



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ
ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ
ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ 5G

Βασίλειος Μπάτσιος

Επιβλέπουσα: Σπυριδούλα Μαργαρίτη
ΕΔΙΠ, Α

Άρτα, Φεβρουάριος, 2025

**PRACTICAL STUDY AND PERFORMANCE ANALYSIS OF
ULTRA-LOW LATENCY NETWORKS: THE CASE OF 5G
NETWORK**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 13/02/2025

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Σπυριδούλα Μαργαρίτη,

ΕΔΙΠ-Α

2. Μέλος επιτροπής

Ελευθέριος Στεργίου,

ΔΕΠ Αναπληρωτής Καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Κωνσταντίνος Αγγέλης,

ΔΕΠ Καθηγητής

© Μπάτσιος, Βασίλειος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Μπάτσιος, Βασίλειος



Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά την αγαπητή μου σύζυγο Μαριάννα που στάθηκε δίπλα μου σε αυτό το εγχείρημα και όχι μόνο. Μόνο με τη δική της συμβολή θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού μου αλλά και στην συνολική ακαδημαϊκή μου πορεία απόκτησης γνώσης. Επίσης να ευχαριστήσω τα αγαπητά μου παιδιά, τον Ίθαν, τον Άσερ και τον Σαμ που πολλές ώρες τις δαπανήσαμε μαζί, ως «μικροί» φοιτητές, ώστε να ολοκληρωθεί αυτό το σημαντικό κεφάλαιο. Τέλος θα ήταν σημαντική παράληψη να μην ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου, ειδικά την κα Δρ. Σπυριδούλα Μαργαρίτη, που στάθηκε διπλά μου ως μέντορας, αρωγός και μαέστρος. Οι κατάλληλες συμβουλές, ο άπλετος χρόνος που μου έδωσε και η υπομονή της σίγουρα δεν πέρασαν απαρατήρητα και ήταν τιμή μου να έχω έναν καθηγητή τέτοιου ήθους ως επιβλέπουσα αρχή για τη διπλωματική μου εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία θα επιχειρήσει να προσεγγίσει το ζήτημα της πραγματικής χρήσης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου 5G και να το συγκρίνει με τις θεωρητικές προδιαγραφές του δικτύου, όπως έχουν δημοσιευτεί επίσημα από το 3GPP. Συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η χρήση του 5G δικτύου στην Ελλάδα [29], το οποίο λειτουργεί σε Non Standalone (NSA) μορφή, δηλαδή υποστηρίζεται από την υπάρχουσα υποδομή του 5G, τουλάχιστον μέχρι την ημερομηνία δημοσίευσης αυτής της μελέτης. Θα χρησιμοποιηθούν τρία διαφορετικά σενάρια χρήσης και θα εξαχθούν συμπεράσματα από τη σύγκριση της πραγματικής απόδοσης με τις θεωρητικές εκτιμήσεις. Επιπλέον, θα γίνει προσπάθεια αναπαραγωγής των ίδιων σεναρίων μέσω εφαρμογών προσομοίωσης, ώστε να παρουσιαστεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα των αποτελεσμάτων.

Λέξεις-κλειδιά: Τηλεπικοινωνίες, Δίκτυο 5G, Μετρήσεις, Ανάλυση Απόδοσης, Εμπειρικά Δεδομένα, 5G NSA

ABSTRACT

This study aims to address the issue of the real-world usage of 5G telecommunications networks and compare it with the theoretical specifications of the network as officially published by 3GPP. Specifically, the focus will be on the implementation of the 5G network in Greece, which operates in Non-Standalone (NSA) mode up until the date of this study's publication. Three scenarios will be analyzed, and conclusions will be drawn by comparing the actual performance with the theoretical projections. Additionally, an effort will be made to reproduce the same data using simulation applications to provide a more comprehensive view of the results.

Keywords: Telecommunications, 5G Network, Measurements, Performance Analysis, Empirical/Practical Data, 5G NSA

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	xiii
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ / ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ	xiv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xvi
Εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής.....	xvi
Κίνητρο και σκοπός της εργασίας.....	xvii
Δομή της εργασίας	xix
1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	1
1.1 Εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.....	1
1.2 Αρχές λειτουργίας του 5G.....	3
1.3 Αρχιτεκτονική 5G	4
1.3.1 Λογικό Μοντέλο του 5G	4
1.3.2 Φυσικό Μοντέλο του 5G.....	5
1.3.3 Υλοποίηση δικτύου 5G NA	7
1.3.4 Υλοποίηση δικτύου 5G NSA	7
1.3.5 Dynamic Spectrum Sharing (DSS)	9
1.4 Απαιτήσεις απόδοσης	10
1.5 Μετρικές απόδοσης.....	11
1.5.1 Καθυστέρηση	11
1.5.2 Jitter.....	12

1.5.3	Εύρος ζώνης (Bandwidth).....	12
1.5.4	Ποσοστά Σφάλματος (Error Rates).....	13
1.5.5	SNR	13
1.6	Διαφορά μεταξύ 4G και 5G όσον αφορά την καθυστέρηση	15
1.7	Σχετικές Εργασίες	16
2	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ 5G.....	17
2.1	Βιομηχανικός αυτοματισμός και IoT	17
2.2	Αυτόνομα οχήματα και έξυπνες πόλεις.....	18
2.3	Υπηρεσίες υγείας και τηλεχειρουργική.....	19
2.4	Παιχνίδια και ψυχαγωγία σε πραγματικό χρόνο	20
2.3	Άλλες εφαρμογές του 5G	20
3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	22
3.1	Το πλαίσιο αξιολόγησης	22
3.1.1	Το περιβάλλον προσομοίωσης	23
3.1.2	Το πραγματικό περιβάλλον.....	24
3.2	Απαραίτητος εξοπλισμός	25
3.2.1	Hardware	25
3.2.2	Software	26
3.3	Σενάρια δοκιμών (Test Cases)	29
3.3.1	Σενάριο 1ο	32
3.3.1	Σενάριο 2ο	34
3.3.2	Σενάριο 3ο	35
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	37
4.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίων δοκιμών	37
4.1.1	Προσομοίωση Σεναρίου 1 ^ο	37
4.1.2	Προσομοίωση Σεναρίου 3 ^ο	40
4.2	Απόδοση και καθυστέρηση σε διαφορετικές συνθήκες	44
4.2.1	Σενάριο 1	44

4.2.2	Σενάριο 2	51
4.2.3	Σενάριο 3	59
4.3	Συγκριτική ανάλυση μεταξύ 5G και άλλων τεχνολογιών	65
4.4	Ερμηνεία των ευρημάτων	66
4.5	Συμπεράσματα σύγκρισης Πραγματικών Δοκιμών και Προσομοίωσης	67
5.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	68
5.1	Συμπεράσματα	68
5.2	Περιορισμοί της μελέτης.....	69
5.3	Μελλοντική έρευνα.....	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Συνοπτική Ιστορική Αναφορά 3GPP για 1G μέχρι 5G [32][33].....	2
Πίνακας 1.2 Αντιπαράβολή 4G με 5G σε διάφορες μετρικές ενδιαφέροντος[3][8]	15
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά κινητού Nokia X10.....	26
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά κινητού TCL 20 R 5G.....	26
Πίνακας 3.3 Συνοπτικός πίνακας που δείχνει τα διάφορα σενάρια και το περιβάλλον των δοκιμών	30

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Χρονική αναπαράσταση εξέλιξης τηλεπικοινωνιακών δικτύων από 1G ως 6G	2
Εικόνα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση λογικού μοντέλου του 5G Core [49].....	5
Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση του 5G Core με βάση την φυσική υλοποίηση [49].....	6
Εικόνα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση του 5G με βάση την φυσική υλοποίηση [52]	6
Εικόνα 2.1 Εικόνα που δείχνει την αναγκαιότητα χρήσης του 5G [11][12][13]	21
Εικόνα 3.1 Στιγμιότυπο οθόνης χρήσης του Simu5G.....	23
Εικόνα 3.2 Γραφική αναπαράσταση τοπολογίας Σεναρίου 1.....	33
Εικόνα 3.3 Στιγμιότυπο οθόνης χρήσης του λογισμικού Termux.....	34
Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση Σεναρίου 2	35
Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση σεναρίου 3.....	36
Εικόνα 4.1 Bandwidth Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου	37
Εικόνα 4.2 Jitter Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου.....	38
Εικόνα 4.3 Latency Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου	39
Εικόνα 4.4 Διάγραμμα ποσοσטיαίων σημείων latency προσομοίωσης Σεναρίου 1ου	39
Εικόνα 4.5 SNR Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου	40
Εικόνα 4.6 Bandwidth Προσομοίωσης Σεναρίου 3ου	41
Εικόνα 4.7 Jitter Προσομοίωσης Σεναρίου 3ου.....	41
Εικόνα 4.8 Διάγραμμα ποσοσטיαίων σημείων Latency προσομοίωσης Σεναρίου 3ου.....	42
Εικόνα 4.9 SNR προσομοίωσης Σεναρίου 3ου.....	43
Εικόνα 4.10 Σημείο και εξυπηρετούμενη κεραία στο UE Nokia X10 και TCL	44
Εικόνα 4.11 Αναλυτικά στοιχεία και γραφικές παραστάσεις κατά τη διάρκεια μιας εκ των δοκιμών	45
Εικόνα 4.12 Bandwidth και Ποιότητα σήματος στη πορεία του χρόνου.....	46
Εικόνα 4.13 SNR Αποστολέα Σεναρίου 1 στη πορεία του χρόνου.....	46
Εικόνα 4.14 Latency Σεναρίου 1 στη πορεία του χρόνου	48
Εικόνα 4.15 Διάγραμμα ποσοσטיαίων σημείων Latency Σεναρίου 1	48
Εικόνα 4.16 Jitter Σεναρίου 1 στη πορεία του χρόνου.	49
Εικόνα 4.17 Διάγραμμα χαμένων πακέτων στην διάρκεια του Σεναρίου 1.....	50
Εικόνα 4.18 Περιοχή δοκιμών Σεναρίου 2.....	51
Εικόνα 4.19 Κύρια πορεία και εξυπηρετούμενες κεραίες κατά τη διάρκεια των δοκιμών	52
Εικόνα 4.20 Λίστα κεραιών του παρόχου Cosmote στη περιοχή δοκιμών.	53
Εικόνα 4.21 Upload Bandwidth και ποιότητα σήματος Σεναρίου 2	54
Εικόνα 4.22 SNR Σεναρίου 2 στη πορεία του χρόνου.....	55

Εικόνα 4.23 Latency Σεναρίου 2 στη πορεία του χρόνου	55
Εικόνα 4.24 Διάγραμμα ποσοσטיαίων σημείων latency Σεναρίου 2	56
Εικόνα 4.25 Διάγραμμα αναμεταδόσεων πακέτων Σεναρίου 2	57
Εικόνα 4.26 Jitter Σεναρίου 2 στη πορεία του χρόνου	58
Εικόνα 4.27 Τυχαίο δειγματοληπτικό σημείο αναφοράς Σεναρίου 3	59
Εικόνα 4.28 Τυχαίο δειγματοληπτικό σημείο αναφοράς Σεναρίου 3	59
Εικόνα 4.29 Ταχύτητα οχήματος σε αντιπαραβολή με το Upload Bandwidth στη πορεία του χρόνου	60
Εικόνα 4.30 Επιπρόσθετο διάγραμμα ταχύτητας οχήματος-Upload Bandwidth στη πορεία του χρόνου	61
Εικόνα 4.31 Jitter Σεναρίου 3 στη πορεία του χρόνου	61
Εικόνα 4.32 Latency Σεναρίου 3 στη πορεία του χρόνου	62
Εικόνα 4.33 Διάγραμμα ποσοσטיαίων σημείων Latency	63
Εικόνα 4.34 SNR Σεναρίου 3 στη πορεία του χρόνου	64
Εικόνα 4.35 Επαναποστολές χαμένων πακέτων στη πορεία του χρόνου	65
Εικόνα 4.36 Μεμονωμένη περίπτωση χρήσης του 5G Standalone με χρήση gNB.....	66

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

5G	Fifth-Generation of mobile telecommunications technology
SA	Standalone
NSA	Non Standalone
UE	User Equipment
CLI	Command Line Interface
eNB	Evolved Node B
gNB	Next Generation Node B
LTE	Long-Term Evolution
VPN	Virtual Private Network
SDN	Software-Defined Networking
NAT	Network Address Translation
CGNAT	Carrier-Grade Network Address Translation
IPSec	Internet Protocol Security
3GPP	3rd Generation Partnership Project
TCP.....	Transmission Control Protocol
E2E.....	End-to-End
D2D.....	Device-to-Device

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ / ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ

- **SA (Standalone):** Αναφέρεται στη λειτουργία των δικτύων 5G χωρίς να εξαρτώνται από την υποδομή LTE/4G. Στο Standalone 5G (SA), τόσο η σηματοδότηση όσο και η μεταφορά δεδομένων γίνονται αποκλειστικά μέσω υποδομής 5G, προσφέροντας πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του 5G.
- **NSA (Non-Standalone):** Αναφέρεται σε έναν τύπο ανάπτυξης του δικτύου 5G όπου το δίκτυο βασίζεται στην υποδομή LTE (4G) για τη σηματοδότηση και τη διαχείριση της σύνδεσης, αλλά η μεταφορά δεδομένων μπορεί να γίνεται μέσω του 5G. Το NSA χρησιμοποιείται συχνά ως μεταβατικό στάδιο πριν την πλήρη μετάβαση σε SA.
- **CLI (Command Line Interface):** Είναι ένας τρόπος αλληλεπίδρασης με συσκευές ή προγράμματα μέσω εντολών κειμένου. Χρησιμοποιείται συχνά από διαχειριστές δικτύων για τη ρύθμιση, τη διαχείριση και την αντιμετώπιση προβλημάτων σε δίκτυα.
- **LTE (Long-Term Evolution):** Είναι ένα πρότυπο ασύρματης ευρυζωνικής επικοινωνίας για κινητές συσκευές και δίκτυα δεδομένων. Το LTE θεωρείται δίκτυο 4ης γενιάς (4G) και παρέχει υψηλότερες ταχύτητες από τα δίκτυα 3G, με βασική του χρήση τη μεταφορά δεδομένων.
- **VPN (Virtual Private Network):** Είναι μια τεχνολογία που δημιουργεί μια κρυπτογραφημένη σύνδεση μεταξύ του χρήστη και ενός απομακρυσμένου διακομιστή, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των δεδομένων και την ιδιωτικότητα. Το VPN χρησιμοποιείται τόσο σε επιχειρήσεις όσο και σε ιδιώτες για ασφαλή πρόσβαση στο διαδίκτυο.
- **SDN (Software-Defined Networking):** Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική δικτύου που διαχωρίζει τον έλεγχο του δικτύου από την υποδομή του υλικού. Το SDN επιτρέπει στους διαχειριστές να διαμορφώνουν και να διαχειρίζονται το δίκτυο μέσω λογισμικού, διευκολύνοντας την ευελιξία και την αποδοτικότητα.
- **NAT (Network Address Translation):** Είναι μια τεχνική που επιτρέπει σε πολλές συσκευές σε ένα ιδιωτικό δίκτυο να χρησιμοποιούν μια κοινή δημόσια διεύθυνση IP για να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο. Το NAT προστατεύει τις εσωτερικές συσκευές από την άμεση πρόσβαση από το εξωτερικό.

- **IPSec (Internet Protocol Security):** Είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και την προστασία της επικοινωνίας μέσω του διαδικτύου. Χρησιμοποιείται συχνά σε VPN για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της ακεραιότητας των δεδομένων.
- **E2E (End-to-End):** Αναφέρεται στη διαδικασία της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ δύο τερματικών σημείων (π.χ., μεταξύ ενός πελάτη και ενός διακομιστή) χωρίς μεσάζοντες. Η αρχή του End-to-End εφαρμόζεται συχνά σε δίκτυα και συστήματα για να διασφαλιστεί η πλήρης ολοκλήρωση των λειτουργιών από το ένα άκρο στο άλλο.
- **eMBB (Enhanced Mobile Broadband):** Τμηματοποίηση δικτύου του 5G που εστιάζει στην παροχή υψηλής ταχύτητας και μεγάλης χωρητικότητας για εφαρμογές όπως το streaming υψηλής ανάλυσης, η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και οι μαζικές λήψεις δεδομένων.
- **URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications):** Τμηματοποίηση δικτύου του 5G που παρέχει εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία με πολύ χαμηλή καθυστέρηση, κρίσιμη για εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση, οι απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις και τα βιομηχανικά δίκτυα.
- **mMTC (Massive Machine-Type Communications):** Τμηματοποίηση δικτύου του 5G σχεδιασμένη για μαζική συνδεσιμότητα μεταξύ συσκευών IoT με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλους χρόνους ζωής μπαταρίας, κατάλληλη για αισθητήρες, έξυπνες πόλεις και βιομηχανικές εφαρμογές.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής

Οι ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας για ταχύτητα και αξιοπιστία στην επικοινωνία επιβάλλουν την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, οι οποίες θα εξασφαλίσουν τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό γίνεται ολοένα πιο απαραίτητο καθώς εξαπλώνεται η χρήση του διαδικτύου, ειδικά του ασύρματου κινητού δικτύου, την εποχή μετά την πανδημία COVID-19. Τα πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων, όπως η δυνατότητα που επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιούν κινητές εφαρμογές και η ευκολία προσαρμογής, τα καθιστούν φυσική επιλογή για τη διασύνδεση στο διαδίκτυο [1]. Μεταξύ των ασύρματων τεχνολογιών, το 5G υπόσχεται υψηλότερο εύρος ζώνης, χαμηλότερη καθυστέρηση, καλύτερη αξιοπιστία και υποστήριξη μαζικής πρόσβασης σε σύγκριση με το 4G [2], και αποτελεί ιδανική λύση για την εξασφάλιση της προσβασιμότητας στο (δια)δίκτυο.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G έχει επιφέρει ήδη επανάσταση στην επικοινωνία και στη συνδεσιμότητα, προσφέροντας όχι μόνο υψηλότερες ταχύτητες, αλλά και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Αυτή η χαρακτηριστική πτυχή του 5G αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την υλοποίηση εφαρμογών που απαιτούν άμεσες και αξιόπιστες ανταποκρίσεις, όπως τα αυτόνομα οχήματα, οι έξυπνες πόλεις, η τηλεϊατρική και η βιομηχανία 4.0.

