και 4 κεραίες. Επιπλέον βελτιώνει το μέγιστο data rate.

- Mode 4 → Closed-Loop Spatial Multiplexing

Ομοίως με το Mode 3. Προσφέρει επιπλέον Pre-coding Matrix Indicator (PMI) το οποίο είναι ένας μηχανισμός feedback από το UE στο eNB. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στο eNB να προκωδικοποιεί (pre-code) τα δεδομένα και να βελτιστοποιεί τη μετάδοση τους.

- Mode 5 → Multi-User MIMO

Είναι παρόμοιο με το Mode 4, όμως σε αυτό το mode τα streams πληροφορίας προορίζονται για διαφορετικά UEs και το data rate του δικτύου βελτιώνεται στο σύνολο του.

- Mode 6 → Closed-Loop Rank-1 Spatial Multiplexing

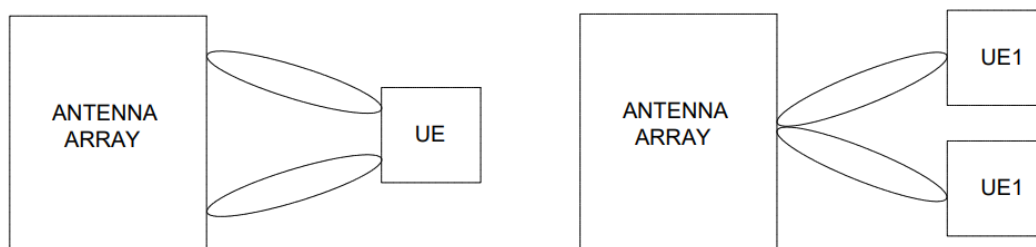
Θεωρείται υποπερίπτωση του mode 5, έχει ένα stream πληροφορίας και επομένως ένα UE και χαρακτηρίζεται από κατευθυντική μετάδοση.

- Mode 7 → Single Antenna Port Beamforming

Παρόμοιο με το mode 1, επίσης χαρακτηρίζεται από κατευθυντική μετάδοση πληροφορίας.

- Mode 8 → Dual-Layer Beamforming

Χαρακτηρίζεται από κατευθυντικότητα 2 επιπέδων.



Σχήμα 1.3. Η κατευθυντικότητα των επιπέδων

- OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*)

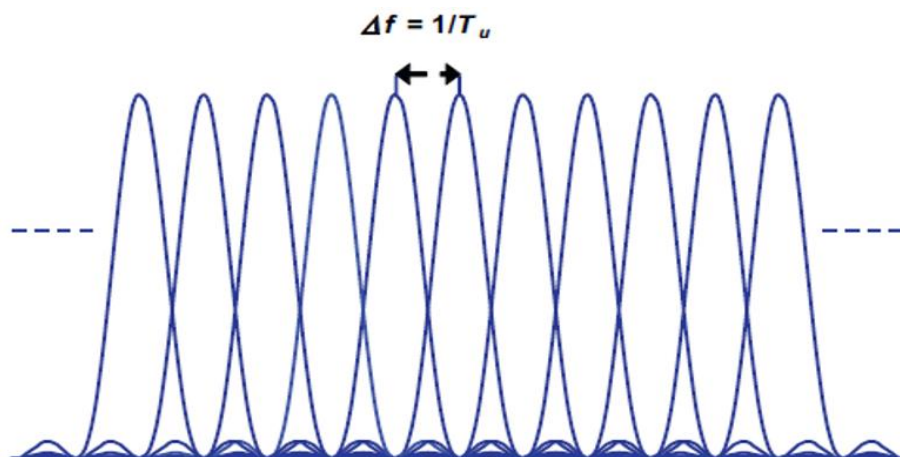
Το OFDM είναι το ακρωνύμιο της φράσης Orthogonal Frequency Division Multiplexing, που στα ελληνικά μεταφράζεται ως Ορθογώνια Πολυπλεξία Συχνοτήτων. Αποτελεί μια τεχνική διαμόρφωσης σήματος που χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας, όπως τα κινητά δίκτυα (π.χ. 4G, 5G), WiFi, και άλλα ασύρματα συστήματα.

Η τεχνική OFDM διαμορφώνει το σήμα σε πολλαπλές φέρουσες συχνότητες, οι οποίες είναι ορθογώνιες μεταξύ τους. Κάθε φέρουσα συχνότητα είναι διαμορφωμένη με διακριτά σήματα, που επιτρέπουν τη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων ταυτόχρονα.

Το εύρος ζώνης διαιρείται σε μικρότερα συχνοτικά τμήματα, γνωστά ως ορθογώνια υποφάσματα (*orthogonal sub-carrier signals*), τα οποία χρησιμοποιούνται για την παράλληλη μεταφορά δεδομένων σε κανάλια επικοινωνίας. Η τεχνολογία OFDM επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερου όγκου δεδομένων σε σύγκριση με άλλες μορφές πολυπλεξίας (όπως ο χρονικός, συχνοτικός, κωδικοπολυπλεξία κ.λπ.), καθώς επίσης επιτρέπει την ταυτόχρονη αποστολή πολλαπλών σημάτων από μια κεραία σε μια συσκευή. Τα συχνοτικά τμήματα διαχωρίζονται με αρκετή απόσταση ώστε να αποφεύγεται η αλληλεπίδρασή τους. [12]

Στο OFDM το φάσμα διαχωρίζεται σε υποφέρουσες συχνότητες. Όταν μια υποφέρουσα συχνότητα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της τότε οι τιμές των υπολοίπων υποφερουσών είναι

μηδενικές. Ο τύπος είναι ο εξής: $\Delta f = 1/T_u$ όπου Δf είναι η απόσταση μεταξύ των κορυφών δύο διαδοχικών υποφερουσών και T_u είναι η χρονική διάρκεια της κάθε υποφέρουσας.



Σχήμα 1.4. Διάγραμμα του φάσματος του OFDM

Το OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access) είναι μια τεχνολογία στο Wi-Fi 6, βελτιώνει την απόδοση του ασύρματου δικτύου καθιερώνοντας ανεξάρτητους υποφορείς εντός των συχνοτήτων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει ταυτόχρονες μεταδόσεις από και προς πολλούς πελάτες.

Ποια είναι η διαφορά μεταξύ OFDM και OFDMA;

Η OFDM (ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας) είναι μια παλαιότερη, σχετική τεχνολογία για την αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης του ασύρματου δικτύου. Το OFDM έχει χρησιμοποιηθεί σε τομείς όπως η δικτύωση κινητής τηλεφωνίας και τα μέσα εκπομπής και σε προηγούμενες εκδόσεις του WiFi.

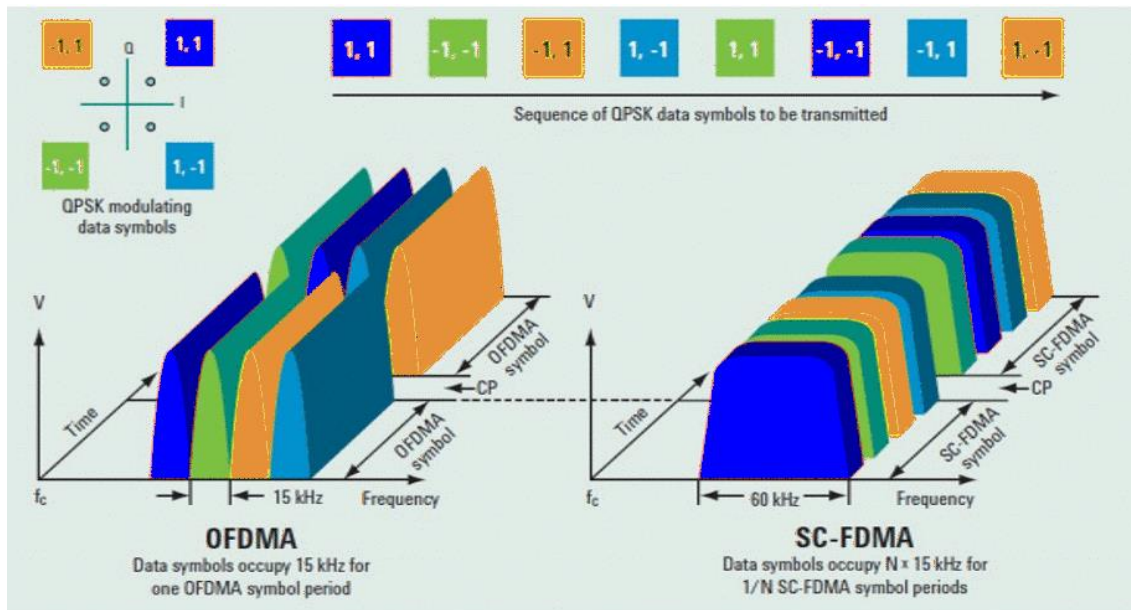
Το OFDMA είναι ουσιαστικά ένας τύπος OFDM για πολλούς χρήστες. Κατανέμει τόσο στον τομέα χρόνου όσο και στον τομέα συχνότητας, επιτρέποντας πολλαπλούς χρήστες—ακόμη και σε αυτούς με πολύ διαφορετικά μοτίβα χρήσης ή φορτίο δεδομένων. Συγκριτικά, το OFDM μπορεί να εκχωρήσει μόνο διαδοχικά.

Το FDMA ενός φορέα (SC-FDMA) είναι ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας. Ονομάζεται επίσης γραμμικά προκωδικοποιημένο OFDMA (LP-OFDMA). Όπως και άλλα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA), ασχολείται με την εκχώρηση πολλαπλών χρηστών σε έναν κοινόχρηστο πόρο επικοινωνίας. Το SC-FDMA μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα γραμμικά προκωδικοποιημένο σχήμα OFDMA, με την έννοια ότι έχει ένα πρόσθετο στάδιο επεξεργασίας DFT που προηγείται της συμβατικής επεξεργασίας OFDMA.

Το SC-FDMA έχει τραβήξει την προσοχή ως εναλλακτική του OFDMA, ειδικά στις επικοινωνίες άνω ζεύξης όπου ο χαμηλότερος λόγος ισχύος αιχμής προς μέσο όρο (PAPR) ωφελεί σημαντικά το κινητό τερματικό όσον αφορά την απόδοση ισχύος μετάδοσης και το μειωμένο κόστος του ενισχυτή ισχύος. Έχει υιοθετηθεί ως το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης ανερχόμενης ζεύξης στο 3GPP Long Term Evolution (LTE) ή το Evolved UTRA (E-UTRA).

Η απόδοση του SC-FDMA σε σχέση με το OFDMA έχει αποτελέσει αντικείμενο διαφόρων μελετών. Αν και το χάσμα απόδοσης είναι μικρό, το πλεονέκτημα της χαμηλής PAPR του SC-

FDMA το καθιστά επιθυμητό για ασύρματη μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης σε συστήματα κινητής επικοινωνίας, όπου η απόδοση ισχύος του πομπού είναι υψίστης σημασίας.



Σχήμα 1.5. Σχεδιάγραμμα του φάσματος του OFDMA και του SC-FDMA

Η απόδοση των SC-FDM & OFDM είναι περίπου παρόμοια όταν δεν λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση του καναλιού στο σύστημα.

Η απόδοση του SC-FDMA είναι ελαφρώς καλύτερη, σε σύγκριση με το OFDM όταν συμπεριλάβουμε το εφέ του καναλιού.

1.2.4.5. Κλάσεις υπηρεσίας του LTE

Στον παρακάτω πίνακα αναλύονται οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας του LTE όπου για την κάθε κλάση αναφέρεται το GBR και το Non-GBR, η προτεραιότητα που έχει η κάθε κλάση, η καθυστέρηση των πακέτων και η απώλεια τους ανά υπηρεσία.

Πίνακας 2. Κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας του LTE

QCI	Resource type	Priority	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example services
1	GBR	2	100ms	10^{-2}	Conversational voice
2		4	150ms	10^{-3}	Conversational video (live streaming)
3		3	50ms	10^{-3}	Real time gaming
4		5	300ms	10^{-5}	Non-conversational video (buffered streaming)
5	Non-GBR	1	100ms	10^{-3}	IMS signaling
6		6	300ms	10^{-6}	Video (buffered streaming TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.))
7		7	100ms	10^{-6}	Voice, Video (live streaming), Interactive gaming
8		8	300ms	10^{-3}	Video (buffered streaming TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.))
9		9		10^{-6}	

Το QCI, σε έναν ακέραιο από το 1 έως το 9, υποδεικνύει εννέα διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης QoS για κάθε πακέτο IP. Οι τιμές QCI είναι τυποποιημένες για να αναφέρονται σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά QoS και κάθε QCI περιέχει τυποποιημένα χαρακτηριστικά απόδοσης (τιμές), όπως τύπος πόρου (GBR ή μη GBR), προτεραιότητα (1~9), Προϋπολογισμός καθυστέρησης πακέτων (επιτρεπόμενη καθυστέρηση πακέτων που εμφανίζεται σε τιμές που κυμαίνονται από 50 ms έως 300 ms), Ποσοστό απώλειας σφαλμάτων πακέτων (επιτρεπόμενη απώλεια πακέτων που εμφανίζεται σε τιμές από 10^{-2} έως 10^{-6}). Για παράδειγμα, το QCI 1 και το 9 ορίζονται ως εξής:

QCI = 1

Resource Type = GBR, Priority = 2, Packet Delay Budget = 100ms, Packet Error Loss Rate = 10^{-2} , Example Service = Conversational Voice

QCI = 9

Resource Type = Non-GBR, Priority = 9, Packet Delay Budget = 300ms, Packet Error Loss Rate = 10^{-6} , Example Service = Video (buffered streaming TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p file sharing, progressive video, etc.))

Για έναν φορέα EPS, η ύπαρξη τύπου πόρου GBR σημαίνει ότι το εύρος ζώνης του φορέα είναι εγγυημένο. Προφανώς, ένας φορέας EPS τύπου GBR έχει έναν "εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης bit" (το GBR θα εξηγηθεί περαιτέρω παρακάτω) ως μία από τις παραμέτρους QoS του. Μόνο ένας αποκλειστικός φορέας EPS μπορεί να είναι φορέας τύπου GBR και κανένας προεπιλεγμένος φορέας EPS δεν μπορεί να είναι τύπου GBR. Το QCI ενός φορέα EPS τύπου GBR μπορεί να κυμαίνεται από 1 έως 4.

Για έναν φορέα EPS, η ύπαρξη ενός τύπου πόρων που δεν είναι GBR σημαίνει ότι ο φορέας είναι φορέας τύπου βέλτιστης προσπάθειας και το εύρος ζώνης του δεν είναι εγγυημένο. Ένας προεπιλεγμένος κομιστής EPS είναι πάντα φορέας που δεν είναι GBR, ενώ ένας αποκλειστικός φορέας EPS μπορεί να είναι είτε GBR είτε μη GBR. Το QCI ενός φορέα EPS τύπου εκτός GBR μπορεί να κυμαίνεται από 5 έως 9.

Στο LTE, ενδέχεται να παρέχονται ελάχιστες κομιστές GBR και φορείς μη GBR. Οι ελάχιστοι φορείς GBR χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές όπως το Πρωτόκολλο Voice over Internet (VoIP), με μια σχετική τιμή GBR. Υψηλότεροι ρυθμοί bit μπορούν να επιτραπούν εάν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι. Οι φορείς που δεν είναι GBR δεν εγγυώνται κανένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης bit και χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές ως περιήγηση στο web όπως video live streaming ή chat, e-mail κ.α.

Το QoS Class Identifier (QCI) είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται σε δίκτυα Long Term Evolution (LTE) 3GPP για να διασφαλιστεί ότι στην κυκλοφορία του παρόχου έχει εκχωρηθεί κατάλληλη Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS). Η κίνηση διαφορετικής εταιρείας κινητής τηλεφωνίας απαιτεί διαφορετικό QoS και επομένως διαφορετικές τιμές QCI. Η τιμή QCI 9 χρησιμοποιείται συνήθως για την προεπιλεγμένη εταιρεία κινητής τηλεφωνίας ενός UE/PDN για μη προνομιούχους συνδρομητές. Αντίθετα εάν χρησιμοποιηθεί η τιμή 1 σημαίνει ότι υπάρχει πολύ υψηλή προτεραιότητα για αυτό το σύνολο των συνδρομητών.

Το Priority εμφανίζει την προτεραιότητα που έχει το κάθε QCI και διαφέρει ο αριθμός ανάλογα με το αν είναι εγγυημένο GBR ή μη εγγυημένο Non-GBR.

Το packet delay budget ενημερώνει τους κόμβους του δικτύου για το πόση καθυστέρηση μπορεί να γίνει ανεκτή για τα πακέτα που διέρχονται από έναν συγκεκριμένο φορέα, δηλαδή είναι μια τιμή η οποία αντικατοπτρίζει το διάστημα που χρειάζεται για να φτάσει ένα πακέτο από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη, όπου αποστολέας νοείται η κεραία κινητής τηλεφωνίας και παραλήπτης το τηλέφωνο (user equipment). η διαδικασία αυτή συμβαίνει για το downlink, όταν πρόκειται για uplink η όλη διαδικασία λειτουργεί αντίστροφα.

Έπειτα το packet error loss rate ενημερώνει τους κόμβους του δικτύου πόσα πακέτα μπορούν να χαθούν από το συνολικό μεταδιδόμενο πακέτο. Σχετίζεται με τον αριθμό των πακέτων που διενεργούνται και είναι μια ακόμα σημαντική μεταβλητή για τις υπηρεσίες του QCI.

Αξίζει να επισημανθεί ότι στο GBR οι τιμές του packet delay budget και του packet error loss εγγυώνται ενώ στο Non-GBR δεν εγγυώνται ότι αυτές θα είναι οι τιμές.

1.2.4.6. Carrier Aggregation

Το Carrier Aggregation είναι μία τεχνική η οποία βρίσκει χρήση στην ασύρματη επικοινωνία με σκοπό την αύξηση του ρυθμού δεδομένων ανά χρήστη. Με αυτή τη μέθοδο εκχωρούνται σε κάθε χρήστη πολλαπλά εύρη συχνοτήτων από 1.4 έως 20 MHz. Ο μέγιστος δυνατός ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη αυξάνεται όσο περισσότερα εύρη συχνοτήτων εκχωρούνται σε ένα

χρήστη. Είναι δυνατή η συνένωση έως και 5 φερουσών συχνοτήτων όπου είναι έως 20MHz η κάθε μία, έτσι το μέγιστο εύρος ζώνης είναι $20\text{MHz} \cdot 5 = 100\text{MHz}$.

Με την τεχνική του carrier aggregation επιτυγχάνεται επέκταση της περιοχής κάλυψης με τον εξής τρόπο:

Ένα κινητό τερματικό επικοινωνεί με τον σταθμό βάσης μιας κυψέλης (donor cell) μέσω ενός βοηθητικού κόμβου (relay node) και έτσι επεκτείνει την περιοχή κάλυψης της κυψέλης.

Ο relay node επικοινωνεί με το σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας LTE ζεύξη δεδομένων.

Το Carrier Aggregation χρησιμοποιείται τόσο για FDD όσο και για TDD.

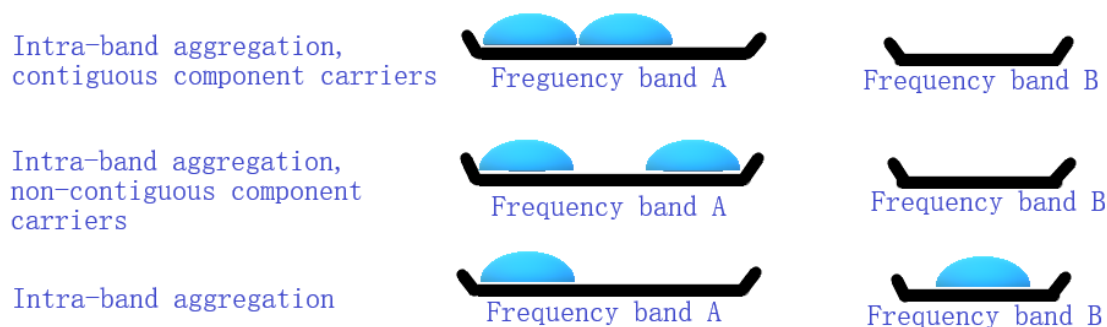
Κάθε συγκεντρωτικός φορέας αναφέρεται ως φορέας συστατικού, CC. Ο φορέας συστατικών μπορεί να έχει εύρος ζώνης 1,4, 3, 5, 10, 15 ή 20 MHz και μπορούν να συγκεντρωθούν το πολύ πέντε φορείς συστατικών, επομένως το μέγιστο συγκεντρωτικό εύρος ζώνης είναι 100 MHz. Στο FDD ο αριθμός των συγκεντρωτικών φορέων μπορεί να είναι διαφορετικός σε DL και UL. Ωστόσο, ο αριθμός των φορέων εξαρτημάτων UL είναι πάντα ίσος ή μικρότερος από τον αριθμό των φορέων εξαρτημάτων DL. Οι μεμονωμένοι φορείς εξαρτημάτων μπορεί επίσης να έχουν διαφορετικό εύρος ζώνης. Για το TDD, ο αριθμός των CC καθώς και τα εύρη ζώνης κάθε CC θα είναι συνήθως τα ίδια για τα DL και UL.

Ο ευκολότερος τρόπος για τη διευθέτηση της συνάθροισης θα ήταν η χρήση συνεχόμενων φορέων εξαρτημάτων εντός της ίδιας ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας (όπως ορίζεται για το LTE), που ονομάζεται συνεχόμενη εντός ζώνης. Αυτό μπορεί να μην είναι πάντα δυνατό, λόγω σεναρίων εκχώρησης συχνότητας χειριστή. Για μη συνεχόμενη κατανομή θα μπορούσε είτε να είναι εντός ζώνης, δηλ. οι φορείς εξαρτημάτων ανήκουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας, αλλά έχουν ένα κενό ή κενά, μεταξύ τους, είτε θα μπορούσε να είναι μεταξύ ζώνης, οπότε οι φορείς εξαρτημάτων ανήκουν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας.

Η απόσταση μεταξύ των κεντρικών συχνοτήτων δύο συνεχόμενων CC είναι $N \cdot 300$ kHz, $N = \text{ακέραιος}$. Για μη συνεχόμενες περιπτώσεις, τα CC χωρίζονται με ένα ή περισσότερα κενά συχνότητας.

Για πρακτικούς λόγους, η CA προσδιορίζεται αρχικά για μερικούς μόνο συνδυασμούς ζωνών λειτουργίας E-UTRA και αριθμό CC. Για τον καθορισμό διαφορετικών συνδυασμών CA χρησιμοποιούνται μερικοί νέοι ορισμοί:

- Συγκεντρωτική διαμόρφωση εύρους ζώνης μετάδοσης (ATBC): συνολικός αριθμός συγκεντρωτικών μπλοκ φυσικών πόρων (PRB).
- Κατηγορία εύρους ζώνης CA: υποδεικνύει έναν συνδυασμό μέγιστου ATBC και μέγιστου αριθμού CC. Στα R10 και R11 ορίζονται τρεις κατηγορίες:
 - Κατηγορία A: $\text{ATBC} \leq 100$, μέγιστος αριθμός CC = 1
 - Κατηγορία B: $\text{ATBC} \leq 100$, μέγιστος αριθμός CC = 2
 - Κατηγορία C: $100 < \text{ATBC} \leq 200$, μέγιστος αριθμός CC = 2



Σχήμα 1.6: Carrier Aggregation

Η εισαγωγή της συνάθροισης φορέων επηρεάζει κυρίως το MAC και το πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου, αλλά εισάγονται και ορισμένα νέα μηνύματα RRC. Προκειμένου να διατηρηθεί η συμβατότητα R8/R9, οι αλλαγές πρωτοκόλλου θα περιοριστούν στο ελάχιστο. Βασικά κάθε φορέας συστατικού αντιμετωπίζεται ως φορέας R8. Ωστόσο, απαιτούνται ορισμένες αλλαγές, όπως νέα μηνύματα RRC για να χειριστεί το SCC, και το MAC πρέπει να μπορεί να χειρίζεται τον προγραμματισμό σε έναν αριθμό CC. Σημαντικές αλλαγές στο φυσικό επίπεδο είναι για παράδειγμα ότι οι πληροφορίες σηματοδότησης σχετικά με τον προγραμματισμό σε CC πρέπει να παρέχονται DL καθώς και το HARQ ACK/NACK ανά CC πρέπει να παραδοθεί UL και DL.

1.2.4.7. Βασικές ελλείψεις 4G δικτύων

Παρά τις υψηλές ταχύτητες που προσφέρει το 4G δίκτυο σε παγκόσμιο επίπεδο, οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται συνεχώς με αποτέλεσμα να μην επαρκεί πια η υπηρεσία των 4G δικτύων. Η μέγιστη ταχύτητα των 4G LTE δικτύων είναι περίπου στο 1Gbps, η οποία όμως λόγω διάφορων παρεμβολών δεν επιτυγχάνεται πάντα. Κάποια ακόμα μειονεκτήματα των 4G δικτύων είναι η περιορισμένη έως ανύπαρκτη κάλυψη του δικτύου σε πολύ μακρινά και ορεινά χωριά και νησιά, καθώς επίσης η ασφάλεια των πληροφοριών όπου υπάρχει υψηλός κίνδυνος διαρροής λόγω της χρήσης του internet. Τέλος ένα σημαντικό πρόβλημα είναι το handover, όπου μια κλήση μεταφέρεται από μια κυψέλη σε μια άλλη ώστε να επιτευχθεί καλύτερη επίδοση καθώς ο χρήστης κινείται, με κίνδυνο όμως να χαθεί η σύνδεση. Προβλήματα τέτοιας φύσεως αναμένεται να εξαλειφθούν με την έλευση του 5G το οποίο θα τροφοδοτήσει την τεχνολογία με αναβαθμισμένες υπηρεσίες καθώς και νέες εφαρμογές.

Κεφάλαιο 2 – Δίκτυα 5^{ης} γενιάς

2.1. Εισαγωγικές έννοιες για τα 5G δίκτυα

Η 5η γενιά κινητής τηλεφωνίας, γνωστή και ως 5G, είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία κινητής επικοινωνίας. Αναπτύχθηκε για να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις της συνδεσιμότητας, της ταχύτητας και της απόκρισης στην εποχή των έξυπνων συσκευών, των αυτόνομων οχημάτων, του Internet of Things και άλλων προηγμένων εφαρμογών.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 5G περιλαμβάνουν:

- Υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων: το 5G προσφέρει υπερύψηλές ταχύτητες μετάδοσης, με προσδόκιμες ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 10 Gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbps). Αυτό επιτρέπει τη γρήγορη λήψη και αποστολή δεδομένων, αλλά και την υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών όπως οι εικονική πραγματικότητα και οι αυτόνομες οχήματα.
- Χαμηλή καθυστέρηση (Low Latency): το 5G προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση, με την αποστολή και λήψη δεδομένων να γίνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως οι αυτόνομες οχήματα, ο τηλεχειρισμός και η απομακρυσμένη χειρουργική.
- Μεγάλη χωρητικότητα δικτύου: επίσης το 5G υποστηρίζει μεγάλη χωρητικότητα δικτύου, δηλαδή τη δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Η νέα γενιά των 5G κινητών δικτύων αναμένεται να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Να παρέχει 1000 φορές τη σημερινή χωρητικότητα
- Να εξυπηρετεί 100 δισεκατομμύρια συσκευές
- Να παρέχει ρυθμούς της τάξης των 10 Gbps με ελάχιστη καθυστέρηση

2.1.1. Εμφάνιση και εξέλιξη των 5G δικτύων

Οι τεχνολογίες 5G ανέβασαν αισθητά τον πήχη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών από την εμφάνισή τους. Ενώ η εμφάνιση των 5G δικτύων ξεκίνησε το 2019, η ανάπτυξη και η επέκτασή τους συνεχίζονται σε πολλές περιοχές του κόσμου.

Οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων των 5G δικτύων είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με τα προηγούμενα δίκτυα γενιάς, όπως τα 3G και 4G. Η τεχνολογία 5G υπόσχεται ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν έως και 10 ή και 20 φορές ταχύτερα από το 4G.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των 5G δικτύων είναι η χαμηλή καθυστέρηση (latency), που επιτρέπει σε συσκευές να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές όπως το αυτόνομο όχημα, τα έξυπνα δίκτυα, τα παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο και την εικονική πραγματικότητα.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες εταιρείες ανά έτη με τις συνεργασίες και τις έρευνες που έγιναν με στόχο την εξέλιξη των 5G δικτύων:

- Απρίλιος 2018, συνεργασία της NASA με την M2Mi (Machine to Machine Intelligence) με στόχο την ανάπτυξη 5G τεχνολογίας.

- Αύγουστος 2012: το πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης ίδρυσε το ερευνητικό κέντρο NYU WIRELESS με σκοπό να πραγματοποιήσει έρευνες για τα ασύρματα δίκτυα 5G.
- Οκτώβριος 2012: το πανεπιστήμιο του Surrey στο Ηνωμένο Βασίλειο χρηματοδοτήθηκε από το Βρετανικό Ταμείο Επενδύσεων με 35 εκατομμύρια λίρες για δημιουργία ερευνητικού κέντρου 5G. Το νέο αυτό κέντρο έγινε με στόχο να προσφέρει στους φορείς επικοινωνιών και στους παρόχους υποδομών εγκαταστάσεις δοκιμών ώστε να αναπτύξουν πρότυπο κινητό δίκτυο με λιγότερο ραδιοφάσμα και λιγότερη ενέργεια ενώ παράλληλα θα παράγει υψηλότερες ταχύτητες από το 4G.
- Νοέμβριος 2012: Δημιουργία του project “Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society” με βασικό σκοπό την μελέτη για τα 5G δίκτυα. [17], [18].
- Μάιος 2013: ανακοίνωση από την εταιρεία Samsung για την πλήρη ανάπτυξη συστήματος 5G όπου στην δοκιμή έστειλε δεδομένα με ταχύτητα 1.056Gbit/s σε απόσταση μέχρι και 2 χιλιόμετρα.
- Ιούλιος 2013: συμφωνία συνεργασίας μεταξύ Ινδίας και Ισραήλ για την ανάπτυξη των τεχνολογιών 5^{ης} γενιάς. [18]
- Οκτώβριος 2013: εγκαίνια του πρώτου παγκόσμιου δικτύου 5G στην Ιαπωνία από την εταιρεία NTT (Nippon Telegraph and Telephone) και απόσπαση βραβείου στην Έκθεση Ικανοποίησης Πελατών.
- Νοέμβριος 2013: η εταιρεία Huawei ανακοινώνει το σχέδιο της για επένδυση τουλάχιστον 600 εκατομμυρίων δολαρίων σε δίκτυα 5^{ης} γενιάς με στόχο την ανάπτυξη ταχυτήτων 100 φορές υψηλότερες από τα σύγχρονα δίκτυα LTE. [18]
- Απρίλιος 2014: το πανεπιστήμιο Τάντον της Νέας Υόρκης πραγματοποίησε για πρώτη φορά διάσκεψη κορυφής για το 5G μέσω του ερευνητικού κέντρου της Σχολής Μηχανικών όπου ήρθαν σε επαφή ηγέτες έρευνας και ανάπτυξης της ασύρματης και κινητής βιομηχανίας του ακαδημαϊκού χώρου, με τις επιχειρήσεις και την κυβέρνηση δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις κεραίες και στην διάδοση της μοντελοποίησης των καναλιών.
- Μάιος 2014: ξεκινάει συνεργασία της εταιρείας NTT DoCoMo με τις εταιρείες Alcatel Lucent, Ericsson, Fujitsu, NEC, Nokia και Samsung με σκοπό την δοκιμή κινητών δικτύων 5G. [18]
- Ιούνιος 2014: το ερευνητικό πρόγραμμα της CROWD επιλέγεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ώστε να συμμετάσχει στην ομάδα των «πρόωρων 5G πρόδρομων έργων», αυτά τα έργα συνέβαλαν ουσιαστικά στην πρώιμη επίδειξη ερευνητικών τεχνολογιών για την 5G υποδομή.
- Οκτώβριος 2014: έναρξη λειτουργίας του ερευνητικού έργου TIGRE5-CM (Ολοκληρωμένες τεχνολογίες για την διαχείριση και λειτουργία δικτύων 5G) το οποίο είχε στόχο τον σχεδιασμό αρχιτεκτονικής κινητών δικτύων 5^{ης} γενιάς με το πρότυπο SDN (Software Defined Networking).
- Νοέμβριος 2014: συνεργασία της Megafon και της Huawei ώστε να αναπτύξουν 5G δίκτυο στη Ρωσία έως το τέλος του 2017. Επίσης τον ίδιο μήνα η Huawei και η SingTel ανακοινώνουν μεταξύ τους συμφωνία για την έναρξη κοινού προγράμματος καινοτομίας για τα 5G δίκτυα. [18]
- Ιούλιος 2015: έναρξη προγράμματος METIS-II με στόχο τον σχεδιασμό του 5G δικτύου πρόσβασης.
- Οκτώβριος 2015: η επιχείρηση Orange γαλλικών συμφερόντων ανακοινώνει ότι πρόκειται να αναπτύξει τεχνολογίες 5G ώστε η πρώτη δοκιμή να ξεκινήσει τον Ιανουάριο του 2016 στο Belfort.
- Ιανουάριος 2016: η σουηδική εταιρεία Ericson δήλωσε την συνεργασία της με την TeliaSonera ώστε να αναπτυχθεί η παροχή υπηρεσιών 5G στους πελάτες της

TeliaSonera στην Στοκχόλμη της Σουηδίας και στο Ταλίν της Εσθονίας το 2018, σε αυτό θα συνέβαλε το δίκτυο της TeliaSonera με την τεχνολογία της Ericson. Τον ίδιο μήνα η Google ανακοίνωσε ότι βρίσκεται στη διαδικασία ανάπτυξης ενός δικτύου 5G με όνομα SkyBender και ότι σχεδιάζει να διανείμει αυτή τη σύνδεση μέσω ηλιακών κινητήρων.