Σε αυτή την εποχή λοιπόν, με την αυξανόμενη χρήση δικτύωσης και την απαίτησης για προσβασιμότητα στο διαδίκτυο από κάθε γεωγραφικό σημείο αλλά και σε οποιεσδήποτε περιστάσεις είναι απαραίτητο να υπάρχει η καλύτερη δυνατή Ποιότητας της Υπηρεσίας ή αλλιώς QoS (Quality of Service). Συνεπώς, είναι αυτονόητο πως η πραγματική ποιότητα και αυτό που τελικά παρέχεται πραγματικά στο τελικό χρήστη έχει μεγάλη σημασία. Ομολογουμένως, οι ονομαστικές τιμές μετρικών ποιότητας που δίνει ένας τηλεπικοινωνιακός πάροχος είναι το βέλτιστο που μπορεί να προσφέρει, όμως, η υπηρεσία που χρησιμοποιεί ο χρήστης είναι και αυτό που πραγματικά έχει αξία για αυτόν.

Κίνητρο και σκοπός της εργασίας

Η ταχύτατη εξάπλωση των τεχνολογιών 5G, που σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο 5G στην Ελλάδα έφτασε σε ποσοστό κάλυψης 85% [38] γίνεται αφορμή για τη διεξαγωγή δοκιμών και πειραμάτων που θα αξιολογήσουν και θα επικυρώσουν την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας [39]. Πολλοί ερευνητές βασίζονται στην προσομοίωση για να αξιολογήσουν την ποιότητα υπηρεσιών ή άλλων κρίσιμων δεικτών απόδοσης. Άλλοι ερευνητές διεξάγουν μετρήσεις σε πραγματικά δίκτυα και παραθέτουν εμπειρικά ευρήματα σχετικά με την κάλυψη και τη ραδιοπρόσβαση του 5G, την απόδοση μετάδοσης, την κατανάλωση ενέργειας και την ποιότητα εμπειρίας(QoE) [40].

Ωστόσο, τα περισσότερα από τα υπάρχοντα εμπειρικά αποτελέσματα είτε διεξάγονται σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον, είτε ελέγχονται υπό ιδανικές συνθήκες είτε εστιάζουν σε μετρικές που αφορούν κυρίως την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, το επονομαζόμενο Bandwidth, είτε δεν αφορούν την ευρύτερη γεωγραφική περιοχή της βορειοδυτικής Ελλάδας. Αυτό αποτέλεσε το κίνητρο για τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης.

Η παρούσα εμπειρική μελέτη και ανάλυση της απόδοσης δικτύων εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, εστιάζει στην τεχνολογία 5G, προκειμένου να κατανοήσει τις δυνατότητές της, καθώς και τις προκλήσεις που συνδέονται με την υλοποίησή της. Η χαμηλή καθυστέρηση είναι κρίσιμη για πολλές εφαρμογές, καθώς καθορίζει την εμπειρία του χρήστη και την αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών που βασίζονται σε αυτήν. Για παράδειγμα, σε περιβάλλοντα όπου η ασφάλεια, η ακρίβεια, η καθυστέρηση στο επίπεδο εφαρμογής αλλά και σε επίπεδο μεταφοράς είναι θεμελιώδεις. Για παράδειγμα στα δομικά σημεία του δικτύου κρίσιμο ζήτημα είναι η ασφάλεια διασύνδεσης με τη χρήση του πρωτοκόλλου TCP και του IPSec [43] η ακρίβεια, όπως είναι τα κατάλληλα πρωτόκολλα και πίνακες δρομολόγησης [44].

Σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία ή εφαρμογές που περιλαμβάνουν ιατρικές διαδικασίες, η οποιαδήποτε καθυστέρηση μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις [45]. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην αξιολόγηση των παραμέτρων απόδοσης του δικτύου 5G σε πραγματικές συνθήκες. Οι παράμετροι απόδοσης που εξετάστηκαν αφορούν κυρίως τους ακόλουθους τομείς [3]:

- Καθυστέρηση στην επικοινωνία, το επονομαζόμενο Latency
- Μεταβλητότητα της καθυστέρησης, κοινώς Jitter
- Ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων με ονομασία Throughput. Θα αναφέρεται και Bandwidth. Παρότι δεν είναι ακριβώς το ίδιο καθώς το Bandwidth αναφέρεται στη μέγιστη θεωρητική ταχύτητα και το Throughput στη πραγματική ποσότητα δεδομένων, κατά γενική παραδοχή οι δύο παράμετροι χρησιμοποιούνται ως ταυτόσημες.
- Απώλεια και Σφάλματα Δεδομένων ή αλλιώς Packet Error Rate

Επιπροσθέτως θα γίνει αναφορά και στο βασικό μετρικό μέγεθος ποιότητας ασύρματης δικτύωσης που λέγεται SNR [4][5]. Περισσότερα για αυτή και για τις άλλες μετρικές παραμέτρους, θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Η συλλογή δεδομένων από δοκιμές πεδίου (με τις περιστάσεις που υπάρχουν μέχρι τη συγγραφή τη παρούσης ερευνάς) και σε προσομοιωτικές συνθήκες προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την πραγματική απόδοση του δικτύου και αναδεικνύει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της τεχνολογίας. Επιπλέον, μπορούν να εξεταστούν οι στρατηγικές και οι τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του 5G, εστιάζοντας σε καινοτόμες προσεγγίσεις όπως το edge computing και το network slicing.

Αυτή η μελέτη έχει, αναμφισβήτητα ακαδημαϊκή αξία, αλλά πρωτίστως δίνει έμφαση στη πρακτική σημασία, καθώς τα αποτελέσματά της μπορούν να ενημερώσουν τις στρατηγικές ανάπτυξης δικτύων 5G και να συμβάλουν στη διαμόρφωση πολιτικών για τη διαχείριση των τεχνολογικών προκλήσεων που ανακύπτουν. Μέσω αυτής της ανάλυσης, επιδιώκεται η κατανόηση του ρόλου του 5G στη διαμόρφωση του μέλλοντος των επικοινωνιών και της τεχνολογίας, παρέχοντας ένα πλαίσιο για τις μελλοντικές εξελίξεις και τις επενδύσεις στον τομέα αυτό.

Δομή της εργασίας

Η εργασία είναι δομημένη σε πέντε κύρια κεφάλαια, καθένα από τα οποία εξετάζει κρίσιμες πτυχές της τεχνολογίας 5G και της απόδοσης των δικτύων εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης. Ακολουθεί η σύντομη παρουσίασή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το πρώτο κεφάλαιο κάνει εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, εστιάζοντας στην εξέλιξή τους από την πρώτη γενιά (1G) έως την πέμπτη γενιά (5G). Παρουσιάζεται μια γενική εικόνα των χαρακτηριστικών και των προκλήσεων κάθε γενιάς, συνοδευόμενη από ένα διάγραμμα τύπου timeline για την καλύτερη οπτική κατανόηση της εξέλιξης αυτής.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας του 5G, επικεντρώνοντας στις τεχνολογίες που το υποστηρίζουν, όπως το mmWave, το Massive MIMO και το Network Slicing.

Στην τρίτη ενότητα του κεφαλαίου, εξετάζονται οι απαιτήσεις για δίκτυα εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, εστιάζοντας στην ανάγκη για άμεσες ανταποκρίσεις σε εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, χειρουργική από απόσταση και βιομηχανικός αυτοματισμός. Στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχει μια συγκριτική ανάλυση της καθυστέρησης μεταξύ 4G και 5G, αναδεικνύοντας τις βελτιώσεις που προσφέρει το 5G.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εφαρμογές του 5G

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζονται οι εφαρμογές του 5G σε διάφορους τομείς. Αρχικά, αναλύεται πώς το 5G επηρεάζει τον βιομηχανικό αυτοματισμό και το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), φέρνοντας επανάσταση στην παραγωγή και στην αποδοτικότητα των διαδικασιών. Στη συνέχεια, διερευνάται η συμβολή του 5G στην ανάπτυξη αυτόνομων οχημάτων και έξυπνων πόλεων, με έμφαση στη μείωση της καθυστέρησης που υποστηρίζει τις έξυπνες μεταφορές.

Η επόμενη ενότητα του κεφαλαίου αφιερώνεται στις υπηρεσίες υγείας και την τηλεχειρουργική, εστιάζοντας στη σημασία των δικτύων εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης στην υγειονομική περίθαλψη. Ακολουθεί μια συζήτηση σχετικά με την επίδραση της καθυστέρησης στην εμπειρία του χρήστη σε εφαρμογές παιχνιδιών και ψυχαγωγίας σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, γίνεται αναφορά σε άλλες εφαρμογές του 5G χωρίς λεπτομερή ανάλυση, παρέχοντας μια συνολική εικόνα των δυνατοτήτων της τεχνολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μεθοδολογία και Σχεδιασμός Πειραμάτων

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της απόδοσης του 5G. Περιγράφεται το πειραματικό περιβάλλον, περιλαμβάνοντας τον εξοπλισμό και το λογισμικό που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της καθυστέρησης. Η ανάλυση των δεδομένων εξετάζεται στη συγκεκριμένη περιοχή όπου διεξάγονται τα πειράματα, με έμφαση στις κεραίες και τη δομή του δικτύου.

Αναπτύσσονται 3 σενάρια πειραμάτων (test cases), περιλαμβάνοντας μετρήσεις με μεγάλο όγκο δεδομένων, όπως η μεταφόρτωση βίντεο. Επιλέγονται οι παράμετροι και οι μεταβλητές που αναλύονται, όπως η απόσταση από τον πύργο της υπό ανάλυσης κεραίας και η χρήση εύρους ζώνης. Η ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει μεθόδους στατιστικής ανάλυσης και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Τέλος, εξετάζεται η προσομοίωση, συνδυάζοντας θεωρητικά (μαθηματικά μοντέλα) και πρακτικά (εφαρμογές) στοιχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα πειράματα, με έμφαση στην απόδοση και την καθυστέρηση σε διαφορετικές συνθήκες. Πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση της απόδοσης του 5G σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, όπως το 4G, ενώ αξιολογούνται τα ευρήματα σε σύγκριση με άλλα έργα και ερευνητικά δεδομένα.

Η ερμηνεία των ευρημάτων επικεντρώνεται στο τι αποκαλύπτουν τα αποτελέσματα σε σχέση με τις θεωρητικές προσδοκίες, εντοπίζοντας τα σημεία σύγκλισης και απόκλισης. Μέσα από αυτήν την ανάλυση, αναδεικνύονται οι επιδόσεις του 5G και η συμβολή του στην επίτευξη των στόχων που σχετίζονται με τις απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής απόδοσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συζήτηση, Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα κύρια συμπεράσματα από την ανάλυση της απόδοσης των δικτύων 5G. Συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της μελέτης, επισημαίνοντας τις περιοχές όπου το 5G παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά και τα σημεία που παρατηρούνται περιθώρια βελτίωσης.

Αναφέρονται οι περιορισμοί της μελέτης, με έμφαση στις προκλήσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της έρευνας, όπως τεχνικά ζητήματα ή περιορισμοί στο πειραματικό περιβάλλον. Παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, εξετάζοντας πιθανές κατευθύνσεις που θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στο πεδίο της τεχνολογίας 5G, όπως η διερεύνηση των δυνατοτήτων της τεχνητής νοημοσύνης και του edge computing για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των δικτύων.

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στην κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τις ασύρματες επικοινωνίες και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Από την εμφάνιση της πρώτης γενιάς (1G) μέχρι την τρέχουσα τεχνολογία 5G, οι εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα έχουν αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε και αλληλεπιδρούμε με το περιβάλλον μας. Κάθε γενιά προσέφερε βελτιώσεις στην ταχύτητα, την ποιότητα και την κάλυψη των δικτύων, ενώ η τεχνολογία 5G υπόσχεται να φέρει επανάσταση με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και αυξημένη χωρητικότητα. Η κατανόηση αυτών των εξελίξεων είναι κρίσιμη για τη διερεύνηση της απόδοσης και των εφαρμογών του 5G, εστιάζοντας στις τεχνολογίες που το υποστηρίζουν και στις απαιτήσεις που προκύπτουν για εφαρμογές που απαιτούν άμεσες ανταποκρίσεις.

1.1 Εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες και δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας έχει καταγράψει σημαντική πρόοδο από την πρώτη γενιά (1G) έως την πέμπτη (5G) και οσονούπω έκτη γενιά (6G). Η τεχνολογία 1G, που εισήχθη τη δεκαετία του 1980, προσέφερε αναλογική επικοινωνία, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να πραγματοποιούν φωνητικές κλήσεις χωρίς καλώδια, αλλά με περιορισμένες δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων.

Με την είσοδο της 2G, στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η ψηφιακή τεχνολογία άλλαξε τον τρόπο που επικοινωνούμε. Η 2G εισήγαγε την υπηρεσία SMS και βελτίωσε την ποιότητα ήχου, καθώς και την ασφάλεια των κλήσεων, μέσω κωδικοποίησης δεδομένων. Αυτή η γενιά αποτέλεσε το θεμέλιο για τις επόμενες εξελίξεις, επιτρέποντας την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών.

Η 3G, που εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000, προσέφερε σημαντική αύξηση της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων, επιτρέποντας τη χρήση πολυμέσων, όπως

βίντεο κλήσεις και πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η 3G ενσωμάτωσε επίσης βελτιωμένες τεχνολογίες όπως το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), προσφέροντας μεγαλύτερη χωρητικότητα και καλύτερη κάλυψη.

Με την είσοδο της 4G, η οποία κυριάρχησε στη δεκαετία του 2010, παρατηρήθηκε περαιτέρω βελτίωση στην ταχύτητα και την ποιότητα των υπηρεσιών. Η 4G υποστήριξε την ταχεία μεταφορά δεδομένων, επιτρέποντας τη μετάδοση HD βίντεο και τη χρήση εφαρμογών που απαιτούν υψηλές ταχύτητες, όπως τα online παιχνίδια και οι υπηρεσίες streaming. Η τεχνολογία LTE (Long-Term Evolution) αποτέλεσε τη βάση της 4G, προσφέροντας ταχύτητες που πολλαπλασιάζουν αυτές της 3G.

Η μετάβαση από 1G σε 4G αναδεικνύει την αδιάκοπη πρόοδο και καινοτομία στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, θέτοντας τα θεμέλια για την επόμενη γενιά, το 5G, που υπόσχεται να επαναστατήσει τις επικοινωνίες με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και αυξημένες δυνατότητες.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας βασικών στοιχείων από τεχνολογία 1G μέχρι και 5G [41].

ΓΕΝΙΑ	ΕΤΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΚΥΡΙΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
1G	1980s	Αναλογική	Φωνητικές κλήσεις	2.4 kbps
2G	1990s	Ψηφιακή	SMS, βελτίωση ποιότητας ήχου, κωδικοποίηση	10-100 kbps
3G	2000s	WCDMA, CDMA2000	Βίντεο κλήσεις, πρόσβαση στο διαδίκτυο	200 kbps - 2 Mbps
4G	2010s	LTE	HD βίντεο, online gaming, ταχύτατη πρόσβαση	5-100 Mbps
5G	2020s	NR (New Radio)	Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, IoT, αυτόνομα οχήματα	50 Mbps - 10 Gbps

Πίνακας 1.1 Συνοπτική Ιστορική Αναφορά 3GPP για 1G μέχρι 5G [32][33]



Εικόνα 1.1 Χρονική αναπαράσταση εξέλιξης τηλεπικοινωνιακών δικτύων από 1G ως 6G

1.2 Αρχές λειτουργίας του 5G

Οι βασικές αρχές λειτουργίας του 5G, όπως περιγράφονται στο έγγραφο [46], υποστηρίζονται από διάφορες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές σχεδιασμένες για να επιτύχουν υψηλότερες ταχύτητες, χαμηλότερη καθυστέρηση και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτές είναι οι κύριες τεχνολογίες που συνεισφέρουν στην επίτευξη αυτών των στόχων.