- Φεβρουάριος 2016: η εταιρεία Ericson μαζί με την NTT DoCoMo κατάφεραν την πρώτη παγκόσμια δοκιμή για επίτευξη σύνδεσης 20Gbit/s με δυο ταυτόχρονα συνδεδεμένες κινητές συσκευές σε 5G.
- Μάρτιος 2016: η βρετανική κυβέρνηση ανακοινώνει και ταυτόχρονα επιβεβαιώνει τα σχέδια της να καταστήσει το Ηνωμένο Βασίλειο παγκόσμιο ηγέτη του 5G.
- Ιούνιος 2016: το πανεπιστήμιο του Cambridge εκδίδει μέσω του Cambridge University Press το πρώτο ολοκληρωμένο βιβλίο για το 5G με τίτλο «Τεχνολογία κινητών και ασύρματων επικοινωνιών 5G» και συγγραφείς τους Afif Osseiran (Ericsson), Jose F. Monserrat (UPV) και Patrick Marsch (Nokia Bell Labs).
- Ιούλιος 2016: ο Günther Oettinger, Ευρωπαίος Επίτροπος για την Ψηφιακή Οικονομία και Κοινωνία, έλαβε δημόσια διακήρυξη για την έγκαιρη ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G στην Ευρώπη, η οποία καθόριζε τις βιομηχανικές συστάσεις για τον τρόπο που η Ευρώπη μπορούσε να υποστηρίξει και να προωθήσει την καινοτομία και την ανάπτυξη του 5G. Επίσης έθετε χρονοδιαγράμματα για τις δοκιμές του 5G από τις εταιρείες Vodafone, Ericson, Deutsche Telecom, Nokia, Telecom Italia, Telia Company, Inmarsat, Orange, KPN, Proximus, Telecom Austria, SES, Telenor, Tele2, Hutchison Whampoa Europe και Telefonica. Επίσης τον ίδιο μήνα ψηφίστηκε ομόφωνα από την Federal Communications Commission (FCC) η πρόταση για την απελευθέρωση ποσοτήτων νέου εύρους ζώνης στο φάσμα υψηλών συχνοτήτων για τις ασύρματες επικοινωνίες 5G.
- Οκτώβριος 2016: ανακοινώνεται από την εταιρεία Qualcomm το πρώτο 5G modem, το Snapdragon X50.
- Ιανουάριος 2017: συνεργασία της Samsung με την Reliance Jio για την αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου στην Ινδία από 4G LTE-A σε 5G.
- Φεβρουάριος 2017: συνεργασία της Nokia με την BSNL για τη δημιουργία 5G δικτύων.
- Μάρτιος 2017: συνεργασία της Nokia με την Aitel της Ινδίας για τη δημιουργία δικτύων κινητής τηλεφωνίας και διαδικτύου 5G στη χώρα.
- Μάρτιος 2017: εγκατάσταση του πρώτου κινητού 5G BS στη Λετονία, στο νέο Κέντρο Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου από την εταιρεία LMT.
- Ιούνιος 2017: η κοινοπραξία των Terrestrial Network και Satellite (SaT5G) ανακοινώνουν την έναρξη ενός έργου 30 μηνών για την απρόσκοπτη και οικονομικά βιώσιμη ενσωμάτωση των δορυφόρων σε 5G δίκτυα, αποσκοπώντας στην βελτίωση της ανθεκτικότητας και στην αποτελεσματικότητα των 5G υπηρεσιών, καθώς και στο άνοιγμα νέων αγορών. Η κοινοπραξία αυτή χρηματοδοτήθηκε από την ΕΕ στο πλαίσιο του προγράμματος Horizon 2020 και αποτελούνταν από 16 μέλη, κάποια από αυτά ήταν η Avanti Communications, Thales Alenia Space, Broadpeak, TNO, Airbus Defense, Space, BT, University of Surrey, SES, Gilat Satellite Networks, Zodiac Inflight Innovation και OneAccess. Επίσης τον ίδιο μήνα η εταιρεία Σρι Λάνκα Telecom μετατρέπεται στην πρώτη εταιρεία Telco με σκοπό να δοκιμάσει την Pre-5G LTE Advanced Pro στην Νότια Ασία, κάτι το οποίο στέφθηκε με επιτυχία.
- Ιούλιος 2017: υπογραφή συμφωνίας της εταιρείας Telecom Italia Mobile με την κυβέρνηση του Αγίου Μαρίνου για την αναβάθμιση του 4G δικτύου σε 5G. Τον ίδιο μήνα οι 28 υπουργοί τηλεπικοινωνιών της ΕΕ και της Νορβηγίας υπέγραψαν δήλωση προθέσεων στο Ταλίν της Εσθονίας, με στόχο να καθιερωθεί μια κοινή βάση για τα μελλοντικά πρότυπα του 5G και επίσης την επιβεβαίωση προθυμίας των κρατών μελών να τοποθετηθεί η Ευρώπη ως ηγετική αγορά στην τεχνολογία του 5G δικτύου.

- Αύγουστος 2017: η Huawei και η Ericson στο Dialog Iconic στο Colombo συμμετείχαν στην πρωτοποριακή δοκιμή δυνατοτήτων τεχνολογίας 5G που διεξήχθη από την Dialog Axiata.
- Σεπτέμβριος 2017: η συνεργαζόμενες εταιρείες Ericson Intel και Telia Eesti ανακοίνωσαν στην ψηφιακή διάσκεψη της EE στο Ταλίν της Εσθονίας ότι είχαν υλοποιήσει το πρώτο ζωντανό δημόσιο δίκτυο 5G στην EE στο λιμάνι του Ταλίν με στόχο την σύνδεση του με τα κρουαζιερόπλοια.
- Οκτώβριος 2017: ανακοίνωση από την εταιρεία Qualcomm της πρώτης κινητής σύνδεσης 5G με ταχύτητα σύνδεσης 1Gbit/s.
- Νοέμβριος 2017: ανακοίνωση της εταιρείας Verizon Communications Inc. για ανάπτυξη ασύρματων οικιακών ευρυζωνικών 5G υπηρεσιών σε 5 πόλεις των ΗΠΑ στο 2^ο εξάμηνο του 2018.
- Φεβρουάριος 2018: επιβεβαίωση της υπογεγραμμένης συμφωνίας των εταιρειών BT Group και Huawei για την παράταση της μεταξύ τους συνεργασίας για την ανάπτυξη αλλά και ζωντανή δοκιμή του 5G δικτύου και του εξοπλισμού των πελατών τους.
- Μάρτιος 2018: ανακοίνωση από το Ηνωμένο Βασίλειο για δημιουργία μιας «5G πόλης» με κόστος πολλά εκατομμύρια λίρες ώστε να αρχίσει η διάθεση μελλοντικά 5G τεχνολογίας σε διεθνές επίπεδο.
- Μάιος 2018: η Σαουδική Αραβία μέσω της επιτροπής επικοινωνιών και τεχνολογίας πληροφορικής εξέδωσε άδειες για δοκιμές 3.6-3.8GHz στις εταιρείες STC Group, Mobily και Zain Group. Με τη χρήση αυτών των αδειών οι προαναφερθείσες εταιρείες – πάροχοι δοκίμασαν την 5G τεχνολογία σε φάσμα 100MHz μεταξύ του Ιουνίου 2018 και τέλους του 2019.
- Ιούλιος 2018: επίδειξη της μεταφοράς δεδομένων με χρήση 5G στα 27Gbps από τις εταιρείες Ericson και Telefonica Telecom στην Μπογκοτά της Κολομβίας.
- Σεπτέμβριος 2018: η ομοσπονδιακή επιτροπή επικοινωνιών των ΗΠΑ ανακοίνωσε το σχέδιο 5G FAST αποσκοπώντας να προωθήσει τη θέση της χώρας μεταξύ των χωρών που έχουν αναπτύξει 5G δίκτυα. Επίσης τον ίδιο μήνα η εταιρεία Turkcell, τουρκικών συμφερόντων ανακοίνωσε την συμφωνία που υπέγραψε με την Nokia για ανάπτυξη 5G δικτύων.
- Νοέμβριος 2018: συνεργασία της Ericson με την εταιρεία κινητής τηλεφωνίας της Νοτίου Αφρικής MTN Group για ανάπτυξη σταθερής 5G ασύρματης σύνδεσης πρόσβασης στο Midrand της Νοτίου Αφρικής.
- Δεκέμβριος 2018: ανακοίνωση συμφωνίας της Ericson με την Tigo για τον εκσυγχρονισμό του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Τον Δεκέμβριο επίσης ανακοινώθηκε η ολοκλήρωση της κατασκευής «Early 5G Innovation Cluster» στο Βερολίνο με συνεργασία της Nokia με τον πάροχο ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιών Telefonica Germany.
- Φεβρουάριος 2019: υπογραφή συμφωνίας μεταξύ της Nokia και της Saudi Telecom Company για την έναρξη του δικτύου 5G και την διάθεση των υπηρεσιών στην Σαουδική Αραβία. Επίσης η Telecom Egypt συμφώνησαν με την Nokia να εισάγουν στην Αίγυπτο ένα 5G δίκτυο.
- Μάρτιος 2019: υπογραφή συνεργασίας του παρόχου τηλεπικοινωνιών της Μαλαισίας Maxis Communications με την Huawei, την U Mobile και την ZTE Corporation για την ανάπτυξη 5G υπηρεσιών στη Μαλαισία.
- Απρίλιος 2019: η Ιαπωνία διέθεσε πάνω από από 24GHz φάσμα για το 5G. Επίσης η Νότια Κορέα αναδείχθηκε ως η πρώτη χώρα που υιοθέτησε 5G τεχνολογία και παράλληλα η Verizon ξεκίνησε υπηρεσίες 5G δικτύων στις ΗΠΑ.

- Ιούνιος 2019: έναρξη κατασκευής ενός 5G κέντρου στην Ταϊπέι της Ταϊβάν από την αμερικανική εταιρεία Qualcomm και διάθεση εμπορικών αδειών για 5G υλοποίηση στην Κίνα από τις εταιρίες China Unicom, China Telecom και China Mobile.
- Ιούλιος 2019: συγχώνευση της κινητής υποδομής των εταιρειών Telecom Italia και Vodafone με στόχο την ανάπτυξη ενός από κοινού 5G δικτύου στην Ιταλία.
- Αύγουστος 2019: λανσάρισμα 5G υπηρεσιών σε πέντε Ιρλανδικές πόλεις από την εταιρεία Vodafone.
- Σεπτέμβριος 2019: ανακοίνωση συνεργασίας της Nokia με την γαλλική εταιρεία Iliad SA που είναι πάροχος τηλεπικοινωνιών με στόχο την ανάπτυξη 5G δικτύου στη Γαλλία και στην Ιταλία. Επίσης τον ίδιο μήνα ανακοινώνεται η συνεργασία της Samsung με την SK Telecom για ανάπτυξη και εμπορευματοποίηση της πρώτης 8K-5G τηλεόρασης στον κόσμο. Και Τρίτη ανακοίνωση συμφωνίας μέσα στον ίδιο μήνα, αυτή τη φορά από την NTT DoCoMo με την Omicron και την Nokia Networks για δοκιμές 5G εντός εργοστασίων της Ιαπωνίας.
- Οκτώβριος 2019: η εταιρεία Ericsson επιλέγεται από τον πάροχο υπηρεσιών Telia ως μοναδικός προμηθευτής 5G δικτύου ασύρματης πρόσβασης για το δίκτυο της επόμενης γενιάς της Telia στη Νορβηγία, με διάθεση του από το 2020 έως το 2023.
- Δεκέμβριος 2019: εγκαίνια εμπορικών υπηρεσιών 5G στο Αμβούργο της Γερμανίας από την εταιρεία Deutsche Telecom.
- Ιανουάριος 2020: πραγματοποίηση επιτυχημένων δοκιμών στην Ουγκάντα από τις εταιρείες ZTE Corporation και MTN Uganda με αποτέλεσμα η Ουγκάντα να γίνεται η πρώτη χώρα στην Ανατολική Αφρική που υιοθετεί τεχνολογίες 5G δικτύων.
- Φεβρουάριος 2020: έναρξη προγράμματος πιστοποίησης 5G από τη Nokia με σκοπό την εκπαίδευση και πιστοποίηση επαγγελματιών επιχειρήσεων και τεχνολογίας.
- Ιούλιος 2020: σχεδιασμός σταθμών βάσεως 5G σε 47 νομούς της Ιαπωνίας έως την άνοιξη του 2021 από την εταιρεία NTT DoCoMo, και σχεδιασμός υλοποίησης συνολικά 10.000 σταθμών βάσεων στο μέλλον.
- Τέλος 2023: εκτίμηση από τον πάροχο τηλεπικοινωνιών China Tower ότι θα φτάσει σε εθνική κάλυψη 5G.
- 2024: σύμφωνα με έρευνα του Global Data που διεξάχθηκε τον Σεπτέμβριο του 2019 οι συνδρομητές 5G παγκοσμίως αναμένεται να φτάσουν το 1,5 δισεκατομμύριο και τα έσοδα αυτών εκτιμώνται στα 301 δισεκατομμύρια δολάρια, με την περιοχή της Ασίας να είναι η μεγαλύτερη αγορά σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.1.2. Αρχιτεκτονική 5G δικτύων

Οι αρχιτεκτονικές του 5G δικτύου περιλαμβάνουν την αρχιτεκτονική Non-Standalone (NSA) και την αρχιτεκτονική Standalone (SA). Η αρχιτεκτονική Non-Standalone (NSA) είναι η πρώτη φάση επέκτασης του 5G και βασίζεται στο υπάρχον 4G δίκτυο. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, οι υπηρεσίες 5G χρησιμοποιούνται μέσω του 4G πυρήνα (Core Network). Αυτό επιτρέπει στους φορείς να εισαγάγουν την ταχύτητα και τη χαμηλή καθυστέρηση (latency) του 5G, ενώ συνεχίζουν να χρησιμοποιούν την υπάρχουσα υποδομή του 4G. Η αρχιτεκτονική Standalone (SA) είναι η πλήρης ανεξαρτησία του 5G και διαθέτει δικό της αυτόνομο πυρήνα (Core Network). Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, οι υπηρεσίες 5G λειτουργούν αποκλειστικά μέσω του 5G δικτύου, προσφέροντας πλήρη λειτουργικότητα και δυνατότητες όπως η χαμηλή καθυστέρηση, η υψηλή ταχύτητα και η συνδεσιμότητα με μεγάλο αριθμό συσκευών (IoT). Οι αρχιτεκτονικές αυτές επιτρέπουν την ανάπτυξη και την εκμετάλλευση των πλήρων δυνατοτήτων του 5G δικτύου, εξασφαλίζοντας βελτιωμένη επικοινωνία και υπηρεσίες για τους χρήστες.

2.1.3. Τεχνολογίες 5G δικτύων

Οι τεχνολογίες που συνδέονται με το 5G είναι οι εξής:

- Υψηλή ταχύτητα: Το 5G παρέχει αυξημένες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων σε σύγκριση με τα προηγούμενα δίκτυα, επιτρέποντας γρηγορότερη λήψη και αποστολή πληροφοριών.
- Χαμηλή καθυστέρηση: Η τεχνολογία 5G μειώνει την καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων, επιτρέποντας πραγματικού χρόνου αλληλεπίδραση και εφαρμογές όπως τηλεχειρισμό, αυτόνομα οχήματα και εικονική πραγματικότητα.
- Μεγάλη χωρητικότητα: Το 5G δίκτυο διαθέτει αυξημένη χωρητικότητα για την υποστήριξη του μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών και την ανταπόκριση σε υψηλές απαιτήσεις κίνησης δεδομένων.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας: Η αρχιτεκτονική του 5G σχεδιάστηκε για να εξοικονομεί ενέργεια, επιτρέποντας πιο αποδοτική λειτουργία των συσκευών και την αναπτυξιακή εφαρμογή της τεχνολογίας IoT (Internet of Things).
- Υποστήριξη συνδεδεμένων συσκευών (IoT): Το 5G δίκτυο παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης μεγάλου αριθμού συσκευών, όπως αισθητήρες, έξυπνες συσκευές και αυτόνομα οχήματα, παρέχοντας την υποδομή για το Internet of Things.

Αυτές είναι μερικές από τις βασικές τεχνολογίες που διακρίνονται στο 5G δίκτυο και επιτρέπουν την παροχή προηγμένων υπηρεσιών και λειτουργιών.

Με την εμφάνιση και εξέλιξη της πέμπτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (5G), εμφανίστηκαν επίσης οι νέες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα 5G κινητά δίκτυα. Αυτές οι νέες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για να υποστηρίξουν τις υψηλές ταχύτητες μετάδοσης που προσφέρουν τα ασύρματα συστήματα 5G.

- Massive Multiple-Input and Multiple-Output (MMIMO)
- Millimeter Wave
- Device-to-Device Communication (D2D)
- Energy Efficient Communications
- Πυκνά Δίκτυα (Ultra Dense Networks)
- Internet of Things (IoT)
- Software Defined Networking (SDN)
- Network Function Virtualization (NFV)
- Big Data and Mobile Cloud Computing
- Cognitive Radio [37], [38]

2.1.4. Μελέτες και πειράματα για τα 5G δίκτυα

Τα 5G δίκτυα έχουν υποστεί πολλές μελέτες και πειράματα για να αξιολογηθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητά τους. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα μελετών και πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί:

- Μελέτες πεδίου: Πολλοί πάροχοι τηλεπικοινωνιών και εταιρείες έχουν πραγματοποιήσει δοκιμές και πειράματα 5G σε πραγματικά περιβάλλοντα. Αυτές οι μελέτες πεδίου περιλαμβάνουν την εγκατάσταση και την αξιολόγηση του υλικού και των συστημάτων 5G σε πόλεις και περιοχές.
- Πειράματα χρήσης: Έχουν διεξαχθεί πειράματα για να αξιολογηθεί η απόδοση των 5G σε διάφορες εφαρμογές και περιβάλλοντα. Παραδείγματα πειραμάτων περιλαμβάνουν τη

χρήση των 5G για την αυτόνομη οδήγηση, την επαυξημένη πραγματικότητα, την υπερυψωμένη προσωπική επικοινωνία, την υγεία και πολλά άλλα.

- Μοντελοποίηση και προσομοίωση: Τα προσομοιωτικά εργαλεία, όπως το NS-3 και το OPNET, έχουν χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιηθούν και να προσομοιωθούν δίκτυα 5G. Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές να αξιολογήσουν την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των 5G δικτύων σε διάφορες συνθήκες και σενάρια.
- Έρευνα και ανάπτυξη προτύπων: Οι οργανισμοί προτύπων, όπως η 3GPP, έχουν εκπονήσει τεχνικές προδιαγραφές για τα 5G δίκτυα. Έχουν γίνει πολλές μελέτες και πειράματα για να αναπτυχθούν και να επικυρωθούν αυτά τα πρότυπα.

Παρακάτω είναι μερικά παραδείγματα μελετών και πειραμάτων που έχουν γίνει για τα 5G δίκτυα. Η έρευνα και η ανάπτυξη στον τομέα των 5G εξακολουθεί να εξελίσσεται, καθώς αναζητούνται νέες εφαρμογές και βελτιώνονται οι τεχνολογίες για την αξιοποίηση του δυναμικού των 5G δικτύων:

- Αρχές 2012: ανακοίνωση από την κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου για δημιουργία κέντρου καινοτομίας 5G στο πανεπιστήμιο του Surrey. Την ίδια χρονιά ιδρύεται το ερευνητικό κέντρο NYU WIRELESS δίνοντας έμφαση στην ασύρματη έρευνα καθώς και στην χρήση 5G σε τομείς ιατρικής και πληροφορικής. Επίσης, το ίδιο έτος η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δεσμεύει 50 εκατομμύρια ευρώ για έρευνα στην κινητή τηλεφωνία 5G υπό την αιγίδα της Neelie Kroes. [30]
- Νοέμβριος 2012: έναρξη ερευνητικού προγράμματος στη Μαδρίτη της Ισπανίας χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση και συντονισμένο από το Ινστιτούτο IMDEA Networks [30]
- Ιανουάριος 2013: έναρξη έργου με το όνομα CROWD (Connectivity management for eneRgy Optimized Wireless Dense networks) το οποίο είχε στόχο να σχεδιάσει βιώσιμες λύσεις δικτύωσης και λογισμικού για να αναπτυχθούν πυκνά και ετερογενή ασύρματα δίκτυα υπό την επίβλεψη του Ινστιτούτου IMDEA Networks.
- Μέσα 2013: έναρξη του έργου 5GrEEen συνδεδεμένο με το έργο METIS και επικέντρωση στον σχεδιασμό πράσινων δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G.
- Νοέμβριος 2013: ανακοίνωση από την κινεζική εταιρεία Huawei ότι θα επενδύσει 600 εκατομμύρια δολάρια σε έρευνα για τα 5G δίκτυα στα επόμενα 5 χρόνια.
- Αρχές 2015: οι εταιρείες Ericsson και Huawei δοκιμάζουν τεχνολογίες σχετικές με τα 5G δίκτυα σε περιοχές αγροτικού ενδιαφέροντος στη Βόρεια Ολλανδία.
- Ιούλιος 2015: έναρξη των ευρωπαϊκών έργων METIS-II & 5GNORMA. Το METIS-II προσέφερε κοινή αξιολόγηση του 5G και του 5G-PPP και προετοίμασε συντονισμένες δράσεις προς τους ρυθμιστικούς φορείς. Αντίστοιχα το έργο 5GNORMA ανέπτυξε μια πρωτοποριακή και προσαρμοστική αρχιτεκτονική του 5G δικτύου η οποία επέτρεπε τη δημιουργία επιπέδων προσαρμοστικότητας στο δίκτυο και παράλληλα εξασφάλιζε αυστηρές απαιτήσεις απόδοσης ασφάλειας, ενέργειας και κόστους. [30] Τον ίδιο μήνα ξεκίνησε το πρόγραμμα mmMAGIC το οποίο ανέπτυξε νέες ιδέες για την ασύρματη πρόσβαση (RAT-Radio Access Technology) και για την ανάπτυξη της ζώνης mmwave. Αυτό αποτέλεσε βασικό στοιχείο του οικοσυστήματος 5G multi-RAT και χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την παγκόσμια προτυποποίηση. Το έργο επέτρεψε εξαιρετικά γρήγορες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες για χρήστες κινητών τηλεφώνων, υποστηρίζοντας 3D streaming, εμβληματικές εφαρμογές και υπηρεσίες cloud υψηλής απόκρισης. Τον συντονισμό του έργου αυτού ανέλαβε η Samsung. Η Ericsson ενήργησε ως τεχνικός διευθυντής, ενώ η Intel, η Fraunhofer HHI, η Nokia, η Huawei και οδήγησαν η καθεμία τις τεχνικές εργασίες του έργου. [30]

- Αρχές 2016: κατασκευή του πρώτου δοκιμαστικού δικτύου 5G στο Oulu της Φινλανδίας όπου έγινε μια εγκατάσταση για έρευνα, ανάπτυξη και δοκιμές σε πραγματικό – ρεαλιστικό περιβάλλον 5G δικτύου. Η απόπειρα αυτή του δοκιμαστικού δικτύου αποδείχθηκε πλήρως λειτουργική και αποτέλεσε μια βάση για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, τεχνολογιών και εφαρμογών.
- Σεπτέμβριος 2016: στην Κίνα, το υπουργείο Βιομηχανίας και Πληροφορικής ανακοινώνει ότι ολοκληρώθηκαν οι κυβερνητικές δοκιμές των 5G δικτύων και στέφθηκαν με επιτυχία, αποφέροντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι δοκιμές αυτές έλαβαν χώρα σε 100 πόλεις της Κίνας και υποστηρίχθηκαν από τη συμμετοχή των εταιρειών Huawei, Samsung, Ericson, Intel, ZTE, Nokia Shanghai Bell και Datang Telecom [30]
- Απρίλιος 2017: ανακοίνωση από την εταιρεία Huawei για διεξαγωγή δοκιμών 5G σε συνεργασία με την εταιρεία Telenor οι οποίες έφτασαν έως και 70Gbit/s σε εργαστηριακό περιβάλλον στη Νορβηγία.
- Ιούνιος 2017: πραγματοποιείται με επιτυχία η πρώτη ολοκληρωμένη δοκιμή του Pre-5G LTE Advanced Pro στη Νότια Ασία από τις εταιρείες Huawei και SLT (Sri Lanka Telecom) και έτσι θέτονται οι βάσεις για την επόμενη γενιά ευρυζωνικών τεχνολογιών. Για την επίτευξη της δοκιμής αυτής χρησιμοποιήθηκε μια τεχνολογία με το όνομα Advanced Carrier Aggregation Technology η οποία επιτρέπει σε πολλαπλούς μεταφορείς LTE να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα και να αυξηθεί έτσι η συνολική απόδοση δεδομένων.
- Ιούλιος 2017: πραγματοποίηση της πρώτης δοκιμής 5G τεχνολογίας σταθερής ασύρματης πρόσβασης στο Λονδίνο από τις εταιρείες Samsung και Arqiva μέσω σταθερής αμφίδρομης σύνδεσης mmWave με ταχύτητες downlink 1Gbps. [30]
- Αρχές 2018: ανακοίνωση της Ινδίας για επένδυση του προϋπολογισμού της σε 5G δοκιμές με στόχο να την θέσει ως ηγέτη της τεχνολογίας 5G στην Ασία. Επίσης, το ίδιο διάστημα η εταιρεία Orange δοκίμασε στη Lille και στο Douai της Γαλλίας το 5G δίκτυο.
- Μάρτιος 2018: ανακοίνωση 6 δοκιμών 5G στο Ηνωμένο Βασίλειο όπου η κάθε μια από αυτές είχε επιχορηγηθεί από το κράτος με 2-5 εκατομμύρια λίρες.
- Απρίλιος 2018: Εξουσιοδότηση 5G δοκιμών σε 16 πόλεις από την κυβέρνηση της Κίνας.
- Μάιος 2018: επιτυχημένη 5G δοκιμή στα 28GHz από την εταιρεία NTT DoCoMo στην Ιαπωνία μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός αυτοκινήτου που ταξίδευε με 293Km/h περίπου. [30], [103]
- Ιούνιος 2018: εγκαίνια των πρώτων εμπορικών 5G δικτύων στον κόσμο από την εταιρεία Elisa της Φινλανδίας η οποία ξεκίνησε να πουλάει άμεσα συνδρομές στο Ταλίν και στο Ταμπέρε. Επίσης τον ίδιο μήνα ξεκίνησαν 5G δοκιμές στις πόλεις Βαρκελώνη, Μαδρίτη, Βαλένθια και Σεβίλλη της Ισπανίας από την εταιρεία Vodafone Spain.
- Σεπτέμβριος 2018: επίτευξη ταχυτήτων 25-27Gbps σε μια δοκιμή 5G από την ιαπωνική εταιρεία NTT DoCoMo σε συνεργασία με την Mitsubishi Electric.
- Νοέμβριος 2018: διεξαγωγή λύσεων σταθερής 5G ασύρματης πρόσβασης στην Κωνσταντινούπολη από τις εταιρείες Turkcell και Samsung. [103] Επιπρόσθετα, τον Νοέμβριο ολοκληρώθηκε το πρώτο πιλοτικό 5G στη ζώνη συχνοτήτων 3,5GHz στην Σιγκαπούρη από τις εταιρείες StarHub και Nokia.
- Δεκέμβριος 2018: έναρξη δοκιμών στη Στοκχόλμη από τις εταιρείες Ericson και TeliaSonera με το Ινστιτούτο KTH Royal Institute of Technology. Επίσης, στη Σεούλ ξεκίνησαν εμπορικές υπηρεσίες του 5G στη ζώνη 3,5GHz από τις εταιρείες SK Telecom, LG Uplus και KT Corporation. Τέλος, τον ίδιο μήνα άνοιξε το πρώτο δίκτυο δοκιμών στη Νορβηγία από την εταιρεία Telia Company. [103]
- Ιανουάριος 2019: πραγματοποιήθηκε η πρώτη μετάδοση 5G δεδομένων στον κόσμο με 2,5GHz από τις εταιρείες Nokia, Sprint Corporation και Qualcomm.

- Φεβρουάριος 2019: διεξαγωγή της πρώτης τηλεπικοινωνιακής εγχείρησης στον κόσμο, από μια ομάδα γιατρών στο Hospital Clinic της Βαρκελώνης όπου αφαιρέθηκε ένας καρκινικός όγκος από το παχύ έντερο ενός ασθενούς ενώ ο χειρουργός γιατρός επέβλεπε τη διαδικασία από 3 μίλια απόσταση.
- Απρίλιος 2019: οι εταιρείες SK Telecom, LG Plus και KT λάνσαραν το πρώτο κινητό 5G στην Νότια Κορέα η οποία έγινε η πρώτη χώρα με αυτή την επιτυχία, ταυτόχρονα οι 3 αυτές εταιρείες πρόσθεσαν περισσότερους από 40.000 χρήστες στα δίκτυα τους τη μέρα κυκλοφορίας της συσκευής κινητού. Παράλληλα στις ΗΠΑ εγκαινιάστηκαν οι υπηρεσίες 5G από την εταιρεία Verizon και στην Ελβετία εγκαινιάστηκε 5G δίκτυο από τις εταιρείες Swisscom και Ericson σε 54 πόλεις. [103]
- Μάιος 2019: έναρξη πωλήσεων του κινητού Samsung Galaxy S10 5G από την εταιρεία Verizon στις Ηνωμένες Πολιτείες. Εγκαίνια από την εταιρεία Telstra της Αυστραλίας σε 5G υπηρεσίες.
- Ιούνιος 2019: εγκαίνια από τη Vodafone σε τεχνολογίες 5G σε πέντε πόλεις της Ιταλίας, σε Μιλάνο, Ρώμη, Νάπολη, Μπολόνια και Τορίνο. Παράλληλα η Huawei σε συνεργασία με την Vodafone αναπτύσσουν τις πρώτες 5G υπηρεσίες στην Ισπανία. [103]
- Αύγουστος 2019: κυκλοφορία του πρώτου κινητού τηλεφώνου με 5G δίκτυο του μοντέλου Axon 10 Pro στην Κίνα από την εταιρεία ZTE. Τον ίδιο μήνα γίνονται τα εγκαίνια του εμπορικού δικτύου 5G στη Γερμανία από τις εταιρείες Vodafone και Ericson με στόχο το 5G δίκτυο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από 20 εκατομμύρια ανθρώπους στη Γερμανία μέχρι το τέλος του 2021. Επίσης, εγκαινιάζεται στη Μόσχα της Ρωσίας η πρώτη 5G ζώνη από την Ericson και την Tele2
- Σεπτέμβριος 2019: κυκλοφορία των 5G τεχνολογιών από την Deutsche Telecom στις πόλεις Μόναχο, Βερολίνο, Κολωνία, Βόννη και Ντάρμστατ της Γερμανίας.
- Οκτώβριος 2019: ανακοίνωση των 11 έργων σε 5G δοκιμές με 26GHz στη Γαλλία από την εταιρεία Arcep. Εγκαίνια σε 20 πόλεις του Ηνωμένου Βασιλείου για 5G υπηρεσίες από την εταιρεία BT Mobile. [103]
- Νοέμβριος 2019: η Κίνα έως και τον Νοέμβριο του 2019 κατάφερε να διαθέτει 113.000 BSs για 5G και τον ίδιο μήνα η Γερμανία πρόσφερε άδειες φάσματος 3,7-3,8GHz στις ιδιωτικές εταιρείες ώστε να αναπτύξουν τις 5G υπηρεσίες.
- Δεκέμβριος 2019: η T-Mobile καταφέρνει να γίνει ο πρώτος αμερικάνικος φορέας που πρόσφερε 5G πρόσβαση σε όλη τη χώρα μέσω 600MHz. Ο στόχος ήταν να μπορούν τουλάχιστον 200 εκατομμύρια άνθρωποι στις ΗΠΑ να έχουν πρόσβαση σε νέα και πληροφορίες μέσω 5G δικτύου και να καλυφθεί μια έκταση 1 εκατομμυρίου τετραγωνικών μιλίων με 5G δίκτυο. Επίσης, τον ίδιο μήνα πραγματοποιήθηκε η πρώτη κλήση με 5G δεδομένα παγκοσμίως με φάσμα 2,3GHz στο Σύδνεϋ της Αυστραλίας από την εταιρεία Optus και η εταιρεία Deutsche Telecom ξεκίνησε τις υπηρεσίες 5G σε εμπορική διάθεση στο Αμβούργο της Γερμανίας.
- Φεβρουάριος 2020: ρεκόρ ταχύτητας στα 4,3Gbps από την εταιρεία Ericson στο φάσμα της mmWave αφήνοντας έτσι πίσω την Huawei που κατείχε το ρεκόρ έως εκείνη τη στιγμή. [103]

2.2. Απαιτήσεις και δυνατότητες των 5G δικτύων

Στις αρχικές γενιές των κινητών τηλεφώνων, τα δίκτυα εστιάζονταν μόνο στην υποστήριξη των κινητών τηλεφώνων. Ωστόσο, με την εξάπλωση του Διαδικτύου και των πολλαπλών εφαρμογών του, προέκυψε η ανάγκη να διαχειριστούμε την κίνηση έτσι ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις διάφορων εφαρμογών όπως το video streaming, οι κλήσεις VoIP, τα δεδομένα και άλλα. Αντίστοιχα, αντιμετωπίζουμε την πρόκληση να υποστηρίξουμε διάφορα είδη συσκευών και

εφαρμογών με ποικίλες απαιτήσεις, προκειμένου οι χρήστες να απολαμβάνουν την καλύτερη δυνατή επικοινωνία. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα κυψελοειδή δίκτυα, το 5G κυψελοειδές δίκτυο σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει μια ποικιλία συσκευών και εφαρμογών, όπως έξυπνα ρολόγια, αυτόνομα οχήματα και το Internet of Things (IoT). Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) έχει καθορίσει τρεις κύριες κατηγορίες εξυπηρέτησης για το 5G: υπηρεσίες ευρυζωνικής κινητής σύνδεσης, μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής και υψηλής αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες. Συνεπώς, απαιτούνται πιο προηγμένα κινητά δίκτυα που να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις και να προσφέρουν τις αναμενόμενες λειτουργίες για να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών. [38]

Αυτές οι απαιτήσεις είναι :

- Υψηλοί ρυθμοί δεδομένων (High Data Rates)

Σε προηγούμενες γενιές κινητής τηλεφωνίας, η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ήταν ο βασικός παράγοντας. Με την εμφάνιση του κινητού Internet και των υπηρεσιών όπως το video streaming υψηλής ανάλυσης και η εικονική πραγματικότητα σε κινητά τηλέφωνα, καθώς και την αύξηση των τάμπλετ και φορητών υπολογιστών που συνδέονται ασύρματα στο Internet, η αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων γίνεται αναπόφευκτη απαίτηση. Αν και οι τρέχουσες μέγιστες ταχύτητες δεδομένων επιτρέπουν το streaming υψηλής ευκρίνειας μετάδοσης στα 8-15 Mbps, υπάρχουν εφαρμογές όπως το 4K video streaming, τα high-definition παιχνίδια και το 3D περιεχόμενο που απαιτούν ακόμα υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης περίπου 25 Mbps για μια ικανοποιητική εμπειρία των χρηστών. Με την εμφάνιση αυτών των νέων εφαρμογών που απαιτούν αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, τα δίκτυα 5G αναμένεται να προσφέρουν ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως και 10 Gbps, ήτοι 100 φορές ταχύτερες από τα υπάρχοντα 4G δίκτυα. [38]

- Χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης (Low Latency)

Η καθυστέρηση στα LTE δίκτυα είναι περίπου 15 milliseconds (ms). Ωστόσο, για τις πρόσφατες εφαρμογές όπως το Internet, η εικονική πραγματικότητα και τα παιχνίδια για πολλαπλούς παίκτες, που τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν, απαιτείται μια καθυστέρηση τάξης μεγέθους γύρω στο 1 ms. Μελλοντικές συσκευές θα ενσωματώσουν διάφορες διεπαφές όπως απτική, οπτική και ακουστική είσοδο και ανατροφοδότηση, που θα προσφέρουν νέους τρόπους αλληλεπίδρασης με το online περιβάλλον για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας, υγειονομικής περίθαλψης, αθλητισμού κλπ. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν αλληλεπιδράσεις πραγματικού χρόνου και οποιαδήποτε καθυστέρηση θα επηρεάσει την εμπειρία του χρήστη, γεγονός που καθιστά την καθυστέρηση κρίσιμο παράγοντα στα δίκτυα 5G. Ένας άλλος τομέας που αναμένεται να υποστηρίζεται από τα δίκτυα 5G είναι η επικοινωνία μηχανής (MTC), όπου οι συσκευές επικοινωνούν αυτόματα μεταξύ τους. [38]

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Low Energy Consumption)

Τα δίκτυα 5G υποστηρίζουν τις συσκευές IoT οι οποίες μέσω αισθητήρων συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με ένα περιβάλλον και τις μεταδίδουν σε έναν κεντρικό server. Αυτές οι συσκευές είναι χαμηλής ισχύος, χαμηλού κόστους και έχουν διάρκεια ζωής αρκετά χρόνια. Δεδομένου ότι οι συσκευές αυτές δεν συνδέονται πάντοτε με τον BS και ενεργοποιούνται μόνο περιστασιακά, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους δεν μπορεί να επιτρέψει τη συγχρονική διαδικασία με τον BS κάθε φορά, καθώς το βήμα

συγχρονισμού κοστίζει περισσότερη ενέργεια από αυτή της πραγματικής μετάδοσης δεδομένων. Αυτή η περίπτωση απαιτεί η ασύρματη πρόσβαση για το 5G να είναι μη συγχρονισμένη. Με τον αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών, ο αριθμός των σταθμών βάσης που απαιτούνται για την υποστήριξη αυτών των συσκευών θα κλιμακωθεί. Λόγω της ανάπτυξης μικρών κυψελών, ο σταθμός βάσης θα πυκνώσει. Αυτή η τάση απαιτεί οι σταθμοί βάσης να είναι ενεργειακά αποδοτικοί, δεδομένου ότι ακόμη και μια μικρή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης θα μεταφραστεί σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. [38]

- Υψηλή κλιμάκωση (Scalability)

Για την υποστήριξη της αύξησης του αριθμού των κινητών συσκευών που συνδέονται με το ασύρματο δίκτυο και επικοινωνούν μεταξύ τους, η επεκτασιμότητα του δικτύου γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό του ασύρματου δικτύου ασύρματης επικοινωνίας επόμενης γενιάς. Η αύξηση του αριθμού των συσκευών επιδεινώνεται περαιτέρω από τις χιλιάδες συσκευών IoT και τις τεχνολογίες επικοινωνίας οχημάτων προς οχήματα που αναμένεται να αυξηθούν στο κυψελοειδές 5G δίκτυο.. Συνεπώς, απαιτείται ένα εξαιρετικά κλιμακωτό δίκτυο που μπορεί να προσαρμόσει αποτελεσματικά αυτήν την έξαρση των ολοένα αυξανόμενων συσκευών. Η υψηλή επεκτασιμότητα είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την απόδοση των σημερινών και αναδυόμενων εφαρμογών, όπως οι υπηρεσίες IoT, τα αυτόνομα οχήματα κλπ. Στην περίπτωση των αυτόνομων οχημάτων, η άμεση επικοινωνία μεταξύ τους σε μεγάλες πυκνότητες κυκλοφορίας απαιτούν την επεκτασιμότητα του κυψελοειδούς δικτύου. [38]

- Βελτιωμένη συνδεσιμότητα και αξιοπιστία (Improved Connectivity & Reliability)

Με την αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών, ο αριθμός των handover που θα χειρίζεται ο σταθμός βάσης θα αυξηθεί τουλάχιστον κατά δύο τάξεις μεγέθους. Για να υποστηριχθεί αυτή η απαίτηση, απαιτούνται νέοι αλγόριθμοι και τεχνικές που παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη στις περιοχές αιχμής κυψελών. Ένα άλλο σχετικό ζήτημα είναι οι ανησυχίες της γνησιότητας και αυθεντικότητας σχετικά με το handover. Η καθυστέρηση επικοινωνίας με τον διακομιστή ελέγχου ταυτότητας για κάθε handover θα είναι εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου, τα οποία θα ήταν απαράδεκτα για τις 5G εφαρμογές. Επίσης, δεδομένης της χρήσης ζωνών υψηλότερης συχνότητας, η περιοχή μετάδοσης σημάτων μειώνεται σημαντικά. Ως εκ τούτου, η διατήρηση της σύνδεσης καθίσταται μια μεγάλη πρόκληση για το 5G. Για τις υπηρεσίες κρίσιμης σημασίας, οι απαιτήσεις σχετικά με την υψηλή αξιοπιστία καθώς και τη συνδεσιμότητα πρέπει να είναι πάντα εγγυημένες. [38]

- Βελτιωμένη ασφάλεια (Improved Security)

Η ασφάλεια του ασύρματου δικτύου έχει τραβήξει μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα μετά το 2015, όταν έγιναν δημοφιλείς οι εφαρμογές των κινητών πληρωμών και του ψηφιακού πορτοφολιού. Από την οπτική γωνία των προηγούμενων γενεών συστημάτων, ο γενικός σκοπός της ασφάλειας είναι η προστασία της βασικής σύνδεσης και η διατήρηση της ιδιωτικότητας των χρηστών. Ωστόσο, δεδομένου ότι το 5G σύστημα θα αντιμετωπίσει τελικά τη δραματικά αυξανόμενη κυκλοφορία δεδομένων σε

ολόκληρο το δίκτυο, η απαίτηση ασφάλειας του 5G δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στην παροχή αξιόπιστης σύνδεσης στους χρήστες, αλλά επίσης στην βελτίωση της ασφάλειας σε ολόκληρο το δίκτυο, με ιδιαίτερη προσοχή στην πιστοποίηση και εξουσιοδότηση ταυτότητας, αναπτύσσοντας νέα πρωτόκολλα κρυπτογράφησης. Τα 4G δίκτυα δεν ήταν σε θέση να αναπτύξουν ένα ενιαίο πρότυπο για την προστασία των προσωπικών δεδομένων των χρηστών, κάτι το οποίο θα αντιμετωπιστεί πλήρως στα 5G ασύρματα δίκτυα. [38]

2.3. Υπηρεσίες των 5G δικτύων

Η πέμπτη γενιά ασύρματης τεχνολογίας αναμένεται να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στις επιδόσεις των δικτύων σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Αυτή η εξέλιξη θα επιτρέψει σε επιχειρήσεις και άλλους τομείς να αξιοποιήσουν ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών, υπηρεσιών και δυνατοτήτων, όπως έξυπνα ρολόγια, φορητές συσκευές, αυτόνομα οχήματα και τεχνολογία Internet of Things (IoT). Αυτές οι υπηρεσίες θα έχουν αντίκτυπο στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων στα επόμενα χρόνια και θα ανταποκριθούν στις ανάγκες τους.