- **Χρήση Κυμάτων Χιλιοστού (mm-Wave):** Το 5G χρησιμοποιεί φάσμα συχνοτήτων πάνω από τα 24 GHz, γνωστό ως φάσμα χιλιοστομετρικών κυμάτων, το οποίο προσφέρει μεγάλη εύρος ζώνης για να καλύψει την αυξημένη ανάγκη σε ταχύτητες δεδομένων
- **Μαζική MIMO:** Η τεχνολογία Multiple Input Multiple Output (MIMO) χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό κεραιών, επιτρέποντας τη διαχείριση πολλαπλών ταυτόχρονων συνδέσεων με αυξημένη αποδοτικότητα και σταθερότητα, ακόμα και σε πυκνά δίκτυα [47].
- **Beamforming:** Πρόκειται για την κατευθυνόμενη μετάδοση σήματος σε συγκεκριμένες περιοχές, η οποία βελτιώνει την ισχύ σήματος και μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των χρηστών, συμβάλλοντας στη βελτίωση της εμπειρίας και της απόδοσης του δικτύου
- **Ευέλικτα Air Interfaces:** Το 5G προσφέρει ευέλικτα πρωτόκολλα για τη διαχείριση των διαφορών στις υπηρεσίες (όπως eMBB, mMTC και URLLC), που καλύπτουν από απλές συσκευές IoT μέχρι εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης όπως η αυτόνομη οδήγηση
- **Αυξημένη Πυκνότητα Δικτύου (Network Densification):** Η αύξηση των σταθμών βάσης μικρής εμβέλειας επιτρέπει την καλύτερη κάλυψη και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε αστικές περιοχές, διευκολύνοντας τη μετάδοση σε υψηλές ταχύτητες
- **Εικονικοποίηση και Network Slicing:** Η χρήση τεχνολογιών όπως το SDN και το NFV επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών δικτύων (network slices) με συγκεκριμένες παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, ώστε να ικανοποιούνται διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσιών σε ένα ενιαίο φυσικό δίκτυο.

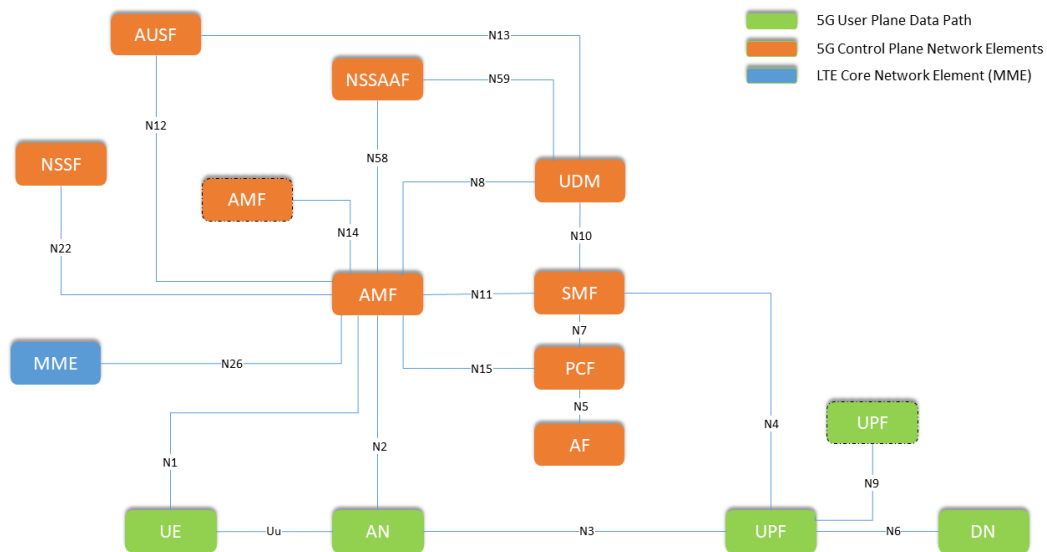
1.3 Αρχιτεκτονική 5G

Στον πυρήνα λειτουργίας του 5G, σύμφωνα με το πρότυπο της 3GPP[30], είναι δομημένο τόσο το λογικό όσο και το φυσικό μοντέλο του δικτύου. Στο λογικό μοντέλο του 5G περιγράφονται οι λειτουργικές οντότητες και η εικονική αρχιτεκτονική του συνολικού δικτύου. Από την άλλη πλευρά, το φυσικό μοντέλο αφορά τον εξοπλισμό και την υλοποίηση του 5G σε επίπεδο υλικού και εξοπλισμού. Γενικά μιλώντας το λογικό μοντέλο καθορίζει πώς λειτουργούν οι υπηρεσίες, δίνει προτεραιότητα σε υπηρεσίες και δεδομένα και περιλαμβάνει υπηρεσίες. Από την άλλη, το φυσικό μοντέλο υλοποιείται με κατάλληλες υποδομές και φυσικό εξοπλισμό, παραδείγματος χάρη περιλαμβάνοντας κεραίες, δίκτυα οπτικών ινών, και άλλο εξοπλισμό [48].

1.3.1 Λογικό Μοντέλο του 5G

Παρακάτω περιγράφονται μερικά βασικά στοιχεία του λογικού μοντέλου του δικτύου.

- **Αρχιτεκτονική διαχωρισμού επιπέδων:** Υπάρχουν στο πυρήνα του δικτύου δύο βασικά διαχωριστικά στοιχεία, το Control Plane και το User Plane. Το User Plane διαχειρίζεται τη μετάδοση των δεδομένων χρήστη. Από την άλλη, το Control Plane διαχειρίζεται τη σηματοδότηση και τις λειτουργίες ελέγχου του δικτύου, όπως η αυθεντικοποίηση και η διαχείριση κινητικότητας. Το Control Plane στο 5G είναι πλήρως διαχωρισμένο από το User Plane ανόμοια με τις παλαιότερες αρχιτεκτονικές.
- **SDN (Software-Defined Networking) και NFV (Network Function Virtualization):** Το 5G στηρίζεται σε λογισμικές λειτουργίες δικτύου που επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση του δικτύου, χωρίς να απαιτούνται μεγάλες αλλαγές στον φυσικό εξοπλισμό. Συνεπώς αυτό το κάνει πολύ ευέλικτο και ευκολά αναβαθμίσιμο και παραμετροποιήσιμο.
- **Μοντέλο λειτουργίας υπηρεσιών:** Το 5G Core επιτρέπει να ενεργοποιηθούν εξειδικευμένα μοντέλα ανάλογα τις ανάγκες. Τέτοια μοντέλα λειτουργίας δικτύου μπορεί να είναι το eMBB (Enhanced Mobile Broadband) που υποστηρίζει υψηλές ταχύτητες και μεγάλες ροές δεδομένων (π.χ., HD streaming), το mMTC (Massive Machine-Type Communication) που υποστηρίζει τη μαζική σύνδεση συσκευών IoT και το uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication) κατάλληλο για εφαρμογές με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία (π.χ., αυτόνομα οχήματα). Περισσότερα για αυτές τις λειτουργίες αναλύονται στο κεφάλαιο 1.3.



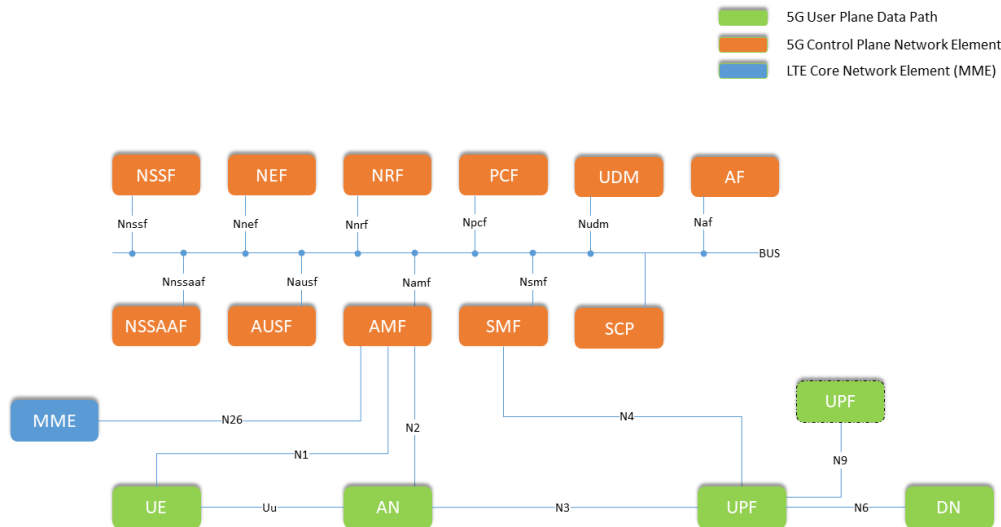
Εικόνα 1.2 Σχηματική αναπαράσταση λογικού μοντέλου του 5G Core [49]

1.3.2 Φυσικό Μοντέλο του 5G

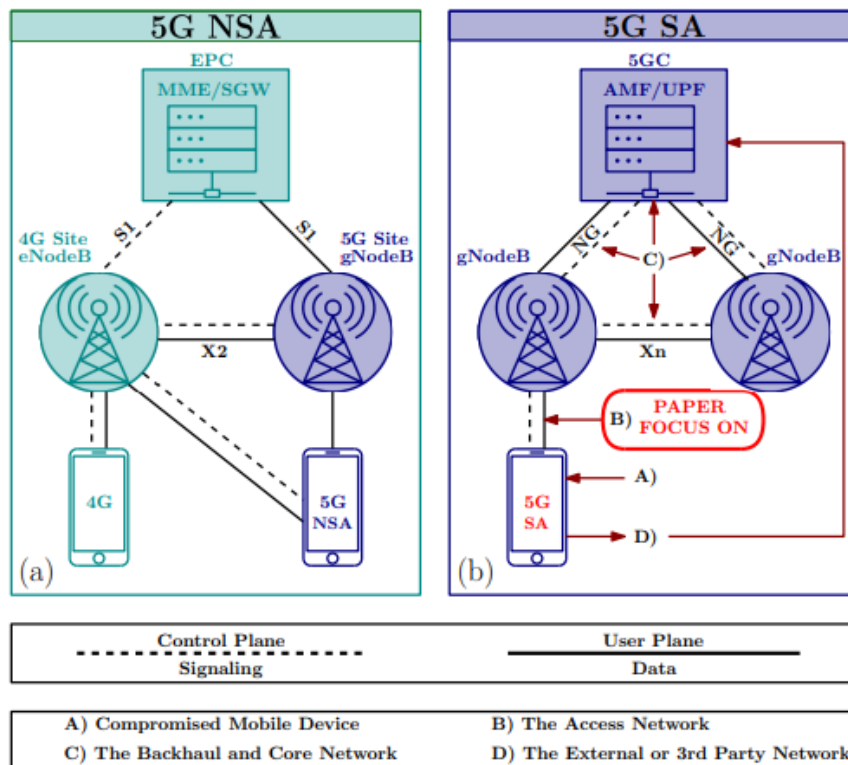
Το φυσικό μοντέλο του δικτύου 5G περιλαμβάνει [48]:

- Φάσμα Συχνοτήτων: Το 5G χρησιμοποιεί τρεις κατηγορίες συχνοτήτων:
 - Χαμηλές συχνότητες (sub-1 GHz): Π.χ., 700 MHz. Παρέχουν ευρεία κάλυψη και καλή διείσδυση σε κτίρια.
 - Μεσαίες συχνότητες (1-6 GHz): Π.χ., 3.5 GHz. Παρέχουν ισορροπία μεταξύ ταχύτητας και κάλυψης.
 - Υψηλές συχνότητες (mmWave, 24-100 GHz): Παρέχουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, αλλά περιορισμένη κάλυψη.
- Υποδομή ραδιοπρόσβασης (RAN - Radio Access Network)
 - Το 5G NR (New Radio) είναι το νέο πρότυπο για την ασύρματη πρόσβαση. Αποτελείται από:
 - Κεραίες gNodeB (gNB): Νέου τύπου κεραίες που αντικαθιστούν τις κεραίες eNodeB που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο 4G (LTE).
 - Small ή Micro Cells: Μικρές κυψέλες που τοποθετούνται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές για να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου.

- Massive MIMO (Multiple Input, Multiple Output): Δομή κεραιών που χρησιμοποιεί πολλές κεραιές για να αυξήσει την ταχύτητα και τη χωρητικότητα.



Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση του 5G Core με βάση την φυσική υλοποίηση [49]



Εικόνα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση του 5G με βάση την φυσική υλοποίηση [52]

1.3.3 Υλοποίηση δικτύου 5G SA

Το 5G Standalone (SA) είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου 5G που βασίζεται εξ ολοκλήρου σε ένα νέο, ανεξάρτητο δίκτυο πυρήνα (5G Core Network), χωρίς να χρειάζεται εξάρτηση από υπάρχον δίκτυο 4G (LTE). Σε αυτή τη μορφή το 5G λειτουργεί ως πλήρως αυτόνομο δίκτυο. Για υλοποίηση 5G Standalone (SA) υπάρχουν οι ακόλουθες παραλλαγές [6]:

- **SA Option 1:** Αρχιτεκτονική που βασίζεται αποκλειστικά στο 4G, επίσης γνωστή ως Evolved Packet Core (EPC).
- **SA Option 2:** Σενάριο ανάπτυξης όπου ο σταθμός βάσης 5G (5G base station) συνδέεται απευθείας με το 5G core network χωρίς εξάρτηση από το δίκτυο 4G.
- **SA Option 5:** Αναβάθμιση του eNodeB (από το 4G) σε επόμενη γενιά eNodeB, ώστε να μπορεί να συνδεθεί με το 5G core. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει τη σταδιακή μετάβαση αλλά παρουσιάζει δυσκολίες στις επιδόσεις λόγω περιορισμών του εξοπλισμού 4G.
- **SA Option 6:** Αρχιτεκτονική που δεν θεωρείται πρότυπη από τον οργανισμό 3GPP, καθώς προβλέπει τη σύνδεση των σταθμών βάσης 5G με τον πυρήνα του 4G, το οποίο δεν θεωρείται αποδοτικό

1.3.4 Υλοποίηση δικτύου 5G NSA

Εκτός της υλοποίησης Standalone (SA), είναι εφικτή η υλοποίηση του δικτύου 5G σε Non-Standalone (NSA) μορφή. Η υλοποίηση βασίζεται στην υπάρχουσα υποδομή του 4G δικτύου. Υπάρχουν 3 βασικές υλοποιήσεις NSA με τη καθεμιά από αυτές να έχει μερικές παραλλαγές [6]:

- **NSA Option 3:** Βασίζεται στον πυρήνα του 4G που εξελίσσεται και ονομάζεται Evolve Packet Core (EPC)
 - **NSA Option 3:** Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων βρίσκεται στη βάση του 4G
 - **NSA Option 3A:** Ομοίως με την Option 3, αλλά με παραλλαγές στον έλεγχο.
 - **NSA Option 3X:** Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων μεταφέρεται στη βάση του 5G. Θα αναλυθεί παρακάτω.

- **NSA Option 4:** Παρέχει διπλή συνδεσιμότητα με το 5G (NR gNB) ως κύριο κόμβο και το LTE (eNB) ως δευτερεύοντα. Χρησιμοποιείται ο πυρήνας δικτύου 5G.
 - NSA Option 4: Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων είναι στη βάση του 5G.
 - NSA Option 4A: Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων βρίσκεται στον πυρήνα του 5G.
- **NSA Option 7:** Η εξέλιξη της Option 3, όπου ο πυρήνας αναβαθμίζεται σε 5G Core.
 - **NSA Option 7:** Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων βρίσκεται στη βελτιωμένη βάση του 4G.
 - **NSA Option 7A:** Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων είναι στον πυρήνα του 5G.
 - **NSA Option 7X:** Το σημείο διαχωρισμού δεδομένων είναι στη βάση του 5G

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην υλοποίηση με ονομασία Option 3X. Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες παραλλαγές παγκοσμίως της Non-Standalone (NSA) αρχιτεκτονικής και βασίζεται στην ταυτόχρονη χρήση του LTE (4G) και του 5G NR για τη μεταφορά δεδομένων. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική ισχύουν τα ακόλουθα:

- Το LTE eNodeB λειτουργεί ως ο κύριος κόμβος (Master Node) και αναλαμβάνει:
 - Τον έλεγχο της σύνδεσης (Control Plane).
 - Την εκκίνηση και τη συντήρηση της σύνδεσης στο δίκτυο.
- Το 5G NR gNodeB λειτουργεί ως δευτερεύων κόμβος (Secondary Node) και αναλαμβάνει:
 - Τη μεταφορά των περισσότερων δεδομένων (User Plane), παρέχοντας μεγαλύτερες ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση.
 - Οι LTE και 5G NR κεραίες συνεργάζονται μέσω του X2 interface, το οποίο επιτρέπει τη σηματοδότηση και τη μεταφορά δεδομένων.

1.3.5 Dynamic Spectrum Sharing (DSS)

Τα LTE δίκτυα αναβαθμίστηκαν μέσω λογισμικού για να υποστηρίζουν 5G σε κοινό φάσμα συχνοτήτων. Το ίδιο φάσμα (π.χ., 700 MHz, 1800 MHz) μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για LTE όσο και για 5G [15][16].

Συνεργασία eNodeB και gNodeB:

- Οι LTE σταθμοί βάσης (eNodeBs) συνεργάζονται με τις υπάρχουσες ή τις νέες 5G NR κεραίες (gNodeBs) όπου είναι διαθέσιμες.

Κάλυψη Περιοχών Χωρίς 5G NR:

- Σε περιοχές με μόνο LTE υποδομή, το DSS επιτρέπει τη μετάδοση 5G υπηρεσιών χωρίς επιπλέον φυσικές κεραίες 5G NR.

Πλεονεκτήματα Option 3X με LTE Κεραίες

- Απλότητα Υλοποίησης: Δεν χρειάζεται πλήρης αναβάθμιση του εξοπλισμού.
- Γρήγορη Ανάπτυξη: Οι LTE κεραίες είναι ήδη εγκατεστημένες και καλύπτουν μεγάλες περιοχές.
- Κόστος-Αποδοτικότητα: Το DSS και οι LTE κεραίες μειώνουν το κόστος υλοποίησης.

Περιορισμοί

- Εξάρτηση από LTE: Το δίκτυο παραμένει NSA, κάτι που σημαίνει ότι το 5G εξαρτάται από το LTE για τη σηματοδότηση.
- Περιορισμένες Ταχύτητες: Σε περιοχές όπου χρησιμοποιούνται μόνο LTE κεραίες, οι ταχύτητες 5G μπορεί να είναι χαμηλότερες από αυτές ενός πλήρους 5G NR δικτύου.
- Διαμοιρασμός Φάσματος: Το LTE και το 5G NR ανταγωνίζονται για το ίδιο φάσμα, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση.

1.4 Απαιτήσεις απόδοσης

Το 5G υποστηρίζει τρεις βασικούς τύπους υπηρεσιών που αφορούν: α) Ενισχυμένη Κινητή Ευρυζωνικότητα (eMBB), β) Εξαιρετικά Αξιόπιστες και Χαμηλής Καθυστερήσης Επικοινωνίες (URLLC) και γ) Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανών (mMTC) [7]. Κάθε τύπος υπηρεσίας έχει διαφορετικές απαιτήσεις που προσδιορίζονται από τους βασικούς δείκτες απόδοσης. Οι δείκτες αυτοί διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αξιολόγηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας των δικτύων 5G. Ακολουθεί η παρουσίαση των KPIs του 5G για τις βασικές υπηρεσίες [17][18]:

Ενισχυμένη Κινητή Ευρυζωνικότητα (eMBB):

Ρυθμός Δεδομένων (Throughput): Η eMBB εστιάζει στην παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων στους χρήστες. Ο KPI εδώ είναι ο μέγιστος επιτεύξιμος ρυθμός, που αντιπροσωπεύει τον κορυφαίο ρυθμό δεδομένων που μπορεί να βιώσει ένας χρήστης.

Καθυστερήση: Η χαμηλή καθυστέρηση είναι ουσιαστική για εφαρμογές όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR), η εικονική πραγματικότητα (VR) και τα παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο. Ο KPI για την καθυστέρηση στην eMBB είναι συνήθως λιγότερο από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου.

Εξαιρετικά Αξιόπιστες και Χαμηλής Καθυστερήσης Επικοινωνίες (URLLC):

Αξιοπιστία: Η URLLC στοχεύει σε κρίσιμες εφαρμογές, όπως η βιομηχανική αυτοματοποίηση, η τηλεχειρουργική και τα αυτόνομα οχήματα. Ο KPI για την αξιοπιστία είναι εξαιρετικά χαμηλή απώλεια πακέτων (συνήθως λιγότερο από 1%).

Καθυστερήση: Η URLLC απαιτεί εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (λιγότερο από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου) για να εξασφαλίσει άμεση ανταπόκριση.

Μαζικές Επικοινωνίες Τύπου Μηχανών (mMTC):

Πυκνότητα Συνδέσεων: Η mMTC ασχολείται με τη σύνδεση ενός τεράστιου αριθμού IoT συσκευών. Ο KPI εδώ είναι ο μέγιστος αριθμός ταυτόχρονων συνδέσεων συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Ενεργειακή Αποδοτικότητα: Για να υποστηριχθούν οι συσκευές IoT που λειτουργούν με μπαταρία, τα δίκτυα 5G στοχεύουν σε υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα. Ο KPI μετράται σε bits ανά joule (bits/Joule).

1.5 Μετρικές απόδοσης

Στα δίκτυα 5G, οι βασικές μετρικές απόδοσης, όπως το jitter, ο χρόνος μετάβασης δεδομένων (RTT), το εύρος ζώνης (bandwidth), η καθυστέρηση (latency) και τα ποσοστά σφάλματος (error rates), είναι κρίσιμες για τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών. Παρακάτω παρουσιάζεται μια μαθηματική ανάλυση αυτών των παραμέτρων και των αλληλεπιδράσεών τους:

1.5.1 Καθυστέρηση

Η καθυστέρηση αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για να μεταδοθούν τα δεδομένα από την πηγή στον προορισμό και πίσω. Στα δίκτυα 5G, η καθυστέρηση επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι καθυστερήσεις επεξεργασίας, οι χρόνοι μετάδοσης και οι χρόνοι διάδοσης. Το latency (καθυστέρηση) ορίζεται στο έγγραφο [34] ως ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ του σταθμού βάσης gNB και της κινητής συσκευής UE. Το Latency μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο:

$$\tau = \tau_1 + p(\tau_2 + \tau_3)$$

Όπου:

- τ_1 είναι ο χρόνος της αρχικής μετάδοσης δεδομένων και περιλαμβάνει:
 - τον χρόνο που χρειάζεται ο αποστολέας (π.χ. σταθμός βάσης ή συσκευή) να επεξεργαστεί και να προετοιμάσει τα δεδομένα για μετάδοση.
 - Την ευθυγράμμιση του πλαισίου (frame alignment) ώστε να αρχίσει η μετάδοση.
 - Τον χρόνο μετάδοσης των δεδομένων μέσω του δικτύου μέχρι να φτάσουν στον παραλήπτη.
- τ_2 είναι ο χρόνος αποστολής αιτήματος HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request)

- Το HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της μετάδοσης δεδομένων.

- τ_3 είναι ο χρόνος επαναμετάδοσης
- p είναι η πιθανότητα επαναμετάδοσης

1.5.2 Jitter

Το jitter αντιπροσωπεύει τη μεταβλητότητα στους χρόνους άφιξης των πακέτων. Υψηλό jitter μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια πακέτων και να επηρεάσει εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Υπολογίζεται ως η διακύμανση ή η τυπική απόκλιση των χρόνων άφιξης πακέτων σύμφωνα με τον τύπο [50]:

$$J = |D(i) - D(i - 1)|$$

Όπου:

- $D(i)$ είναι η καθυστέρηση του πακέτου i
- $D(i-1)$ είναι η καθυστέρηση του προηγούμενου πακέτου.

1.5.3 Εύρος ζώνης (Bandwidth)

Το εύρος ζώνης αναφέρεται στο μέγιστο ρυθμό με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα σε ένα δίκτυο. Μετρείται συνήθως σε bits ανά δευτερόλεπτο (bps). Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει το "Bandwidth" στο πλαίσιο της οδηγίας IMT-2020 του ITU (International Telecommunication Union) που υλοποιείται με το δίκτυο 5G [34] ορίζεται ως εξής:

$$BW_{max} = \sum_{i=1}^N BW_i$$

- BW_{max} είναι το μέγιστο συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος
- BW_i είναι το εύρος ζώνης κάθε επιμέρους φορέα συχνότητας (component carrier - CC).
- N είναι ο αριθμός των συγκεντρωμένων φορέων (CCs)

1.5.4 Ποσοστά Σφάλματος (Error Rates)

Τα ποσοστά σφάλματος δείχνουν τη συχνότητα εμφάνισης λαθών στα μεταδιδόμενα δεδομένα. Το Bit Error Rate (BER) είναι μια κοινή μετρική και ορίζεται ως [51]:

$$BER = \frac{\text{Αριθμος λανθασμενων bits}}{\text{Συνολικος αριθμος μεταδιδομενων bits}}$$

Στα συστήματα 5G, τα ποσοστά σφάλματος επηρεάζονται από παράγοντες όπως ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR), τα σχήματα διαμόρφωσης και οι συνθήκες του καναλιού.

1.5.5 SNR

Το SNR (Signal-to-Noise Ratio) ή Λόγος Σήματος προς Θόρυβο είναι μια μετρική που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία σήματος και στις τηλεπικοινωνίες για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της ισχύος του σήματος που θέλουμε να λάβουμε (ή μεταδώσουμε) και της ισχύος του θορύβου που το συνοδεύει.

Ο λόγος SNR εκφράζεται μαθηματικά ως: $SNR = \frac{P_{noise}}{P_{signal}}$

Όπου:

- P_{signal} : Η ισχύς του σήματος (συνήθως σε Watts ή dBm).
- P_{noise} : Η ισχύς του θορύβου (συνήθως στην ίδια μονάδα μέτρησης).

Το SNR μπορεί επίσης να εκφραστεί σε ντεσιμπέλ (dB), χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{noise}}{P_{signal}} \right) dB$$

Υψηλό SNR: Όταν το SNR είναι υψηλό, το σήμα είναι πολύ ισχυρότερο από τον θόρυβο. Αυτό συνεπάγεται καλή ποιότητα επικοινωνίας ή επεξεργασίας δεδομένων.

Χαμηλό SNR: Όταν το SNR είναι χαμηλό, ο θόρυβος είναι συγκρίσιμος ή ισχυρότερος από το σήμα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει απώλειες, παρεμβολές ή υποβάθμιση της απόδοσης.

Υπάρχουν αρκετοί σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές SNR. Παρακάτω φαίνονται οι πιο βασικοί:

- **Ισχύς εκπομπής:** Ένα ισχυρότερο σήμα αυξάνει το SNR.
- **Απόσταση:** Μεγαλύτερες αποστάσεις μειώνουν το SNR, καθώς το σήμα εξασθενεί λόγω διάδοσης.
- **Περιβαλλοντικός θόρυβος:** Θόρυβος από παρεμβολές ή θερμικός θόρυβος μπορεί να μειώσει το SNR.
- **Εξοπλισμός:** Η ποιότητα των δεκτών και των κεραιών μπορεί να επηρεάσει το SNR.

Ένα $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ σημαίνει ότι η ισχύς του σήματος είναι 100 φορές μεγαλύτερη από την ισχύ του θορύβου ($10^{\frac{20}{10}} = 100$)

Ένα $\text{SNR} = 0 \text{ dB}$ σημαίνει ότι η ισχύς του σήματος είναι ίση με την ισχύ του θορύβου.

Όπως είναι εύλογο, το SNR αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη ποιοτικής και αξιόπιστης επικοινωνίας σε δίκτυα όπως το 5G.

Συνολικά όλες αυτές οι μετρικές είναι αλληλεξαρτώμενες. Για παράδειγμα:

- Η αύξηση του εύρους ζώνης μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση, αλλά ενδέχεται να αυξήσει τα ποσοστά σφάλματος αν το SNR είναι χαμηλό.
 - Υψηλό jitter μπορεί να επηρεάσει την αντιλαμβανόμενη καθυστέρηση και να αυξήσει την απώλεια πακέτων, επηρεάζοντας συνολικά την απόδοση του δικτύου.
- [31]

Η κατανόηση και η μαθηματική μοντελοποίηση αυτών των παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση των δικτύων 5G και την εξασφάλιση αξιόπιστης επικοινωνίας.

1.6 Διαφορά μεταξύ 4G και 5G όσον αφορά την καθυστέρηση

Η σύγκριση των τεχνολογιών 4G και 5G είναι κρίσιμη για την κατανόηση των δυνατοτήτων των σύγχρονων δικτύων κινητής τηλεφωνίας και του ρόλου τους στη συνδεσιμότητα. Το 4G, που εισήγαγε μεγάλες ταχύτητες και βελτιωμένη εμπειρία χρήστη, αποτέλεσε το θεμέλιο για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο και οι υπηρεσίες βασισμένες στο cloud. Ωστόσο, η τεχνολογία 5G, με ακόμα υψηλότερες ταχύτητες, ελάχιστη καθυστέρηση και αυξημένη χωρητικότητα, προορίζεται να υποστηρίξει νέες καινοτομίες, όπως η συνδεσιμότητα IoT, οι έξυπνες πόλεις και οι υπηρεσίες αυτόνομων συστημάτων.

Οι πληροφορίες που ακολουθούν βασίζονται σε μια μελέτη που διεξήχθη από την ITU (International Telecommunication Union), έναν εξειδικευμένο οργανισμό των Ηνωμένων Εθνών που ασχολείται με τις τηλεπικοινωνίες. Η μελέτη αυτή παρέχει μια αντικειμενική και λεπτομερή σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών 4G και 5G.

Χαρακτηριστικό	4G	5G
Ταχύτητα	Έως 1 Gbps	10+ Gbps
Καθυστέρηση (latency)	10-50 ms	1 ms
Απόδοση Φάσματος	Μικρότερη	Βελτιστοποιημένη
Σύνδεση Συσκευών	Περιορισμένη (περίπου 10,000/km ²)	Υποστηρίζει εκατομμύρια συσκευές/km ²
Εφαρμογές	Βασικό διαδίκτυο, βίντεο, VoIP	IoT, AR/VR, αυτόνομα οχήματα, έξυπνες πόλεις

Πίνακας 1.2 Αντιπαράβολή 4G με 5G σε διάφορες μετρικές ενδιαφέροντος[3][8]

Συνεπώς, η μετάβαση από το 4G στο 5G σηματοδοτεί μια σημαντική τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, καθιστώντας δυνατές εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες και άμεση απόκριση. Το 5G αναμένεται να ενισχύσει την απόδοση των δικτύων, να επιτρέψει τη σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών και να υποστηρίξει την ανάπτυξη καινοτομιών, όπως τα αυτόνομα οχήματα και οι έξυπνες πόλεις. Αυτή η εξέλιξη όχι μόνο θα μεταμορφώσει τη διασύνδεση αλλά θα διαδραματίσει επίσης κεντρικό ρόλο στην ψηφιακή εποχή, επιταχύνοντας τις διαδικασίες μετασχηματισμού της σύγχρονης κοινωνίας [8].

1.7 Σχετικές Εργασίες

Υπάρχουν διάφορες εργασίες που διερευνούν την απόδοση του δικτύου 5G για διάφορες περιπτώσεις χρήσης όπως γίνεται και στην παρούσα. Για παράδειγμα, οι El-Saleh et al., [10] αναλύουν την απόδοση των υπηρεσιών κινητής ευρυζωνικότητας (MBB) σε αστική περιοχή (Cyberjaya, Μαλαισία), συγκεντρώνοντας δεδομένα μέσω δοκιμών πεδίου σε δίκτυα 3G και 4G από διάφορους παρόχους (Maxis, Celcom, Digi, U Mobile, Unifi). Η αξιολόγηση των υπηρεσιών βασίζεται σε μετρήσεις, όπως ποιότητα σήματος, ρυθμούς κατερχόμενης/ανερχόμενης μετάδοσης, ping και handover, σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους. Παρέχει προτάσεις βελτίωσης δικτύου και παρουσιάζει περιορισμούς της μελέτης για μελλοντική έρευνα. Το άρθρο [35] προσπαθεί να προσεγγίσει το ζήτημα του 5G από την άποψη κόστους-κέρδους. Η εργασία [36] προσεγγίζει παρόμοια ζητήματα με την παρούσα αλλά με πιο λίγες μετρικές. Η δημοσίευση [21] προσπαθεί να προσεγγίσει ανωμαλίες στο δίκτυο και να το αντιπαραβάλει με το δίκτυο 4G

Από την άλλη πλευρά η παρούσα προσεγγίζει τις βασικές μετρικές σε πραγματικές συνθήκες 5G NSA προσπαθώντας να επιβεβαιώσει μεν τις υπάρχουσες όμως δημιουργώντας ένα συνδυασμό σεναρίων ξεχωριστό από αυτές. Μια βασική διαφοροποίηση είναι ότι μελετάται η μεταφόρτωση δεδομένων προς το Διαδίκτυο (upload) και η τελική απόδοση που προσφέρεται στο χρήστη σε περιβάλλοντα επαρχίας σε υπάρχουσες υποδομές χωρίς χρήση νέων κεραιών για 5G, δηλαδή κεραιές gNB.

2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ 5G

Η τεχνολογία 5G αναμένεται να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις επιχειρήσεις και τη βιομηχανία, προσφέροντας εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου και ελάχιστη καθυστέρηση. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν την υιοθέτηση καινοτομιών όπως η αυτοματοποίηση μέσω τεχνητής νοημοσύνης, η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR) για εκπαίδευση προσωπικού, καθώς και η παρακολούθηση εφοδιαστικής αλυσίδας σε πραγματικό χρόνο. Η αύξηση της αποδοτικότητας και η ταχύτερη λήψη αποφάσεων θα αναδιαμορφώσουν σημαντικά τη βιομηχανία.

Παράλληλα, το 5G προωθεί την ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να παρακολουθούν απομακρυσμένα εξοπλισμό και να συλλέγουν δεδομένα σε μεγάλες ποσότητες και υψηλή ταχύτητα. Ειδικότερα, βιομηχανίες όπως η παραγωγή, οι μεταφορές και η υγειονομική περίθαλψη μπορούν να ωφεληθούν από τις δυνατότητες αυτοματοποίησης και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα, μειώνοντας τα κόστη και ενισχύοντας τη συνολική απόδοση των επιχειρήσεων. [19][20]

2.1 Βιομηχανικός αυτοματισμός και IoT

Η τεχνολογία 5G φέρνει επανάσταση στον βιομηχανικό αυτοματισμό, επιτρέποντας ταχύτατες συνδέσεις και ελάχιστη καθυστέρηση που απαιτούνται για τον συντονισμό αυτοματοποιημένων συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Μέσω του 5G, τα συστήματα παραγωγής και οι μηχανές σε μια βιομηχανική μονάδα μπορούν να επικοινωνούν και να αλληλεπιδρούν σε πολύ πιο αποδοτικά δίκτυα, βελτιώνοντας την ταχύτητα παραγωγής και την αξιοπιστία των εργασιών. Αυτή η υποδομή επιτρέπει την υιοθέτηση πιο ευέλικτων μοντέλων παραγωγής, τα οποία προσαρμόζονται άμεσα σε νέες ανάγκες χωρίς χειροκίνητες παρεμβάσεις.