Οι κύριες ανάγκες και υπηρεσίες που μπορεί να καλύψει η 5G τεχνολογία είναι οι εξής:

- Διασκέδαση :

Υπάρχουν ήδη πολλές εφαρμογές, που προσφέρουν στους χρήστες τη δυνατότητα να διασκεδάσουν και θα υπάρξουν πολλές περισσότερες στο μέλλον με την εμφάνιση της 5G τεχνολογίας. Μερικές από τις βασικές υπηρεσίες που προσφέρονται σε αυτόν τον τομέα είναι :

- παιχνίδια με πολλαπλούς παίκτες, η τεχνολογία 5G προσφέρει τη δυνατότητα σε πολλούς παίκτες να παίζουν ταυτόχρονα στο ίδιο παιχνίδι, να έχουν αλληλεπίδραση και να συνεργάζονται σε υψηλούς ρυθμούς χωρίς καμία καθυστέρηση.
- συνεχής ροή (streaming) σε πραγματικό χρόνο, όπου δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να δρουν ζωντανά, να διαφοροποιούν τα δεδομένα ή να διαχειρίζονται τις πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο χωρίς καθυστέρηση.
- online αλληλεπιδραστικές συνομιλίες, όπου οι χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να αλληλοεπιδράσουν σαν να βρίσκονται στον ίδιο χώρο.
- mobile μέσα κοινωνικής δικτύωσης,
- φορητές συσκευές, για χρήση διαδικτύου και δεδομένων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή σε οποιοδήποτε μέρος.
- network gaming, με specific rooms για συζήτηση ανταλλαγή δεδομένων και συνεργασιών.
- ψυχαγωγία μέσα στο αυτοκίνητο (μέσα μαζικής ενημέρωσης και υπηρεσίες ψυχαγωγίας σε υποβοηθούμενα ή αυτοκινούμενα οχήματα), αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση εφαρμογών εγκατεστημένων στο αυτοκίνητο ή με ασύρματη σύνδεση με το κινητό του οδηγού.
- παρακολούθηση ταινίας με ακουστικά εικονικής πραγματικότητας, κ.λπ.

- Εικονική πραγματικότητα και Επαυξημένη πραγματικότητα :

Σε αυτήν την περίπτωση, ένα άτομο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας φορητές συσκευές, όπως γυαλιά ή ακουστικά. Με αυτή την

υπηρεσία, οι χρήστες έχουν την δυνατότητα να απολαμβάνουν μια νέα, υψηλής ποιότητας εμπειρία σε υψηλότερο επίπεδο. Ως εκ τούτου, νέες υπηρεσίες θα είναι διαθέσιμες στο κοινό, όπως :

- ταινίες και shows, με υψηλές ταχύτητες δεδομένων για παρακολούθηση οποιαδήποτε στιγμή θελήσει ο χρήστης.
 - ζωντανές συναυλίες, αθλητικές και άλλες εκδηλώσεις όπου ο χρήστης θα μπορεί να παρακολουθήσει έχοντας πολύ υψηλή ανάλυση και θα αισθάνεται σαν να βρίσκεται εντός του χώρου που εκτυλίσσεται το γεγονός.
 - διαδραστικό παιχνίδι και διασκέδαση.
 - μόρφωση μέσω διαδικτύου, παρακολούθηση διαλέξεων και διεξαγωγή εξετάσεων απομακρυσμένα χωρίς κανένα πρόβλημα.
 - εκπαίδευση και demos για ευκολότερη κατανόηση των χρηστών σε θέματα που τους ενδιαφέρουν.
 - 3D σχεδίαση και τέχνη με στόχο την εξέλιξη του πολιτισμού.
 - κοινωνικές συναναστροφές,
 - εξερεύνηση αξιοθέατων και περιοχών σε όλο τον κόσμο μέσω εικονικής πραγματικότητας
 - επικοινωνία οικογένειας εικονικά π.χ. αντάμωση σε γεύμα με όλη την οικογένεια ακόμα και αν κάποια μέλη βρίσκονται στην άλλη άκρη του πλανήτη.
 - επαγγελματικός κλάδος κ.λπ.
- Αυτοκινούμενα οχήματα :

Το 5G φέρνει μαζί του νέες υπηρεσίες και προσφέρει ευκαιρίες στους χρήστες να απολαμβάνουν τη δυνατότητα αυτοκινούμενων οχημάτων. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της αυτόνομης οδήγησης είναι :

- η οδική ασφάλεια (road safety) όπου οι υπηρεσίες οδικής ασφάλειας μειώνουν τον αριθμό τροχαίων ατυχημάτων μέσω παρακολούθησης της κυκλοφορίας, της κίνησης των οχημάτων και των πεζών κ.τ.λ.
- η διαχείριση της κυκλοφορίας (traffic management), όπου το cloud επεξεργάζεται τις πληροφορίες που έλαβε συνολικά από τα οχήματα και εξάγει συμπεράσματα σχετικά με την κίνηση σε μια προκαθορισμένη γεωγραφική περιοχή, έπειτα ενημερώνει όλα τα οχήματα που διέρχονται από την συγκεκριμένη περιοχή για τις συνθήκες κυκλοφορίας, συμβάλλοντας έτσι στην αποφυγή μποτιλιαρίσματος.
- η διαχείριση των φωτεινών σηματοδοτών μέσω της οποίας θα παρέχονται λύσεις κυκλοφοριακής συμφόρησης αλλά ακόμα σημαντικότερος είναι ο συνδυασμός της με εφαρμογές διαχείρισης κυκλοφορίας και διαχείρισης καταστροφών.
- η διαχείριση στάθμευσης μέσω της οποίας διευκολύνονται οι οδηγοί για τον εντοπισμό διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης και επίσης παρέχεται βοήθεια στάθμευσης στους οδηγούς.
- η αυτόνομη οδήγηση η οποία στοχεύει στην ασφαλή πλοήγηση των οχημάτων με χρήση OBUs, όπως υπολογιστές, αισθητήρες και navigators. Με τη χρήση αυτών των συσκευών ενημερώνονται οι χρήστες για τις αλλαγές του περιβάλλοντος όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση, τροχαία ατυχήματα κ.α.

- η άνεση τόσο για τον οδηγό όσο και για τους επιβάτες, καθώς θα μπορούν να ασκούν και άλλες δραστηριότητες κατά την μετακίνησή τους μέσα στο αυτοκίνητο,
- εξοικονόμηση καυσίμων και βελτίωση της κινητικότητας.

Έτσι, τα αυτοκινούμενα οχήματα θα είναι πραγματικά σημαντικά στο μέλλον, δίνοντας στους χρήστες μια καλύτερη εμπειρία οδήγησης. [73]

- "Έξυπνες" πόλεις : (+διαφάνεια 9 έως 22 από Smart Cities)

Ένα άλλο νέο βήμα που τονίζει τη σημασία της 5G τεχνολογίας θα είναι η ανάπτυξη μιας "έξυπνης" πόλης. Η δημιουργία ενός νέου ψηφιακού οικοσυστήματος θα ωφελήσει τους πολίτες, καθώς οι πόλεις θα λειτουργήσουν πιο αποτελεσματικά και με πιο βιώσιμο τρόπο. Θα υπάρχουν πολλαπλές ψηφιακές συσκευές χαμηλού κόστους που θα συνδέονται μεταξύ τους για να επικοινωνούν, έτσι ώστε να βελτιώσουν και να ενισχύσουν τα σπίτια, τα γραφεία και άλλους χώρους και να προσφέρουν εξοικονόμηση κόστους και χρόνου και νέες παροχές στους κατοίκους της πόλης. Τα βασικά πλεονεκτήματα που θα απολαμβάνουν οι άνθρωποι από την εφαρμογή "έξυπνων" πόλεων είναι:

- οικονομική ανάπτυξη,
- βελτίωση της ποιότητας ζωής,
- καλύτερο και ασφαλές περιβάλλον,
- καλύτερη επικοινωνία. [73], [75]

Επίσης κάποιες βασικές υπηρεσίες των Έξυπνων πόλεων είναι οι εξής:

- Smart Parking όπου γίνεται εντοπισμός των θέσεων parking, με δυνατότητα ανάλυσης ελεύθερων και κατειλημμένων θέσεων, δημιουργία στατιστικών ανά περιοχή και μετέπειτα χρέωση για την παροχή θέσης.
- Smart Lighting όπου γίνεται διαχείριση φωτισμού και δημιουργούνται επίπεδα φωτισμών ανάλογα με την κίνηση στους δρόμους με κύριο στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Smart Traffic Control με στόχο την ελάττωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, αποφυγή διαδρομών όπου γίνονται έργα ή έχει προκληθεί κάποιο ατύχημα ή φυσική καταστροφή και πρόταση εναλλακτικών διαδρομών προς τους οδηγούς, αυτό θα επιτευχθεί με έξυπνη διαχείριση φωτεινών σηματοδοτών, και συλλογή δεδομένων κίνησης από σημεία ελέγχου.
- Smart Waste Management όπου πραγματοποιείται επίβλεψη των επιπέδων απορριμμάτων ανά περιοχή, επιλογή βέλτιστης διαδρομής για τα απορριμματοφόρα καθώς και εξοικονόμηση πόρων όπως είναι καύσιμα, ανθρώπινοι πόροι και συντήρηση οχημάτων.
- Smart Buildings σε αυτά τα κτήρια υπάρχει η δυνατότητα ενεργειακής διαχείρισης (έξυπνου φωτισμού ή και έξυπνης ψύξης θέρμανσης), διαχείρισης νερού, ασφάλεια από φυσικές καταστροφές, απομακρυσμένος έλεγχος συσκευών και εύκολη προσβασιμότητα για ΑΜΕΑ.
- Smart Vehicles επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω roadside εξοπλισμού, ο οποίος εγκαθίσταται σε φωτεινούς σηματοδότες, πινακίδες κ.α. συμβάλλοντας στη μετάδοση δεδομένων αφού παρέχει υπηρεσίες ίντερνετ στα οχήματα. Επίσης τα οχήματα διαθέτουν On-Board Units (OBUs) δηλαδή εξοπλισμό για παροχή αποθηκευτικών και τηλεπικοινωνιακών πόρων καθώς και δυνατότητα

προσθήκης συσκευών όπως tablets, κινητό τηλέφωνο, GPS κ.α. Τέλος τα οχήματα διαθέτουν σύγχρονες εφαρμογές όπως πλοήγηση, υπηρεσίες οδικής ασφάλειας, διαχείριση κυκλοφορίας, στάθμευσης κ.τ.λ.

- Smart Crosswalk όπου βασικός στόχος είναι η ασφάλεια των πεζών και μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, πρώτον με αλγορίθμους οπτικής αναγνώρισης οχημάτων, πινακίδων ή πεζών, δεύτερον με ασύρματη επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και πεζών και τέλος με αισθητήρες στο οδόστρωμα.
- Smart Agriculture μέσω της οποίας θα αυξηθεί η παραγωγή και ταυτόχρονα θα μειωθεί η εργασία, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ρομποτικών μηχανημάτων για την καλλιέργεια ή την συγκομιδή προϊόντων, μέσω αυτόνομης οδήγησης των γεωργικών μηχανημάτων και στη συνέχεια ελέγχοντας τις καλλιέργειες μέσω applications και αισθητήρων για πιθανή ύπαρξη ζιζανίων και χρησιμοποιώντας drones για άρδευση ή λίπανση ή ψεκασμούς των καλλιεργειών.

Επιπλέον παρακάτω γίνεται αναφορά και σε κάποιες γενικές κατηγορίες υπηρεσιών που είναι πολύ χρήσιμες για την λειτουργία όλων των παραπάνω αναγκών και υπηρεσιών που θα καλύψει το 5G δίκτυο. Αναλυτικά έχουν ως εξής:

- VoIP (Voice over Internet Protocol) - conversational voice

Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για τη μεταφορά φωνητικών και πολυμεσικών δεδομένων, όπως κλήσεις, εικόνες, βίντεο, φωτογραφίες, μηνύματα κειμένου κλπ., με τη μορφή πακέτων IP. Τα δεδομένα μεταδίδονται μετατρέποντας τα σε bits και συμπιέζοντάς τα, προκειμένου να τοποθετηθούν σε πακέτα. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ταχύτερη μετάδοση των δεδομένων, καθώς και την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας της συσκευής, λόγω της μεγαλύτερης συμπίεσης των δεδομένων.

- Conversational video

Ορίζεται ως τη σύλληψη μιας αυθεντικής αφήγησης ή άποψης ή γνώσης – που δίνεται από έναν ζωντανό άνθρωπο που βασίζεται στην αυθεντική του εμπειρία, είτε πρόκειται για ιστορικές είτε επαγγελματικές δεξιότητες που έχει. Αυτές μεταδίδονται από άτομο σε άτομο. Η χρήση του conversational video επιτρέπει στο χρήστη να αλληλεπιδρά με ένα βίντεο με τρόπο που βασίζεται στη σειρά, σχεδόν σαν να είχε μια απλή συνομιλία με τους χαρακτήρες του βίντεο.

- Web browsing

Η περιήγηση είναι η πράξη της γρήγορης αναζήτησης ενός συνόλου πληροφοριών, χωρίς συγκεκριμένη αίσθηση σκοπού. Στο πλαίσιο του διαδικτύου, συνήθως αναφέρεται στη χρήση του παγκόσμιου ιστού. Πρόκειται δηλαδή για την υπηρεσία που προσφέρει πρόσβαση σε ιστότοπους. Όταν ένας χρήστης ζητά μια ιστοσελίδα από έναν συγκεκριμένο ιστότοπο, το πρόγραμμα περιήγησης ανακτά τα αρχεία του από έναν διακομιστή ιστού και στη συνέχεια εμφανίζει τη σελίδα στην οθόνη του χρήστη. Τα προγράμματα περιήγησης χρησιμοποιούνται σε μια σειρά συσκευών, όπως επιτραπέζιους υπολογιστές, φορητούς υπολογιστές, tablet και smartphone. Το 2020, υπολογίζεται ότι 4,9 δισεκατομμύρια άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει πρόγραμμα περιήγησης. Το πιο χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα περιήγησης είναι το Google Chrome, με μερίδιο παγκόσμιας αγοράς 65% σε όλες τις συσκευές, ακολουθούμενο από το Safari με 18%.

- Real time gaming

Το 5G θα οδηγήσει σε μια νέα εποχή διαδραστικών παιχνιδιών με τεχνητή νοημοσύνη. Με το 5G, τα παιχνίδια μπορούν να υποστηρίξουν περιεχόμενο που δημιουργείται από τους χρήστες με τη μορφή χαρακτήρων, επιπέδων, ακόμη και ιστοριών και να παρέχουν μια προσαρμοστική εμπειρία παιχνιδιού. Αυτό θα βοηθήσει τους παίκτες να έχουν μεγαλύτερο έλεγχο της εμπειρίας του παιχνιδιού, βασίζοντας το παιχνίδι στη συμπεριφορά και τις επιλογές τους. Το Real time gaming θα δημιουργήσει ένα ρεαλιστικό, προκλητικό και διαισθητικό παιχνίδι επιτρέποντας μια πιο ικανοποιητική εμπειρία παιχνιδιού και η υιοθέτηση 5G θα επιτρέψει προηγμένες εφαρμογές AI στο gaming.

2.4. Σύνοψη Γενεών

Παρακάτω ακολουθεί ο Πίνακας 3. ο οποίος έχει όλες τις γενιές των δικτύων, ξεκινώντας από το 1G και την δεκαετία του 1970 και καταλήγοντας στο 5G και στη δεκαετία του 2010. Αυτός ο πίνακας αντικατοπτρίζει επιγραμματικά το άλμα που έχει κάνει η τεχνολογία μέσα σε λίγες δεκαετίες και το βιοτικό επίπεδο που έχει καταφέρει να αυξήσει παγκοσμίως, διότι μέσα από την εξέλιξη αυτή προσφέρει σε πολλούς τομείς τη δυνατότητα να εξελιχθούν, να πρωτοπορήσουν και να δημιουργήσουν νέες θέσεις εργασίας παγκοσμίως.

Η ανθρωπότητα μέσω της τεχνολογίας, των ερευνών και των αδιάκοπων προσπαθειών εξελίσσεται και είναι ικανή να κατακτήσει και άλλους τομείς με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων. Η εξέλιξη των δικτύων είναι επιτακτική και σύμφωνα με το ερευνητικά νέα σε λίγα χρόνια πρόκειται να υποδεχτούμε το 6G όπου θα δώσει ακόμα περισσότερες δυνατότητες και ευελιξία στην ζωής μας. Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται μια μικρή αναφορά στις έρευνες αυτές για τα 6G δίκτυα.

Πίνακας 3. Η εξέλιξη των δικτύων ανά γενιά

1G	2G	3G	4G	5G
<p>Χρονολογία έκδοσης: 1979</p> <p>Standards: NMT, AMPS & TACS</p> <p>Δυνατότητες: Analog voice</p>	<p>Χρονολογία έκδοσης: 1991</p> <p>Standards: GSM & CDMA</p> <p>Δυνατότητες: Ψηφιακή φωνή Κρυπτογραφημένη επικοινωνία Περιορισμένη παγκόσμια περιαγωγή SMS & MMS</p> <p>Επεκτάσεις: GPRS (2,5G) CDMA2000 (2,5G) EDGE (2,75G)</p>	<p>Χρονολογία έκδοσης: 2002</p> <p>Standards: UMTS & EV-DO</p> <p>Δυνατότητες: Ευρυζωνική σύνδεση Υπηρεσίες εντοπισμού Ροές πολυμέσων Απρόσκοπτη παγκόσμια περιαγωγή</p> <p>Επεκτάσεις: HSPA+ (3,5G)</p>	<p>Χρονολογία έκδοσης: 2009</p> <p>Standards: LTE</p> <p>Δυνατότητες: Διαδίκτυο υψηλών ταχυτήτων Μεταγωγή πακέτων IP Ροές πολυμέσων υψηλής ανάλυσης Απρόσκοπτη παγκόσμια περιαγωγή</p> <p>Επεκτάσεις: LTE-A (4G+)</p>	<p>Χρονολογία έκδοσης: 2019</p> <p>Standards: 5G</p> <p>Δυνατότητες: Private networks IoT Ready Massive Machine Type communication Ultra-low latency Ultra-high-reliability Millimeter Wave support</p> <p>Επεκτάσεις: Feature extension through categories/releases</p>
0.0024Mbit/s	0.064 Mbit/s	42 Mbit/s	1.000 Mbit/s	10.000 Mbit/s
Επιπτώσεις στον κλάδο της βιομηχανίας: -	Επιπτώσεις στον κλάδο της βιομηχανίας: 0	Επιπτώσεις στον κλάδο της βιομηχανίας: +	Επιπτώσεις στον κλάδο της βιομηχανίας: ++	Επιπτώσεις στον κλάδο της βιομηχανίας: +++
Καμία επίδραση στις βιομηχανικές εφαρμογές	Απομακρυσμένος έλεγχος/ Μηνύματα κειμένου από και προς απομακρυσμένα μηχανήματα	Παρακολούθηση βίντεο Απομακρυσμένη πρόσβαση σε μηχανήματα Απομακρυσμένη Παρακολούθηση Κατάστασης	Ασύρματο Backhaul	Αυτόνομα Συστήματα Υποβοηθούμενη εργασία Ασύρματο Backhaul χαμηλής καθυστέρησης Υπολογιστική άκρου Εικονοποίηση (virtualization) υποδομών

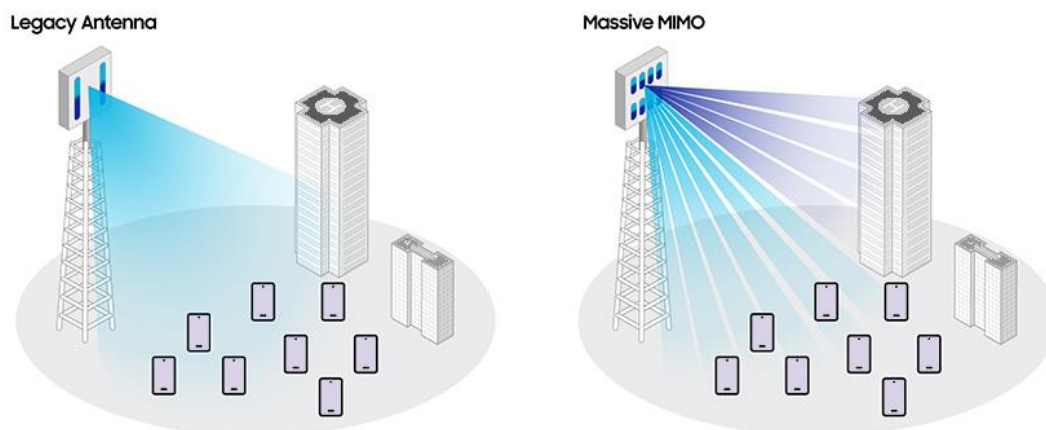
Κεφάλαιο 3 – Τεχνολογίες 5G

3.1. Massive MIMO

Η τεχνολογία Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο 5G δίκτυο. Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών πομποδεκτών και πομπών για τη μετάδοση και λήψη σημάτων στον αέρα.

Η τεχνολογία Massive MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλούς πομποδέκτες (antennas) στον βάσιμο σταθμό (base station) και πολλαπλούς πομπούς (transmitters) στις συσκευές των χρηστών. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημάτων σε διάφορες κατευθύνσεις. Οι κεραιές Massive MIMO μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου και βελτιώνοντας την απόδοση και την ταχύτητα των συνδέσεων. Επίσης, με τη χρήση beamforming τεχνικών, η τεχνολογία Massive MIMO μπορεί να εστιάσει τα σήματα προς συγκεκριμένους χρήστες, βελτιώνοντας την ποιότητα της σύνδεσης και μειώνοντας τις παρεμβολές. Η τεχνολογία Massive MIMO αποτελεί ένα από τα κλειδιά για την παροχή υψηλής ταχύτητας και απόδοσης στις ασύρματες επικοινωνίες του 5G δικτύου. [38]

Αυτή η ασύρματη τεχνολογία ενσωματώνει πολλαπλούς αποστολείς και παραλήπτες στον κεντρικό της μηχανισμό. Αυτή η δυνατότητα βελτιώνει τον ρυθμό μετάδοσης για ταυτόχρονη μετάδοση. Επιπλέον, είναι συμβατή με την τεχνολογία 802.11 και προάγει τη βελτίωσή της. Επιπλέον, είναι συμβατή με άλλες τεχνολογίες ασύρματου και κινητού δικτύου. Η τρέχουσα δομή περιλαμβάνει κεραιές που μεταδίδουν το σήμα σε μικρές αποστάσεις. Με βάση τον αριθμό των κεραιών, αυτή η τεχνολογία αναφέρεται ως MIMO (Multiple Input Multiple Output) ή Massive MIMO, και μπορεί να περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό κεραιών.



Σχήμα 3.1. Σύγκριση των κεραιών Massive MIMO της 5ης γενιάς με τις κεραιές των δικτύων 4ης γενιάς

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα, που προσφέρει η τεχνολογία MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) στο 5G δίκτυο είναι τα εξής:

- **Αυξημένη χωρητικότητα:** Η χρήση πολλαπλών κεραιών στον βάσιμο σταθμό και στις συσκευές των χρηστών επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών σημάτων, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα του δικτύου. Αυτό σημαίνει περισσότερα δεδομένα που μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα και αυξημένη ταχύτητα σύνδεσης για τους χρήστες.
- **Βελτιωμένη απόδοση σε πυκνοκατοικημένες περιοχές:** Οι τεχνολογίες MIMO επιτρέπουν την αποδοτική χρήση των συχνοτήτων και του φάσματος, μειώνοντας τις παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και αυξάνοντας την αξιοπιστία και την ποιότητα της επικοινωνίας, ιδίως σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών.
- **Βελτιωμένη κάλυψη:** Η χρήση πολλαπλών κεραιών και τεχνικών beamforming επιτρέπει την κατευθυντική μετάδοση του σήματος, επιτρέποντας την εστίαση της ενέργειας στον συγκεκριμένο χρήστη. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη κάλυψη σε μεγάλες αποστάσεις και σε δυσπρόσιτες περιοχές.
- **Μείωση παρεμβολών:** Οι τεχνολογίες MIMO μπορούν να μειώσουν τις παρεμβολές μεταξύ συσκευών, επιτρέποντας πιο αξιόπιστη επικοινωνία και βελτιωμένη απόδοση του δικτύου.
- **Τεχνολογία που είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον:** Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας από την πλευρά του αποστολέα [83]

Αυτά τα πλεονεκτήματα του 5G MIMO συντελούν στη βελτίωση της απόδοσης, της ταχύτητας και της εμπειρίας χρήστη στο 5G δίκτυο.

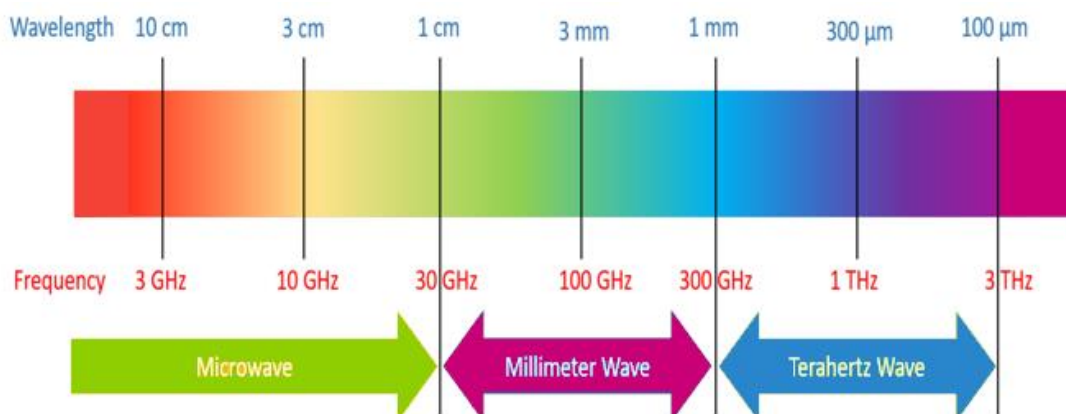
Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία MIMO, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- **Αυξημένη πολυπλοκότητα:** Η υλοποίηση της τεχνολογίας MIMO απαιτεί περισσότερους πομποδέκτες και πομπούς, καθώς και πολύπλοκες τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη πολυπλοκότητα στην κατασκευή και στη συντήρηση του εξοπλισμού.
- **Αύξηση κατανάλωσης ενέργειας:** Η χρήση πολλαπλών κεραιών και πομποδεκτών αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών συσκευών και να απαιτήσει περισσότερη ενέργεια για τη λειτουργία του δικτύου.
- **Αυξημένη απαιτητικότητα σε φάσμα συχνοτήτων:** Η τεχνολογία MIMO απαιτεί περισσότερο φάσμα συχνοτήτων για τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα. Αυτό μπορεί να αποτελέσει πρόκληση στη διαχείριση και την εκχώρηση του φάσματος, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένο φάσμα. [83]

Παρόλα αυτά τα μειονεκτήματα, η τεχνολογία MIMO παραμένει ένας σημαντικός παράγοντας για τη βελτίωση των ασύρματων επικοινωνιών και την προώθηση του 5G δικτύου. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία και η βελτίωση της απόδοσης αναμένεται να αντιμετωπίσουν ορισμένα από αυτά τα μειονεκτήματα.

3.2. Millimeter Wave

Όπως προτείνεται από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) και διάφορες ερευνητικές ομάδες από ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς κλάδους, η τεχνολογία των Υπερύψηλών Συχνοτήτων παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων στα Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Ο όρος "Υπερύψηλές Συχνότητες" αναφέρεται στις ζώνες συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz, ενώ επίσης συζητείται η προσθήκη των κοντινότερων ζωνών συχνοτήτων από 24 έως 28 GHz. Οι ζώνες συχνοτήτων που δεν έχουν αδειοδότηση και έχουν περιορισμένη χρήση παρέχουν ένα μεγάλο εύρος φάσματος που μπορεί να υποστηρίξει τις απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, χαμηλή καθυστέρηση και ευέλικτη συνδεσιμότητα για μια ευρεία γκάμα χρηστών. Υπάρχουν ήδη συστήματα επικοινωνίας Υπερυψηλών Συχνοτήτων που μπορούν να μεταφέρουν πολλά δεδομένα σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων για επικοινωνία από σημείο σε σημείο. Ωστόσο, τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα (όπως ενισχυτές ισχύος, ενισχυτές χαμηλού θορύβου, κεραίες κ.λπ.) είναι μεγάλα και καταναλώνουν υπερβολική ενέργεια για να εφαρμοστούν στις κινητές επικοινωνίες. Η διαθεσιμότητα της ζώνης των 60 GHz ως μη αδειοδοτημένου φάσματος έχει προκαλέσει ενδιαφέρον για τη χρήση της σε ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (WPANs) και ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). Μετά από λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών διάδοσης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία των Υπερύψηλών Συχνοτήτων μπορεί να παρέχει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τις κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές στο μέλλον και πέρα. Οι συχνότητες των 28 GHz και 38 GHz των Υπερύψηλών Συχνοτήτων μελετώνται εκτενώς για να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά διάδοσης σε διάφορα περιβάλλοντα, ανοίγοντας τον δρόμο για την χρήση τους σε συστήματα 5G. [38] [43]



Σχήμα 3.2. Το εύρος συχνοτήτων του Millimeter Wave και των υπολοίπων κυμάτων

Οι επικρατούσες τεχνολογίες στην περιοχή των υπερύψηλών συχνοτήτων (Millimeter Wave) προσφέρουν αρκετά οφέλη.

- Αποτελεσματικοί αλγόριθμοι κατανομής μνήμης βελτιώνουν τη συντήρηση ροών βίντεο και την ποιότητα επικοινωνίας ακόμη και για σύντομες συνδέσεις μεταξύ χρηστών και βάσεων.
- Η άδεια χρήση της Millimeter Wave προσφέρει προστασία από παρεμβολές και μπορεί να εφαρμοστεί γρήγορα και οικονομικά μέσω του Διαδικτύου.
- Οι επικοινωνίες μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ταχύτητες Gigabit ανά δευτερόλεπτο.
- Η τεχνολογία Beamforming αυξάνει την απόδοση.
- Η ζώνη συχνοτήτων των 30-300 GHz προσφέρει ευρύ φάσμα χρήσης.

- Η E-band (71-76 GHz, 81-86 GHz) είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα με πλεονεκτήματα όπως υψηλά κέρδη κεραίας, μεγάλη εμβέλεια, χαμηλό κόστος, οικονομικά αποδοτικές λύσεις και ταχεία αδειοδότηση. [84],[85],[86],[87]

Οι επικοινωνίες Millimeter Wave αντιμετωπίζουν ορισμένες προκλήσεις. Κάποιες από αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Οι υψηλές συχνότητες προκαλούν απώλειες διάδοσης
- Η χρήση προτύπου Beamforming απαιτεί συστοιχία πολλαπλών κεραιών στον δέκτη.
- Τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης, όπως η διάδοση στον χώρο, ο αέρας και η βροχή, μπορεί να προκαλέσουν μείωση του σήματος.
- Η αύξηση του κόστους συνδέεται με την ανάγκη απομάκρυνσης υπαρχόντων χρηστών από το φάσμα κατά την αδειοδότηση.
- Επιπλέον, υπάρχουν καθυστερήσεις, αύξηση στον εξοπλισμό και δυσκολία στην εκτίμηση της ακρίβειας.
- Οι επικοινωνίες στην ζώνη E-band αντιμετωπίζουν επιπλέον προκλήσεις, όπως αυξημένος θόρυβος φάσης, περιορισμένο κέρδος ενισχυτή και άλλα.
- Επιπλέον, οι αντανάκλασεις προκαλούν πρόσθετη απώλεια ισχύος και επηρεάζουν την απόδοση." [84], [85], [86], [87]

3.3. Device To Device Communication

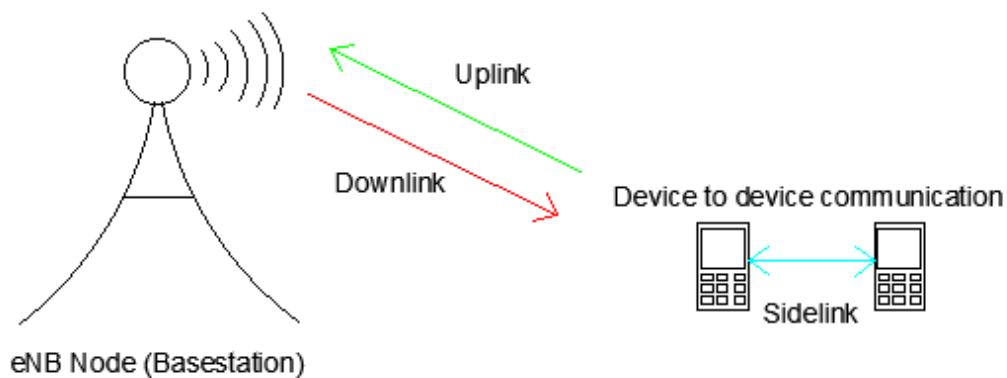
Η τεχνολογία 5G αναφέρεται στις επικοινωνίες μεταξύ συσκευών, όπου κάθε χρήστης μπορεί να επικοινωνεί απευθείας με άλλους χρήστες για να μοιραστεί τη σύνδεση ασύρματης πρόσβασης ή να ανταλλάξει πληροφορίες, χωρίς να χρειάζεται να επικοινωνήσει μέσω του κεντρικού σταθμού βάσης (BS) ή του κεντρικού δικτύου. Με τον έλεγχο της ισχύος, οι επικοινωνίες συσκευών προς συσκευές (Device-to-Device - D2D) μπορούν να μειώσουν τις παρεμβολές, ιδίως στις μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες. Η επικοινωνία D2D προσφέρει μια νέα χαμηλού κόστους αρχιτεκτονική, με στόχο την αύξηση της κάλυψης και της χωρητικότητας, την αποφόρτιση των μεταδόσεων και την παροχή εναλλακτικής συνδεσιμότητας για να αποφευχθεί η πλήρης αναχαίτιση του συστήματος. [43]

Οι επικοινωνίες συσκευών προς συσκευές (Device-to-Device - D2D) θα βελτιώσουν την ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) στο κυψελοειδές δίκτυο, καθώς η αναμετάδοση μεταξύ συσκευών θα αυξήσει τις ρυθμίσεις μετάδοσης για τους χρήστες που βρίσκονται στην άκρη των κυψελών. Το άλλο σενάριο, όπου οι συσκευές επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, θα μειώσει τη ροή δεδομένων μεταξύ κοντινών συσκευών και του κεντρικού σταθμού βάσης (BS). Αυτό μπορεί να απαλλάξει τη χωρητικότητα του BS και παράλληλα να προσφέρει μια βελτιωμένη εμπειρία στον χρήστη. [38]

Επιπλέον, οι επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή (Device-to-Device - D2D) παρέχουν πολλά οφέλη στους χρήστες λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, η οποία επιτρέπει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι επικοινωνίες μεταξύ συσκευών εκμεταλλεύονται την επαναχρησιμοποίηση φάσματος σε άλλες περιοχές, καθώς η εμβέλεια της επικοινωνίας μειώνεται. Τέλος, η επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή επιτυγχάνεται μέσω ενός μοναδικού συνδέσμου στο D2D, ενώ η συμβατική επικοινωνία μέσω του βασικού σταθμού (BS) απαιτεί τόσο τις uplink όσο και τις downlink επικοινωνίες. [38]

Στο επίπεδο των εφαρμογών, οι επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή (Device-to-Device - D2D) θα αποφέρουν ποικίλα οφέλη και θα ανοίξουν τον δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές και

υπηρεσίες. Μια σημαντική εφαρμογή είναι στον τομέα της δημόσιας ασφάλειας και προστασίας. Σε περιπτώσεις όπως ατυχήματα σε μεγάλες σήραγγες, κατολισθήσεις και σεισμοί, όπου τα κυψελοειδή δίκτυα είναι ανεπαρκή ή ανενεργά, οι επικοινωνίες μεταξύ συσκευών μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα για επιχειρήσεις διάσωσης. Επιπλέον, οι D2D επικοινωνίες θα συμβάλουν σημαντικά στις επικοινωνίες μεταξύ οχημάτων, ειδικά στην ενημέρωση για ατυχήματα και άλλους κινδύνους σχετικά με τις διαδρομές, όπως η πλοήγηση σε αυτόνομα οχήματα. Μια άλλη χρήση των επικοινωνιών συσκευής προς συσκευή είναι η σύνδεση πολλαπλών συσκευών, όπως Smartwatches με Smartphones. Αν και άλλες τεχνολογίες όπως το Bluetooth επίσης συνδέουν συσκευές με κινητά τηλέφωνα, ένα ενιαίο πρωτόκολλο θα επέτρεπε μειωμένο κόστος και κατανάλωση ενέργειας για τις συσκευές. Όσον αφορά την κινητικότητα των χρηστών, οι επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή παρέχουν ένα πιο αξιόπιστο περιβάλλον σε σχέση με το Bluetooth, το οποίο δεν σχεδιάστηκε για περιβάλλοντα με υψηλή κινητικότητα. Τέλος, οι επικοινωνίες συσκευής προς συσκευή θα ανοίξουν νέες μορφές κοινωνικών δικτύων, όπου κοντινές συσκευές θα μπορούν να συνδεθούν απευθείας μεταξύ τους. [38]



Σχήμα 3.3. Το μοντέλο Device to Device Communication

Η τεχνολογία Device-to-Device (D2D) αναφέρεται στη δυνατότητα επικοινωνίας απευθείας μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών σε ένα ασύρματο δίκτυο, χωρίς την ανάγκη διέλευσης από τον κεντρικό σταθμό βάσης. Αυτή η τεχνολογία παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα:

- Αυξημένη επιχειρησιακή αποδοτικότητα: Η D2D επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, εκμεταλλευόμενες την τοπική ασύρματη σύνδεση. Αυτό μπορεί να μειώσει την κίνηση δεδομένων που περνά από το κεντρικό δίκτυο, απελευθερώνοντας εύρος ζώνης για άλλες επικοινωνίες και βελτιώνοντας την απόδοση του δικτύου.
- Χαμηλότερη καθυστέρηση: Η επικοινωνία D2D μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων, καθώς οι συσκευές επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπου η χαμηλή καθυστέρηση είναι κρίσιμη, όπως οι φωνητικές κλήσεις και οι παιχνιδοκοσόλες.
- Εξοικονόμηση ενέργειας: Η D2D μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς η επικοινωνία απευθείας μεταξύ των συσκευών απαιτεί λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με τη μετάδοση μέσω του κεντρικού σταθμού βάσης.

Ωστόσο, η τεχνολογία D2D συναντά ορισμένες προκλήσεις, όπως:

- Κατανάλωση ενέργειας: Οι συσκευές χρειάζονται ενέργεια για να επικοινωνήσουν με άλλες συσκευές.
- Διαχείριση παρεμβολών: Απαιτείται αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα της επικοινωνίας.
- Συνύπαρξη με δίκτυα καθυστέρησης: Η ταυτόχρονη λειτουργία με άλλα δίκτυα μεγάλης καθυστέρησης απαιτεί προσεκτική διαχείριση.
- Ασφάλεια: Πρέπει να ληφθούν μέτρα για την ασφάλεια των επικοινωνιών D2D.
- Περιορισμένη ικανότητα διαπερασιμότητας: Οι D2D επικοινωνίες μπορεί να αντιμετωπίζουν περιορισμούς στη δυνατότητά τους να διαπεράσουν φυσικά εμπόδια.
- Δραστηριότητα χρήστη: Η δραστηριότητα των χρηστών είναι δύσκολο ή αδύνατο να ελεγχθεί, προκειμένου να επιτευχθεί συνεργασία στις επικοινωνίες D2D. [88], [91]

3.4. Energy Efficient Communications

Οι Emergency Efficient Communications (EEC) αναφέρονται σε τεχνολογίες και πρωτόκολλα που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να βελτιστοποιήσουν την επικοινωνία κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης ή καταστροφής. Η αποτελεσματική επικοινωνία κατά τις έκτακτες ανάγκες είναι ζωτικής σημασίας για τις δραστηριότητες διάσωσης, την παροχή βοήθειας και τη συντονισμένη διαχείριση της κρίσης.

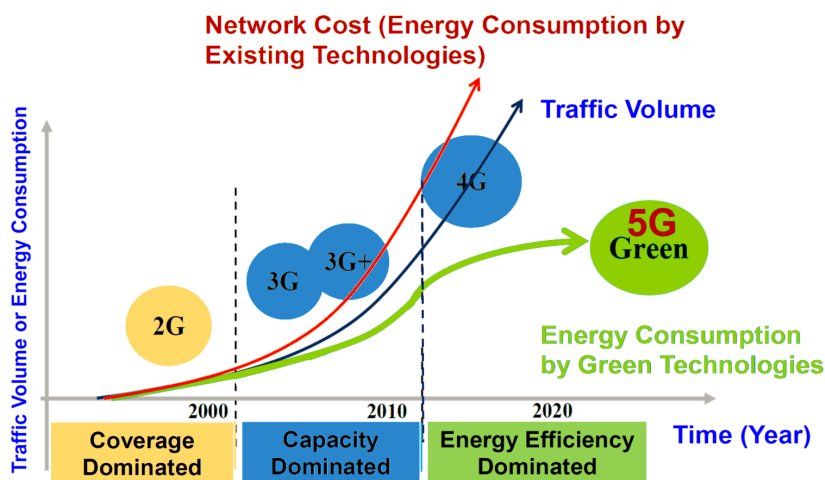
Οι τεχνολογίες EEC περιλαμβάνουν:

- Προτεραιότητα επικοινωνίας: Οι συσκευές έκτακτης ανάγκης, όπως αστυνομικές, πυροσβέστες και ιατρικό προσωπικό, μπορούν να έχουν προτεραιότητα πρόσβασης στις επικοινωνίες για να διασφαλίσουν την άμεση επικοινωνία και την αποτελεσματική συντονισμένη αντίδραση.
- Αυτόματη ανίχνευση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης: Οι τεχνολογίες EEC μπορούν να παρακολουθούν και να ανιχνεύουν αυτόματα καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως σεισμούς, πλημμύρες ή πυρκαγιές, και να ειδοποιούν αυτόματα τις αρχές ή να ενεργοποιούν επείγοντες μηχανισμούς επικοινωνίας.
- Ασφάλεια και ανθεκτικότητα: Οι τεχνολογίες EEC προσφέρουν ασφαλείς και ανθεκτικές επικοινωνίες κατά τις έκτακτες ανάγκες. Αυτό περιλαμβάνει ανθεκτικότητα σε αναλώσιμα δίκτυα, προστασία από κακόβουλες επιθέσεις και εξασφάλιση της αποτελεσματικής λειτουργίας των επικοινωνιών ακόμη και σε συνθήκες περιορισμένων πόρων.
- Τοποθεσία και παρακολούθηση: Οι τεχνολογίες EEC μπορούν να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για την τοποθεσία των ατόμων έκτακτης ανάγκης, όπως πυροσβέστες και ασθενοφόρα, προκειμένου να επιταχυνθεί η αντίδραση και η διάσωση.

Οι τεχνολογίες EEC συμβάλλουν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της απόκρισης σε έκτακτες καταστάσεις, επιτρέποντας την άμεση επικοινωνία, την παρακολούθηση και τη συντονισμένη δράση των διάφορων εμπλεκόμενων φορέων και υπηρεσιών. [43]

Η χρήση μικρών κυψελοειδών σε ετερογενή κυψελοειδή δίκτυα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση. Οι σταθμοί βάσης των μικρών κυψελών τοποθετούνται στρατηγικά προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου και να μειωθούν το κόστος και η ανάπτυξη της υποδομής. Αυτή η βελτιστοποίηση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιοχές με υψηλή χρήση και απαιτήσεις σε δεδομένα, όπως γραφεία, εμπορικά κέντρα, σταθμοί μετρό κ.λπ., όπου η πυκνότητα των χρηστών είναι υψηλή. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι πολλά από αυτά

τα σημεία βρίσκονται εσωτερικά, είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν εσωτερικά σημεία πρόσβασης με τρόπο που θα αποφεύγει τη σπατάλη ενέργειας λόγω της διείσδυσης σε τοίχους.[43] "Ένα άλλο πρόβλημα στα κυψελοειδή δίκτυα είναι η υψηλή μεταβλητότητα της κυκλοφορίας του δικτύου με τον χρόνο λόγω του τρόπου που οι χρήστες αποκτούν πρόσβαση στο δίκτυο ταυτόχρονα. Αυτή η κατάσταση οδηγεί σε μεγάλες διαφορές στην κίνηση των κυττάρων μεταξύ των ωρών αιχμής και εκτός αιχμής. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της μέσης κυκλοφορίας αυξάνεται, και αναμένεται ότι το ποσοστό της μέγιστης κυκλοφορίας θα αυξηθεί πιο γρήγορα από το ρυθμό αύξησης της μέσης κυκλοφορίας. Αυτό απαιτεί από τους φορείς των δικτύων να αναπτύξουν περισσότερους σταθμούς βάσης για να αντιμετωπίσουν την αυξημένη κυκλοφορία κατά την ώρα αιχμής. Αυτό οδηγεί σε περιττή κατανάλωση ενέργειας και σπατάλη, χωρίς να είναι απαραίτητο. [43] "Μια λύση για το πρόβλημα θα μπορούσε να είναι η συστηματική απενεργοποίηση ορισμένων σταθμών βάσης που δεν απαιτούνται για να λειτουργήσουν. Με βάση το κυκλοφοριακό πρότυπο, μπορούν να δημιουργηθούν λεπτομερή μοντέλα για τον καθορισμό των βέλτιστων χρόνων απενεργοποίησης των σταθμών βάσης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι οι απαιτήσεις κυκλοφορίας διαφέρουν σημαντικά μεταξύ διαφόρων φορέων δικτύου που εξυπηρετούν την ίδια γεωγραφική περιοχή. Συνεπώς, η υποδομή δικτύου μπορεί να κοινοποιηθεί μεταξύ των φορέων δικτύων για τη σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, παρέχοντας ταυτόχρονα βελτιωμένη κάλυψη και χωρητικότητα. [43] Μια εναλλακτική προσέγγιση για την επίτευξη πράσινων δικτύων επικοινωνίας είναι η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και οι δονήσεις, για την τροφοδοσία των σταθμών βάσης και τη μείωση ή ακόμη και την εξάλειψη της χρήσης συμβατικής ενέργειας. Προτείνεται επίσης η συλλογή ενέργειας από συνθετικές πηγές, όπως η μεταφορά ενέργειας μέσω μικροκυμάτων. Παρέχεται μια ολοκληρωμένη μελέτη για την ηλιακή ενέργεια που μπορεί να συλλέγεται και εξετάζεται η δυνατότητα λειτουργίας ενός σταθμού βάσης με ηλιακή ενέργεια σε σταθερή βάση. [43]



Σχήμα 3.4. Energy Efficiency στις 5G τεχνολογίες

Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με την αποθήκευση της υπερβολικής ηλιακής ενέργειας, η οποία συλλέγεται και αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας για χρήση το βράδυ, μπορεί να επιτευχθεί διαρκής αυτοτροφοδότηση κατά τη διάρκεια περιόδων με έντονο ηλιακό φως, ακόμη και το χειμώνα, αποφεύγοντας την ανάγκη εξάλειψης ενέργειας από το δίκτυο για τρεις έως έξι ώρες την ημέρα. Εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα επιτρέψει επίσης την αυτόνομη λειτουργία των σταθμών

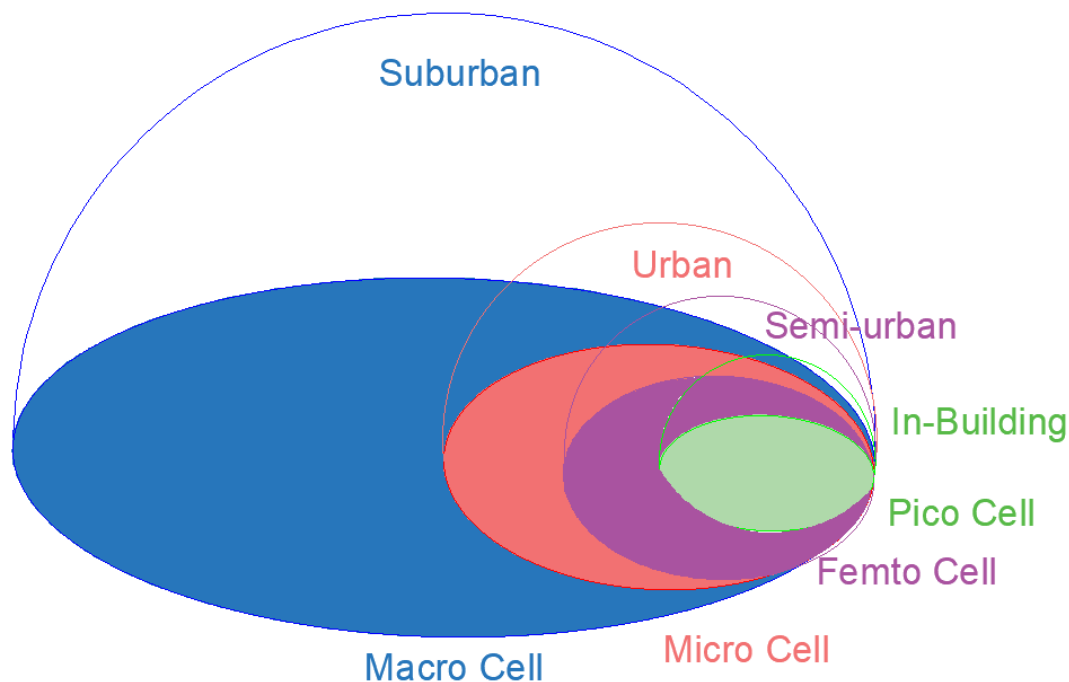
βάσης σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, βελτιώνοντας έτσι την κάλυψη. [43]

3.5. Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα (HetNets)

Τα Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα (HetNets) αναφέρονται σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας που αποτελούνται από διάφορους τύπους κυττάρων με διαφορετικές χαρακτηριστικές. Αυτά τα δίκτυα συνήθως συνδυάζουν τα παραδοσιακά μεγάλης κλίμακας κελιά με μικρότερα κελιά υψηλής πυκνότητας, όπως πυκνοκατοικημένες περιοχές ή εσωτερικούς χώρους.

Μία από τις λύσεις που χρησιμοποιούν οι πάροχοι δικτύων για να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις ταχύτητας μετάδοσης είναι η μείωση του μεγέθους των κυψελών. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματικότερη χρήση της συχνότητας μέσω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και τη μείωση της ισχύος μετάδοσης. Επιπλέον, η κάλυψη μπορεί να βελτιωθεί μέσω της εγκατάστασης μικρών κυψελών σε εσωτερικούς χώρους, όπου το σήμα μπορεί να είναι ασθενές, καθώς και με τον έλεγχο της κυκλοφορίας όταν απαιτείται. Αυτές οι αλλαγές στη λειτουργική αρχιτεκτονική των δικτύων πρόσβασης επιτρέπουν στα δεδομένα και τον έλεγχο να μεταδίδονται μέσω του Διαδικτύου, επιτρέποντας την ανάπτυξη μικρών κυψελών οπουδήποτε υπάρχει σύνδεση στο διαδίκτυο. [43] Η ταυτόχρονη λειτουργία διάφορων τεχνολογιών και κατηγοριών σταθμών βάσης (π.χ. macro, pico και femto) αναφέρεται ως ετερογενές δίκτυο (HetNets). Η ομάδα των μικρότερων στοιχείων, όπως picocells και femtocells, παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να προσφέρει ευέλικτη κάλυψη και βελτιωμένη απόδοση σε φάσμα και ενέργεια. Επιπλέον, η επικάλυψη διάφορων κατηγοριών σταθμών βάσης μπορεί να αποτελέσει λύση για τις αυξανόμενες ανάγκες σε δικτυακούς πόρους. [38], [43]

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες με επικαλυπτόμενη κάλυψη, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο HetNet, προσφέροντας ευκαιρίες για συνδυασμένη αύξηση της χωρητικότητας. Για να επιτευχθεί αυτό, τα συστήματα 5G πρέπει να υποστηρίξουν δικτυακές αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα που ενσωματώνουν πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες, συμπεριλαμβάνοντας αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων (licensed), συχνοτήτες «άδειου χώρου» (cognitive) καθώς και υψηλές συχνοτήτες (high frequencies), σε ένα ενιαίο δίκτυο εικονικής πρόσβασης, παρέχοντας μία διαφανή εμπειρία για τους χρήστες. Το ολοκληρωμένο δίκτυο εικονικής πρόσβασης επιτρέπει την κοινή διαχείριση και την ταυτόχρονη χρήση πόρων ραδιοφάσματος από διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης, βελτιώνοντας σημαντικά τη χωρητικότητα, την κάλυψη και την αξιοπιστία των συνδέσεων. Για να αντιμετωπιστεί η υψηλή κινητικότητα οχηματικών χρηστών, προτάθηκε η έννοια της κινητής Femtocell (MFemtocell). Οι MFemtocells είναι εγκατεστημένες εντός των οχημάτων για να παρέχουν ασύρματη πρόσβαση στους επιβάτες, ενώ μεγαλύτερα πάνελ κεραιών βρίσκονται εγκατεστημένα στον εξωτερικό χώρο των οχημάτων κι επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης. Ένα MFemtocell και οι συνδεδεμένοι σε αυτό χρήστες θεωρούνται ως μια ενιαία μονάδα από την πλευρά του σταθμού βάσης. Από την άποψη του χρήστη, ένα MFemtocell θεωρείται ως ένας κανονικός βάσης σταθμός. [43]



Σχήμα 3.5. Τα δίκτυα ως συνδυασμός Pico cell, Femto cell, Micro cell, Macro cell

Τα Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος επικοινωνίας, καθώς μπορούν να εκμεταλλευτούν διαφορετικά εύρη ζώνης για τη μετάδοση δεδομένων. Δεύτερον, μειώνουν την περιβαλλοντική επίδραση των κυττάρων, καθώς τα μικρότερα κελιά μπορούν να λειτουργούν με χαμηλή ισχύ εκπομπής. Τρίτον, παρέχουν υψηλότερη ταχύτητα και χωρητικότητα δικτύου, καθώς οι χρήστες μπορούν να συνδεούνται με τον πλησιέστερο κόμβο με την καλύτερη δυνατή σύνδεση.

Βέβαια, τα Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα παρουσιάζουν και ορισμένες προκλήσεις. Η διαχείριση των πολλαπλών κυττάρων και η αντιμετώπιση των παρεμβολών μεταξύ τους είναι σημαντικά ζητήματα. Επίσης, η απόδοση του δικτύου μπορεί να επηρεαστεί από την αλληλεπίδραση μεταξύ των διάφορων τύπων κυττάρων.

Συνολικά, τα Ετερογενή Πυκνά Δίκτυα αντιπροσωπεύουν μια εξέλιξη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, προσφέροντας βελτιωμένη συνδεσιμότητα και απόδοση για τους χρήστες σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. [38]

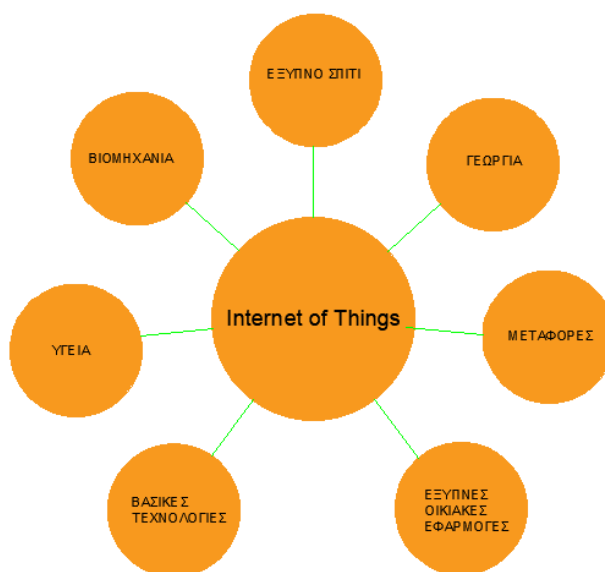
3.6. Internet Of Things (IoT)

Το Internet of Things (IoT) είναι μία αναδυόμενη τεχνολογία που επηρεάζει τον τομέα των 5G κυψελοειδών δικτύων. Ορισμένα παραδείγματα των συσκευών IoT περιλαμβάνουν φούρνους μικροκυμάτων, πλυντήρια, έξυπνα ρολόγια και οθόνες παρακολούθησης υγείας. Αυτές οι συσκευές είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες και συνδέονται με μια πλατφόρμα που συλλέγει τα δεδομένα που παράγουν, παρέχοντας αναλυτικές πληροφορίες σε εφαρμογές που αντιμετωπίζουν συγκεκριμένες ανάγκες. Οι συσκευές IoT μπορούν να αναγνωρίσουν τις χρήσιμες πληροφορίες και να τις εκμεταλλευτούν αυτόματα, αυτοματοποιώντας επαναλαμβανόμενες ή χρονοβόρες εργασίες. Ωστόσο, η διαχείριση και η ερμηνεία του μεγάλου όγκου πληροφοριών που

παράγονται από αυτές τις συσκευές, λόγω της διαρκούς επικοινωνίας με το δίκτυο (streaming data), αποτελούν πρόκληση για τους παραγωγούς συστημάτων IoT. Μία ακόμα πρόκληση που παρουσιάζεται είναι η αποθήκευση των τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που παράγονται. Συχνά, τα συστήματα απαιτούν μεγάλο χώρο αποθήκευσης λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων. Επιπροσθέτως, στις μέρες μας, το Διαδίκτυο συμβάλλει στο 5% της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης, και υπάρχει κίνδυνος αύξησης αυτού του αριθμού με την ευρεία εφαρμογή του IoT σε παγκόσμιο επίπεδο. Με την εισαγωγή του IoT σε διάφορους τομείς, πολλές συσκευές θα συνδεθούν στο Διαδίκτυο. Λόγω του μεγάλου αριθμού των συσκευών IoT και της ποικιλίας των εφαρμογών που αυτές υποστηρίζουν, το IoT παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των 5G συστημάτων. Απλούστερα, η ιδέα πίσω από το IoT είναι η σύνδεση όλων των ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους, είτε μέσω τοπικού δικτύου είτε μέσω σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Όταν αναφερόμαστε σε "πράγματα" (Things), δεν αναφερόμαστε αποκλειστικά σε προϊόντα. Αναφερόμαστε σε μια ευρεία ποικιλία συσκευών που είναι εντελώς διαφορετικές μεταξύ τους, όπως οχήματα με ενσωματωμένους αισθητήρες, κάμερες, κλιματιστικά, φώτα, συστήματα ασφαλείας, smartwatches κτλ. Η κύρια ιδιότητα όλων αυτών των τεχνολογικών προϊόντων είναι η συνδεσιμότητά τους, με σκοπό τον έλεγχο τους από έναν υπολογιστή ή ένα κινητό τηλέφωνο. Είναι εμφανές ότι το IoT έχει μεγάλη χρησιμότητα και υπάρχει αυξημένη ζήτηση από τους πιθανούς χρήστες, καθώς οι άνθρωποι, γενικά, αναζητούν αυτονομία σε πολλές πτυχές της ζωής τους. Από ένα αυτόματο ξυπνητήρι μέχρι ένα έξυπνο ψυγείο που ειδοποιεί τον χρήστη για την έλλειψη αποθηκευμένων αντικειμένων, ή π.χ. και τη δυνατότητα ενεργοποίησης του κλιματισμού πριν καν ο χρήστης εισέλθει στο σπίτι, υπάρχουν πολλές δυνατότητες που προσφέρει το IoT. Σημειώνεται επίσης ότι η χρήση του IoT δεν περιορίζεται μόνο στους οικιακούς χρήστες, αλλά επεκτείνεται και στον επαγγελματικό χώρο, όπου οι επιχειρήσεις αξιοποιούν τη δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας δεδομένων μέσω συστημάτων cloud.

Συνοψίζοντας, οι κύριες υπηρεσίες που προσφέρει το IoT περιλαμβάνουν τα παρακάτω :

- Εφαρμογές για την υγεία: Οι εφαρμογές του IoT για την υγεία μπορούν να βελτιώσουν την περίθαλψη των ασθενών, ειδικά των νοσηλευόμενων. Αισθητήρες σώματος που μπορούν να φορεθούν προσφέρουν πολλές δυνατότητες. Μετρήσεις όπως η γλυκόζη, η ηλεκτροκαρδιογραφία, η αρτηριακή πίεση και η θερμοκρασία του σώματος είναι κάποια βασικά παραδείγματα που προσφέρει η τεχνολογία IoT στον τομέα της υγείας. Ακόμα και εκτός νοσοκομείου, η παρακολούθηση των επιπέδων γλυκόζης είναι κρίσιμη για ασθενείς με διαβήτη. [92], [93]
- Βασικές Τεχνολογίες: Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται και χρειάζονται για να οικοδομηθεί το περιβάλλον IoT συνίστανται στην ταυτοποίηση στοιχείων, αισθητήρων, ενσωματωμένων συστημάτων και νανοτεχνολογίας. Βασικά ζητήματα που συνδέονται με το IoT είναι η ασφάλεια τροφίμων, οι φυσικές καταστροφές και οι εφαρμογές νερού.
- "Έξυπνες" οικιακές εφαρμογές : Όπως ο έλεγχος της θερμοκρασίας του νερού στον ηλιακό θερμοσίφωνα, η ένταση του φωτισμού στον εξωτερικό χώρο ενός σπιτιού, κ.α. [95]
- "Έξυπνες" πόλεις: Υπάρχουν καινοτόμοι τρόποι εκμετάλλευσης των δεδομένων που οδηγούν σε νέες υπηρεσίες και λειτουργίες, που αφορούν την ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων. [96]
- "Έξυπνη" Γεωργία: έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες και συσκευές για την ομαλή ανάπτυξη αλλά και την άρδευση των φυτών και των καλλιεργειών.
- Βιομηχανία: δημιουργείται ένα δίκτυο αισθητήρων για την ανίχνευση, αναγνώριση και επεξεργασία δεδομένων με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγής και την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας.



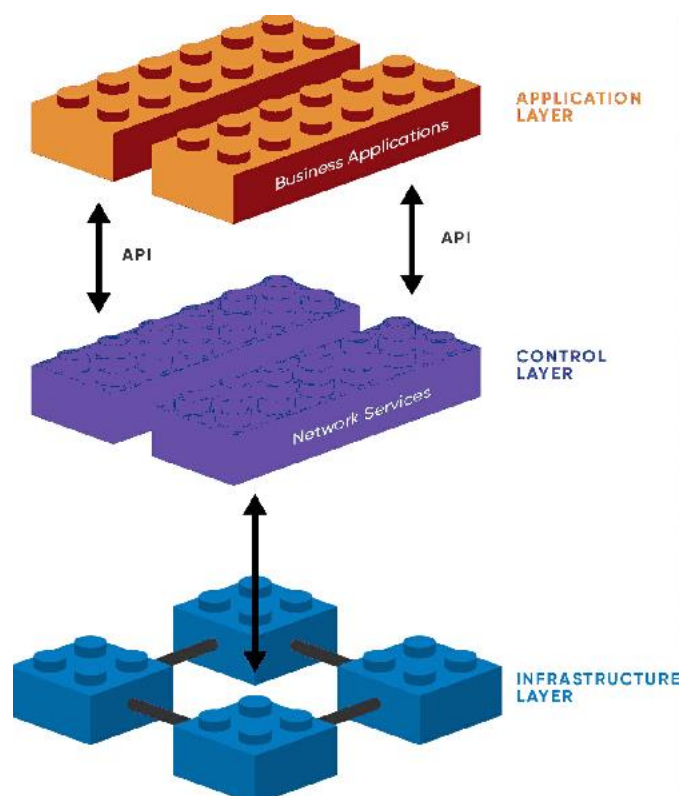
Σχήμα 3.6. Διασύνδεση συσκευών και προϊόντων στην IoT τεχνολογία

3.7. Software Defined Networking (SDN)

Το Software Defined Networking (SDN) είναι μια προσέγγιση στον τομέα των δικτύων επικοινωνιών που αποσκοπεί στον ξεχωρισμό του επιπέδου ελέγχου του δικτύου από το επίπεδο προώθησης των πακέτων. Στα παραδοσιακά δίκτυα, ο έλεγχος και η προώθηση των πακέτων γίνονται συνήθως από ενσωματωμένο υλικό (π.χ. δρομολογητές, μεταγωγείς), ενώ στο SDN αυτή η λειτουργία εκτελείται από ένα κεντρικό λογισμικό που ονομάζεται ελεγκτής (controller).

Ο ελεγκτής SDN παρέχει μια κεντρική προοπτική του δικτύου και διαχειρίζεται δυναμικά τη ροή των πακέτων. Αυτό επιτρέπει την ευελιξία και την αυτοματοποίηση των δικτύων. Οι προγραμματιζόμενες διεπαφές (APIs) επιτρέπουν στους διαχειριστές δικτύου να διαμορφώνουν και να ελέγχουν το δίκτυο μέσω λογισμικού, ανεξάρτητα από τη φυσική υποδομή.

Οι βασικές αρχές του SDN περιλαμβάνουν τον ξεχωρισμό του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο προώθησης, την κεντρική διαχείριση και έλεγχο του δικτύου, και την αναλογική διάχυση των αποφάσεων για την προώθηση πακέτων. Οι τεχνολογίες που σχετίζονται με το SDN περιλαμβάνουν το πρωτόκολλο OpenFlow, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή και των δικτυακών συσκευών, καθώς και διάφορα πλαίσια εργαλείων και πλατφορμών.



Σχήμα 3.7. Αρχιτεκτονική της SDN τεχνολογίας

Τα πλεονεκτήματα του SDN περιλαμβάνουν την ευελιξία, την ευκολία στη διαχείριση και την αυτοματοποίηση του δικτύου, την ανεξαρτησία από το υλικό και τη δυνατότητα παροχής προσαρμοσμένων υπηρεσιών. Το SDN έχει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως τα κέντρα δεδομένων, τα επιχειρησιακά δίκτυα, τα δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης και τα ασύρματα δίκτυα.

Γενικά, το SDN αναπαριστά μια εξέλιξη στον τομέα των δικτύων, επιτρέποντας την ευελιξία, την καινοτομία και την απλοποίηση της διαχείρισης του δικτύου μέσω λογισμικού.