Παράλληλα, το 5G ενισχύει την ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) σε βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών με

ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση. Οι αισθητήρες που ενσωματώνονται σε εξοπλισμό και συστήματα παραγωγής συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας σε πιο στοχευμένη ανάλυση και βελτιστοποίηση διαδικασιών. Οι επιχειρήσεις μπορούν έτσι να εντοπίζουν γρήγορα σημεία συμφόρησης, να προλαμβάνουν προβλήματα συντήρησης και να λαμβάνουν στρατηγικές αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα.

Επιπλέον, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις μπορούν να επωφεληθούν από το 5G για την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως η επαυξημένη και η εικονική πραγματικότητα (AR/VR), για την εκπαίδευση του προσωπικού και τη συντήρηση εξοπλισμού. Η χρήση αυτών των τεχνολογιών σε πραγματικό χρόνο συμβάλλει στην καλύτερη εκπαίδευση και στην ασφάλεια του προσωπικού, ενώ παράλληλα ενισχύει την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα των επιχειρήσεων.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης του 5G στον βιομηχανικό αυτοματισμό είναι στις έξυπνες μονάδες παραγωγής αυτοκινήτων. Σε μια τέτοια εγκατάσταση, τα ρομποτικά συστήματα παραγωγής, οι αισθητήρες και οι κινητές συσκευές συνδέονται μέσω 5G, επιτρέποντας τον συγχρονισμό των διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, εάν ένας αισθητήρας εντοπίσει αστοχία σε μια μηχανή, το 5G επιτρέπει την άμεση ειδοποίηση άλλων συστημάτων, ώστε να αναπροσαρμόσουν την παραγωγή και να προληφθούν καθυστερήσεις ή αστοχίες στην ποιότητα.

2.2 Αυτόνομα οχήματα και έξυπνες πόλεις

Το 5G διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη αυτόνομων οχημάτων, παρέχοντας την ταχύτητα και την αξιοπιστία που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία τους. Η χαμηλή καθυστέρηση του δικτύου επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων (V2V) και των υποδομών (V2I), διευκολύνοντας την αποφυγή συγκρούσεων και τη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας. Για παράδειγμα, ένα αυτόνομο όχημα μπορεί να λάβει δεδομένα για ένα εμπόδιο στον δρόμο και να προσαρμόσει την πορεία του μέσα σε χιλιοστά του δευτερολέπτου.

Στις έξυπνες πόλεις, το 5G υποστηρίζει την υλοποίηση δικτύων IoT που συνδέουν αισθητήρες, κάμερες, φανάρια και συστήματα διαχείρισης κυκλοφορίας. Αυτές οι

υποδομές επιτρέπουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο των κυκλοφοριακών συνθηκών, μειώνοντας τη συμφόρηση και βελτιώνοντας την ασφάλεια. Επιπλέον, η συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο βοηθά στην καλύτερη διαχείριση πόρων, όπως η ενέργεια και το νερό, καθιστώντας τις πόλεις πιο βιώσιμες.

Τέλος, το 5G επιτρέπει τη διασύνδεση αυτόνομων οχημάτων με υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, όπως ασθενοφόρα και πυροσβεστικά οχήματα. Η άμεση ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ οχημάτων και κέντρων διαχείρισης κρίσεων μειώνει τον χρόνο απόκρισης σε περιστατικά, ενώ παράλληλα βελτιώνει τον συντονισμό σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Με αυτόν τον τρόπο, το 5G συμβάλλει σε ασφαλέστερες και αποδοτικότερες αστικές μετακινήσεις.

2.3 Υπηρεσίες υγείας και τηλεχειρουργική

Το 5G φέρνει επανάσταση στις υπηρεσίες υγείας, επιτρέποντας τη γρήγορη και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων υψηλής ποιότητας, όπως εικόνες MRI ή άλλες διαγνωστικές εξετάσεις. Η άμεση ανταλλαγή αυτών των δεδομένων διευκολύνει την ταχύτερη διάγνωση και θεραπεία, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές. Επιπλέον, οι ασθενείς μπορούν να λαμβάνουν εξειδικευμένη φροντίδα μέσω τηλεϊατρικής χωρίς γεωγραφικούς περιορισμούς.

Στην τηλεχειρουργική, η χαμηλή καθυστέρηση του 5G είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει την ακριβή και άμεση εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων από εξειδικευμένους γιατρούς σε μεγάλη απόσταση. Οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να ελεγχθούν με ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τους κινδύνους και επεκτείνοντας τη δυνατότητα προηγμένων ιατρικών υπηρεσιών σε υποεξυπηρετούμενες περιοχές.

Επιπλέον, το 5G επιτρέπει τη σύνδεση ιατρικών συσκευών IoT για τη συνεχή παρακολούθηση της υγείας των ασθενών. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν ζωτικά σημεία σε πραγματικό χρόνο και να ειδοποιούν άμεσα το ιατρικό προσωπικό σε περίπτωση κρίσης, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της φροντίδας και σώζοντας ζωές.

2.4 Παιχνίδια και ψυχαγωγία σε πραγματικό χρόνο

Η τεχνολογία 5G μεταμορφώνει τον χώρο των παιχνιδιών και της ψυχαγωγίας σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλές ταχύτητες. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στους παίκτες να απολαμβάνουν παιχνίδια cloud gaming χωρίς διακοπές ή καθυστερήσεις, ανεξαρτήτως της συσκευής που χρησιμοποιούν. Ταυτόχρονα, η βελτιωμένη ροή δεδομένων διευκολύνει τις εφαρμογές επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας (AR/VR), προσφέροντας πιο καθηλωτικές εμπειρίες σε πραγματικό χρόνο.

Επιπλέον, το 5G διευρύνει τις δυνατότητες κοινωνικής αλληλεπίδρασης στην ψυχαγωγία. Πλατφόρμες live streaming και πολυμεσικά περιβάλλοντα όπως εικονικά συναυλιακά σόου γίνονται πιο προσβάσιμα και ρεαλιστικά. Οι χρήστες μπορούν να συμμετέχουν σε διαδραστικά γεγονότα ή να απολαμβάνουν περιεχόμενο υψηλής ανάλυσης 8K χωρίς προβλήματα buffering.

Τέλος, το 5G δίνει ώθηση στις πολυπαικτικές εμπειρίες, προσφέροντας πιο γρήγορες και αξιόπιστες συνδέσεις. Οι παίκτες μπορούν να συνδέονται και να συνεργάζονται σε πολύπλοκα σενάρια παιχνιδιών σε πραγματικό χρόνο, ανεξαρτήτως γεωγραφικής απόστασης, διαμορφώνοντας ένα νέο επίπεδο κοινωνικής ψυχαγωγίας.

2.3 Άλλες εφαρμογές του 5G

Το 5G ενισχύει σημαντικά τη βιομηχανία μέσα από προηγμένες εφαρμογές όπως η αυτοματοποίηση, η συντήρηση βάσει προγνωστικών δεδομένων και η χρήση ρομποτικής σε πραγματικό χρόνο. Στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας, η τεχνολογία επιτρέπει την παρακολούθηση φορτίων με ακρίβεια, μειώνοντας καθυστερήσεις και απώλειες. Επιπλέον, διευκολύνει την απομακρυσμένη παρακολούθηση και λειτουργία μηχανημάτων σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, ενισχύοντας την ασφάλεια και την αποδοτικότητα. Τέλος, το 5G στηρίζει την εξατομικευμένη παραγωγή μέσω δυναμικής διαμόρφωσης γραμμών παραγωγής, που ανταποκρίνονται στις ανάγκες της αγοράς σε πραγματικό χρόνο.

Παρατίθενται μερικά παραδείγματα εφαρμογών του 5G στη βιομηχανία:

- Συντήρηση βάσει προγνωστικών δεδομένων
- Απομακρυσμένος Έλεγχος Μηχανημάτων
- Βελτιστοποίηση Ενέργειας
- Δυναμική Παραγωγή
- Χρήση AR/VR για Εκπαίδευση και Συντήρηση

Συμπερασματικά λοιπόν είναι απαραίτητο να αναφερθεί η αναγκαιότητα της ποιότητας προς τον τερματικό σταθμό (e2e). Βάση αυτού έχουν δημιουργηθεί βασικά Key Performance Indicators (KPI) [28]δηλαδή μετρήσεις που αξιολογούν την απόδοση ενός συστήματος ή υπηρεσίας σε σχέση με συγκεκριμένους στόχους. Στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, όπως το 5G, τα KPIs χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η καθυστέρηση (latency), το εύρος ζώνης (bandwidth), η φασματική απόδοση (spectral efficiency), η αξιοπιστία (reliability) Κάθε κλάδος που προαναφέρθηκε απαιτεί και τα ανάλογα KPIs να ικανοποιούνται. Συνεπώς η ανάγκη πλέον είναι παρούσα και επιτακτική για αποδέκτες λύσεις. Παρακάτω φαίνεται ένα δείγμα που δείχνει τα χρονικά περιθώρια και τους διάφορους κλάδους που ζητούν ποιότητα υπηρεσίας διαδικτύου.

5G is a giant leap				
	Today	2020-25		
Users	10M people	+100M 'things'		
Speed	100 Mbps	100x faster	Smart home	Mobile gaming
Latency	>>10 ms	10x less		
NW service level	Best effort for all	Committed SLAs	Industry 4.0	Connected cars
Logical networks	1	Many (slices)		
			Drones	IoT wearables

Εικόνα 2.1 Εικόνα που δείχνει την αναγκαιότητα χρήσης του 5G [11][12][13]

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στο τμήμα αυτό περιγράφονται οι βασικοί παράγοντες και το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Η γενική μεθοδολογία δοκιμών που πραγματοποιήθηκε περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [14] [27]:

- 1 Προσδιορισμός τόπου και χρόνου δοκιμών
- 2 Ενεργοποίηση συστημάτων καταγραφής δεδομένων (Logging)
- 3 Εκτέλεση σεναρίων
- 4 Ενδιάμεση μέτρηση Latency και Jitter
- 5 Επανάληψη βημάτων 2 έως 4 σε διαφορετικές στιγμές και περιστάσεις, σύμφωνα με το εκάστοτε σενάριο
- 6 Επεξεργασία και φιλτράρισμα δεδομένων (αφαίρεση δεδομένων όταν το δίκτυο άλλαζε σε 4G)

3.1 Το πλαίσιο αξιολόγησης

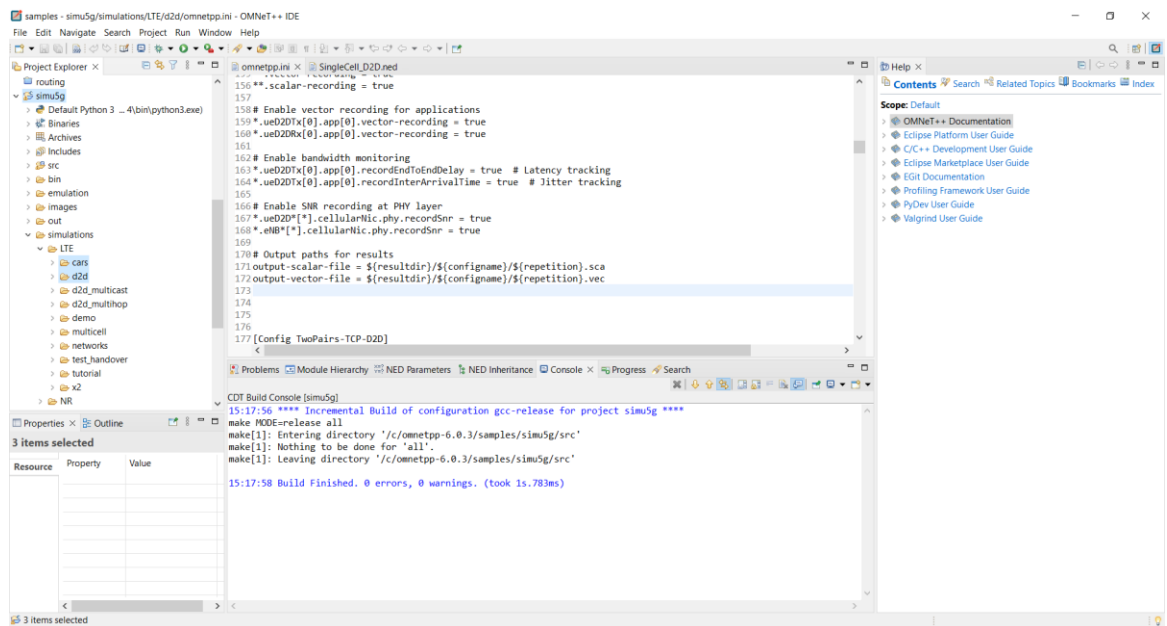
Επιλέχθηκαν δύο προσεγγίσεις για την αξιολόγηση και μελέτη των αποτελεσμάτων.

- A. Περιβάλλον προσομοίωσης
- B. Πραγματικό περιβάλλον

Η ταυτόχρονη χρήση προσομοίωσης και πραγματικών μετρήσεων βοηθάει στην κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου καθώς επίσης και στο να βρεθούν σημεία βελτίωσης τόσο στο περιβάλλον προσομοίωσης όσο και στο πραγματικό περιβάλλον. Όπως είναι λογικό, η προσομοίωση προηγείται της πραγματικής εφαρμογής και αποτελεί βασικό συστατικό μιας πλήρους μελέτης. Επιπροσθέτως μέσω προσομοίωσης γίνεται εξοικονόμηση χρόνου και κόστους μιας και δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός. Φυσικά μέσω προσομοίωσης μπορούν να δοκιμαστούν διάφορα σενάρια αλλά και ακραίες συνθήκες. Άρα είναι σίγουρο ότι η προσομοίωση περιβάλλοντος, όποτε είναι δυνατή, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα.

3.1.1 Το περιβάλλον προσομοίωσης

Για το τμήμα της προσομοίωσης λήφθηκαν υπόψη πολλοί παράγοντες, όπως η δυσκολία χρήσης του εκάστοτε εργαλείου προσομοίωσης, σχετική βιβλιογραφία [23][25], καθώς επίσης και υπάρχουσες υποδομές υλικού και λογισμικού. Έτσι αποφασίστηκε η χρήση του συστήματος προσομοίωσης Simu5G. Το Simu5G βασίζεται στο OMNeT++ το οποίο είναι μία επεκτάσιμη, αρθρωτή (modular) βιβλιοθήκη και σύστημα προσομοίωσης βασισμένο σε εξαρτήματα λογισμικού (components) σε C++, κυρίως για την ανάπτυξη προσομοιωτών δικτύων. Η χρήση του είναι δωρεάν και ανήκει στα open source projects δηλαδή σε ανοιχτού κώδικα λογισμικό. Μετά την εγκατάσταση του λογισμικού, το σύστημα παρέχει κάποια προεπιλεγμένα πρότυπα και σενάρια. Βάση αυτών έγιναν μερικές προσαρμογές ώστε να προσεγγίσουν τις συνθήκες των πραγματικών δοκιμών για τα Σενάρια 1 και 3. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται το περιβάλλον εργασίας όπου είναι επιλεγμένα τα προεπιλεγμένα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 3.1 Στιγμιότυπο οθόνης χρήσης του Simu5G

Σε αυτό το σύστημα έγινε προσπάθεια προσέγγισης όσο ήταν δυνατόν των δύο από τα τρία σενάρια δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες. Έγιναν αλλαγές στα υπάρχοντα σενάρια αλλάζοντας τον κώδικα και ενεργοποιώντας στοιχεία αναφορών σχετικών με τις μετρικές που αναλύονται στη παρούσα εργασία. Επιπροσθέτως

προστέθηκε στο κώδικα τμήμα για ανταλλαγή 200Mb εικονικού αρχείου (dummy data file) με πρωτόκολλο επικοινωνίας το TCP.

3.1.2 Το πραγματικό περιβάλλον

Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναφορά στο περιβάλλον που έγιναν οι μετρήσεις οι οποίες αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.5.

Στην Ελλάδα [21][22][29] την εποχή συγγραφής της παρούσας ερευνάς υπάρχουν τρεις ενεργοί κύριοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακής υπηρεσίας οι οποίοι είναι οι ακόλουθοι:

- Cosmote
- Vodafone
- Wind/Nova

Και οι τρεις πάροχοι προσφέρουν την υπηρεσία 5G. Βέβαια, όπως ισχύει και στην πλειοψηφία των χωρών παγκοσμίως, δεν υπάρχει δίκτυο 5G το οποίο λειτουργεί τελείως αυτόνομο, δηλαδή Standalone. Αντιθέτως χρησιμοποιείται η υπάρχουσα υποδομή του 4G για τον έλεγχο της σύνδεσης στο δίκτυο και υπάρχει ένα τμήμα του 5G που αφορά την κίνηση των δεδομένων του χρήστη προς το Διαδίκτυο. Γενικά αυτού του είδους εφαρμογής του 5G ονομάζεται 5G Non Standalone (5G NS) και είναι υλοποιημένο με το λεγόμενο Option 3X.