3.8. Network Function Virtualization (NFV)

Το Network Function Virtualization (NFV) αναφέρεται στη μεταφορά παραδοσιακών λειτουργιών δικτύου, γνωστών ως δικτυακές λειτουργίες (network functions), από εξειδικευμένο, αποκλειστικά φυσικό υλικό σε εικονικοποιημένες μορφές που μπορούν να εκτελούνται σε κοινόχρηστη υπολογιστική υποδομή.

Η ιδέα πίσω από το NFV είναι να αποσυνδεθούν οι λειτουργίες του δικτύου από το εξειδικευμένο υλικό και να εκτελούνται ως εικονικές μηχανές (Virtual Machines) ή εφαρμογές λογισμικού σε εικονικοποιημένα περιβάλλοντα. Αυτό επιτρέπει την ευελιξία, την κλιμακωσιμότητα και την αποδοτικότητα στην παροχή δικτυακών υπηρεσιών.

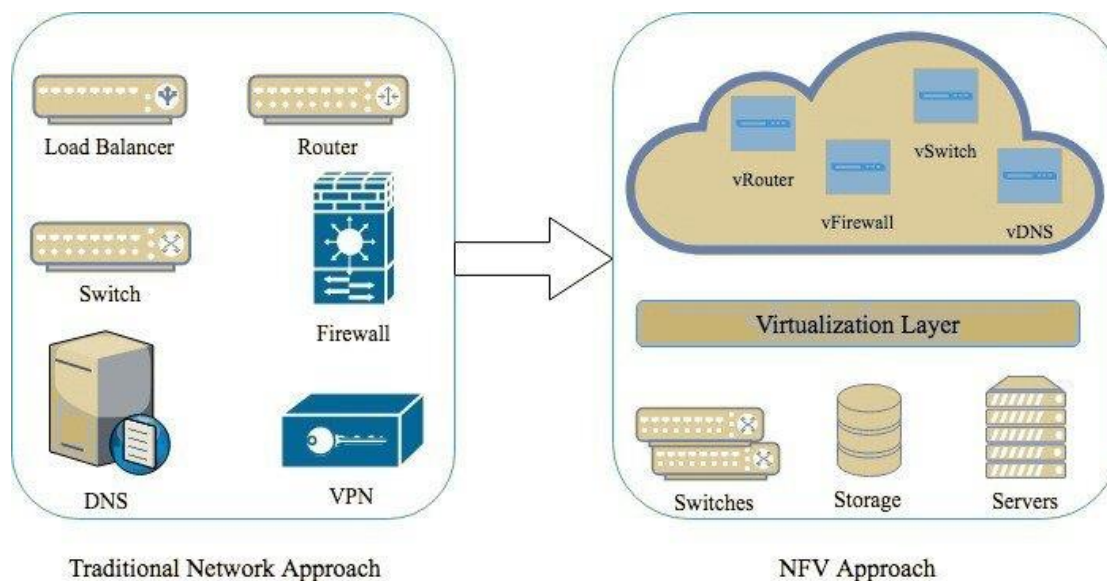
Με το NFV, οι διάφορες λειτουργίες του δικτύου, όπως οι δρομολογητές, οι μεταγωγείς, οι προσκολλητές φωνής ή οι προστασίες ασφάλειας, εκτελούνται ως λογισμικό επάνω σε εικονικά περιβάλλοντα. Αυτό επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών να αναπτύσσουν, να εγκαθιστούν και να διαχειρίζονται δικτυακές λειτουργίες με μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα.

Οι κεντρικές αρχές του NFV περιλαμβάνουν την εικονικοποίηση των δικτυακών λειτουργιών, την ορχήστρωση και τον έλεγχο τους μέσω ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης και την ευελιξία στην αλλαγή και προσαρμογή των λειτουργιών του δικτύου.

Το NFV παρέχει οφέλη όπως ευελιξία, κόστος μειωμένο, επιτάχυνση της εισαγωγής νέων υπηρεσιών και αυξημένη κλιμακωσιμότητα. Έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, δίκτυα ευρυζωνικής πρόσβασης, κέντρα δεδομένων και επιχειρησιακά δίκτυα.

Συνολικά, το NFV επιτρέπει την εικονικοποίηση και αφαιρεί τον περιορισμό των λειτουργιών δικτύου από το συγκεκριμένο φυσικό υλικό, προσφέροντας ευελιξία, κλιμακωσιμότητα και αποδοτικότητα στην παροχή δικτυακών υπηρεσιών.

Επιπρόσθετα, εάν μια υποδομή μοιράζεται μεταξύ πολλών παρόχων υπηρεσιών, ο διαχωρισμός διεύθυνσεων VNF γίνεται απαραίτητος, καθώς πρέπει να γίνει αντιληπτή η ευχρηστία της διεύθυνσης ενός μόνο συγκεκριμένου παρόχου, ενώ ο χώρος διεύθυνσης μπορεί να επικαλύπτεται μεταξύ των παρόχων. [45] Συγκεκριμένα, καθώς η κίνηση από διαφορετικούς παρόχους μοιράζεται τους ίδιους πόρους δικτύωσης, όχι μόνο η ασφάλεια καθίσταται πρόκληση, αλλά και η ευελιξία και η βέλτιστη προώθηση της κυκλοφορίας από ένα εικονικό δίκτυο (δίκτυο VNFs) σε ένα άλλο, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια και ο διαχωρισμός διεύθυνσης. Επιπλέον, η NFV θα πρέπει να διατηρήσει τα χαρακτηριστικά επεκτασιμότητας των σημερινών υψηλά καταναμημένων κυψελοειδών δικτύων, αξιοποιώντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα της NFV, έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως η εξισορρόπηση φορτίου και η τοποθέτηση VM στο cloud περιβάλλον, θα γίνουν σε πραγματικό χρόνο και θα υποστηρίξουν χιλιάδες εικονικές λειτουργίες. [45]



Σχήμα 3.8. Η NFV τεχνολογία σε σύγκριση με την παραδοσιακή

Τέλος, η τεχνολογία του Network Function Virtualization (NFV) παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή υλοποίησή της. Ορισμένες από αυτές τις προκλήσεις περιλαμβάνουν:

- Απαιτήσεις υποδομής: Η εκτέλεση εικονικοποιημένων λειτουργιών δικτύου απαιτεί υψηλές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος, αποθήκευσης και δικτύωσης. Αυτές οι απαιτήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη υποδομή, όπως ευέλικτους εξυπηρετητές και αποθηκευτικούς πόρους.

- Πολυπλοκότητα διαχείρισης: Η εικονικοποίηση των δικτυακών λειτουργιών δημιουργεί πολυπλοκότητα στη διαχείριση και την παρακολούθηση του δικτύου. Είναι αναγκαίο να αναπτυχθούν αποτελεσματικά εργαλεία και πλατφόρμες διαχείρισης για την εντοπισμό, τον έλεγχο και την αποκατάσταση προβλημάτων.
- Ασφάλεια: Η εικονικοποίηση και η απομακρυσμένη εκτέλεση δικτυακών λειτουργιών αυξάνουν τις προκλήσεις ασφάλειας.
- Επεκτασιμότητα και ευελιξία
- Επιτάχυνση υλοποίησης
- Διαφάνεια, διαλειτουργικότητα και παγκόσμια εμβέλεια [52]

3.9. Big Data and Mobile Cloud Computing

Το Big Data and Mobile Cloud Computing (MCC) αναφέρεται στη συνδυασμένη χρήση του μεγάλου όγκου δεδομένων (Big Data) και του υπολογισμού στον νέφος (Cloud Computing) για την ανάλυση, αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων από φορητές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα και tablet.

Το Big Data αναφέρεται στον όγκο, την ποικιλία και την ταχύτητα με την οποία δημιουργούνται και διαχειρίζονται τα δεδομένα. Αυτά τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως κοινωνικά δίκτυα, αισθητήρες, συσκευές IoT και άλλα. Η ανάλυση του Big Data απαιτεί συνήθως υψηλές υπολογιστικές ισχύς και αποθηκευτικούς πόρους.

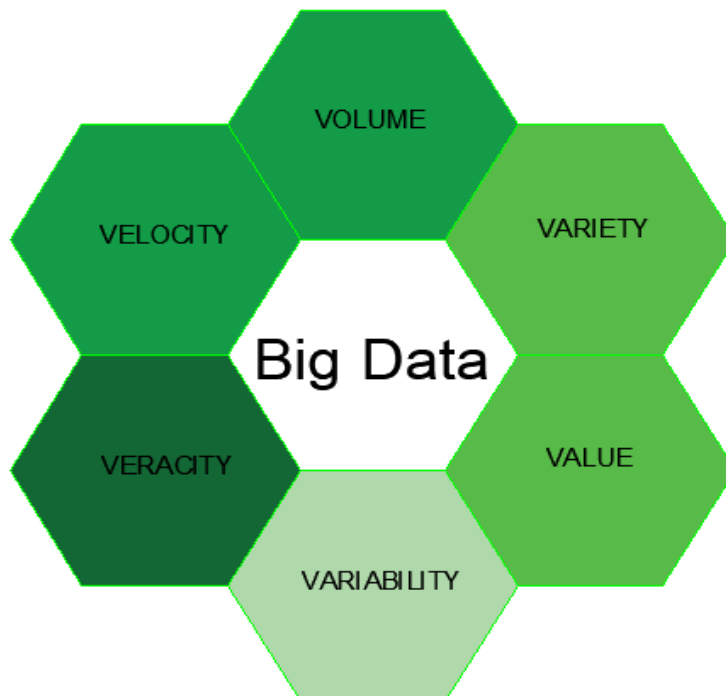
Το Cloud Computing παρέχει τη δυνατότητα αποθήκευσης, διαχείρισης και παροχής υπολογιστικών πόρων μέσω του διαδικτύου. Οι χρήστες μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτούς τους πόρους από οποιαδήποτε συσκευή με σύνδεση στο διαδίκτυο, χωρίς να χρειάζεται να διατηρούν τοπικά υλικά.

Η συνδυασμένη χρήση του Big Data και του Cloud Computing στο πλαίσιο του MCC επιτρέπει την αποθήκευση και ανάλυση των μεγάλων όγκων δεδομένων από φορητές συσκευές. Οι φορητές συσκευές συλλέγουν συνεχώς δεδομένα, όπως τοποθεσία, αισθητήρες και κοινωνικές δραστηριότητες, και αυτά τα δεδομένα μπορούν να αποσταλούν και να επεξεργαστούν στον νέφος για ανάλυση και ανακτήσιμα αποτελέσματα.

Οι εφαρμογές του Big Data and Mobile Cloud Computing περιλαμβάνουν την ανάλυση δεδομένων για προγνωστική ανάλυση, τη βελτιστοποίηση υπηρεσιών, την παροχή εξατομικευμένων υπηρεσιών στους χρήστες, καθώς και την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών.[54]

Τα σύνολα δεδομένων αυξάνονται ραγδαία, εν μέρει επειδή συλλέγονται ολοένα και περισσότερο από πολυάριθμες IoT συσκευές, όπως συσκευές κινητής τηλεφωνίας, τηλεκατευθυνόμενα προγράμματα, αρχεία καταγραφής λογισμικού, κάμερες, μικρόφωνα, ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνότητας (RFID) και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το RFID λειτουργεί ως γενικός όρος των τεχνολογιών, που χρησιμοποιούν ραδιοκύματα για να προσδιορίσουν αυτόματα ανθρώπους ή αντικείμενα. Η τεχνολογία RFID είναι γνωστή εδώ και 50 χρόνια και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την πολεμική αεροπορία της Αγγλίας κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου πολέμου, για την αναγνώριση και τη διάκριση των εχθρικών αεροπλάνων από τα φιλικά. Κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, άρχισε να εδραιώνεται η χρήση και η εκμετάλλευσή της. [54], [72] Η τεχνολογική ικανότητα ανά τον κόσμο για την αποθήκευση πληροφοριών έχει σχεδόν διπλασιαστεί κάθε 40 μήνες από τη δεκαετία του 1980. Με βάση μια πρόβλεψη της εταιρίας IDC, ο παγκόσμιος όγκος δεδομένων θα αυξηθεί εκθετικά από 4,4 zettabytes σε 44 zettabytes μεταξύ 2013 και 2021. Από το 2025, η IDC προβλέπει ότι θα υπάρξουν 163 zettabytes δεδομένων. [54] Επομένως, λόγω της ραγδαίας αύξησης των δεδομένων, η παραδοσιακή αποθήκευση δεδομένων στις τοπικές συσκευές δεν θα είναι πλέον σε θέση να χειριστεί την εκθετικά αυξανόμενη μνήμη cache, ειδικά όταν ο χρήστης θέλει να κάνει λήψη τεράστιων αρχείων ή προγραμμάτων ή ακόμα και να μεταδίδει HD βίντεο. Τα τελευταία χρόνια, η cloud αποθήκευση

έγινε δημοφιλής λόγω της βολικής υπηρεσίας, που προσφέρει στους χρήστες, οι οποίοι μπορούν να μεταφορτώσουν δεδομένα σε cloud servers μέσω του Διαδικτύου και συνεπώς να χειριστούν διαφορετικά τον τοπικό αποθηκευτικό χώρο στις συσκευές τους. [38]



Σχήμα 3.9. Η αξία των Big Data

- **Volume:** το πρώτο από τα 6 V των Big Data, αναφέρεται στην ποσότητα δεδομένων που υπάρχει. Ο όγκος είναι σαν τη βάση των μεγάλων δεδομένων, καθώς είναι το αρχικό μέγεθος και ο όγκος των δεδομένων που συλλέγονται. Εάν ο όγκος των δεδομένων είναι αρκετά μεγάλος, μπορεί να θεωρηθεί μεγάλος όγκος δεδομένων. Αυτό που θεωρείται ότι είναι μεγάλα δεδομένα είναι σχετικό, ωστόσο, και θα αλλάξει ανάλογα με τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ που υπάρχει στην αγορά.
- **Velocity:** Το επόμενο από τα 6 V των Big Data είναι η ταχύτητα. Αναφέρεται στο πόσο γρήγορα παράγονται τα δεδομένα και πόσο γρήγορα μετακινούνται αυτά τα δεδομένα. Αυτή είναι μια σημαντική πτυχή για τις ανάγκες των εταιρειών που χρειάζονται τα δεδομένα τους να ρέουν γρήγορα, επομένως είναι διαθέσιμο την κατάλληλη στιγμή για να λάβουν τις καλύτερες δυνατές επιχειρηματικές αποφάσεις. Ένας οργανισμός που χρησιμοποιεί μεγάλα δεδομένα θα έχει μια μεγάλη και συνεχή ροή δεδομένων που δημιουργείται και αποστέλλεται στον τελικό προορισμό του. Τα δεδομένα θα μπορούσαν να προέρχονται από πηγές όπως μηχανήματα, δίκτυα, smartphone ή μέσα κοινωνικής δικτύωσης. Αυτά τα δεδομένα πρέπει να αφομοιωθούν και να αναλυθούν γρήγορα, και μερικές φορές σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, μπορεί να είναι καλύτερο να έχετε ένα περιορισμένο σύνολο συλλεγμένων δεδομένων παρά να συλλέξετε περισσότερα δεδομένα από αυτά που μπορεί να χειριστεί ένας οργανισμός -- καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερες ταχύτητες δεδομένων.
- **Variety:** Το επόμενο V στα 6 V των Big Data είναι η ποικιλία. Η ποικιλία αναφέρεται στην ποικιλομορφία των τύπων δεδομένων. Ένας οργανισμός μπορεί να λάβει δεδομένα από διάφορες πηγές δεδομένων, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν σε αξία. Τα δεδομένα

μπορούν επίσης να προέρχονται από πηγές εντός και εκτός μιας επιχείρησης. Η πρόκληση στην ποικιλία αφορά την τυποποίηση και τη διανομή όλων των δεδομένων που συλλέγονται. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορεί να είναι αδόμητα, ημι-δομημένα ή δομημένα. Τα μη δομημένα δεδομένα είναι δεδομένα που δεν είναι οργανωμένα και διατίθενται σε διαφορετικά αρχεία ή μορφές. Συνήθως, τα μη δομημένα δεδομένα δεν είναι κατάλληλα για μια βασική σχεσιακή βάση δεδομένων, επειδή δεν ταιριάζουν σε συμβατικά μοντέλα δεδομένων. Ημι-δομημένα δεδομένα είναι δεδομένα που δεν έχουν οργανωθεί σε εξειδικευμένο αποθετήριο αλλά έχουν συσχετισμένες πληροφορίες, όπως μεταδεδομένα. Αυτό καθιστά ευκολότερη την επεξεργασία από τα μη δομημένα δεδομένα. Τα δομημένα δεδομένα, εν τω μεταξύ, είναι δεδομένα που έχουν οργανωθεί σε ένα διαμορφωμένο αποθετήριο. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα γίνονται πιο προσιτά για αποτελεσματική επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων.

- **Veracity:** Το Veracity είναι το τέταρτο V στα 6 V των Big Data. Αναφέρεται στην ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορεί να έχουν κομμάτια που λείπουν, μπορεί να είναι ανακριβή ή μπορεί να μην είναι σε θέση να παρέχουν πραγματικές, πολύτιμες πληροφορίες. Η αλήθεια, συνολικά, αναφέρεται στο επίπεδο εμπιστοσύνης που υπάρχει στα δεδομένα που συλλέγονται. Τα δεδομένα μπορεί μερικές φορές να γίνουν ακατάστατα και δύσχρηστα. Ένας μεγάλος όγκος δεδομένων μπορεί να προκαλέσει περισσότερη σύγχυση από ό,τι πληροφορίες, εάν είναι ελλιπείς. Για παράδειγμα, όσον αφορά τον ιατρικό τομέα, εάν τα δεδομένα σχετικά με τα φάρμακα που παίρνει ένας ασθενής είναι ελλιπή, τότε η ζωή του ασθενούς μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο. Τόσο η αξία όσο και η ακρίβεια βοηθούν στον καθορισμό της ποιότητας και των πληροφοριών που συλλέγονται από τα δεδομένα.
- **Value:** το 5 V από τα 6 V των Big Data είναι η τιμή. Αυτό αναφέρεται στην αξία που μπορούν να προσφέρουν τα μεγάλα δεδομένα και σχετίζεται άμεσα με το τι μπορούν να κάνουν οι οργανισμοί με αυτά τα δεδομένα που συλλέγονται. Το να μπορείτε να αντλήσετε αξία από μεγάλα δεδομένα είναι μια απαίτηση, καθώς η αξία των μεγάλων δεδομένων αυξάνεται σημαντικά ανάλογα με τις πληροφορίες που μπορείτε να αποκτήσετε από αυτά. Οι οργανισμοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα ίδια εργαλεία μεγάλων δεδομένων για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων, αλλά ο τρόπος με τον οποίο αντλούν αξία από αυτά τα δεδομένα πρέπει να είναι μοναδικός για αυτούς.
- **Variability:** Η μεταβλητότητα είναι το τελευταίο V των Big Data και είναι διαφορετική από την ποικιλία. Η μεταβλητότητα αναφέρεται στα δεδομένα που αλλάζουν συνεχώς. Η μεταβλητότητα εστιάζει κυρίως στην κατανόηση και την ερμηνεία των σωστών νοημάτων των ακατέργαστων δεδομένων.

3.9.1 Delivery Models του Cloud

Τα 3 βασικά delivery models είναι τα εξής:

1. (SaaS) - Software as a Service
2. (PaaS) - Platform as a Service
3. (IaaS) - Infrastructure as a Service

Κάθε ένα από τα κύρια αυτά delivery models περιέχει και σύνολο δευτερευόντων delivery models.

Εκτός από αυτά υπάρχει και το Cooperation as a Service (CaaS) το οποίο όμως δεν αποτελεί κατηγορία κάποιου delivery model παρά αναφέρεται σε κάθε είδους παροχή υπηρεσίας στην οποία πραγματοποιείται συνεργασία μεταξύ των οχημάτων. Το CaaS συνδυάζεται με τα delivery models όταν η λειτουργία τους πρόκειται να επεκταθεί σε συνεργασία μεταξύ των οχημάτων, π.χ.

μέσω του CaaS και των delivery models μπορεί να πραγματοποιηθεί βελτιωμένη διαχείριση οδικής κυκλοφορίας μέσω της συνεργασίας μεταξύ των οχημάτων.

1. SaaS

Τα οχήματα είναι οι τελικοί χρήστες των εφαρμογών cloud. Οι χρήστες δεν μπορούν να παραμετροποιήσουν τον πηγαίο κώδικα της εφαρμογής καθώς επίσης και να ελέγξουν την υποκείμενη υποδομή cloud που φιλοξενεί την εφαρμογή. Κάποιες υποκατηγορίες του SaaS είναι οι εξής:

- UCaaS (User Communication as a Service): παρέχει εφαρμογές στους χρήστες του VANET Cloud με στόχο να επικοινωνούν μεταξύ τους, τέτοιες εφαρμογές είναι αποστολή μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, φωνητικές κλήσεις ή βιντεοκλήσεις κ.α.
- DaaS (Data as a Service): παρέχει εφαρμογές που είναι απαραίτητες στα οχήματα για να ανακτούν δεδομένα από το cloud. Μια τέτοια εφαρμογή είναι το Dropbox.
- INaaS (Information as a Service): παρέχει πληροφορίες στα οχήματα σχετικά με κυκλοφοριακές ρυθμίσεις, καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, διαθεσιμότητα θέσεων parking κ.α. Αυτό επιτυγχάνεται με ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των οχημάτων μέσω cloud. Έτσι, εάν ένα όχημα χρειάζεται πληροφορίες για κάτι συγκεκριμένο π.χ. για θέση στάθμευσης χρησιμοποιεί το μοντέλο ανταλλαγής μηνυμάτων Information Centric αλληλεπίδρα με το cloud, εγγράφεται στην υπηρεσία INaaS και λαμβάνει τις πληροφορίες που χρειάζεται.
- PWaaS (Pictures on a Wheel as a Service): η συγκεκριμένη υπηρεσίες αφορά τα οχήματα, τα οποία εγγράφονται σε έναν διαχειριστή cloud και κοινοποιούν τις γεωγραφικές συντεταγμένες τους σε τακτά χρονικά διαστήματα. Έτσι, όταν ένα όχημα αναζητά πληροφορίες για μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή τότε ο διαχειριστής επιλέγει ένα σύνολο οχημάτων που κινούνται σε εκείνη την περιοχή, τους αποστέλλει φωτογραφικό υλικό και βίντεο και παράλληλα αυτό το υλικό αποστέλλεται ενημερωμένο στο όχημα που αναζητά πληροφορίες.
- SEaaS (Sensing as a Service): η υπηρεσία αυτή προσφέρει πληροφορίες μέσω αισθητήρων που διαθέτουν κάποια από τα οχήματα που είναι στο δίκτυο VANET Cloud. Οι αισθητήρες αυτοί καταγράφουν τις οδικές συνθήκες π.χ. θερμοκρασία οδοστρώματος και στόχος είναι η διασφάλιση της οδικής ασφάλειας. Αυτό επιτυγχάνεται με συλλογή των δεδομένων στο cloud και διαμοιρασμό αυτών σε όλα τα οχήματα, είτε έχουν στον εξοπλισμό τους αισθητήρες είτε όχι.
- WaaS (Warning as a Service): το VANET παρακολουθείται από την υποδομή cloud η οποία συλλέγει πληροφορίες σχετικά με την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τις οδικές συνθήκες, στη συνέχεια έχει την δυνατότητα να μεταδώσει προειδοποιητικά μηνύματα στα οχήματα. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη τις προειδοποιήσεις οι οδηγοί των οχημάτων μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικότερα μια κατάσταση που πιθανόν αντιμετωπίσουν.

2. PaaS

Το Platform as a Service παρέχει ένα περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών cloud όπου οι χρήστες θεωρούνται πάροχοι των εφαρμογών και έχουν τον πλήρη έλεγχο του πηγαίου κώδικα των εφαρμογών τους, οι εφαρμογές αυτές πρέπει να είναι συμβατές με την υποκείμενη πλατφόρμα cloud. Χάρη στο PaaS παρέχεται ευκολία στην παραμετροποίηση των πόρων του cloud από τον χρήστη χωρίς να χρειάζεται να διαχειριστεί τη βασική υποδομή του υλικού. Παρακάτω αναλύονται οι υποκατηγορίες του PaaS:

- FaaS (Framework as a Service): παρέχει μια πλατφόρμα για την υλοποίηση εφαρμογών με δυνατότητα παραμετροποίησης των ιδιοτήτων που σχετίζονται με την απόδοση των εφαρμογών όπως επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας. Ο πάροχος του cloud διατηρεί τα εργαλεία ανάπτυξης και διαχειρίζεται την υποδομή.
- RaaS (Runtime Environment as a Service): παρέχει ένα περιβάλλον εκτέλεσης για τις εφαρμογές του χρήστη και ο πάροχος του cloud διατηρεί και διαχειρίζεται το runtime.

3. IaaS

Το Infrastructure as a Service παρέχει υποδομή cloud στους χρήστες οι οποίοι μπορούν να εγκαταστήσουν μια πλατφόρμα για την ανάπτυξη των εφαρμογών τους. Το μοντέλο IaaS παρέχει πόρους όπως αποθηκευτικό χώρο, πυρήνες επεξεργασίας, μνήμη κ.α. Κάποιες υποκατηγορίες του IaaS είναι οι εξής:

- DaaS (Discovery as a Service): επιτρέπει στα οχήματα να εντοπίσουν πόρους όπως RSUs. Τα οχήματα εντοπίζουν τις υπηρεσίες και τους πόρους που διατίθενται σε κοντινούς cloud servers, οι servers αυτοί αναφέρονται ως transportation servers (STARs) και είναι εγγεγραμμένοι σε RSUs που ενεργούν ως τοποθεσίες του cloud.
- NaaS (Network as a Service): επιτρέπει σε οχήματα ή RSUs τα οποία έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο να δώσουν πρόσβαση και σε αυτά που δεν έχουν.
- HaaS (Hardware as a Service): σε ένα δίκτυο VANET Cloud κάποια οχήματα ενδέχεται να μην διαθέτουν αρκετούς υπολογιστικούς πόρους για να ολοκληρώσουν επιτυχώς τις εργασίες τους, έτσι όσα οχήματα έχουν άφθονους υπολογιστικούς πόρους προσφέρουν μέρος αυτών στα οχήματα που τους έχουν ανάγκη. Το HaaS περιλαμβάνει τις 2 ακόλουθες υποκατηγορίες:
 - COaaS (Computing as a Service): παρέχει υπολογιστικούς πόρους στα οχήματα προκειμένου να μπορούν να εκτελούν τις εφαρμογές τους.
 - STaaS (Storage as a Service): προσφέρει αποθηκευτικό χώρο στα οχήματα για να αποθηκεύουν τα δεδομένα τους π.χ. Dropbox backend. Παράδειγμα αυτής της παροχής είναι το εξής:
χρησιμοποιείται ένα σύνολο από σταθμευμένα αυτοκίνητα και ορίζονται οι 3 βασικοί τύποι κόμβων, το Producer Vehicle (PV) (όχημα με άφθονους πόρους αποθήκευσης), το RSU (σταθερός κόμβος που παρέχει τηλεπικοινωνιακούς πόρους) και το Consumer Vehicle (CV) (όχημα με περιορισμένους πόρους αποθήκευσης). Αρχικά το RSU ζητάει από τα οχήματα ενημέρωση για τον αποθηκευτικό χώρο που διαθέτουν, τα οχήματα απαντούν με μήνυμα «Storage» ή «No Storage» αντίστοιχα. Στη συνέχεια το RSU αν διαθέτει δεδομένα τα στέλνει στα PVs για αποθήκευση, ένα CV ζητάει από το RSU χώρο αποθήκευσης και το RSU επικοινωνεί με τα PVs και τους ζητά να αποθηκεύσουν τα δεδομένα του CV. Κάθε PV αποθηκεύει τα ζητούμενα στοιχεία και όταν το CV χρειαστεί τα δεδομένα στέλνει αίτημα στο RSU και αυτό με τη σειρά του ανακτά τα δεδομένα από τα PVs και τα προωθεί στο CV.

Πίνακας 4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Delivery Models

	Software as a Service (SaaS)	Platform as a Service (PaaS)	Infrastructure as a Service (IaaS)
Advantages	<p>Το πιο οικονομικό delivery model.</p> <p>Εύκολο στη χρήση.</p> <p>Μπορεί να παρέχεται γρήγορα on-demand.</p> <p>Ο χρήστης δεν ανησυχεί σχετικά με τη διαχείριση υπηρεσιών.</p>	<p>Ισορροπημένο κόστος υπηρεσίας.</p> <p>Ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει και να τρέξει τις δικές του εφαρμογές.</p> <p>Ο χρήστης έχει πλήρη έλεγχο:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Του πηγαίου κώδικα των εφαρμογών του. - Των δικαιωμάτων των άλλων χρηστών που έχουν πρόσβαση στο λογισμικό του. - Οι λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων στο εσωτερικό των εφαρμογών του. - Δυνατότητα ενσωμάτωσης (integration) μεταξύ εφαρμογών χρήστη και εξωτερικών συστημάτων σε επίπεδο εφαρμογής. <p>Απαιτείται ελάχιστη διαχείριση της VM.</p>	<p>Ο χρήστης έχει πλήρη έλεγχο πάνω στις VMs του.</p> <p>Ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει και να τρέξει οποιαδήποτε εφαρμογή θέλει μέσα στις VMs του.</p> <p>Πλήρης έλεγχος των λειτουργιών επεξεργασίας δεδομένων μέσα στις VMs.</p> <p>Δυνατότητα πλήρους ενσωμάτωσης (integration) μεταξύ εφαρμογών χρήστη και εξωτερικών συστημάτων.</p> <p>Η πιο ιδιωτική (privacy aware) υπηρεσία cloud.</p>
Disadvantages	<p>Κανένας έλεγχος της εκτέλεσης και παραμετροποίησης εφαρμογών, ή των λειτουργιών επεξεργασίας δεδομένων.</p> <p>Περιορισμένος έλεγχος πάνω στην ανάπτυξη εφαρμογών και στις διαδικασίες αναβάθμισης.</p> <p>Δύσκολη ενσωμάτωση με άλλο λογισμικό του χρήστη.</p>	<p>Έλλειψη δυνατότητας ελέγχου της VM: Θα μπορούσε να δημιουργήσει κινδύνους για την ασφάλεια των δεδομένων εφαρμογής.</p> <p>Κίνδυνοι ιδιωτικότητας και πρόσθετο data traffic θα μπορούσε να δημιουργηθεί από χρήστες που συνυπάρχουν στο ίδιο VM και εκτελούν τις εφαρμογές τους.</p>	<p>Το πιο ακριβό delivery model.</p> <p>Η διαχείριση των VMs πρέπει να πραγματοποιείται από το χρήστη.</p>

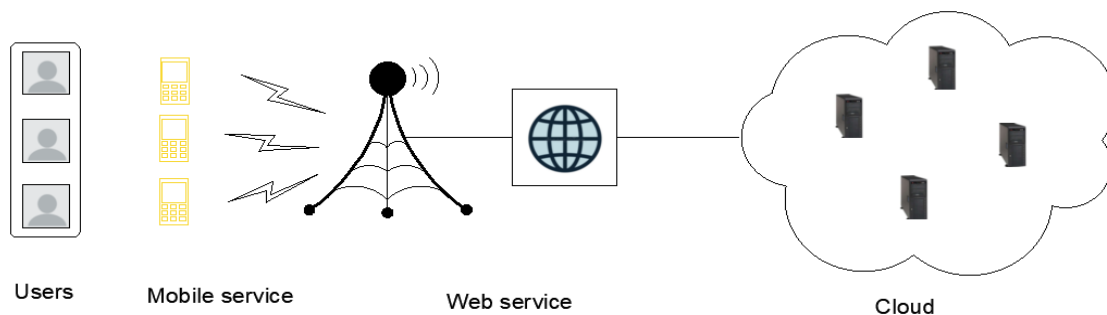
Επιπροσθέτως, η πλειονότητα των δεδομένων, που παράγονται από κινητές συσκευές και δίκτυα, εντείνουν επίσης τη σημασία της ανάλυσης των Big Data. Συνεπώς, η περισσότερη διαδικασία της ανάλυσης δεδομένων εκτελείται σε ομάδες φυσικών μηχανών, χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα, που ονομάζεται Apache Hadoop. Η Apache Hadoop είναι μια ανοικτού κώδικα πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων (Big Data) σε κατανεμημένα συστήματα. Αναπτύχθηκε αρχικά από το Yahoo και κατανέμεται υπό την άδεια Apache Software Foundation.

Η βασική ιδέα πίσω από το Hadoop είναι η δυνατότητα να επεξεργάζεται μεγάλα σύνολα δεδομένων σε πλήθος από υπολογιστές που είναι συνδεδεμένοι μέσω ορισμένου δικτύου. Η πλατφόρμα Hadoop αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία:

- Hadoop Distributed File System (HDFS): Αυτός είναι ένας κατανεμημένος αρχειοθετικός συστήματα που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση μεγάλων όγκων δεδομένων σε διαφορετικούς κόμβους του συστήματος Hadoop. Τα δεδομένα διαιρούνται και αναπαράγονται σε διάφορα μηχανήματα, επιτρέποντας την επεξεργασία τους παράλληλα.
- Hadoop MapReduce: Αυτό είναι ένα πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και ανάλυση μεγάλων όγκων δεδομένων σε πολυπύρηνες περιβάλλοντα. Βασίζεται στο μοντέλο "map" και "reduce", όπου οι εργασίες διαίρονται σε μικρότερα τμήματα που εκτελούνται παράλληλα σε διάφορους κόμβους και στη συνέχεια συνολικεύονται για την απόδοση του τελικού αποτελέσματος.

Η Apache Hadoop παρέχει μια ανθεκτική και κλιμακούμενη πλατφόρμα για την αποθήκευση και επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων, και έχει ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η ανάλυση δεδομένων, η επεξεργασία κειμένου, η ανίχνευση ανωμαλιών και η μηχανική μάθηση.

Σε αντίθεση με το Hadoop, η αποθήκευση των "μεγάλων δεδομένων" στο cloud προσφέρει οφέλη όσον αφορά το κόστος, την αποδοτικότητα και την επεκτασιμότητα [38]. Τα μεγάλα δεδομένα και το mobile cloud computing σε συνδυασμό με το 5G παρέχουν ευελιξία και υψηλή απόδοση στη διαχείριση δεδομένων. Καθώς οι χρήστες αυξάνουν τη χρήση των cloud servers για την κοινή χρήση αρχείων αποθήκευσης, το mobile cloud computing προσφέρει διαχείριση δεδομένων μέσω των cloud servers. Σε αντίθεση με το κυψελοειδές σύστημα, όπου η κατερχόμενη ζεύξη (downlink) είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσης, το mobile cloud computing δίνει σημασία στην ποιότητα της ανερχόμενης ζεύξης (uplink) και το δίκτυο backhaul. Το ασύρματο backhaul αποτελεί την ασύρματη υποδομή δικτύου που μεταφέρει τα δεδομένα επικοινωνίας από τους χρήστες ή τους κόμβους προς το κεντρικό δίκτυο και αντίστροφα. Το mobile cloud computing παρέχει ένα περιβάλλον όπου η αποθήκευση και η επεξεργασία δεδομένων διεξάγονται εκτός της κινητής συσκευής. Επιπλέον, απαιτεί μία σταθερή σύνδεση με τον cloud server, η οποία θέτει υψηλές απαιτήσεις για την backhaul πύλη δεδομένων, προκειμένου να διασφαλίσει τις βέλτιστες διαδρομές για τη ροή δεδομένων στο δίκτυο [38], [55].