Ως προς αυτό υπάρχει μια μεγάλη διαφορά ειδικά στην Ελλάδα αλλά και στη πλειοψηφία των Ευρωπαϊκών χωρών. Για όλη την κίνηση των δεδομένων χρησιμοποιούνται κεραίες του 4G, οι λεγόμενες eNodeB. Η χρήση LTE κεραιών για την παροχή 5G μέσω τεχνολογιών όπως το Dynamic Spectrum Sharing (DSS) είναι ενσωματωμένη στη φιλοσοφία του Option 3X. Όταν δεν υπάρχουν φυσικές κεραίες 5G NR σε μια περιοχή, οι LTE κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή 5G μέσω DSS. Το δίκτυο παραμένει NSA, καθώς το LTE είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του Control Plane.

Στην Ελλάδα, οι πάροχοι έχουν υιοθετήσει ακριβώς αυτή την αρχιτεκτονική για να επεκτείνουν το 5G γρήγορα, χρησιμοποιώντας αρχικά LTE κεραίες:

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι μετρήσεις πεδίου έγιναν κυρίως στη περιοχή των Ιωάννινων. Στη περιοχή το δίκτυο είναι τύπου 5G Non Standalone Option 3X με υποδομή κεραιών eNodeB LTE-A.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί και το γεγονός ότι οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι προσφέρουν πακέτα δεδομένων όπου εφαρμόζεται πολιτική ορθής χρήσης. Παραδείγματος χάρη, στον πάροχο που χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν οι δοκιμές, στους όρους και προϋποθέσεις του συμβολαίου παροχής υπηρεσίας αναφέρονται τα εξής: «...Όταν η κατανάλωση των δεδομένων υπερβεί τα 200GB εφαρμόζεται πολιτική ορθής χρήσης και η μέγιστη ταχύτητα λήψης και μετάδοσης δεδομένων είναι 12Mbps...». Συνεπώς όταν αυτές οι πολιτικές ενεργοποιούνται αλλάζουν κατά πολύ τις μετρικές και δεν υπάρχει αντιστοιχία των πραγματικών δυνατοτήτων του δικτύου 5G και της παρεχόμενης υπηρεσίας από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο.

3.2 Απαραίτητος εξοπλισμός

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για να παρθούν τα συνολικά αποτελέσματα. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: Hardware και Software ώστε να γίνει πλήρης απεικόνιση των συσκευών αλλά και του συνολικού λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.

3.2.1 Hardware

Ως συσκευές/τερματικά UE χρησιμοποιήθηκαν δύο συσκευές, που να υποστηρίζουν το δίκτυο 5G, διαφορετικών κατασκευαστών ώστε να υπάρχει βέλτιστη και αντικειμενική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Παρακάτω αναφέρονται οι συσκευές καθώς και μερικά χαρακτηριστικά τους.

Nokia X10		
Network	Technology	GSM / HSPA / LTE / 5G
	2G bands	GSM 850 / 900 / 1800 / 1900
	3G bands	HSDPA 850 / 900 / 1900 / 2100
	4G bands	1, 3, 5, 7, 8, 20, 28, 38, 39, 40, 41
	5G bands	1, 3, 5, 7, 28, 31, 41, 78 SA/NSA/Sub6
	Speed	HSPA, LTE, 5G
Platform	OS	Android 11, upgradable to Android 14

Chipset	Qualcomm SM4350 Snapdragon 480 5G (8 nm)
CPU	Octa-core (2x2.0 GHz Kryo 460 & 6x1.8 GHz Kryo 460)

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά κινητού Nokia X10

TCL 20 R 5G		
Network	Technology	GSM / HSPA / LTE / 5G
	2G bands	GSM 850 / 900 / 1800 / 1900
	3G bands	HSDPA 850 / 900 / 1700(AWS) / 1900 / 2100
	4G bands	1, 3, 5, 7, 8, 20, 26, 28, 32, 38, 40, 41
	5G bands	1, 3, 5, 7, 8, 28, 40, 78 SA/NSA
	Speed	HSPA 42.2/11.5 Mbps, LTE Cat13 400/100 Mbps, 5G 2.7 Gbps DL
Platform	OS	Android 11, TCL UI
	Chipset	Mediatek Dimensity 700 (7 nm)
	CPU	Octa-core (2x2.2 GHz Cortex-A76 & 6x2.0 GHz Cortex-A55)

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά κινητού TCL 20 R 5G

Τέλος χρησιμοποιήθηκε η φυσική δομή του τηλεπικοινωνιακού παρόχου δηλαδή οι κεραίες του.

3.2.2 Software

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθεί όλο το λογισμικό, δωρεάν και επί πληρωμή που χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν τα σενάρια καθώς επίσης και λογισμικό που κατέγραφε και ανέλυε στατιστικά. Σε αυτό το κεφάλαιο δεν θα αναφερθεί το λογισμικό που δεν είχε βασική επιρροή στα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης όπως παραδείγματος χάρη η σουίτα Microsoft Office (Word,Excel κτλ), Visual Studio Code και άλλα.

- **Fing:** Το Fing είναι ένα δωρεάν εργαλείο ανάλυσης και παρακολούθησης δικτύου, το οποίο είναι διαθέσιμο ως εφαρμογή για κινητά (Android και iOS) και ως πρόγραμμα για υπολογιστές. Χρησιμοποιείται για τη σάρωση δικτύων και την αναγνώριση συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο ίδιο δίκτυο, προσφέροντας λεπτομέρειες όπως διευθύνσεις IP, MAC διευθύνσεις, και τύπους συσκευών.
- **Termux:** Το Termux είναι μια εφαρμογή για Android που προσφέρει ένα περιβάλλον τύπου Linux terminal. Ουσιαστικά, πρόκειται για έναν εξομοιωτή τερματικού που επιτρέπει να εκτελεί ο χρήστης εντολές και να χρησιμοποιεί εργαλεία Linux απευθείας από το κινητό ή το tablet τύπου Android. Το Termux

δημιουργεί ένα πλήρες περιβάλλον Linux στο Android. Η εφαρμογή διατίθεται δωρεάν.

- **CellMapper:** Το CellMapper είναι μια εφαρμογή και υπηρεσία που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση πύργων κινητής τηλεφωνίας και την ανάλυση της κάλυψης δικτύων κινητής τηλεφωνίας (2G, 3G, 4G, 5G) σε πραγματικό χρόνο. Είναι εξαιρετικά χρήσιμο για όσους θέλουν να κατανοήσουν την απόδοση του δικτύου τους ή να βρουν πληροφορίες για πύργους κινητής τηλεφωνίας στην περιοχή τους. Υπάρχει ως διαδικτυακή εφαρμογή καθώς και σε έκδοση για Android. Παρότι η εφαρμογή είναι δωρεάν διατίθεται και επί μηνιαία συνδρομή για γρηγορότερα αποτελέσματα και αποφυγή διαφημίσεων. Για τη παρούσα μελέτη αγοράστηκε μηνιαία συνδρομή.
- **Send Anywhere:** Το Send Anywhere αποτελεί μια υπηρεσία μεταφοράς αρχείων που επιτρέπει στους χρήστες να στέλνουν και να λαμβάνουν αρχεία με ευκολία και ταχύτητα, χωρίς να απαιτείται εγγραφή ή δημιουργία λογαριασμού και παρέχεται και δωρεάν και επί συνδρομή. Για τη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η δωρεάν έκδοση. Είναι διαθέσιμο ως εφαρμογή για κινητά, υπολογιστές και μέσω web browser, ενώ υποστηρίζει την αποστολή αρχείων ανεξαρτήτως μεγέθους ή τύπου. Το Send Anywhere χρησιμοποιεί διάφορα πρωτόκολλα δικτύου για να εξασφαλίσει τη γρήγορη και ασφαλή μεταφορά αρχείων, ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου και τη διαμόρφωση των συσκευών. Τα κυριότερα πρωτόκολλα που αξιοποιεί περιλαμβάνουν:
 - TCP/IP
 - UDP
 - WebRTC (Peer-to-Peer μέσω Web) είτε άλλο πρωτόκολλο που το λογισμικό θεωρεί βέλτιστο.

Η υπηρεσία Send Anywhere μέσω αυτών και άλλων πρωτοκόλλων προσπαθεί να επιτύχει επικοινωνία τύπου Peer to Peer (P2P) μεταξύ των δύο συσκευών.

- **Iperf3:** Το iperf3 είναι ένα δημοφιλές εργαλείο ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόδοσης δικτύων. Συγκεκριμένα, βοηθά στη δοκιμή και την ανάλυση της ταχύτητας, του εύρους ζώνης (bandwidth), της καθυστέρησης (latency), και της σταθερότητας ενός δικτύου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για διαχειριστές δικτύων, μηχανικούς δικτύων και προγραμματιστές. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το σύστημα Termux που αναφέρθηκε παραπάνω.

- **ZeroTier:** Το ZeroTier είναι ένα εργαλείο που παρέχει μια εικονική λύση δικτύωσης (Virtual Network) και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ιδιωτικών, ασφαλών και αποκεντρωμένων δικτύων VPN. Είναι ιδανικό για να συνδέει απομακρυσμένες συσκευές ή δίκτυα, όπως υπολογιστές, κινητά και servers, μέσω του διαδικτύου, χωρίς να απαιτείται περίπλοκη ρύθμιση router ή firewall. Το ZeroTier λειτουργεί ως ένα peer-to-peer (P2P) δίκτυο που συνδέει συσκευές μεταξύ τους, δημιουργώντας μια εικονική σύνδεση δικτύου (virtual LAN). Το σύστημα χρησιμοποιήθηκε για το Σενάριο 1 στην Υλοποίηση 2 ώστε να δημιουργηθεί ένα άμεσο, γρήγορο και αξιόπιστο VPN P2P δίκτυο μεταξύ των 2 τερματικών UE.
- **G-NetTrack Pro:** Το G-NetTrack Pro είναι μια προηγμένη εφαρμογή για Android που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και ανάλυση δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για μηχανικούς δικτύων, τεχνικούς, αλλά και χρήστες που θέλουν να μελετήσουν την απόδοση του δικτύου κινητής τους, όπως 2G, 3G, 4G (LTE), 5G, και Wi-Fi. Υπάρχει και δωρεάν έκδοση που ονομάζεται G-NetTrack Lite αλλά για τη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Pro διατίθεται επί πληρωμή μέσω του Google Play Store. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του που χρησιμοποιήθηκαν εδώ είναι τα ακόλουθα:
 - Παρακολούθηση Δικτύων:
 - Καταγράφει πληροφορίες για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπως:
 - Ισχύς σήματος (RSRP, RSSI).
 - Ποιότητα σύνδεσης (SINR, RSRQ).
 - Πληροφορίες κυψελών (Cell ID, PCI).
 - Πύργος κινητής τηλεφωνίας στον οποίο ο χρήστης είναι συνδεδεμένος.
 - Χαρτογράφηση Πύργων Κινητής Τηλεφωνίας:
 - Εμφανίζει τη θέση των πύργων κινητής τηλεφωνίας γύρω από το UE.
 - Δείχνει τη σύνδεση με τον πλησιέστερο πύργο (Base Station).
 - Δοκιμές Δικτύου:
 - Υποστηρίζει speed tests (ταχύτητα λήψης/μεταφόρτωσης).
 - Έλεγχος καθυστέρησης (latency/ping).
 - Ανάλυση της σταθερότητας του δικτύου.

- Καταγραφή Δεδομένων (Logging):
 - Παρέχει δυνατότητα καταγραφής δεδομένων δικτύου για ανάλυση αργότερα.
 - Δημιουργεί αναφορές σε μορφή CSV ή KML για προβολή σε Google Maps ή άλλα εργαλεία.
- Υποστήριξη Πολλαπλών Τεχνολογιών Δικτύου:
 - Συμβατό με 2G (GSM), 3G (UMTS), 4G (LTE), και 5G (NR).
 - Παρέχει επίσης πληροφορίες για δίκτυα Wi-Fi.
- Διαγνωστικά και Προβλήματα Σήματος:
 - Εντοπίζει "νεκρές ζώνες" (dead zones) όπου το σήμα είναι αδύναμο ή ανύπαρκτο.
 - Εντοπίζει προβλήματα με τη σύνδεση στο δίκτυο.
- Χρήση Χαρτών:
 - Παρουσιάζει δεδομένα σε χάρτη, βοηθώντας στη χαρτογράφηση της κάλυψης του δικτύου.
 - Υποστηρίζει offline χάρτες.
- Πληροφορίες Συσκευής:
 - Παρέχει λεπτομέρειες για την κινητή συσκευή, όπως κατασκευαστή, μοντέλο, και τρέχουσα λειτουργία του modem. [9] [26]
- **YouTube:** Το YouTube είναι μια από τις μεγαλύτερες και πιο δημοφιλείς πλατφόρμες κοινής χρήσης βίντεο στον κόσμο. Ανήκει στη Google και επιτρέπει στους χρήστες να ανεβάζουν, να παρακολουθούν, να μοιράζονται και να σχολιάζουν βίντεο. Στη παρούσα μελέτη η υπηρεσία χρησιμοποιήθηκε στα Σενάρια 2 και 3 ως υπηρεσία ανεβάσματος βίντεο δοκιμών.

3.3 Σενάρια δοκιμών (Test Cases)

Ανάπτυξη δικτύου 5G

Επιλέχθηκε να υλοποιηθούν τρία διαφορετικά πιθανά σενάρια χρήσης ώστε να παρθούν και οι ανάλογες μετρήσεις. Τα σενάρια αυτά είναι:

- **Σενάριο 1^ο** : Επικοινωνία συσκευής με συσκευή. Σε αυτό το σενάριο έγινε ανταλλαγή αρχείου τύπου βίντεο και ανταλλαγή δεδομένων με το iperf3 ώστε να παρθούν οι κατάλληλες μετρικές
- **Σενάριο 2^ο** : Αποστολή (μεταφόρτωση/upload) βίντεο στη πλατφόρμα YouTube σε πολυσύχναστο σημείο, με κεραίες να έχουν κυκλοφορία καθώς και αρκετά εμπόδια όπως κτήρια. Ταυτόχρονα έγινε χρήση του iperf3 για να μετρηθούν, όσο είναι δυνατόν, και τα άλλα μεγέθη.
- **Σενάριο 3^ο** : Ομοίως με το σενάριο 2 αλλά οι δοκιμές έγιναν σε αυτοκίνητο υπό κίνηση με μέση ταχύτητα περίπου τα 95km/h.

Δημιουργία κυκλοφορίας

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ένας πίνακας που δείχνει τις βασικές παραμέτρους των σεναρίων δοκιμών.

	Διαμόρφωση Δικτύου	Τεχνολογίες	Τύπος κυκλοφορίας	Συνθήκες	Μετρικές Απόδοσης
Σενάριο 1	5G NSA	Option 3X DDS σε συνδυασμό με αναβαθμισμένες κεραίες του 4G (LTE-A)	P2P η αλλιώς D2D και χρήση του iperf ως client και server	2 κινητά UE εξυπηρετούμενα από τον ίδιο πάροχο από διαφορετικές κεραίες	Bandwidth Latency Jitter Error Rate SNR
Σενάριο 2	5G NSA	Option 3X DDS σε συνδυασμό με αναβαθμισμένες κεραίες του 4G (LTE-A)	Upload στη πλατφόρμα YouTube και χρήση του iperf3 ως client	Πολυσύχναστο σημείο της πόλης και αργή μετακίνηση του UE μεταξύ κτηρίων και εμποδίων	Bandwidth Latency Jitter SNR
Σενάριο 3	5G NSA	Option 3X DDS σε συνδυασμό με αναβαθμισμένες κεραίες του 4G (LTE-A)	Upload στη πλατφόρμα YouTube και χρήση του iperf3 ως client	Upload κινούμενοι με ταχύτητα περίπου 95km/h	Bandwidth Latency Jitter SNR

Πίνακας 3.3 Συνοπτικός πίνακας που δείχνει τα διάφορα σενάρια και το περιβάλλον των δοκιμών

Καταρχάς για να υπάρχει ενιαία δομή καθώς να εξαλειφθούν όσοι περισσότεροι μεταβλητοί παράγοντες, σε κάθε σενάριο χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια αρχεία για μεταφόρτωση. Λόγω του ότι τουλάχιστον κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας, οι περισσότεροι χρήστες ανταλλάσσουν αρχεία ήχου και εικόνες, κυρίως μέσω κοινωνικών δικτύων, livestreams και τηλεσυνδιασκέψεων όπως παραδείγματος χάρη video calls, δόθηκε η έμφαση σε αυτού του είδους δεδομένων και επικοινωνίας. Συνεπώς έγινε

χρήση δύο τμημάτων οπτικοακουστικού υλικού, κοινώς βίντεο και χάριν συντομίας θα χρησιμοποιείται αυτός ο όρος στη πορεία της παρούσας μελέτης. Τα ακόλουθα δύο αρχεία είναι δοκιμαστικά βίντεο που υπάρχουν διαθέσιμα στο διαδίκτυο για πειραματικούς σκοπούς. Παρακάτω αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά για δύο αυτά βίντεο:

- Όνομα Αρχείου : 200MB_1080P_THETESTDATA.COM_mp4.mp4

- ο Μέγεθος: 200MB – 205.281KB
- ο Πηγή: thetestdata.com
- ο Βίντεο
 - Χρονική Διάρκεια: 00:01:37
 - Πλάτος Καρέ: 1920
 - Ύψος Καρέ: 1080
 - Ταχύτητα Δεδομένων: 17136Kbps
 - Συνολικός Ρυθμός Μετάδοσης: 17329Kbps
 - Ρυθμός Καρέ: 30 Καρέ/Δευτερόλεπτο
- ο Ήχος:
 - Ρυθμός Μετάδοσης bit: 192Kbps
 - Κανάλια: 2 Στερεοφωνικά
 - Ρυθμός Δειγμάτων Ήχου: 44.100KHz

- Όνομα Αρχείου : Video MP4_Bike - testfile.org.mp4

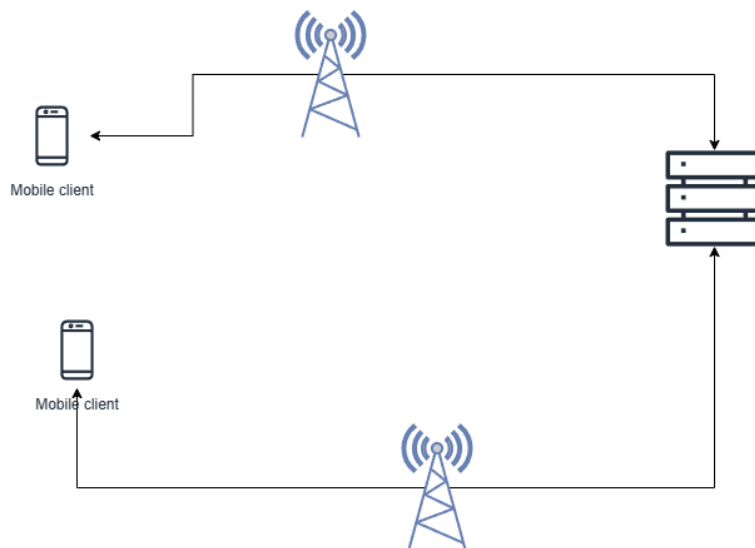
- ο Μέγεθος: 228MB – 233.659KB
- ο Πηγή: testfile.org
- ο Βίντεο
 - Χρονική Διάρκεια: 00:00:31
 - Πλάτος Καρέ: 3840
 - Ύψος Καρέ: 2160
 - Ταχύτητα Δεδομένων: 59484Kbps
 - Συνολικός Ρυθμός Μετάδοσης: 59801Kbps
 - Ρυθμός Καρέ: 25 Καρέ/Δευτερόλεπτο
- ο Ήχος:
 - Ρυθμός Μετάδοσης bit: 316Kbps
 - Κανάλια: 2 Στερεοφωνικά

- Ρυθμός Δειγμάτων Ήχου: 48.000KHz

3.3.1 Σενάριο 1ο

Δημιουργήθηκε μια σύνδεση μεταξύ δύο τερματικών συσκευών (UE) που να υποστηρίζουν και οι δύο τεχνολογία 5G, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2. Χρησιμοποιώντας εργαλεία λογισμικού που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.2 είτε αντάλλαξαν αρχεία μεγάλου όγκου τύπου βίντεο είτε αντάλλαξαν δοκιμαστικά ροές μεγάλου με χρήση της iperf3. Οι χρήστες/συσκευές εξυπηρετήθηκαν από διαφορετικές κυψέλες δικτύου. Επιπρόσθετα μελετήθηκε η συμπεριφορά του δικτύου όταν οι UEs θα εξυπηρετούνται από την ίδια κυψέλη της ίδιας κεραίας. Παρακάτω αναφέρονται δύο διαφορετικές υλοποιήσεις του σεναρίου που περιεγράφηκε. Οι λόγοι που εφαρμοστήκαν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις είναι οι ακόλουθοι:

- Πειραματική προσέγγιση με δύο διαφορετικά υποσυστήματα ώστε να παρθούν περισσότερες από μία σειρές μετρήσεων και να φανεί αν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις μετρήσεις
- Περιορισμοί στην ασφάλεια των κινητών δικτύων δυσκολεύουν την επικοινωνία απλά με χρήση TCP/IP. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών υπηρεσιών προστατεύουν τα δίκτυα για μεγιστοποίηση της ασφάλειας στο επίπεδο δικτύου. Τέτοιοι περιορισμοί περιλαμβάνουν διαχείριση μέσω NAT, Firewall Rules, CGNAT καθώς και έλλειψη δρομολόγησης μέσα στο δίκτυο και άλλα. Αυτό αποδείχτηκε όταν έγινε προσπάθεια χρήσης της ιδιωτικής (private) και δημόσιας (public) IP του ενός UE ώστε να επικοινωνήσει με την άλλη συσκευή ακόμα και όταν εξυπηρετούνταν από ακριβώς την ίδια κεραία και κυψέλη.



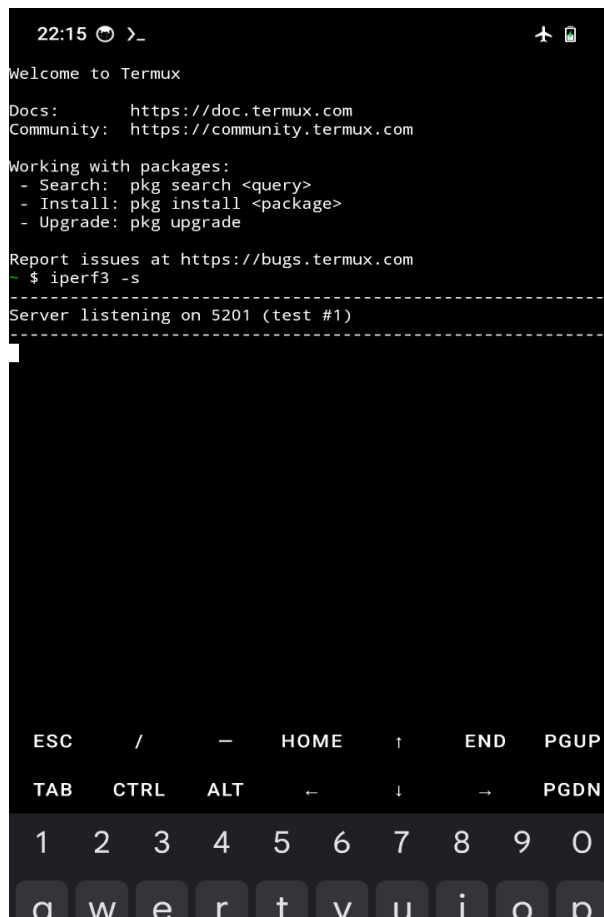
Εικόνα 3.2 Γραφική αναπαράσταση τοπολογίας Σεναρίου 1

3.3.1.1 Υλοποίηση 1^η – Χρήση Εφαρμογής Send AnyWhere

Ως προς αυτή την υλοποίηση έγινε χρήση του συστήματος Send Anywhere. Το Send Anywhere χρησιμοποιεί διάφορες τεχνολογίες και πρωτόκολλα για να επιτύχει P2P επικοινωνία μεταξύ δύο τερματικών UE. Λεπτομέρειες σχετικά με το λογισμικό Send AnyWhere και τη παρεχόμενη υπηρεσία που το συνοδεύει αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.2. Δυστυχώς δεν είναι εύκολο να αναγνωστεί πλήρως ποια από τις τεχνολογίες ή πρωτόκολλα χρησιμοποιεί.

3.3.1.2 Υλοποίηση 2^η – Χρήση Εφαρμογής ZeroTier για P2P VPN

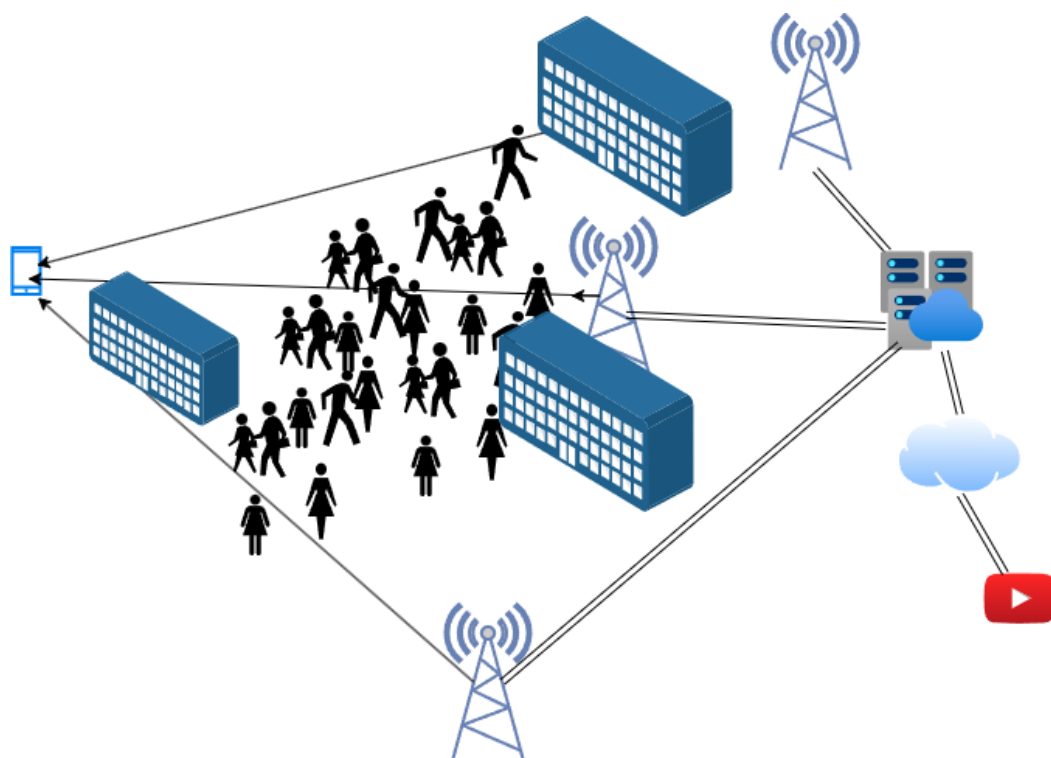
Σε αυτή την υλοποίηση δημιουργήθηκε ένα Software Defined Network (SDN) ώστε να υλοποιηθεί ένα Virtual Private Network (VPN) μεταξύ δυο τερματικών UE. Για αυτό χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία ZeroTier. Με αυτόν τον τρόπο έγινε εφικτή η άμεση επικοινωνία μεταξύ των δύο τερματικών χωρίς μεσολάβηση. Έπειτα, με αυτή την υλοποίηση, μιας και τα δύο τερματικών ανήκαν στο ίδιο δίκτυο, ήταν εύκολο να γίνει χρήση του δικτυακού εργαλείου iperf3 αλλά και άλλων λειτουργιών. Για να υπάρχει μια πλήρης σουίτα εργαλείων CLI στα τερματικά χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Termux. Μέσω αυτής πάρθηκαν μετρήσεις με το σύστημα iperf3 αλλά και ανταλλάχθηκαν αρχεία με χρήση CLI εντολών όπως η wget και η curl. Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται το περιβάλλον της εφαρμογής Termux όπως απεικονίζεται σε ένα τερματικό UE.



Εικόνα 3.3 Στιγμιότυπο οθόνης χρήσης του λογισμικού Termux

3.3.1 Σενάριο 2ο

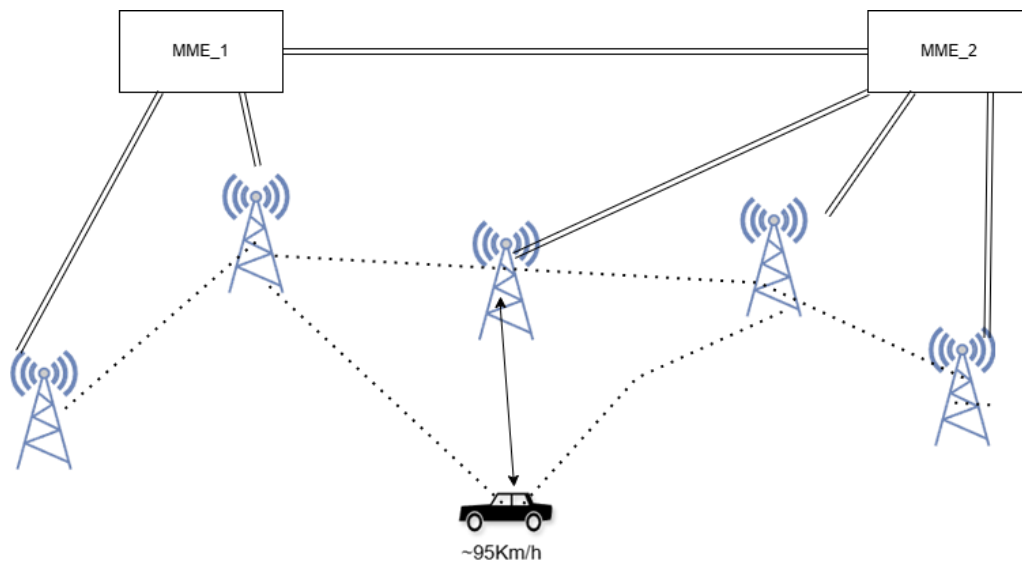
Στο σενάριο αυτό διερευνάται η συμπεριφορά του δικτύου κατά τη διάρκεια της μεταφόρτωσης ενός μεγάλου αρχείου τύπου video από τη συσκευή του χρήστη σε κάποια δημοφιλή πλατφόρμα όπως παραδείγματος χάρη το YouTube σε περιβάλλον που συνυπήρχαν και άλλοι χρήστες, δηλαδή υπήρχε και άλλη κυκλοφορία στο δίκτυο 5G. Για να επιτευχθεί αυτό το πείραμα, οι μετρήσεις έγιναν σε ώρα αιχμής με κίνηση δεδομένων μέσα σε μια κυψέλη ώστε να προσομοιωθεί η λειτουργία του 5G υπό φόρτο, ή αλλιώς ονομαζόμενη stress testing. Αυτό το σενάριο υλοποιήθηκε στο κέντρο των Ιωάννινων σε ώρα που υπήρχε αρκετή κινητικότητα του δικτύου λόγω πλήθους κόσμου συν του γεγονότος του ότι ήταν εορταστική περίοδος συνεπώς το δίκτυο ήταν ακόμα πιο πιεσμένο από το αναμενόμενο.



Εικόνα 3.4 Σχηματική αναπαράσταση Σεναρίου 2

3.3.2 Σενάριο 3ο

Σε αυτό το σενάριο, παρομοίως με το Σενάριο 2 μεταφορτώθηκε ενός μεγάλου αρχείου τύπου βίντεο σε κινούμενο όχημα με μέση ταχύτητα τα 95 km/h. Μελετήθηκαν καθορισμένες μετρικές καθώς και η συμπεριφορά του δικτύου σε εναλλαγές κεραιών, κυψελών και περιοχών. Η απόσταση που καλύφθηκε ήταν μεταξύ Πάργας και Ιωαννίνων και έγιναν πολλές προσπάθειες μεταφόρτωσης του αρχείου ώστε να υπάρχει πιο εμπειριστατωμένη άποψη για την αντικειμενικότητα των δεδομένων. Οι τιμές αυτές ενώθηκαν σε μια κοινή βάση δεδομένων και πάρθηκαν μέσες τιμές καθώς και διαγράμματα.



Εικόνα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση σεναρίου 3

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα που περιγράφονται στην ενότητα 3.3 επικεντρώθηκε στη μέτρηση της απόδοσης και της καθυστέρησης του δικτύου 5G σε διαφορετικές συνθήκες. Τα πειράματα αξιολόγησαν την πραγματική απόδοση του δικτύου μέσα από τρία σενάρια.

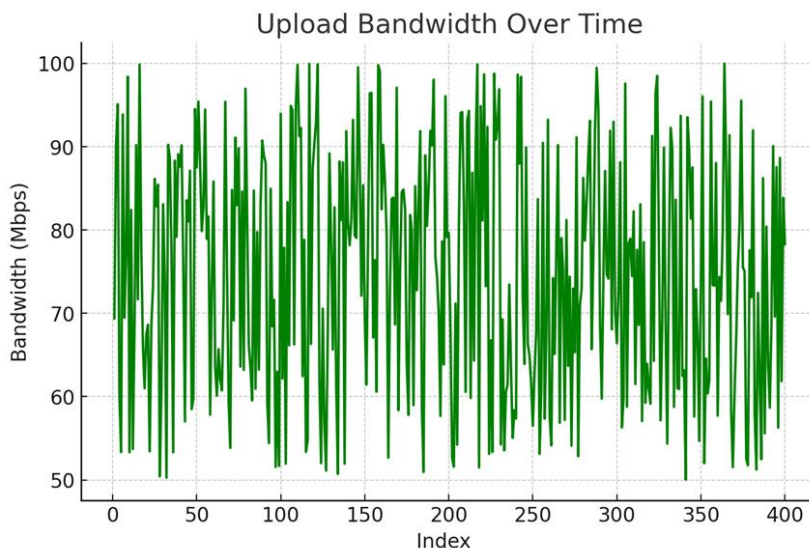
4.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίων δοκιμών

Βάση των προσομοιώσεων, βγήκαν τα ακόλουθα ευρήματα για τα σενάρια 1 και 3.