Σχήμα 3.10. Διασύνδεση κινητών συσκευών μέσω του internet με τους Cloud Servers

Η χρήση του Mobile Cloud Computing (MCC) προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα, αλλά υπάρχουν επίσης και ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ας αναλύσουμε αυτά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πιο αναλυτικά:

Πλεονεκτήματα του Mobile Cloud Computing:

- Απομακρυσμένη πρόσβαση: Οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στους πόρους και τις υπηρεσίες του νέφους από οποιαδήποτε φορητή συσκευή με σύνδεση στο διαδίκτυο. Αυτό επιτρέπει την ευελιξία και την απομακρυσμένη εργασία.
- Αύξηση των υπολογιστικών πόρων: Οι φορητές συσκευές συχνά διαθέτουν περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και αποθηκευτικό χώρο. Με το MCC, μπορούν να αξιοποιήσουν τους πόρους του νέφους για εκτέλεση πιο απαιτητικών εφαρμογών και αποθήκευση μεγάλων όγκων δεδομένων.
- Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης: Η εκτέλεση εργασιών στο νέφος αντί για την τοπική συσκευή μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση των φορητών συσκευών, καθώς η επεξεργασία και οι υπολογισμοί γίνονται σε απομακρυσμένους διακομιστές.
- Αποθήκευση και εφεδρικά αντίγραφα δεδομένων: Το MCC επιτρέπει την αποθήκευση και το backup των δεδομένων σε απομακρυσμένες υπηρεσίες αποθήκευσης του νέφους, προσφέροντας ασφάλεια και αξιοπιστία στα δεδομένα.

Μειονεκτήματα του Mobile Cloud Computing:

- Εξάρτηση από τη σύνδεση στο διαδίκτυο: Η χρήση του MCC απαιτεί σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση στο διαδίκτυο. Η απουσία σύνδεσης μπορεί να περιορίσει την πρόσβαση και τη λειτουργία των υπηρεσιών.
- Απόρρητο και ασφάλεια δεδομένων: Η μεταφορά και αποθήκευση δεδομένων στο νέφος μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις όσον αφορά το απόρρητο και την ασφάλεια. Πρέπει να ληφθούν μέτρα για να εξασφαλιστεί η προστασία των δεδομένων.
- Καθυστέρηση και απόκριση: Η απομακρυσμένη επεξεργασία και αποθήκευση σε απομακρυσμένα διακομιστές μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση στην απόκριση των εφαρμογών, ιδίως όταν υπάρχουν περιορισμένοι πόροι δικτύου ή υψηλή κίνηση δεδομένων.
- Κόστος: Η χρήση των υπηρεσιών του MCC μπορεί να συνεπάγεται επιπλέον κόστος, καθώς απαιτείται πρόσβαση σε υποδομές νέφους και προνομιούχα συνδρομή για ορισμένες υπηρεσίες.

3.10. Cognitive Radio (CR)

Το Cognitive Radio (CR) είναι μια ασύρματη τεχνολογία επικοινωνιών που έχει σχεδιαστεί για να εκμεταλλεύεται το φάσμα συχνοτήτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με πιο αποδοτικό τρόπο. Ο στόχος του CR είναι να επιτρέπει την έξυπνη χρήση του φάσματος, εντοπίζοντας και χρησιμοποιώντας διαθέσιμα φάσματα που δεν χρησιμοποιούνται από άλλες συσκευές ή χρήστες.

Έτσι λοιπόν, οι τεχνολογίες των ασύρματων επικοινωνιών της Πέμπτης Γενιάς (5G) περιλαμβάνουν την αυτόματη ανίχνευση διαθέσιμων καναλιών στο ασύρματο φάσμα και την προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης ή λήψης για να επιτραπούν περισσότερες ταυτόχρονες ασύρματες επικοινωνίες σε μια συγκεκριμένη ζώνη φάσματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Στα δίκτυα της τεχνολογίας CR (Cognitive Radio), υπάρχουν χρήστες με προτεραιότητα οι οποίοι έχουν πρόσβαση στο αδειοδοτημένο φάσμα. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλοι χρήστες, γνωστοί ως Δευτερεύοντες Χρήστες (SUs), οι οποίοι πρέπει να ελέγχουν σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του δικτύου και να εξετάζουν εάν το αδειοδοτημένο φάσμα είναι διαθέσιμο ή όχι. Ανάλογα με την κατάσταση, οι χρήστες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μη αδειοδοτημένο φάσμα ή να αξιοποιήσουν το αδειοδοτημένο φάσμα εάν είναι ελεύθερο. Ωστόσο, πρέπει να διασφαλίζουν ότι δεν υπάρχουν Πρωτεύοντες Χρήστες (PUs), δηλαδή χρήστες με προτεραιότητα που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το σύστημα. [97]

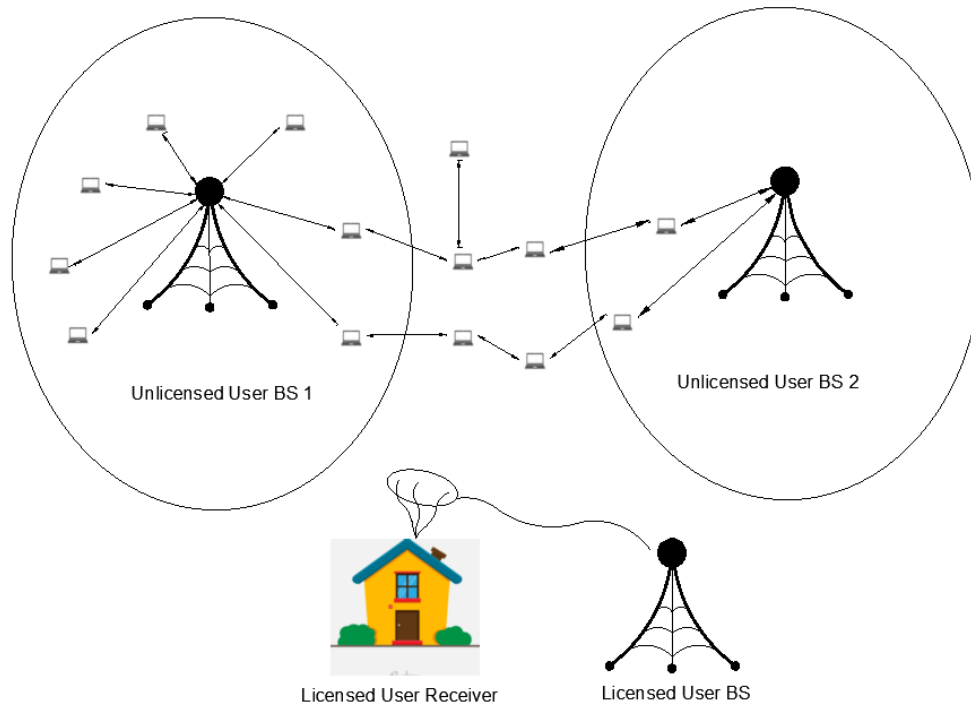
Οι κύριες αρχές του Cognitive Radio περιλαμβάνουν:

- **Συνείδηση του φάσματος:** Οι συσκευές CR έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν και να αναλύουν το φάσμα συχνοτήτων για να εντοπίσουν διαθέσιμα κενά φάσματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία.
- **Ανίχνευση και αναγνώριση συνθηκών του φάσματος:** Οι συσκευές CR μπορούν να ανιχνεύουν την κατάσταση του φάσματος, όπως τη στάθμη σήματος, την ποιότητα του σήματος και τις διαθέσιμες συχνότητες, προκειμένου να επιλέξουν την καλύτερη διαθέσιμη συχνότητα για επικοινωνία.
- **Δυναμική αναδιαμόρφωση:** Οι συσκευές CR μπορούν να προσαρμόζουν δυναμικά τις ρυθμίσεις τους, όπως η συχνότητα, η ισχύς και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, για να ελαχιστοποιήσουν την παρεμβολή και να βελτιστοποιήσουν την απόδοση της επικοινωνίας.
- **Συνεργασία και αλληλεπίδραση:** Οι συσκευές CR μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους για να μοιραστούν πληροφορίες σχετικά με το φάσμα και να συνεργαστούν για την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων.

Οι κύριες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τεχνολογία Cognitive Radio περιλαμβάνουν:

- **Εντοπισμός κενών φάσματος:** Ο εντοπισμός ακατοίκητων ή ελάχιστα χρησιμοποιούμενων κενών φάσματος είναι πρόκληση, καθώς απαιτεί σύνθετους αλγορίθμους και αναλυτικές μεθόδους για τον ανιχνευτή φάσματος.
- **Αλληλεπίδραση με άλλες συσκευές:** Οι συσκευές CR πρέπει να αλληλοεπιδρούν και να συνεργάζονται με τις παραδοσιακές συσκευές επικοινωνίας για να μειώσουν την παρεμβολή και να επιτύχουν τη συνεργατική χρήση του φάσματος.
- **Ασφάλεια και αξιοπιστία:** Η εξασφάλιση της ασφάλειας και αξιοπιστίας των επικοινωνιών CR είναι σημαντική, καθώς οι συσκευές μπορεί να έρθουν αντιμέτωπες με κακόβουλες επιθέσεις και παρεμβολές.
- **Νομοθεσία και ρύθμιση:** Η ανάπτυξη και εφαρμογή του CR απαιτεί να ληφθούν υπόψη οι νομοθετικές και ρυθμιστικές απαιτήσεις που διέπουν την ασύρματη επικοινωνία και τη χρήση του φάσματος.

Συνολικά, το Cognitive Radio προσφέρει τη δυνατότητα αποδοτικής και έξυπνης χρήσης του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ανταποκρινόμενο στις αυξανόμενες ανάγκες επικοινωνίας και επιτρέποντας την αποτελεσματική και αποδοτική αξιοποίηση των ασύρματων δικτύων.



Σχήμα 3.11. Το αδειοδοτημένο - το μη αδειοδοτημένο φάσμα και οι χρήστες τους

Η τεχνολογία του Έξυπνου Ραδιοφάσματος (Cognitive Radio) αποσκοπεί στην αποτελεσματική χρήση του ραδιοφάσματος. Το σύστημα CR θεωρείται "έξυπνο" επειδή αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και μπορεί να προσαρμόσει δυναμικά τη λειτουργία του βάσει των δεδομένων για τις συχνότητες που λαμβάνει, με σκοπό να παρέχει ένα αξιόπιστο δίκτυο επικοινωνίας και να εκμεταλλευτεί αποτελεσματικά το φάσμα. Η τεχνολογία CR αντιμετωπίζει το πρόβλημα της έλλειψης φάσματος μέσω της δυναμικής πρόσβασης και κοινής χρήσης του. Εμπνέεται από το γεγονός ότι μεγάλο μέρος του ασύρματου φάσματος παραμένει ανεκμετάλλευτο σε διάφορες συχνότητες και περιοχές. Επιπλέον, η τεχνολογία CR δεν απαιτεί την απόκτηση επιπλέον ακριβών πόρων σε ραδιοσυχνότητες, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος για έναν ασύρματο πάροχο υπηρεσιών. [59], [60] Ο Joseph Mitola ανέπτυξε την ιδέα για την τεχνολογία Cognitive Radio (CR) στο Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) των Ηνωμένων Πολιτειών, γνωστή ως "Mitola Radio". Στην βασική της μορφή, η CR τεχνολογία είναι μια υβριδική τεχνολογία που συνδυάζει την τεχνολογία Software-Defined Radio (SDR) όπως χρησιμοποιείται στις επικοινωνίες εξάπλωσης φάσματος. Οι δυνατές λειτουργίες της CR περιλαμβάνουν την ικανότητα ενός πομποδέκτη να προσδιορίζει τη γεωγραφική του θέση, να αναγνωρίζει και να εξουσιοδοτεί το χρήστη, να κρυπτογραφεί ή να αποκρυπτογραφεί σήματα, να αντιλαμβάνεται τις γειτονικές ασύρματες συσκευές που είναι ενεργές και να προσαρμόζει την ισχύ εξόδου και τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης. [58] Υπάρχουν δύο κύριοι CR τύποι, το Full Cognitive Radio και Spectrum-sensing Cognitive Radio. Το Full Cognitive Radio λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους που μπορεί να γνωρίζει ένας ασύρματος κόμβος ή δίκτυο. Το Spectrum-sensing Cognitive Radio χρησιμοποιείται για την ανίχνευση καναλιών στο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων. Τον

Νοέμβριο του 2008, η Federal Communications Commission (FCC) αποφάσισε να κατανέμει τμήματα του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που παρέμεναν αχρησιμοποίητα (γνωστά ως white spaces) για δημόσια χρήση. Οι συσκευές που λειτουργούν στα white spaces πρέπει να διαθέτουν τεχνολογίες για την αποφυγή παρεμβολών, όπως την ανίχνευση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων και τη δυνατότητα γεωγραφικής τοποθέτησης. [58]

Κεφάλαιο 4 – Πειραματικά αποτελέσματα

4.1. Ο προσομοιωτής δικτύων NS-3

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση ενός προσομοιωτή δικτύων 5G, έτσι επιλέχθηκε ο προσομοιωτής δικτύων NS-3, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των προσομοιωτών δικτύων διακριτών γεγονότων (discrete event network simulator). Οι προσομοιωτές της κατηγορίας αυτής, μοντελοποιούν τη λειτουργία ενός συστήματος, ως μια ακολουθία διακριτών γεγονότων στο χρόνο, με κάθε γεγονός να συμβάλει στην διαμόρφωση της κατάστασης του συστήματος.

Ο προσομοιωτής δικτύων NS-3 (Network Simulator 3) είναι ένα εργαλείο λογισμικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και την αξιολόγηση δικτύων επικοινωνιών. Αποτελεί ένα ανοιχτού κώδικα πρότζεκτ που παρέχει ένα πλήρες περιβάλλον προσομοίωσης για την ανάπτυξη και τον έλεγχο διάφορων σεναρίων δικτύου.

Ο NS-3 είναι ο τρίτος στην σειρά προσομοιωτής δικτύων διακριτών γεγονότων (discrete event network simulator) και σκοπός του είναι να μετατρέπει την λειτουργία ενός συστήματος σε μια ακολουθία διακριτών γεγονότων στο χρόνο. Οι δημιουργοί του NS-3 ήθελαν να αναπτύξουν ένα περιβάλλον προσομοίωσης ελεύθερου λογισμικού για όλους που θα βοηθούσε να καλυφθούν οι σύγχρονες ανάγκες προσομοίωσης δικτύων, ενώ παράλληλα θα ήταν εφικτή η τροποποίηση και επέκταση του αρχικού κώδικα έτσι ώστε να μπορεί ο προσομοιωτής να προσαρμόζεται ανάλογα με το τι χρειάζονται οι χρήστες του. Επίσης, ο NS-3 παρέχει πλούσια λειτουργικότητα και ευελιξία για την προσομοίωση δικτύων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και πρωτοκόλλων επικοινωνιών, όπως ασύρματα δίκτυα, δίκτυα αισθητήρων, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και διαδίκτυο των πραγμάτων.

Οι βασικές λειτουργίες και δυνατότητες του NS-3 περιλαμβάνουν:

- Μοντελοποίηση και προσομοίωση: Ο NS-3 παρέχει ένα ποικίλο σύνολο μοντέλων για την αναπαράσταση δικτύων και πρωτοκόλλων. Οι χρήστες μπορούν να ορίσουν την τοπολογία του δικτύου, να προσθέσουν συσκευές και να προσομοιώσουν την επικοινωνία μεταξύ τους.
- Αξιολόγηση επίδοσης: Ο NS-3 επιτρέπει τη μέτρηση και την αξιολόγηση της επίδοσης του δικτύου σε διάφορες παραμέτρους, όπως η εύρος ζώνης, η καθυστέρηση, η απώλεια πακέτων κ.λπ. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να αξιολογήσουν την απόδοση διάφορων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων.
- Ανάπτυξη πρωτοκόλλων: Ο NS-3 παρέχει ένα περιβάλλον για την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων επικοινωνίας. Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν τα δικά τους πρωτόκολλα και να τα ενσωματώσουν στο πλαίσιο του NS-3.
- Επεκτασιμότητα: Ο NS-3 είναι επεκτάσιμος και επιτρέπει την προσθήκη νέων λειτουργικοτήτων και μοντέλων μέσω πρόσθετων πακέτων. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να προσαρμόσουν τον προσομοιωτή στις ανάγκες τους και να επεκτείνουν τις δυνατότητές του.

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων της χρήσης του NS-3 συγκαταλέγονται:

- Ευελιξία και πλούσια λειτουργικότητα για την προσομοίωση δικτύων.
- Ακρίβεια και αξιοπιστία στην αξιολόγηση της απόδοσης δικτύων και πρωτοκόλλων.
- Επεκτασιμότητα και δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες των χρηστών.

Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα στη χρήση του NS-3, όπως:

- Η προσομοίωση σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο.
- Η μάθηση και η εξοικείωση με το περιβάλλον του NS-3 μπορεί να απαιτεί κάποιον χρόνο και εκπαίδευση.
- Η ανάπτυξη νέων μοντέλων και πρωτοκόλλων μπορεί να είναι περίπλοκη και απαιτητική.

Παρόλα αυτά, το NS-3 αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την προσομοίωση και αξιολόγηση δικτύων, και έχει ευρεία αποδοχή και χρήση στην ακαδημαϊκή και βιομηχανική κοινότητα.

Ο NS-3 καθώς και τα μοντέλα που υποστηρίζει είναι γραμμένα σε C++. Είναι δομημένος σαν μια βιβλιοθήκη και μπορεί να συνδεθεί στατικά ή δυναμικά με ένα κύριο πρόγραμμα C++ που καθορίζει την τοπολογία προσομοίωσης και έτσι ξεκινά η λειτουργία του προσομοιωτή. Πέρα από αυτό το μεγαλύτερο μέρος των APIs (Application Programming Interfaces) που υποστηρίζει ο προσομοιωτής είναι γραμμένα σε γλώσσα Python.

4.2. Οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων

Οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων που επιλέχθηκαν για την υλοποίηση της προσομοίωσης στην παρούσα εργασία είναι οι 3 ακόλουθοι:

- NSVN – Network Slicing for Vehicular Networks

Στο αλγόριθμό NSVN (βλ. Παράρτημα Α) λαμβάνεται υπόψη το throughput που αποκτά κάθε χρήστης για τις υπηρεσίες του. Εάν το διαθέσιμο throughput είναι πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο (threshold), τότε οι απαραίτητοι τηλεπικοινωνιακοί πόροι ανατίθενται από το τρέχον Σημείο Πρόσβασης (Point of Access - PoA) καθώς επαρκούν για την υποστήριξη των υπηρεσιών του χρήστη. Αντίθετα, εάν το διαθέσιμο throughput είναι χαμηλότερο από το προκαθορισμένο όριο (threshold), πρόσθετοι πόροι (resource blocks) από ένα εικονικό κέντρο συγκέντρωσης πόρων (Virtual Resource Pool - VRP) που διατηρείται σε έναν ελεγκτή Software Defined Networking (SDN) δεσμεύονται από το PoA προκειμένου να υποστηριχθούν επαρκώς οι απαιτούμενες υπηρεσίες.

- RR – Round Robin

Πρόκειται για το πιο απλό αλγόριθμο κατανομής πόρων. Συγκεκριμένα, με τον αλγόριθμο RR οι διαθέσιμοι πόροι κατανέμονται ισόποσα στα slices, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη κάποια παράμετρος που θα επηρέαζε την ποιότητα υπηρεσίας των slices όπως για παράδειγμα οι ανάγκες για περισσότερο throughput σε κάποιο slice σε σύγκριση με κάποιο άλλο slice.

- WRR – Weighted Round Robin

Ο αλγόριθμος Weighted Round Robin (WRR) αποτελεί μία βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου RR. Συγκεκριμένα, σε κάθε TTI ένα βάρος (weighting value) υπολογίζεται για κάθε ένα από τα διαθέσιμα slices και το slice με τη μεγαλύτερη τιμή αποκτά προτεραιότητα ως προς τη δέσμευση των διαθέσιμων πόρων (resource blocks) έναντι των υπολοίπων slices.

4.3. Οι υπηρεσίες των χρηστών και οι παράμετροι αυτών

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής το δίκτυο που μελετήθηκε αποτελείται από 7 κεραίες LTE – A PRO. Η κάθε κεραία προκειμένου να εκτελεστεί η προσομοίωση μας λαμβάνει συγκεκριμένους οχηματικούς χρήστες κάθε φορά, δηλαδή στην 1^η εκτέλεση θέτουμε 10 οχηματικούς χρήστες, στη 2^η εκτέλεση 20 και συνεχίζουμε με αυτό τον τρόπο έως ότου καταλήξουμε στους 50 οχηματικούς χρήστες. Η κάθε μια από αυτές τις εκτελέσεις θα υλοποιηθεί 3 φορές, μια φορά για κάθε αλγόριθμο κατανομής πόρων από αυτούς που αναλύθηκαν παραπάνω.

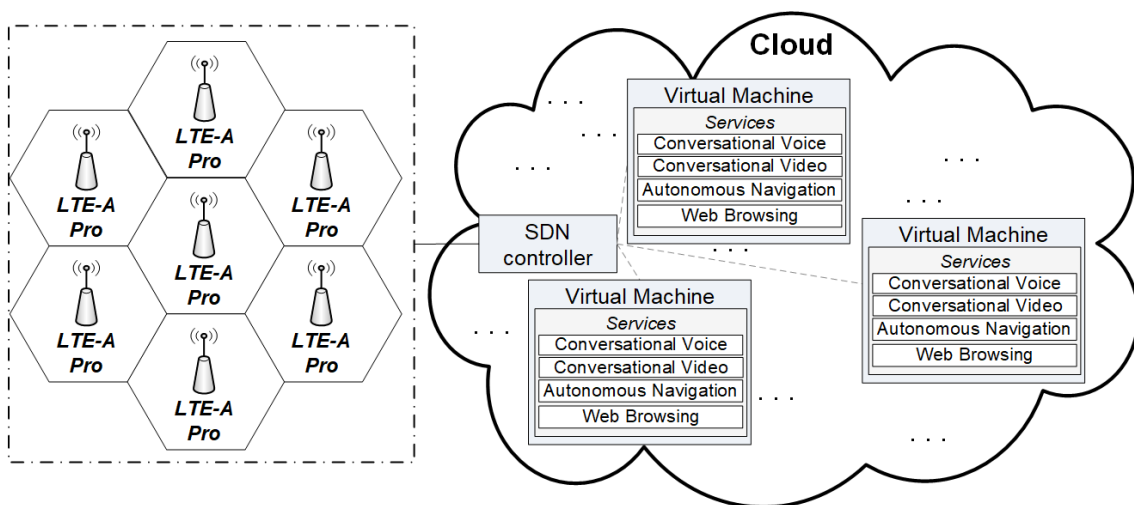
Οι χρήστες που ταξινομήθηκαν στην κάθε κεραία διαθέτουν κάποιες συγκεκριμένες υπηρεσίες και επακόλουθα κάθε υπηρεσία πλαισιώνεται από παραμέτρους.

Οι υπηρεσίες αυτές είναι οι εξής:

- Conversational voice
- Conversational video
- Autonomous navigation
- Web Browsing

Οι παράμετροι της κάθε υπηρεσίας είναι οι ακόλουθοι:

- Throughput (δεδομένα/sec)
- Delay (ms)
- Packet Loss (%)



Σχήμα 4.1. Η τοπολογία του δικτύου προσομοίωσης

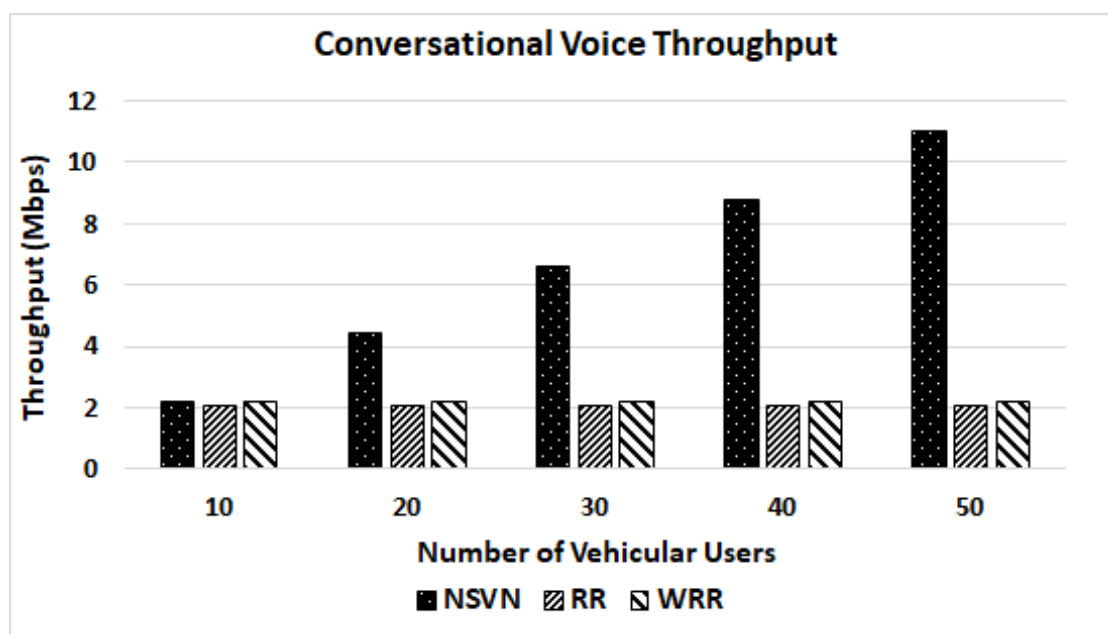
Συνοψίζοντας η προσομοίωση δικτύου θα εκτελεστεί σε συγκεκριμένη τοπολογία δικτύου (Σχήμα 4.1.) 5 φορές, δηλαδή 1 φορά για κάθε ομάδα οχηματικών χρηστών και αντίστοιχα η κάθε μία εκτέλεση θα «τρέξει» 3 φορές, δηλαδή 1 φορά για κάθε αλγόριθμο. Παρακάτω αναλύονται τα αποτελέσματα και απεικονίζονται τα διαγράμματα του κάθε αλγορίθμου για κάθε μια υπηρεσία χρηστών και για τις παραμέτρους αυτής.

4.4. Η ανάλυση των αλγορίθμων

Στις παρακάτω υποενότητες αναλύονται οι 4 υπηρεσίες και οι εκτελέσεις που έτρεξαν με τις παραμέτρους που τέθηκαν για την υλοποίηση. Κάθε διάγραμμα αφορά την κάθε παράμετρο υπηρεσίας και τους 3 αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν.

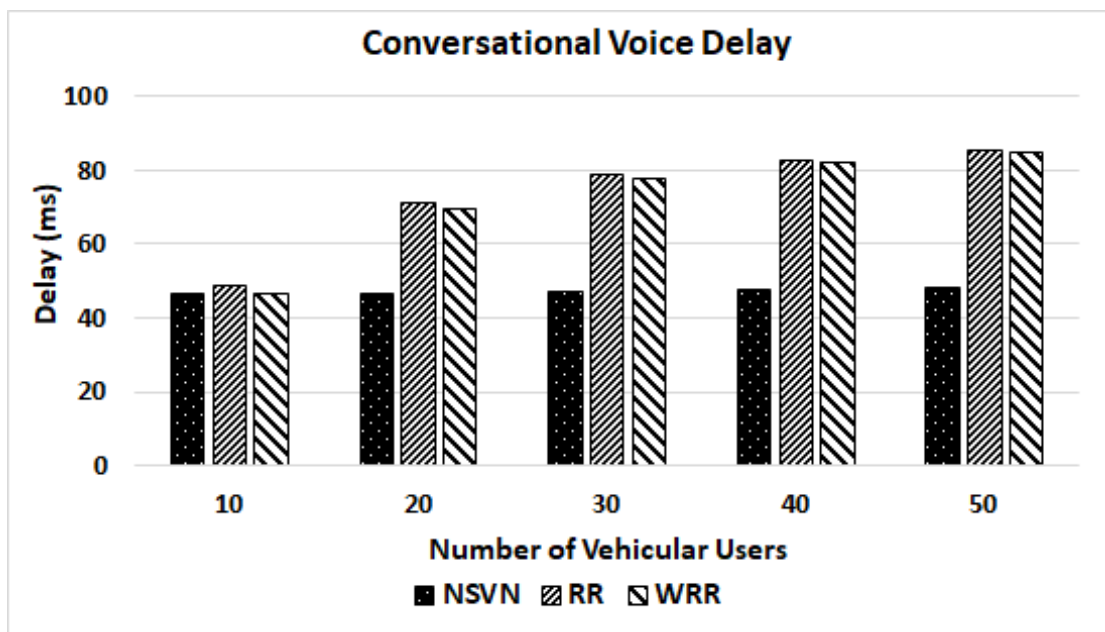
4.1. Conversational Voice

Αναλυτικά στο πρώτο διάγραμμα είναι το Throughput του Conversational Voice όπου διακρίνουμε τον αλγόριθμο NSVN να υπερέχει των άλλων δυο με υψηλότερες τιμές όσο αυξάνονται οι χρήστες, γεγονός που τον καθιστά ικανότερο σε ότι αφορά τις διακινήσεις έναντι των άλλων 2 αλγορίθμων. Οι άλλοι 2 αλγόριθμοι παραμένουν σταθεροί σε όλες τις εκτελέσεις από τους 10 οχηματικούς χρήστες έως και τους 50 με Throughput έως 2Mbps ενώ ο NSVN στην πρώτη εκτέλεση έχει 2Mbps και σταδιακά στην τελευταία εκτέλεση φτάνει τα 11Mbps.



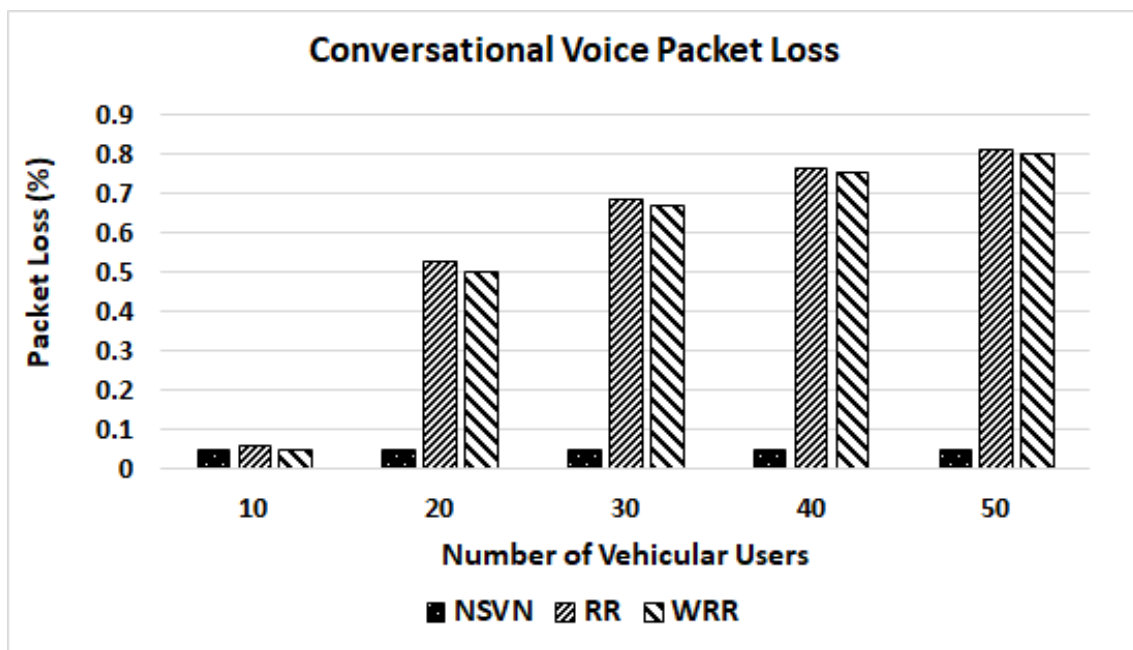
Σχήμα 4.1.1. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Conversational Voice ως προς τη Ρυθμαπόδοση (Throughput).

Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζεται το Delay του Conversational Voice, όπου και πάλι ο αλγόριθμος NSVN υπερέχει των άλλων 2 παρουσιάζοντας χαμηλή καθυστέρηση ανά ms σε σύγκριση με τους άλλους δύο. Η καθυστέρηση του NSVN δεν υπερβαίνει καμία στιγμή τα 50ms σε αντίθεση με τον RR που στους 10 οχηματικούς χρήστες είναι πολύ κοντά στις τιμές του NSVN όμως αυξάνοντας τους χρήστες εκτοξεύεται στα 80-85ms. Την ίδια διαδρομή με τον RR ακολουθεί και ο WRR ο οποίος στους 10 οχηματικούς χρήστες έχει καθυστέρηση κάτω από 50ms και όταν αυξηθούν οι χρήστες σταδιακά φτάνει και αυτός τα 80ms.



Σχήμα 4.1.2. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Conversational Voice ως προς την Καθυστέρηση Μετάδοσης (Delay).

Τέλος στο τρίτο διάγραμμα αναλύεται το Packet Loss του Conversational Voice, όπου για ακόμα μια φορά ο αλγόριθμος NSVN υπερτερεί των άλλων 2, παρουσιάζοντας πολύ χαμηλή απώλεια δεδομένων. Όπως φαίνεται παρακάτω η τιμή του NSVN παραμένει κάτω από το 10% και είναι σταθερή σε όλες τις εκτελέσεις έως και τους 50 οχηματικούς χρήστες. Ενώ την ίδια στιγμή οι αλγόριθμοι RR και WRR στην εκτέλεση των 10 οχηματικών χρηστών είναι κάτω από το 10% απώλειας ενώ στους 20 οχηματικούς χρήστες ανεβαίνουν στο 50% και καταλήγουν στην τελευταία εκτέλεση των 50 οχηματικών χρηστών η απώλεια δεδομένων τους να αγγίζει το 80% σε αντίθεση με τον NSVN που συνεχίζει να παραμένει κάτω από το 10%.

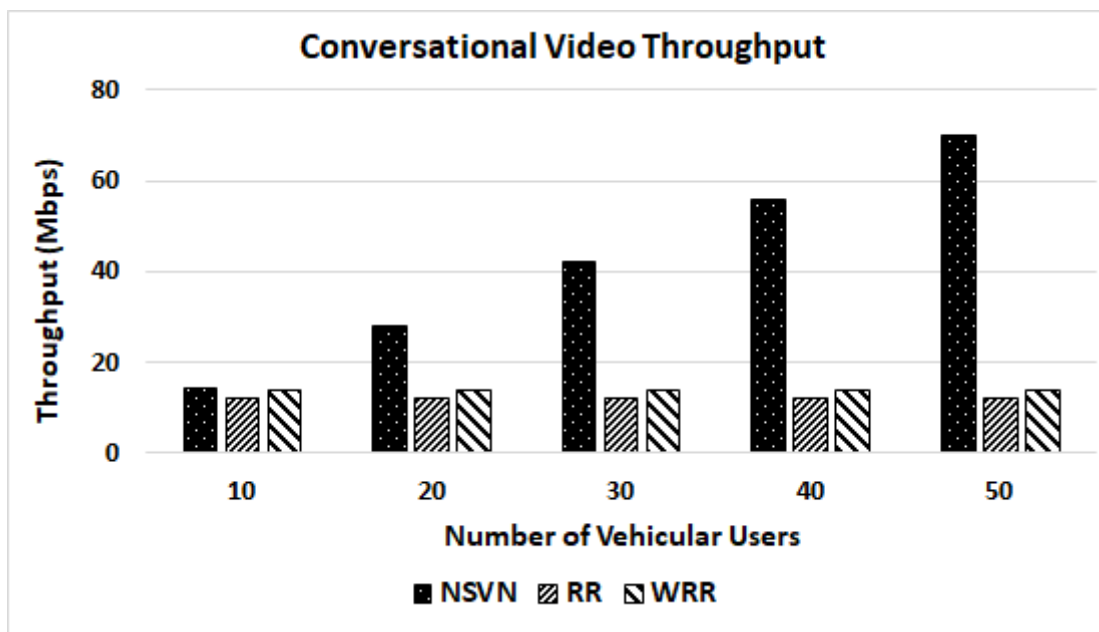


Σχήμα 4.1.3. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Conversational Voice ως προς τις Απώλειες Πακέτων (Packet Losses).

Συμπερασματικά και στις 3 παραμέτρους της υπηρεσίας Conversational Voice, η πρώτη εκτέλεση που αφορά στους πρώτους 10 οχηματικούς χρήστες είναι ίδια και για τους 3 αλγόριθμους ενώ στην συνέχεια των εκτελέσεων οι τιμές των αλγόριθμων RR και WRR εκτοξεύονται συγκριτικά με τις τιμές του NSVN οι οποίες παραμένουν σταθερές για το Delay και για το Packet Loss ενώ αντίθετα στο Throughput αυξάνεται σημαντικά η τιμή του NSVN ενώ οι τιμές των άλλων 2 παραμένουν σταθερές.

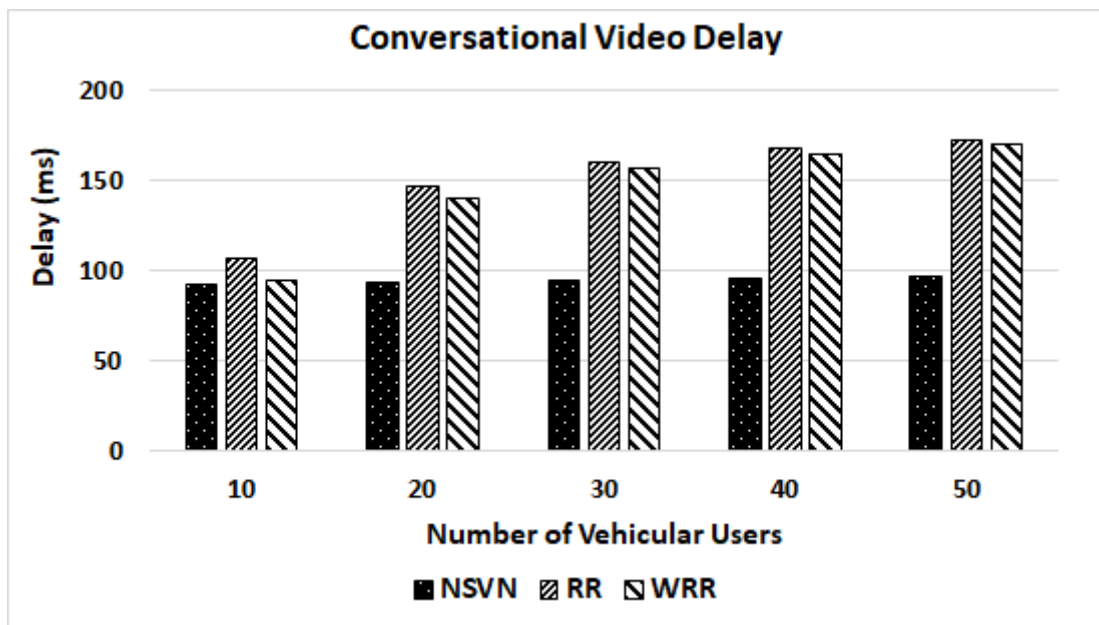
4.2. Conversational Video

Στη συνέχεια αναλύεται η υπηρεσία Conversational Video και το πρώτο διάγραμμα αφορά το Throughput της υπηρεσίας αυτής. Στις εκτελέσεις που πραγματοποιήθηκαν αυξάνοντας τους οχηματικούς χρήστες ανά 10 ξεκινώντας από τους 10 και καταλήγοντας στους 50 διακρίνουμε τον αλγόριθμο NSVN να αυξάνεται όσο αυξάνονται οι χρήστες, αναλυτικά ξεκινάει στην πρώτη εκτέλεση με λιγότερα από 20Mbps καταλήγοντας στην τελευταία με 70Mbps επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη διακίνηση δεδομένων. Αντίθετα οι αλγόριθμοι RR και WRR παραμένουν σταθερά κάτω από τα 20Mbps σε όλες τις εκτελέσεις των οχηματικών χρηστών.



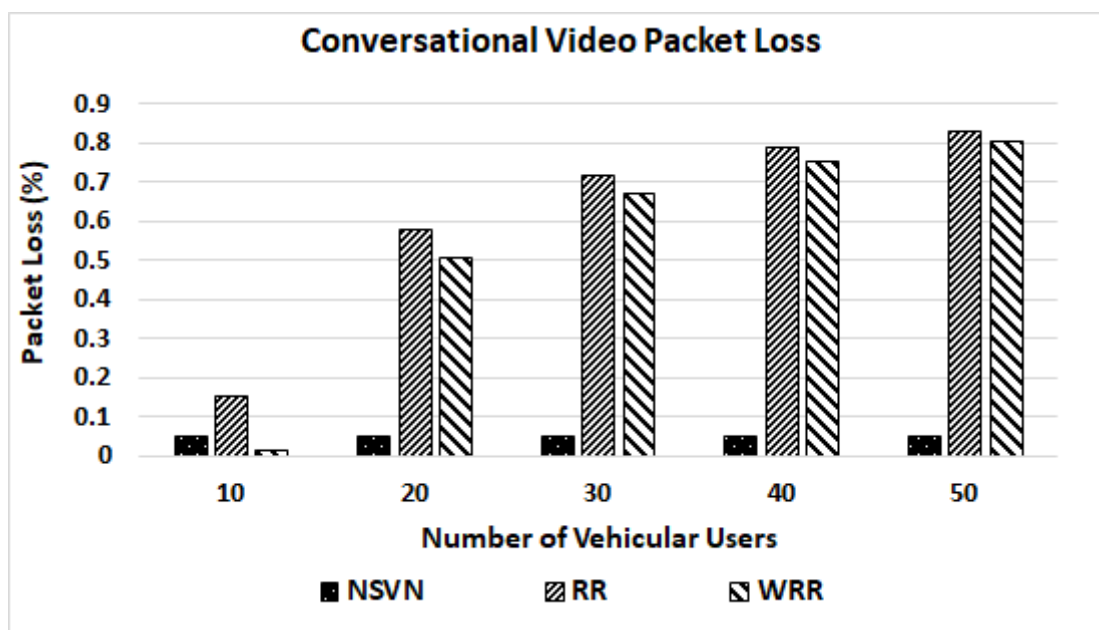
Σχήμα 4.2.1. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Conversational Video ως προς τη Ρυθμαπόδοση (Throughput).

Η επόμενη παράμετρος που αναλύεται είναι η καθυστέρηση (Delay) για την υπηρεσία Conversational Video όπου οι αλγόριθμοι RR και WRR έχουν μεγάλη αύξηση όσο προστίθενται σχηματικοί χρήστες στις εκτελέσεις, δηλαδή από 100ms στην πρώτη εκτέλεση εκτοξεύονται στα 170ms περίπου στην τελευταία εκτέλεση. Και σε αυτή την παράμετρο ο αλγόριθμος NSVN αποδεικνύεται καλύτερος διότι παραμένει σταθερά κάτω από τα 100ms σε όλες τις εκτελέσεις.



Σχήμα 4.2.2. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Conversational Video ως προς την Καθυστέρηση Μετάδοσης (Delay).

Τελευταία παράμετρος για την υπηρεσία Conversational Video είναι το Packet Loss, δηλαδή η απώλεια πακέτων. Διακρίνουμε τον αλγόριθμο NSVR να παραμένει περίπου στο 5% σε όλες τις εκτελέσεις και όσο και αν αυξηθούν οι χρήστες, ενώ οι άλλοι 2 αλγόριθμοι παρουσιάζουν υψηλή αύξηση που φτάνει πάνω από το 80% απώλειας.

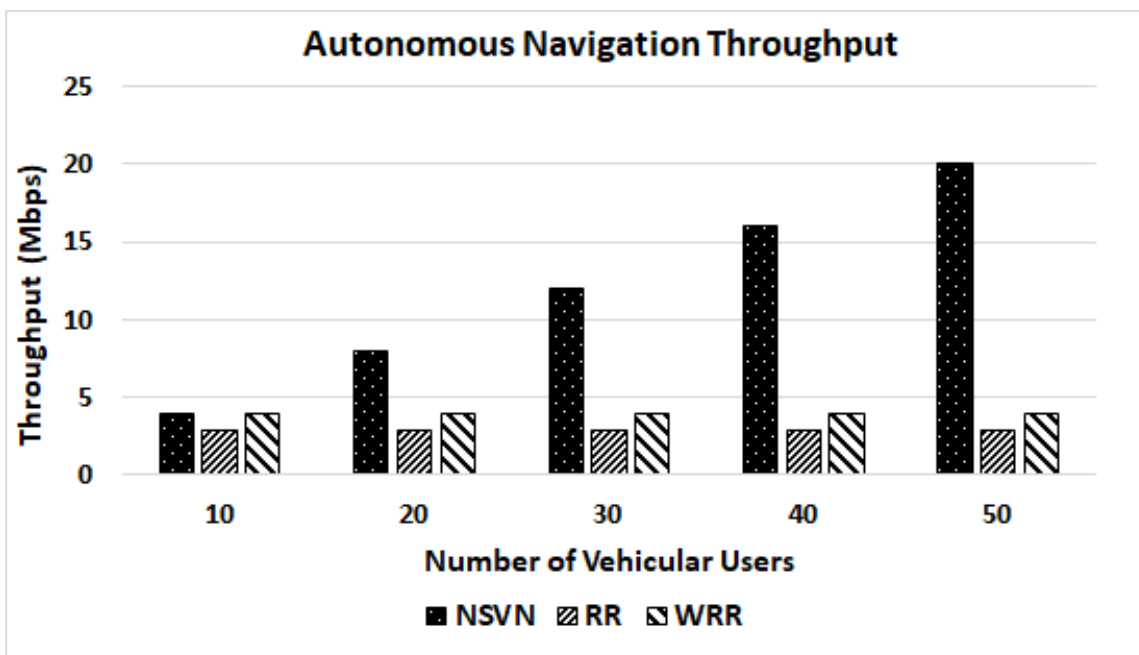


Σχήμα 4.2.3. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Conversational Video ως προς τις Απώλειες Πακέτων (Packet Losses).

Έτσι, αναλύοντας την προσομοίωση της υπηρεσίας Conversational Video με όλες τις παραμέτρους συμπεραίνουμε πως ο αλγόριθμος NSVN είναι αποτελεσματικότερος έναντι των άλλων δύο και στις 3 παραμέτρους που τίθενται. Άρα ο NSVN έχει καλύτερη διακίνηση, χαμηλότερη καθυστέρηση και μικρότερη απώλεια πακέτου συγκριτικά με τους άλλους δύο.

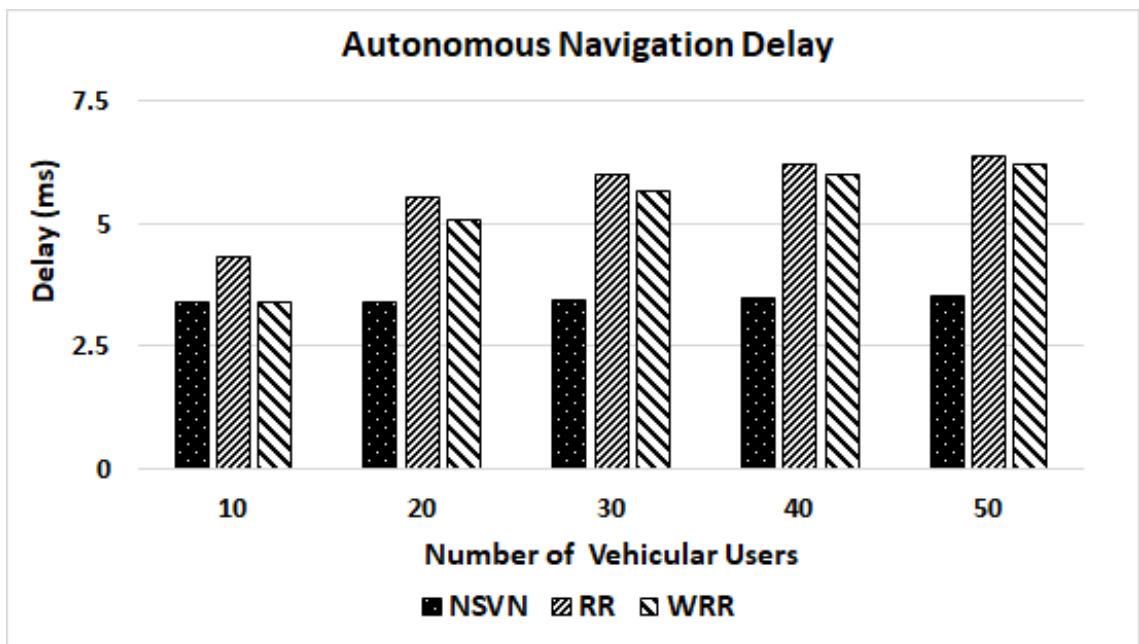
4.3. Autonomous Navigation

Η 3^η υπηρεσία που παρέχεται στους οχηματικούς χρήστες είναι αυτή του Autonomous Navigation. Σε αυτή την υπηρεσία το πρώτο διάγραμμα είναι με την παράμετρο του Throughput, ο αλγόριθμος NSVN αυξάνεται όσο αυξάνονται οι οχηματικοί χρήστες και φτάνει τα 20Mbps, προσφέροντας έτσι πολύ καλή διακίνηση στους οχηματικούς χρήστες για την υπηρεσία αυτή. Αντίθετα οι άλλοι δυο αλγόριθμοι παραμένουν χαμηλά και σταθερά σε λιγότερο από 5Mbps σε όλες τις εκτελέσεις που πραγματοποιήθηκαν.



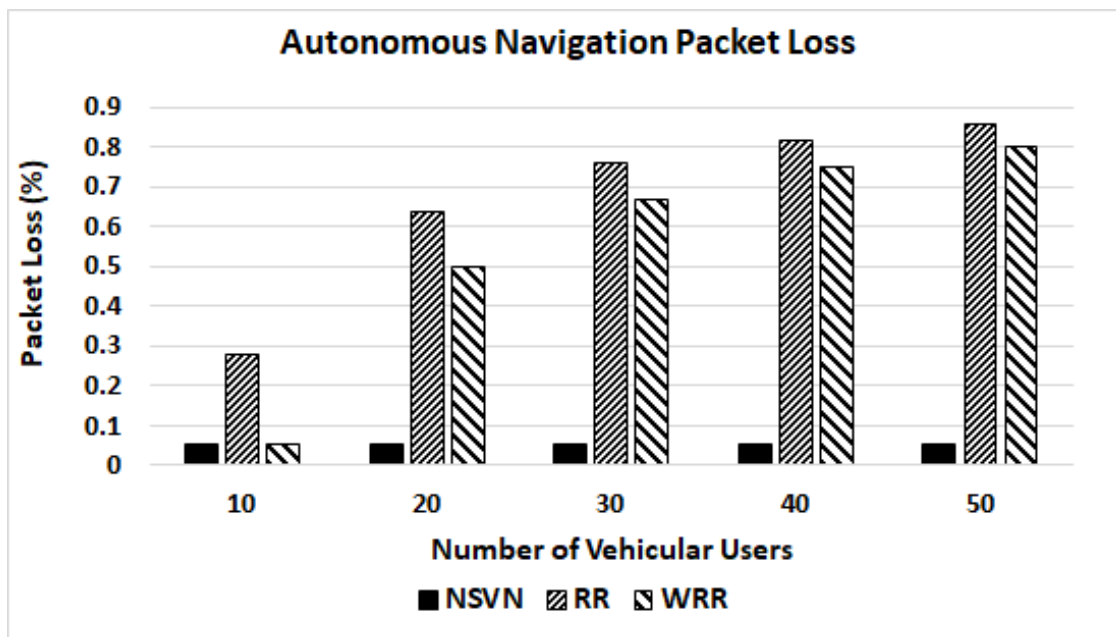
Σχήμα 4.3.1. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Autonomous Navigation ως προς τη Ρυθμαπόδοση (Throughput).

Η καθυστέρηση της υπηρεσίας Autonomous Navigation έχει την ίδια πορεία με την καθυστέρηση και των παραπάνω υπηρεσιών, δηλαδή ο αλγόριθμος NSVN έχει καθυστέρηση της τάξεως των 3ms σε όλες τις εκτελέσεις οχηματικών χρηστών ενώ οι άλλοι δυο αλγόριθμοι ξεκινάνε στην πρώτη εκτέλεση με λιγότερα από 5ms και καταλήγουν με 7ms περίπου στην τελευταία εκτέλεση.



Σχήμα 4.3.2. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Autonomous Navigation ως προς την Καθυστέρηση Μετάδοσης (Delay).

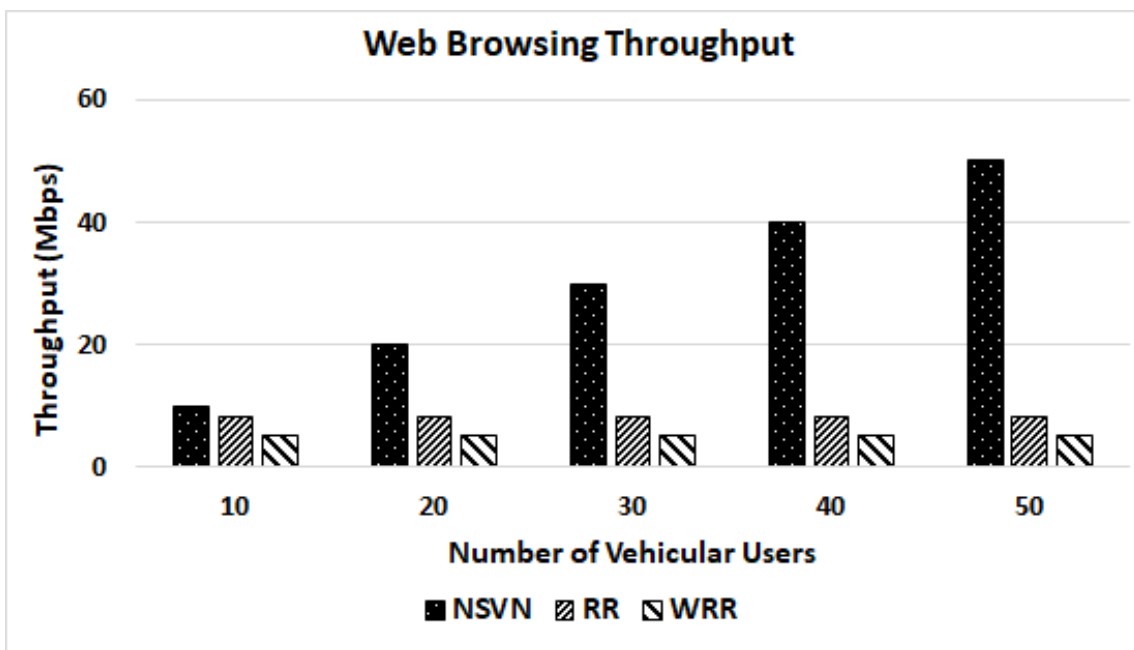
Τελευταία παράμετρος αυτής της υπηρεσίας είναι το Packet Loss, η απώλεια δηλαδή των πακέτων του κάθε αλγορίθμου. Όπως διακρίνεται παρακάτω στο διάγραμμα, και σε αυτή την υπηρεσία ο αλγόριθμος NSVN έχει πολύ χαμηλή απώλεια πακέτου της τάξεως του 5-7% για το σύνολο των εκτελέσεων των οχηματικών χρηστών, ενώ οι αλγόριθμοι RR και WRR έχουν υψηλή απώλεια πακέτων η οποία καταλήγει στην 5^η εκτέλεση και στους 50 οχηματικούς χρήστες να αγγίζει το 85% για τον RR και το 80% αντίστοιχα για τον WRR.



Σχήμα 4.3.3. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Autonomous Navigation ως προς τις Απώλειες Πακέτων (Packet Losses).

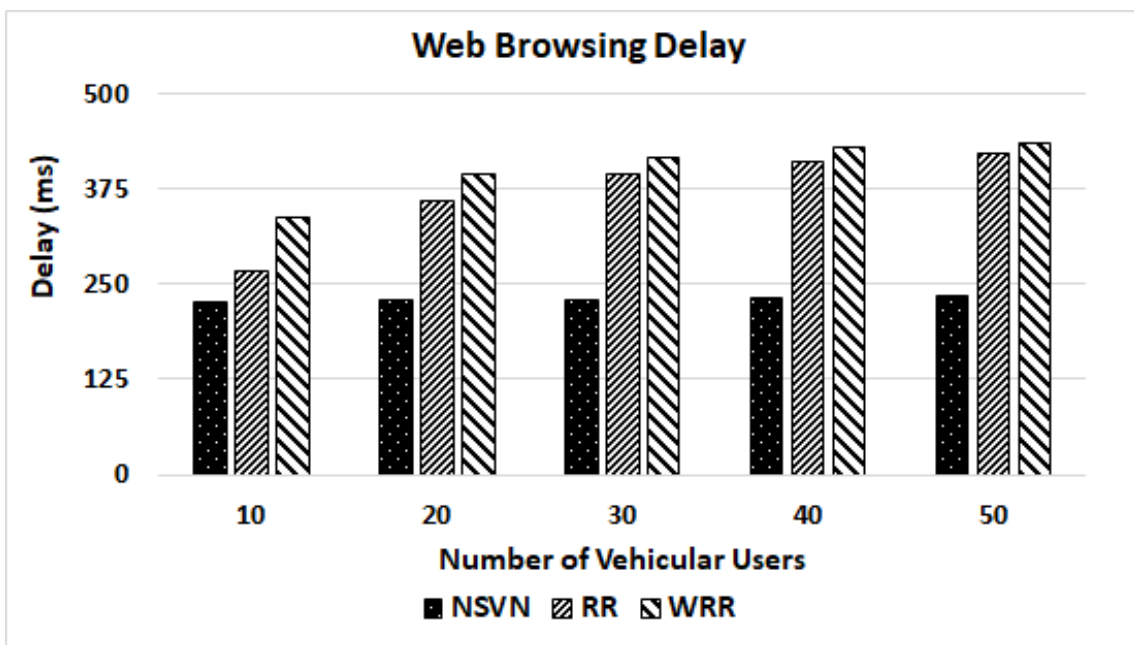
4.4. Web Browsing

Η τελευταία υπηρεσία που μελετήθηκε είναι το Web Browsing και το 1^ο διάγραμμα αφορά την παράμετρο του Throughput για αυτή την υπηρεσία. Στην εκτέλεση των αλγορίθμων κατανομής πόρων διακρίνουμε τον αλγόριθμο NSVN να έχει υψηλό Throughput όσο αυξάνονται οι οχηματικοί χρήστες στις εκτελέσεις που πραγματοποιούνται. Συγκεκριμένα ξεκινάει στην 1^η εκτέλεση με 10 οχηματικούς χρήστες στα 10Mbps περίπου (πολύ κοντά με τους άλλους δυο αλγόριθμους) και καταλήγει στην 5^η εκτέλεση και τους 50 οχηματικούς χρήστες να έχει περίπου 30Mbps διακίνησης. Αντίθετα οι άλλοι δυο αλγόριθμοι ενώ στην πρώτη εκτέλεση έχουν περίπου 10Mbps διακίνηση (πολύ κοντά με τον NSVN) παραμένουν σε αυτό το ποσό και στις υπόλοιπες εκτελέσεις, χωρίς καμία μεταβολή.



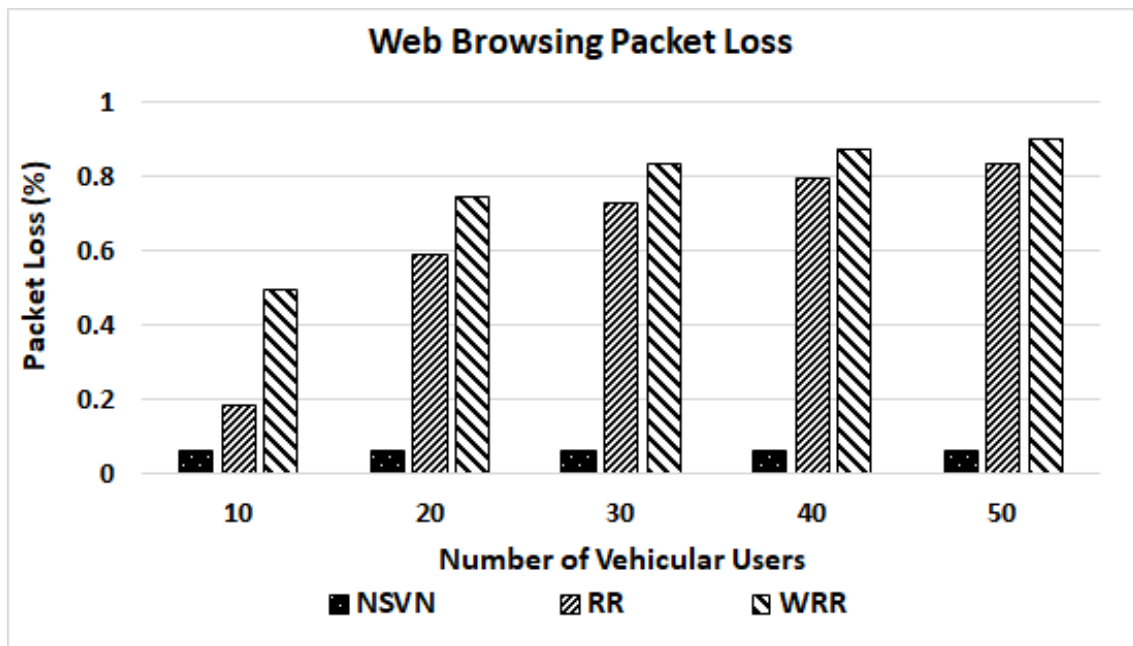
Σχήμα 4.4.1. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Web Browsing ως προς τη Ρυθμαπόδοση (Throughput).

Όσον αφορά την καθυστέρηση της υπηρεσίας αυτής, συμπεραίνουμε από το παρακάτω διάγραμμα ότι ο αλγόριθμος NSVN παραμένει σταθερός με λιγότερο από 250ms σε όλο το εύρος των εκτελέσεων, ενώ οι αλγόριθμοι RR και WRR αυξάνονται σταδιακά και ξεπερνάνε τα 375ms.



Σχήμα 4.4.2. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Web Browsing ως προς την Καθυστέρηση Μετάδοσης (Delay).

Η τελευταία παράμετρος αυτής της υπηρεσίας είναι το Packet Loss, όπου και σε αυτή την υπηρεσία όπως και στις προηγούμενες ο αλγόριθμος NSVN έχει πολύ χαμηλή απώλεια πακέτων που παραμένει σταθερή περίπου στο 5-8% για όλες τις εκτελέσεις των οχηματικών χρηστών. Ενώ την ίδια στιγμή οι άλλοι δύο αλγόριθμοι είναι αρκετά υψηλά από την πρώτη κιόλας εκτέλεση, όπου βρίσκονται στο 20% ο RR και στο 50% ο WRR έως και την 5^η εκτέλεση που σκαρφαλώνουν και οι δυο σε ένα ποσοστό πάνω από 80% απώλειας πακέτου.



Σχήμα 4.4.3. Αποτελέσματα για την υπηρεσία Web Browsing ως προς τις Απώλειες Πακέτων (Packet Losses).

Συμπερασματικά, ο αλγόριθμος NSVN είναι βέλτιστος αλγόριθμος της προσομοίωσης όλων των υπηρεσιών και όλων των παραμέτρων που τέθηκαν στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση των δικτύων 5G. Συγκριτικά με τους άλλους δύο αλγορίθμους, ο NSVN έχει πολύ υψηλή διακίνηση, μικρή καθυστέρηση και εξαιρετικά μικρό ποσοστό απώλειας πακέτων σε όλες τις υπηρεσίες. Τέλος, ένα ακόμα αξιοσημείωτο συμπέρασμα είναι ότι στις εκτελέσεις που πραγματοποιήθηκαν για τους οχηματικούς χρήστες, παρόλο που αυξάνονταν οι χρήστες κάθε φορά ανά 10, ο NSVN είχε πολύ σταθερές τιμές στο Delay και στο Packet Loss και σταδιακή αύξηση του Throughput, πράγμα που τον καθιστά πολύ αποτελεσματικό.

Κεφάλαιο 5 – Τα 5G δίκτυα στο αστικό περιβάλλον

5.1 Η κάλυψη των κεραιών 5G μέσα σε μια πόλη

Η συνεχής ανάπτυξη των 5G δικτύων δημιουργεί την ανάγκη για πυκνότερη κάλυψη των αστικών περιοχών από κεραιές, ώστε το σήμα να γίνεται ισχυρότερο και καλύτερο. Οι κεραιές αυτές καλύπτονται κατάλληλα (βλ. παρακάτω εικόνες) ώστε να είναι αποδεκτές από το αστικό περιβάλλον μιας πόλης.



Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε ολόκληρο το φάσμα των δραστηριοτήτων που συμβάλλουν στην εξέλιξη της πέμπτης γενιάς των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Ξεκινώντας από τις τεχνολογίες και τις αρχιτεκτονικές που θα οδηγήσουν στην πρόοδο και μετέπειτα συνεχίζοντας στους τομείς που θα επηρεαστούν από τις περιπτώσεις χρήσης του 5G.

Αναφέρθηκαν οι διαδικασίες προτυποποίησης που διεξάγονται από διάφορους παγκόσμιους φορείς, καθώς και οι πρώιμες δοκιμές και οι έρευνες που έχουν γίνει για τα 5G δίκτυα. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα έργα που έχουν εγκριθεί και χρηματοδοτούνται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την προώθηση και εξέλιξη του 5G στην Ευρώπη αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο.

Η πέμπτη γενιά των τηλεπικοινωνιών (5G) δεν περιορίζεται μόνο στη βελτίωση των ευρυζωνικών κινητών δικτύων. Προσφέρει μοναδικές δυνατότητες καινοτόμου δικτύου και υπηρεσιών. Καταρχάς, βελτιώνει την εμπειρία των χρηστών στη χρήση του διαδικτύου και παράλληλα δημιουργεί νέες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης. Επιπλέον, το 5G αποτελεί βασικό παράγοντα για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Internet of Things (IoT), παρέχοντας μια πλατφόρμα για τη σύνδεση ενός τεράστιου αριθμού αισθητήρων και συσκευών με αυστηρούς περιορισμούς ενέργειας και μετάδοσης. Πολλοί κλάδοι, όπως η βιομηχανία και η ενέργεια, καθώς και ο τομέας της υγείας, θα επωφεληθούν από τη χρήση των νέων ασύρματων και διαδικτυακών τεχνολογιών. Επίσης, οι βιομηχανίες αναγνωρίζουν ότι η υιοθέτηση έξυπνων συνδεδεμένων συστημάτων με τεχνολογία 5G δεν είναι πλέον προαιρετική, αλλά αναγκαία για να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις των ανταγωνιστικών αγορών.

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυνατότητες που προσφέρει το 5G δίκτυο σε πολλούς επαγγελματικούς κλάδους σε παγκόσμιο επίπεδο η παρούσα εργασία περιέγραψε τις τεχνολογίες των δικτύων 5^{ης} γενιάς αναλύοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Επιπρόσθετα, αναφέρθηκαν οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές που προσφέρει το 5G δίκτυο στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων.

Τέλος, με χρήση αλγορίθμων κατανομής πόρων έγινε προσομοίωση για κάποιες από τις υπηρεσίες που προσφέρει το 5G δίκτυο και πως αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με τον αλγόριθμο και τον αριθμό των χρηστών που τις χρησιμοποιούν.

Κεφάλαιο 7 - Μελλοντική ερεύνα

7.1 Εισαγωγή στα 6G δίκτυα

Η κινητή επικοινωνία έκτης γενιάς (6G) έχει συζητηθεί εκτενώς παρακάτω ακολουθώντας τη μεγάλη κλίμακα εμπορική ανάπτυξη του 5G/ πέρα από δίκτυα 5G (B5G). Το 6G αναμένεται να επιφέρει περαιτέρω σημαντικές αλλαγές στην ανθρώπινη παραγωγή και στον τρόπο ζωής, καθώς και στο παγκόσμιο δίκτυο. Ήδη νωρίτερα τον Σεπτέμβριο του 2018, επισημάνθηκε ότι στο 6G η ζώνη συχνοτήτων μπορεί να κινηθεί προς την εποχή THz, όταν η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) μίλησε για πρώτη φορά για την τεχνολογία 6G. Τον Μάρτιο του 2019, η FCC ψήφισε ομόφωνα για το άνοιγμα του εύρους συχνοτήτων THz από 95 GHz έως 3 THz για πειράματα 6G, τα οποία αναμένεται να εφαρμοστούν στο δίκτυο 6G. Τον Ιανουάριο του 2020, προτάθηκε ότι είναι απαραίτητο να προωθηθεί και να ερευνηθούν οι προοδευτικές και βασικές τεχνολογίες του 6G. Πολλοί ειδικοί και μελετητές της επικοινωνίας επεσήμαναν ότι η τυποποίηση του 6G μπορεί να πραγματοποιηθεί γύρω στο 2025 και ως προεμπορικό δίκτυο θα είναι έτοιμο να τεθεί σε χρήση γύρω στο 2030.

Η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης 6G φτάνει τα 100 Gb/s–1 Tb/s, ενώ στο 5G είναι μόλις τα 10 Gb/s. Η ακρίβεια τοποθέτησης σε εσωτερικούς χώρους φτάνει τα 10 cm και εξωτερικά είναι 1 m, κάτι το οποίο είναι λιγότερο από το 1/10 του 5G. Η καθυστέρηση επικοινωνίας είναι τόσο χαμηλή όσο 0,1 ms, που είναι 10 φορές υψηλότερο από το 5G και αξιοπιστία αυξάνεται από το τρέχον 99,9% σε 99,999% με εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία. Επίσης η πυκνότητα του συνδεδεμένου εξοπλισμού φτάνει περισσότερο από 100/m³ με εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα, και στην κάλυψη το ποσοστό αυξάνεται από 70% στο 5G σε 99% στο 6G. Τέλος, η επικοινωνία ζώνης συχνοτήτων THz μπορεί να αυξάνει σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου. Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει τα κύρια χαρακτηριστικά του 5G και του 6G.

Βασικά χαρακτηριστικά	5G	6G
Συχνότητα λειτουργίας	3-300GHz	>1THz
Ρυθμός δεδομένων uplink	10Gb/s	1Tb/s
Ρυθμός δεδομένων downlink	20Gb/s	1Tb/s
Χρόνο-καθυστέρηση επικοινωνίας	1ms	<0.1ms
Μέγιστη διακίνηση	10Gb/s	100Gb/s – 1Tb/s
Περιοχή κάλυψης	Έδαφος	Διάστημα, έδαφος, ωκεανός
Ακρίβεια τοποθέτησης	Εξωτερικά 10m (2D)	Εσωτερικά (10cm), εξωτερικά 1m (3D)
Αποδοτικότητα φάσματος	10 b/s/Hz/m ²	1000 b/s/Hz/m ²
Αξιοπιστία	10 ⁻⁵	10 ⁻⁹
Μέγιστη κινητικότητα	500 km/h	1000 km/h
Καθυστέρηση u-plane	0.5 ms	<0.1 ms
Καθυστέρηση c-plane	10 ms	<1 ms
Καθυστέρηση επεξεργασίας	100 ns	10 ns
Ικανότητα μετάδοσης	10 Mb/s/m ²	1-10 Gb/s/m ²
Ρυθμός εμπειρίας χρήστη	50 Mb/s 2D	>10 Gb/s 3D
Αποδοτικότητα φάσματος DL	30 b/s/Hz	100 b/s/Hz
Ρυθμός δεδομένων DL	20 Gb/s	> 1 Tb/s
Ρυθμός προσωπικών δεδομένων	1 Gb/s	100 Gb/s
Χαμηλή πυκνότητα	10 Tb/s/ km ²	100 Tb/s/ km ²
Πυκνότητα σύνδεσης	1 million/km ²	10 million/km ²
Ποσοστό % κάλυψης	70%	99%
Αξιοπιστία	99.9%	99.999%
Ευαισθησία δέκτη	-120 dBm	<-130 dBm

Τα ασύρματα δίκτυα δεν περιορίζονται πλέον μόνο στο έδαφος ως προς την κάλυψη. Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις επικοινωνιών σε μεγάλο υψόμετρο και σε μεγάλο βάθος της θάλασσας αλλά και να μειωθεί το κόστος σύνδεσης πυκνών κυψελοειδών δικτύων παγκοσμίως, το 6G θα ενσωματώσει μη επίγεια δίκτυα για να παρέχει πλήρη ασύρματη κάλυψη και να επιτύχει ολοκληρωμένες επικοινωνίες μεταξύ αέρα, διαστήματος και εδάφους. Συνειδητοποιώντας την απρόσκοπτη σύνδεση του εδάφους, δορυφορικά και αερομεταφερόμενα δίκτυα θα επεκτείνουν το εύρος κάλυψης και θα αυξήσουν τη χωρητικότητα του συστήματος.

Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας δικτύου, της τεχνολογίας απεικόνισης, της ανίχνευσης και της απεικόνισης εξοπλισμού και επεξεργαστές χαμηλής κατανάλωσης κάνουν το 6G επαρκές για την επίτευξη τοποθέτησης υψηλής ακρίβειας σε μαζικές συσκευές Internet of Things (mIoT). Τα 6G δίκτυα θα συμβάλουν στην ενσωμάτωση της εικονικής πραγματικότητας (VR), της επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και της μικτής πραγματικότητας (MR) σε μία εκτεταμένη πραγματικότητα (XR), στην απρόσκοπτη ενσωμάτωση των δικτύων αισθητήρων και των ανθρώπινων αισθήσεων (π.χ., τα γυαλιά μπορεί να αντικαταστήσουν τα smartphone, οι φορητές οθόνες θα έχουν γίνει το κύριο εργαλείο για την ανθρώπινη ζωή και εργασία, και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στην εξ αποστάσεως εκπαίδευση, απομακρυσμένο γραφείο και προηγμένη τρισδιάστατη προσομοίωση). Το 6G είναι βαθιά ενσωματωμένο με την τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση και ο βαθμός ευφυΐας έχει αυξηθεί πολύ.

Οι τεχνολογίες THz του ορατού φωτός μπορεί να είναι η βάση για το 6G για να πραγματοποιήσει τη χρήση νέων πόρων προδιαγραφών καθώς και μια νέα μέθοδο διαμόρφωσης της τροχιακής γωνιακής ορμής, η οποία έχει τρισδιάστατη αρχιτεκτονική και έξυπνη διαχείριση κινητικότητας, έτσι μπορεί να επεκτείνει την κάλυψη με βάση την ενσωμάτωση του σε επίγειες και δορυφορικές κινητές επικοινωνίες. Η ZTE επεσήμανε στη Δεύτερη Σύνοδο Κορυφής 6G ότι η αντίληψη Διαδίκτυο, τεχνητή νοημοσύνη και βιομηχανία Διαδικτύου θα είναι νέες υπηρεσίες που μπορεί να γεννηθούν στην εποχή του 6G, η οποία μπορεί να ενσωματώσει τον φυσικό και ψηφιακό κόσμο με περισσότερους δύσκολους δείκτες απόδοσης δικτύου που τα 5G δίκτυα ενδέχεται να μην είναι σε θέση να ικανοποιήσουν.

7.2 Βασικά χαρακτηριστικά των 6G δικτύων

Το φυσικό επίπεδο ασφάλειας μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω για να παρέχει ένα επίπεδο άμυνας ασφαλείας στην τεχνολογία κρυπτογράφησης για διάφορες συσκευές και μηχανήματα με διαφορετικές λειτουργίες. Ως νέα κινητή επικοινωνία επόμενης γενιάς του μέλλοντος, οι συνολικές δυνατότητες του 6G θα είναι αναμφίβολα 10 έως 100 φορές υψηλότερες από το 5G.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 6G θα ενσωματώσει επίγειες ασύρματες κινητές επικοινωνίες, μεσαίες/χαμηλές δορυφορικές επικοινωνίες σε τροχιά και μικρής εμβέλειας τεχνολογίες άμεσης επικοινωνίας, ιδίως τη δομή του αυτόνομου δικτύου αέρα-ουρανού-εδάφους-υποβρύχιου, που μπορεί να παρέχει πλήρη κάλυψη και υπερ-ασύρματη συνδεσιμότητα για να παρέχει πλήρες εύρος ασύρματης κάλυψης. Η τεχνολογία 6G θα ενσωματώσει την επικοινωνία, τον υπολογισμό, την πλοήγηση, την αντίληψη, τον έλεγχο, την ανίχνευση, την προσωρινή αποθήκευση, τα ραντάρ, την απεικόνιση, την τεχνητή νοημοσύνη και άλλες νέες τεχνολογίες.

Αναμεταξύ οι βασικές τεχνολογίες 6G περιλαμβάνουν κυρίως THz επικοινωνία, IRS, ολογραφική διαμόρφωση δέσμης (HBF), τροχιακή γωνιακή ορμή (OAM), επικοινωνία ορατού φωτός (VLC), κοινή χρήση φάσματος με βάση την αλυσίδα, νάνο Διαδίκτυο και περισσότερα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του 6G δικτύου μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

- Το 6G θα πρέπει να είναι ένα πανταχού παρόν ολοκληρωμένο δίκτυο για την επίτευξη ευρύτερης και βαθύτερης κάλυψης. Μπορεί να ενσωματώσει επίγειες επικοινωνίες, δορυφορικών επικοινωνιών και μικρών αποστάσεων, επικοινωνίες συσκευής με συσκευές εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης.
- Το δίκτυο 6G θα έχει έναν εσωτερικό μηχανισμό ασφαλείας ή «ενσωματωμένο σχεδιασμένο λειτουργικής ασφάλειας». Το 6G έχει αυτογνωσία, σε πραγματικό χρόνο, δυναμική ανάλυση και προσαρμοστικό κίνδυνο και εμπιστοσύνη. Η αξιολόγηση λειτουργεί μέσω μηχανισμών εμπιστοσύνης και ασφάλειας, οι οποίοι μπορούν να βοηθήσουν στην πραγματοποίηση της ασφάλειας του κυβερνοχώρου.
- Το 6G μπορεί να ενσωματώσει υπολογιστές, πλοήγηση, λειτουργίες αίσθησης και επικοινωνίας. Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να ενσωματωθούν όχι σε μόνο συστήματα δορυφορικής επικοινωνίας, αλλά επίσης σε συστήματα δορυφορικής πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, ακόμη και σε συστήματα ανίχνευσης ραντάρ. Το 6G δίκτυο θα υιοθετήσει μια πιο ανοιχτή αρχιτεκτονική και θα έχει ένα βασικό δίκτυο που θα καθορίζεται από λογισμικό και δυναμική ανάπτυξη λειτουργιών δικτύου.
- Το 6G μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες ποσότητες δεδομένων μέσω του Διαδικτύου. Επιπλέον, το 6G μπορεί να συνδυαστεί με νέες τεχνολογίες όπως το cloud computing, το Edge υπολογιστών, η τεχνητή νοημοσύνη και το Blockchain για την επίτευξη «ευφυΐας όλων των πραγμάτων» και ομαδική συλλογική νοημοσύνη. Το 6G μπορεί επίσης να υποστηρίξει παντού έξυπνη παρουσία και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για έξυπνη ζωή και ανάπτυξη βιομηχανιών.

7.3 Η επικοινωνία Terahertz

Η τεχνολογία επικοινωνίας THz είναι μια βασική τεχνολογία του 6G και έχει ευρείες προοπτικές εφαρμογής. Επιπλέον, τα κύματα terahertz χαρακτηρίζονται από ευρεία ζώνη συχνοτήτων, υψηλή ταχύτητα, καλή κατευθυντικότητα, υψηλή ασφάλεια, χαμηλή σκέδαση και καλή διείσδυση. Η ζώνη συχνοτήτων 0,1–10 THz έχει πλουσιότερους πόρους φάσματος και υπερευρεία ζώνη συχνοτήτων για επικοινωνία εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, ιδίως, μπορεί να μειώσει το φάσμα περιορισμών σπανιότητας και χωρητικότητας των σημερινών συστημάτων επικοινωνίας χωρίς καλώδιο.

Σε σύγκριση με το κύμα χιλιοστών (mmW) το ίδιο διάφραγμα πομπού, το μήκος κύματος THz είναι μικρότερο και η περίθλασή του στον ελεύθερο χώρο είναι μικρότερη, επομένως η ζώνη συχνοτήτων THz μπορεί να επιτεύξει υψηλότερης κατευθυντικότητας ζεύξη και μείωση διαφορετικών κεραιών. Μεταξύ της ισχύος μετάδοσης και της παρεμβολής, η πιθανότητα υποκλοπής είναι χαμηλή. Το τεράστιο εύρος ζώνης (>50 GHz) που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη συνδέσεων tera bits ανά δευτερόλεπτο μπορεί να προσφέρει άφθονο πόρο φάσματος για εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα διαβίβασης. Η δέσμη των σημάτων THz είναι σχετικά στενή και η μετάδοση πληροφοριών απαιτεί ότι η δέσμη εκπομπής μπορεί να ευθυγραμμιστεί πλήρως με τη λήψη κεραίας, και το μεγάλο εύρος ζώνης έχει επίσης καλή ικανότητα κατά των παρεμβολών. Η επικοινωνία THz μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ασφάλεια απόδοση της επικοινωνίας.

Το THz έχει καλή διεισδυτικότητα σε σύγκριση με το υπέρυθρο και το ορατό φως όταν υπάρχει κακοκαιρία ή θόρυβος. Επιπλέον, το THz όχι μόνο δεν επηρεάζεται από το φως του περιβάλλοντος, αλλά λύνει το πρόβλημα του VLC που δεν επιτρέπει τη μετάδοση εκτός οπτικής επαφής, και μπορεί επίσης να επιτύχει μετάδοση ανερχόμενης ζεύξης.

Για τη συχνότητα δόνησης και περιστροφής του μακρομόριου στη ζώνη συχνοτήτων THz, το THz παρέχει ένα αποτελεσματικό μέσο για την ανίχνευση βιολογικών πληροφοριών. Επιπλέον, η ενέργεια φωτονίων του είναι χαμηλή, και έτσι δεν προκαλεί ζημιά στον ανιχνευτή, θα έχει καλή διεισδυτική ικανότητα σε διηλεκτρικά υλικά, και θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό κρυμμένων αντικειμένων. Επιπλέον, η ζώνη THz είναι μη ιονίζουσα ζώνη, η οποία είναι πιο υγιεινή για το δέρμα και τα μάτια απ' ό,τι η υπεριώδης (UV) επικοινωνία.

Εξαιρετικά γρήγορες διακυμάνσεις καναλιών και διακοπτόμενες συνδέσεις, για παράδειγμα, ο χρόνος συνοχής στα THz είναι πολύ μικρός και στο Doppler η συχνότητα είναι σχετικά υψηλή, επομένως η καθυστέρηση μετάδοσης μπορεί να μειωθεί στα 0,1 μs. Πιο υψηλές συχνότητες (μικρά μήκη κύματος) με χωρική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθούν για υπερ-ανάλυση, ανίχνευση και τοποθέτηση υψηλής ακρίβειας. Μικροί παλμοί (picoseconds) με υψηλή ανάλυση στον τομέα χρόνου μπορεί να αποκτήσουν τομέα χρόνου THz φάσματος με υψηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο, κάτι το οποίο διευκολύνει την εκτέλεση φασματικής ανάλυσης σε διάφορα υλικά.

7.4 Οι προκλήσεις για το φάσμα των Terahertz

Όταν η συχνότητα είναι υψηλή, είναι δύσκολο να κατασκευαστούν μικροσκοπικά τσιπ προκειμένου να κατασταλεί ο θόρυβος και οι παρεμβολές μεταξύ των συστατικών. Και για να ξεπεραστεί ο περιορισμός σύνθετης αντίστασης, οι διάφορες έρευνες συνεχίζουν να αναπτύσσονται και διεξάγονται μελέτες όπως σχεδιασμός φυσικού στρώματος με επίγνωση απόστασης, επικοινωνία MIMO υπερμάζας, έξυπνη επιφάνεια, και κρυστάλλους γραφενίου.

Η ισχύς εξόδου του πομποδέκτη THz είναι περιορισμένη. Η αντιμετώπιση εξαιρετικά μεγάλου εύρους ζώνης και οι υπερμεγάλες κεραίες οδηγούν σε εξαιρετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, λόγω αδύναμου φαινομένου περίθλασης, οι σκιές και το μπλοκάρισμα αυξάνουν περαιτέρω την απώλεια ισχύος. Η εξασθένηση ισχύος ενός σήματος THz σε έναν τοίχο μπορεί να είναι τόσο υψηλή ως 40–80 dB.

Λόγω της εξασθένησης υψηλής συχνότητας και των χαρακτηριστικών απώλειας διαδρομής, 300 GHz είναι περίπου 100 dB σε απόσταση 10 m. Επιπλέον, ο συντονισμός των μορίων του αέρα θα προκαλούν υπερβολική εξασθένηση. Όταν η συχνότητα υπερβαίνει το 1 THz, τα ραδιοκύματα θα απορροφούνται από υδατμούς και μόρια οξυγόνου στην ατμόσφαιρα και θα εξασθενούν 10 φορές σε απόσταση διάδοσης 1.

7.5 Τα σενάρια εφαρμογής

Τα σενάρια επικοινωνίας THz χωρίζονται κυρίως σε δίκτυα νανοκλίμακας (Nano-scale Networks) για επικοινωνία σε απόσταση 1 m ή μικρότερη, μικροσκοπικά δίκτυα (Micro Networks) με περιορισμένες αποστάσεις βιολογικής μετάδοσης από 1 m έως 10 m και δίκτυα μακροεντολών (Macro Networks) με αποστάσεις μετάδοσης από αρκετά μέτρα έως πολλά χιλιόμετρα.

- **Macro Network:** Συνήθως χρησιμοποιείται σε εξωτερικούς χώρους, σε ασύρματες συνδέσεις από σημείο σε σημείο, επίσης χρησιμοποιείται ευρέως για τη μετάδοση πληροφοριών σε σταθμούς βάσης σε μακροκυψέλες. Στο μακροδίκτυο THz οι απαιτήσεις πρέπει να πληρούν την κάλυψη πολλών χιλιομέτρων, να έχουν υψηλή απόδοση έως και 1 Tb/s και χαμηλή καθυστέρηση μικρότερη από 1 ms. Στο μέλλον, θα εξακολουθούν να χρειάζονται πειραματικά δεδομένα για την αξιολόγηση του εξωτερικού χώρου των

μοντέλων καναλιών, με στόχο να μειώνουν τους περιορισμούς της απόστασης μετάδοσης και να αυξάνουν τη χωρητικότητα ζεύξης.

- **Micro Network:** Αυτή τη στιγμή, η ζώνη συχνοτήτων THz παρέχει μικρές κυψελοειδείς επικοινωνίες, που μπορεί να παρέχει στους χρήστες κινητών τηλεφώνων εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων εντός εύρους μετάδοσης έως 20μ. Ο ρυθμός επικοινωνίας της επίγειας δικτύωσης εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, όπως η ασύρματη πρόσβαση, η ασύρματη λήψη και η ασύρματη διασύνδεση απαιτεί από 1 GB/s έως αρκετές εκατοντάδες giga byte ανά δευτερόλεπτο. Τα κύματα THz έχουν ρυθμό επικοινωνίας μεγαλύτερο από 10 GB/S και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασύρματη ασφαλή πρόσβαση με ποσοστό υψηλής μετάδοσης και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση.
- **Nano-scale Network:** στο δίκτυο νανοκλίμακας οι εφαρμογές περιλαμβάνουν συνδέσμους chip-to-chip και εσωτερική επικοινωνία μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Αυτό είναι ένας νέος τύπος τοπολογίας τεχνολογίας με εξαιρετικά μικρά μήκη κύματος. Στο δίκτυο νανοκλίμακας η επικοινωνία βασίζεται κυρίως σε πιο ευφυή τεχνολογία και εξοπλισμό νανοκλίμακας. Επί του παρόντος, έχει χρησιμοποιηθεί προηγμένη νανοτεχνολογία στη μοντελοποίηση καναλιών στη ζώνη συχνοτήτων THz. Η επικοινωνία THz μπορεί να υπολογίσει το κανάλι χωρητικότητας του νανοδικτύου. Επιπλέον, το μοντέλο καναλιών του νανοδικτύου μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει τεχνολογία διαμόρφωσης δέσμης, η οποία μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη χωρητικότητα και την κάλυψη του συστήματος.

Εκτός από τα τρία παραπάνω σενάρια εδάφους, η επικοινωνία στο διάστημα είναι επίσης ένα σημαντικό σενάριο για την επικοινωνία THz. Στη ζώνη συχνοτήτων THz του εξωτερικού χώρου, τα σχετικά διαφανή ατμοσφαιρικά παράθυρα είναι περίπου 350, 450, 620, 735 και 870 μm. Το σήμα θα απορροφάται ελάχιστα από την υγρασία και η επικοινωνία θα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Το δίκτυο 6G με βάση την τεχνολογία THz αναμένεται να ολοκληρώσει την αποτελεσματική ενοποίηση του δικτύου 5G, το δίκτυο δορυφορικής επικοινωνίας, και το ωκεάνιο δίκτυο βαθέν υδάτων, που καλύπτει φυσικούς χώρους όπως π.χ στο διάστημα, τον αέρα, τη γη και τον ωκεανό και την υλοποίηση ενός ασύρματου δικτύου ευρυζωνικής επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας με κάλυψη πολλαπλών επιπέδων και πολλαπλών δικτύων. Είναι πολύ σημαντικό να το συνειδητοποιήσουμε σε παγκόσμιο επίπεδο την εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC). Προς το παρόν, ορισμένα ερευνητικά αποτελέσματα έχουν επιτύχει στην εφαρμογή της ζώνης συχνοτήτων THz στην παρακολούθηση ραντάρ, στη βιοϊατρική, σε μη επανδρωμένα οχήματα και άλλα πεδία. Στο μέλλον, η τεχνολογία THz αναμένεται να έχει περαιτέρω έρευνα στη βιολογική απεικόνιση, στην ταχεία ανίχνευση του Φάσματος THz και στο ραντάρ διαμπερούς τοίχου.

Βιβλιογραφία

1. <https://apothetirio.lib.uoi.gr/xmlui/handle/123456789/52> , 15 Ιανουαρίου 2023
2. «Το 53% του παγκόσμιου πληθυσμού παραμένει χωρίς πρόσβαση στο Διαδίκτυο» <http://www.sepe.gr/research-studies/article/7534657/to-53-tou-pagosmiou-plithusmou-paramenei-horis-prosvasi-sto-diadiktuo/> , 15 Ιανουαρίου 2023
3. «Mobile internet usage worldwide - Statistics & Facts» <https://www.statista.com/topics/779/mobile-internet/>, 2 Φεβρουαρίου 2023
4. «Number of smartphone mobile network subscriptions worldwide from 2016 to 2022, with forecasts from 2023 to 2028(in millions) » <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>, 3 Απριλίου 2023
5. «Number of global mobile users until 2010» <https://www.statista.com/statistics/218984/number-of-global-mobile-users-since-2010/>, 3 Απριλίου 2023
6. «LTE» <https://el.wikipedia.org/wiki/LTE>, 4 Απριλίου 2023
7. «Difference Between 3G and 4G Technology» <http://techdifferences.com/difference-between-3g-and-4g-technology.html> , 5 Απριλίου 2023
8. «MIMO» <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>, 5 Απριλίου 2023
9. LTE MIMO: Multiple Input Multiple Output, Multiple Input Multiple Output is used within LTE to provide improved signal performance and / or improved data rates using the multiple path propagation. <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/mimo.php>, 6 Απριλίου 2023
10. «Internet Protocol version 6 (IPv6) » <https://en.wikipedia.org/wiki/IPv6>, 7 Απριλίου 2023
11. «Voice over Internet Protocol (VoIP)» https://en.wikipedia.org/wiki/Voice_over_IP, 7 Απριλίου 2023
12. «Orthogonal frequency-division multiplexing» https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing, 8 Απριλίου 2023
13. «The Sandblaster Software-Defined Radio Platform for Mobile 4G Wireless Communications» <https://www.hindawi.com/journals/ijdmb/2009/384507/>, 10 Απριλίου 2023
14. «Software Defined Radio, SDR: An overview of Software Defined Radio» <http://www.cablefree.net/wirelesstechnology/software-defined-radio-sdr/>, 12 Απριλίου 2023
15. «5G Networks Explained: How is it better than 4G» <https://www.gizbot.com/telecom/features/5g-networks-explained-how-is-it-better-than-4g-037100.html>, 12 Απριλίου 2023
16. «Πάτρα: Ο Δήμος "πάγωσε" το 5G για λόγους δημόσιας υγείας» <https://www.patrasevents.gr/article/366751-patra-o-dimos-pagose-to-5g-gia-logous-dimosias-igeias-ke-to-psaxnei>, 21 Απριλίου 2023
17. «A timeline of 5G development: From 1979 to Now» <https://www.techworld.com/picture-gallery/tech-innovation/timeline-of-5g-development-3654794/>, 23 Απριλίου 2023
18. «5G» <https://en.wikipedia.org/wiki/5G> , 29 Απριλίου 2023
19. «What Is OFDMA? » <https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-ofdma.html>, 6 Μαΐου 2023
20. «Single-carrier FDMA (SC-FDMA)» https://en.wikipedia.org/wiki/Single-carrier_FDMA, 7 Μαΐου 2023


```

    {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
    {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
    0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
};

double RBs_assigned_perRSU[n_rsu] = {0, 0, 0, 0};
double RBs_assigned_perRSUperm[n_rsu] = {0, 0, 0, 0};

double offered_latencies_perRSUandSlice[n_rsu][service_slices_count] = {
    {9.98, 50, 100, 300},
    {10, 50, 100, 300},
    {10, 50, 100, 300},
    {10, 50, 100, 300}
    // {10, 50, 100, 150, 300, 300},
};

double slices_q_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0};
double slices_e_requirements[service_slices_count] = {0.5, 0.5, 0.5, 0.5};
double slices_s_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0};

// CVo, CVi, ANav, RG, BS, WB
double slices_throughput_requirements[service_slices_count] = {250, 8000, 1000,
2000}; //kbps
double slices_delay_requirements[service_slices_count] = {100, 150, 5, 300}; //ms ,
according to 3gpp qos classes for 5g
double slices_jitter_requirements[service_slices_count] = {40, 40, 4, 200}; //ms
double slices_packetloss_requirements[service_slices_count] = {0.01, 0.001, 0.00001,
0.000001}; //ms , according to 3gpp qos classes for 5g

double min_req_throughput = 0;
double min_req_delay = 0;
double min_req_jitter = 0;
double min_req_packetloss = 0;
double max_req_throughput = 0;
double max_req_delay = 0;
double max_req_jitter = 0;
double max_req_packetloss = 0;

// CVo, CVi, ANav, RG, BS, WB
double slices_throughput_norm_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0};
double slices_delay_norm_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0};
double slices_jitter_norm_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0};

```

```

double slices_packetloss_norm_requirements[service_slices_count] = {0, 0, 0, 0};

double ofanp_weights_for_services[service_slices_count][q_parameters_count] = {
    //th      d      j      pl
    {0.194701, 0.268433, 0.268433, 0.268433}, // CVo
    {0.1719942, 0.252854, 0.252854, 0.3223 }, // CVi
    {0.199673, 0.471965, 0.121544, 0.206818}, // ANav
    {0.428128, 0.145346, 0.145346, 0.281179} // WB
};

void calculate_req_Q(){
    /****CALCULATE REQUIRED Q - start***/
    min_req_throughput = slices_throughput_requirements[0];
    min_req_delay      = slices_delay_requirements[0];
    min_req_jitter     = slices_jitter_requirements[0];
    min_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[0];
    max_req_throughput = slices_throughput_requirements[0];
    max_req_delay      = slices_delay_requirements[0];
    max_req_jitter     = slices_jitter_requirements[0];
    max_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[0];

    for(int i=1; i<service_slices_count; i++){
        if(min_req_throughput > slices_throughput_requirements[i]){
            min_req_throughput =
slices_throughput_requirements[i];
        }

        if(min_req_delay > slices_delay_requirements[i]){
            min_req_delay = slices_delay_requirements[i];
        }

        if(min_req_jitter > slices_jitter_requirements[i]){
            min_req_jitter = slices_jitter_requirements[i];
        }

        if(min_req_packetloss > slices_packetloss_requirements[i]){
            min_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[i];
        }

        if(max_req_throughput < slices_throughput_requirements[i]){
            max_req_throughput = slices_throughput_requirements[i];
        }

        if(max_req_delay < slices_delay_requirements[i]){
            max_req_delay = slices_delay_requirements[i];
        }
    }
}

```

```

    }

    if(max_req_jitter < slices_jitter_requirements[i]){
    max_req_jitter = slices_jitter_requirements[i];
    }

    if(max_req_packetloss < slices_packetloss_requirements[i]){
    max_req_packetloss = slices_packetloss_requirements[i];
    }
}

for(int i=1; i<service_slices_count; i++){
    slices_throughput_norm_requirements[i] =
(slices_throughput_requirements[i] - min_req_throughput) / (max_req_throughput -
min_req_throughput);
    slices_delay_norm_requirements[i] =
(slices_delay_requirements[i] - min_req_delay) / (max_req_delay - min_req_delay);
    slices_jitter_norm_requirements[i] =
(slices_jitter_requirements[i] - min_req_jitter) / (max_req_jitter - min_req_jitter);
    slices_packetloss_norm_requirements[i] =
(slices_packetloss_requirements[i] - min_req_packetloss) / (max_req_packetloss -
min_req_packetloss);
}

for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
    slices_q_requirements[i] = (ofanp_weights_for_services[i][0] *
slices_throughput_norm_requirements[i]) +
(ofanp_weights_for_services[i][1] * (1-slices_delay_norm_requirements[i])) +
(ofanp_weights_for_services[i][2] * (1-slices_jitter_norm_requirements[i])) +
(ofanp_weights_for_services[i][3] * (1-slices_packetloss_norm_requirements[i]));
}

    /****CALCULATE REQUIRED Q - end***/
    for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
    std::cout << "Q_reg["<<i<<"]:" << slices_q_requirements[i] << std::endl;
    }
}

void calculate_req_E(){
    for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
    std::cout << "E_reg["<<i<<"]:" << slices_e_requirements[i] << std::endl;
    }
}

```

```

}

void calculate_req_S(){
    for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
        for(int j=0; j<10201; j++){
            double value = (int)(slices_q_requirements[i] * 100 + .5);
            double current_slices_q_req = (double)value / 100;

            if(user_satisfaction_chart[j][0]==current_slices_q_req &&
user_satisfaction_chart[j][1]==slices_e_requirements[i]){
                slices_s_requirements[i]=user_satisfaction_chart[j][2];
            }
        }
    }

    for(int i=0; i<service_slices_count; i++){
        std::cout << "S_reg["<<i<<"]": " << slices_s_requirements[i] << std::endl;
    }
}

double calculate_service_achievable_S(int k, int i){

    double freeRBs=0;

    for(int j=0; j<RBs_perTTI; j++){
        if(RBs_perRSU[k][j]==0){
            freeRBs++;
        }
    }

    double achievable_throughput = freeRBs*1000; //1 Mbps per RB according to
LTE specification (best case)

    double norm_achievable_throughput = (achievable_throughput -
min_req_throughput) / (max_req_throughput - min_req_throughput);

    if(norm_achievable_throughput>1){
        norm_achievable_throughput=1;
    }else if(norm_achievable_throughput<0){
        norm_achievable_throughput=0.01;
    }

    double norm_achievable_delay = 1/norm_achievable_throughput;
    double norm_achievable_jitter = slices_jitter_norm_requirements[i];

```



```

        double norm_achievable_packetloss =
slices_throughput_norm_requirements[i]-norm_achievable_throughput;

        if(norm_achievable_packetloss>1){
            norm_achievable_packetloss=1;
        }else if(norm_achievable_packetloss<0){
            norm_achievable_packetloss=0;
        }

        double slice_achievable_q = (ofanp_weights_for_services[i][0] *
norm_achievable_throughput) +

        (ofanp_weights_for_services[i][1] * (1-norm_achievable_delay)) +

        (ofanp_weights_for_services[i][2] * (1-norm_achievable_jitter)) +

        (ofanp_weights_for_services[i][3] * (1-norm_achievable_packetloss));

        double slice_achievable_e = 0.2; //one antenna is used
        double slice_achievable_s = 0;

        for(int j=0; j<10201; j++){
            double value = (int)(slice_achievable_q * 100 + .5);
            double current_slice_achievable_q = (double)value / 100;

            if(user_satisfaction_chart[j][0]==current_slice_achievable_q &&
user_satisfaction_chart[j][1]==slice_achievable_e){
                slice_achievable_s=user_satisfaction_chart[j][2];
            }
        }

        return slice_achievable_s;
    }

double calculate_service_achievable_S_extended(int k, int g, int i){

    double freeRBs=0;

    for(int j=0; j<RBs_perTTI; j++){
        if(RBs_perRSU[k][j]==0){
            freeRBs++;
        }
    }

    for(int j=0; j<RBs_perTTI; j++){

```

```

        if(RBs_perRSU[g][j]==0){
            freeRBs++;
        }
    }

    double achievable_throughput = freeRBs*1000; //1 Mbps per RB according to
    LTE specification (best case)

    double norm_achievable_throughput = (achievable_throughput -
    min_req_throughput) / (max_req_throughput - min_req_throughput);

    if(norm_achievable_throughput>1){
        norm_achievable_throughput=1;
    }else if(norm_achievable_throughput<0){
        norm_achievable_throughput=0.01;
    }

    double norm_achievable_delay = 1/norm_achievable_throughput;
    double norm_achievable_jitter = slices_jitter_norm_requirements[i];
    double norm_achievable_packetloss =
    slices_throughput_norm_requirements[i]-norm_achievable_throughput;

    if(norm_achievable_packetloss>1){
        norm_achievable_packetloss=1;
    }else if(norm_achievable_packetloss<0){
        norm_achievable_packetloss=0;
    }

    double slice_achievable_q = (ofanp_weights_for_services[i][0] *
    norm_achievable_throughput) +

    (ofanp_weights_for_services[i][1] * (1-norm_achievable_delay)) +

    (ofanp_weights_for_services[i][2] * (1-norm_achievable_jitter)) +

    (ofanp_weights_for_services[i][3] * (1-norm_achievable_packetloss));

    double slice_achievable_e = 0.2; //one antenna is used
    double slice_achievable_s = 0;

    for(int j=0; j<10201; j++){
        double value = (int)(slice_achievable_q * 100 + .5);
        double current_slice_achievable_q = (double)value / 100;

```

```

        if(user_satisfaction_chart[j][0]==current_slice_achievable_q &&
user_satisfaction_chart[j][1]==slice_achievable_e){
            slice_achievable_s=user_satisfaction_chart[j][2];
        }
    }

    return slice_achievable_s;
}

static void slicing ()
{
    std::cout << "Slicing Run" << std::endl;

    for(int i=0; i<service_slices_count; i++){

        double S_req = slices_s_requirements[i];

        for(int k=0; k<1 ; k++){ // 1: n_rsu

            int no_other_RBs_required = 0;
            int RBs_assigned_to_service_slice = 0;

            //find the RBs that must be assigned
            double achievable_S_service = calculate_service_achievable_S(k, i);
            while(achievable_S_service >= S_req && no_other_RBs_required == 0){
                //local RBs can satisfy S requirements
                std::cout<<"a1: achievable_S_service:
                    "<<achievable_S_service<<" , S_req: "<<S_req<<std::endl;

                //decreasing free local RBs RBrsu(k)
                int RBfound=0;
                int tmp=RBs_assigned_perRSUperm[k];
                for(int j=tmp; j<RBs_perTTI; j++){ //assign the next free local RB
                    if(RBs_perRSU[k][j]==0 && RBfound==0){
                        RBs_perRSU[k][j]=1;
                        RBfound=1;
                        RBs_assigned_to_service_slice++;
                        RBs_assigned_perRSU[k]++;
                    }
                }
                achievable_S_service = calculate_service_achievable_S(k, i);
                std::cout<<"a2: achievable_S_service:
                    "<<achievable_S_service<<" , S_req: "<<S_req<<std::endl;

                if(RBs_assigned_to_service_slice >=

```

```

        (slices_throughput_requirements[i]/1000)){
            no_other_RBs_required = 1;
        }
    }
    no_other_RBs_required = 0;
    while(achievable_S_service < S_req && no_other_RBs_required == 0){
        //local RBs cannot satisfy latency requirements
        int found=0;
        for(int g=1; g<n_rsu; g++){ //for(int g=1 or 0; g<n_rsu; g++){

            if( (((double)RBs_assigned_perRSU[g]+1)/
                (double)RBs_perTTI) < A[g][0] ) && found==0){ //A[g][current]
                found = 1;
                if(k != g){
                    std::cout<<"b1: achievable_S_service:
                    "<<achievable_S_service<<" , S_req:
                    "<<S_req<<std::endl;

                    //update RBrsu(k')
                    int RBfound=0;
                    int tmp=RBs_assigned_perRSUperm[g];
                    for(int j=tmp; j<RBs_perTTI; j++){
                        //assign the next free local RB
                        if(RBs_perRSU[g][j]==0 && RBfound==0){
                            RBs_perRSU[g][j]=1;
                            RBfound=1;
                            RBs_assigned_to_service_slice++;
                            RBs_assigned_perRSU[g]++;
                        }
                    }

                    //increasing free local RBs RBrsu(k)
                    RBfound=0;
                    int tmp2=RBs_assigned_perRSUperm[k];
                    for(int j=(RBs_perTTI-1); j>=tmp2; j--){
                        //assign the next free local RB
                        if(RBs_perRSU[k][j]==1 && RBfound==0){
                            RBs_perRSU[k][j]=0;
                            RBfound=1;
                            RBs_assigned_to_service_slice--;
                            RBs_assigned_perRSU[k]--;
                        }
                    }
                }

                achievable_S_service = calculate_service_achievable_S_extended(k, g, i);
                std::cout<<"b2: achievable_S_service: "<<achievable_S_service<<" , S_req:

```

```

        "<<S_req<<std::endl;
            }
        }
    }

    if(RBs_assigned_to_service_slice >=
        (slices_throughput_requirements[i]/1000)){
        no_other_RBs_required = 1;
    }
    if(found==0 && no_other_RBs_required == 0){
        //assign local RBs RBrsu(k) if remote RBs are not available
        int tmp=RBs_assigned_perRSUperm[k];
        for(int j=tmp; j<RBs_perTTI; j++){
            //assign the next free local RB
            if( RBs_perRSU[k][j]==0 &&
                (RBs_assigned_to_service_slice <
                 (slices_throughput_requirements[i]/1000)) ){
                RBs_perRSU[k][j]=1;
                RBs_assigned_to_service_slice++;
                RBs_assigned_perRSU[k]++;
            }
        }
        achievable_S_service = calculate_service_achievable_S(k, i);
        std::cout<<"c: achievable_S_service: "<<achievable_S_service<<std::endl;
    }
}

for(int g=0; g<n_rsu; g++){
    for(int j=0; j<RBs_perTTI; j++){
        std::cout<<"RBs_perRSU["<<g<<"]["<<j<<"]: "<<RBs_perRSU[g][j]<<std::endl;
    }
}

for(int k=0; k<n_rsu; k++){
    RBs_assigned_perRSUperm[k] = RBs_assigned_perRSU[k];
}

std::cout<<"-----"<<std::endl;
}
}

int
main (int argc, char *argv[])

```

```
{  
    calculate_req_Q();  
    calculate_req_E();  
    calculate_req_S();  
    slicing();  
    return 0;  
}
```