4.1.1 Προσομοίωση Σεναρίου 1^ο

Για το σενάριο 1^ο που αφορά την επικοινωνία μεταξύ των 2 συσκευών ανταλλάσσοντας μεταξύ τους αρχείου μεγέθους 200Mb. Παρακάτω απεικονίζονται με γραφικές παραστάσεις τα αποτελέσματα προσομοίωσης:

Bandwidth

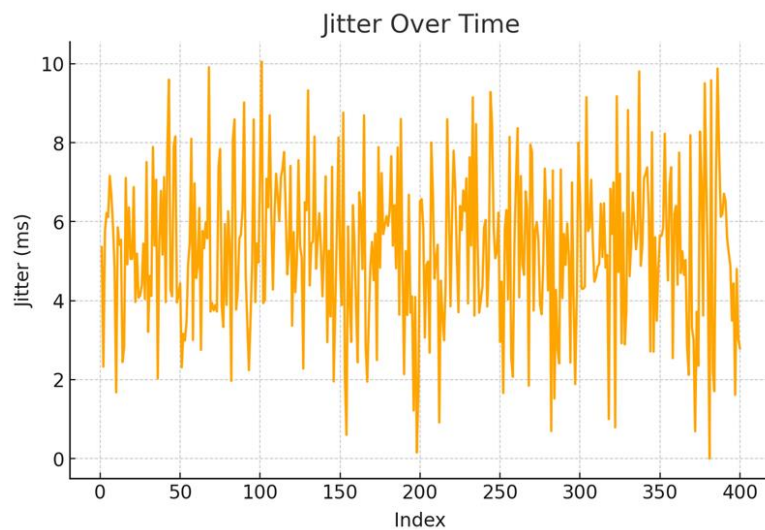


Εικόνα 4.1 Bandwidth Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου

Η γραμμή παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις με συχνά σκαμπανεβάσματα από το χαμηλότερο εύρος των 50 Mbps έως και τις μέγιστες τιμές κοντά στα 100 Mbps. Αυτό

δείχνει πιθανή αστάθεια στη σύνδεση κατά τη μεταφορά των δεδομένων. Παρά τις διακυμάνσεις, φαίνεται ότι η πλειονότητα των σημείων κινείται κοντά στα 80-90 Mbps. Αυτό είναι σχετικά καλό εύρος ζώνης για τη μεταφορά μεγάλων αρχείων σε σύνδεση 5G NSA.

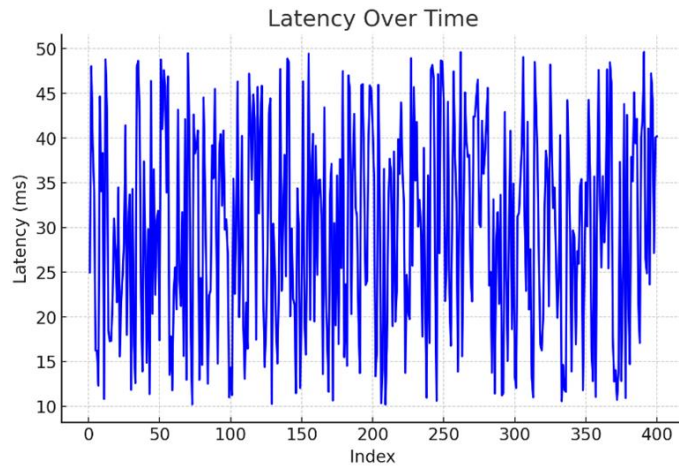
Jitter



Εικόνα 4.2 Jitter Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου

Οι τιμές του jitter κυμαίνονται κυρίως από 2 ms έως περίπου 10 ms, με ορισμένες τιμές να αγγίζουν το 0 ms ή να ξεπερνούν τα 10 ms σε μικρά διαστήματα. Παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις με συχνά σκαμπανεβάσματα αλλά σχετικά μικρή μεταβλητότητα.

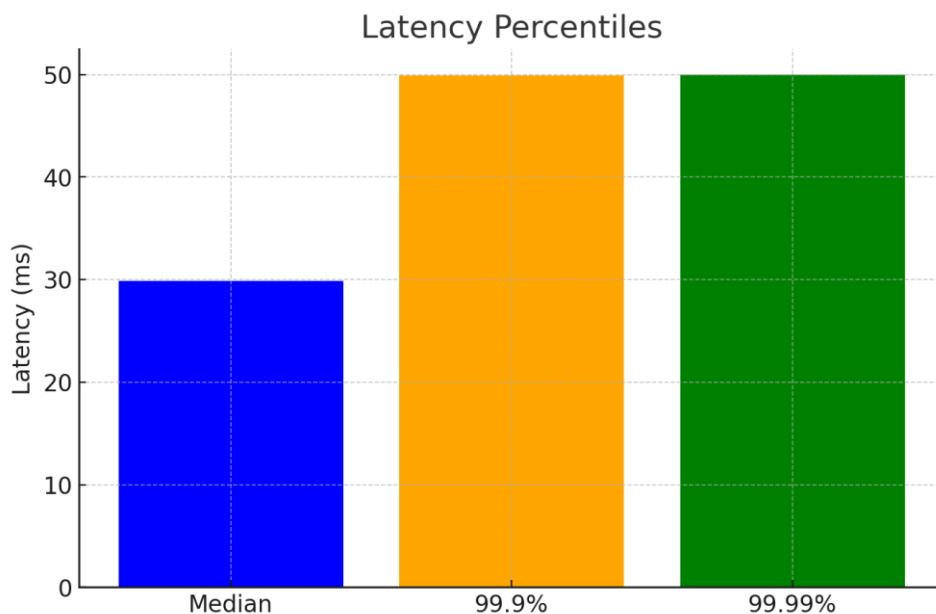
Latency



Εικόνα 4.3 Latency Προσομοίωσης Σεναρίου 1ου

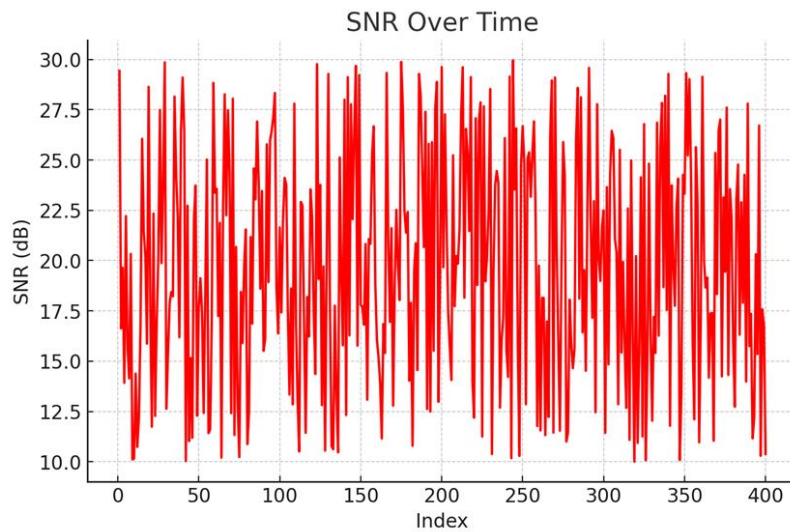
Οι τιμές της καθυστέρησης κυμαίνονται κυρίως από 10 ms έως 50 ms, με αρκετές αιχμές που φτάνουν στο ανώτερο όριο. Σε συνδυασμό με το jitter προκύπτει άμεση αλληλοσύνδεση από τη μεταβλητότητα της καθυστέρησης, ενώ το bandwidth επηρεάζει το ρυθμό μετάδοσης των πακέτων.

Παρατίθεται και το σχετικό διάγραμμα ποσοστιαίων στόχων



Εικόνα 4.4 Διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων latency προσομοίωσης Σεναρίου 1ου

SNR



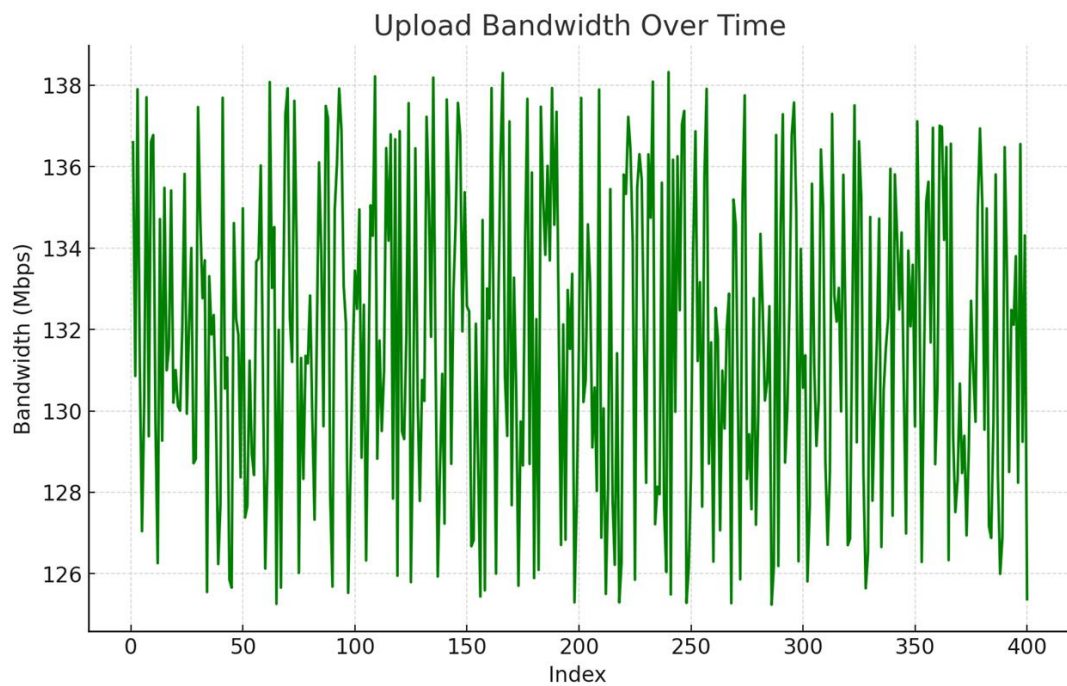
Εικόνα 4.5 SNR Προσομείωσης Σεναρίου 1ου

Οι τιμές του SNR κυμαίνονται κυρίως από 10 dB έως 30 dB. Αυτές οι τιμές είναι μέτριες έως καλές, αλλά η έντονη μεταβλητότητα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα απόδοσης. Το SNR βρίσκεται σε μέτρια επίπεδα, με συχνές διακυμάνσεις που μπορεί να επηρεάζουν τη σταθερότητα της σύνδεσης.

4.1.2 Προσομοίωση Σεναρίου 3ο

Για το σενάριο 3ο που αφορά την αποστολή αρχείου 200Mb προς τη πλατφόρμα YouTube παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα ευρήματα:

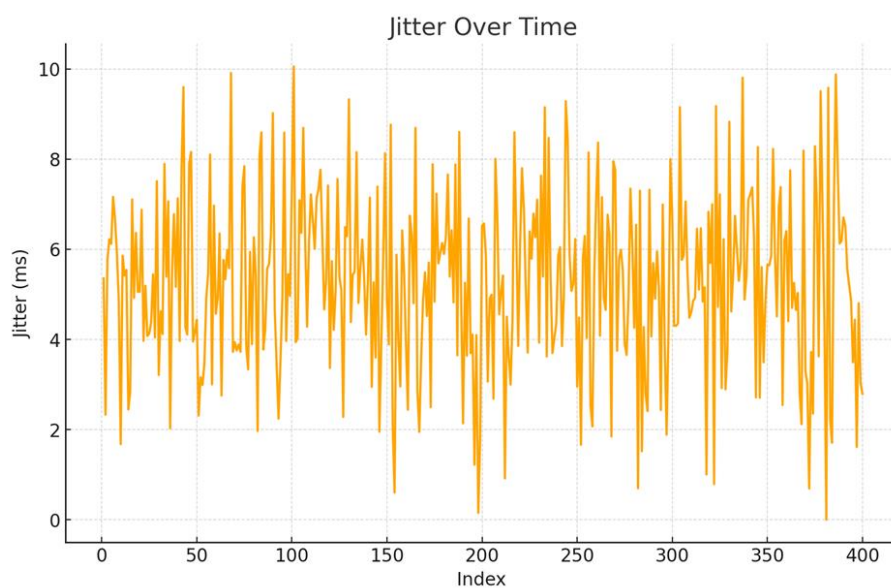
Bandwidth



Εικόνα 4.6 Bandwidth Προσομοίωσης Σεναρίου 3ου

Η καμπύλη παραμένει σταθερή και φαίνεται να είναι μια γενικά καλή και σταθερή για την απόδοση του δικτύου, με μικρές διακυμάνσεις. Οι τιμές κυμαίνονται γύρω από τα 131-135 Mbps, κάτι που είναι ικανοποιητικό για απαιτητικές εφαρμογές όπως video streaming και μεγάλες μεταφορές αρχείων.

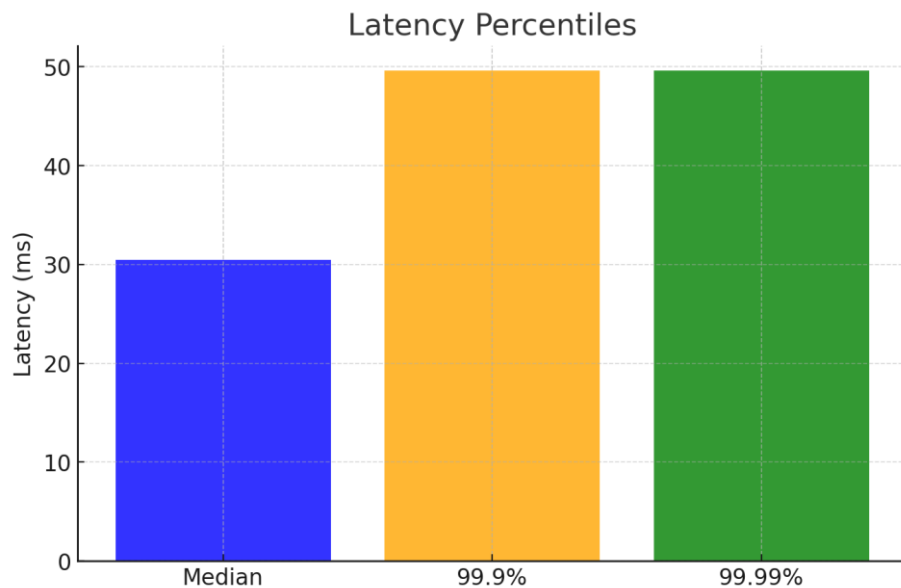
Jitter



Εικόνα 4.7 Jitter Προσομοίωσης Σεναρίου 3ου

Οι διακυμάνσεις είναι μεν συχνές, με τις τιμές να κινούνται κυρίως μεταξύ 2 ms και 10 ms και αυτό δείχνει μια μέτρια μεταβλητότητα που θα μπορούσε να προκαλέσει κάποιες καθυστερήσεις στις εφαρμογές άμεσης χρήσης του διαδικτύου όπως εφαρμογές βιντεοκλήσεων, αλλά βρίσκεται γενικά εντός αποδεκτών ορίων συνεπώς φαίνεται να είναι σταθερή η σύνδεση.

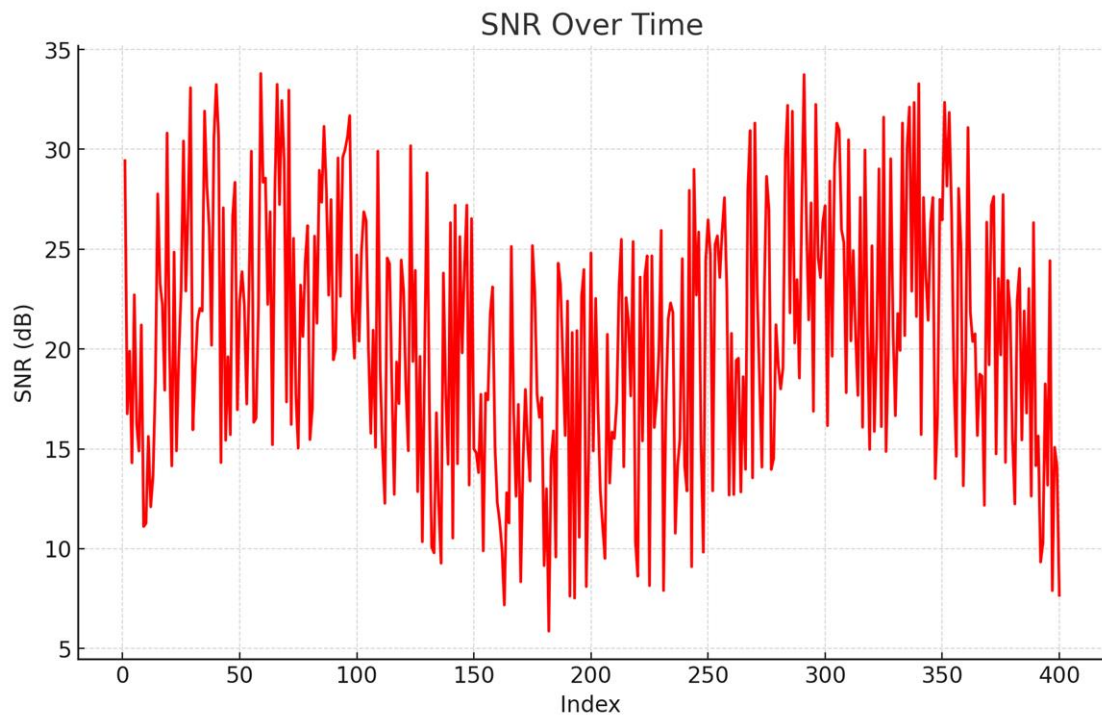
Παρατίθεται και το σχετικό διάγραμμα ποσοστιαίων στόχων



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων Latency προσομοίωσης Σεναρίου 3ου

Αυτό το διάγραμμα υποδεικνύει ότι το δίκτυο διατηρεί σταθερές καθυστερήσεις, ακόμα και σε εξαιρετικά ακραία ποσοστά.

SNR



Εικόνα 4.9 SNR προσομοίωσης Σεναρίου 3ου

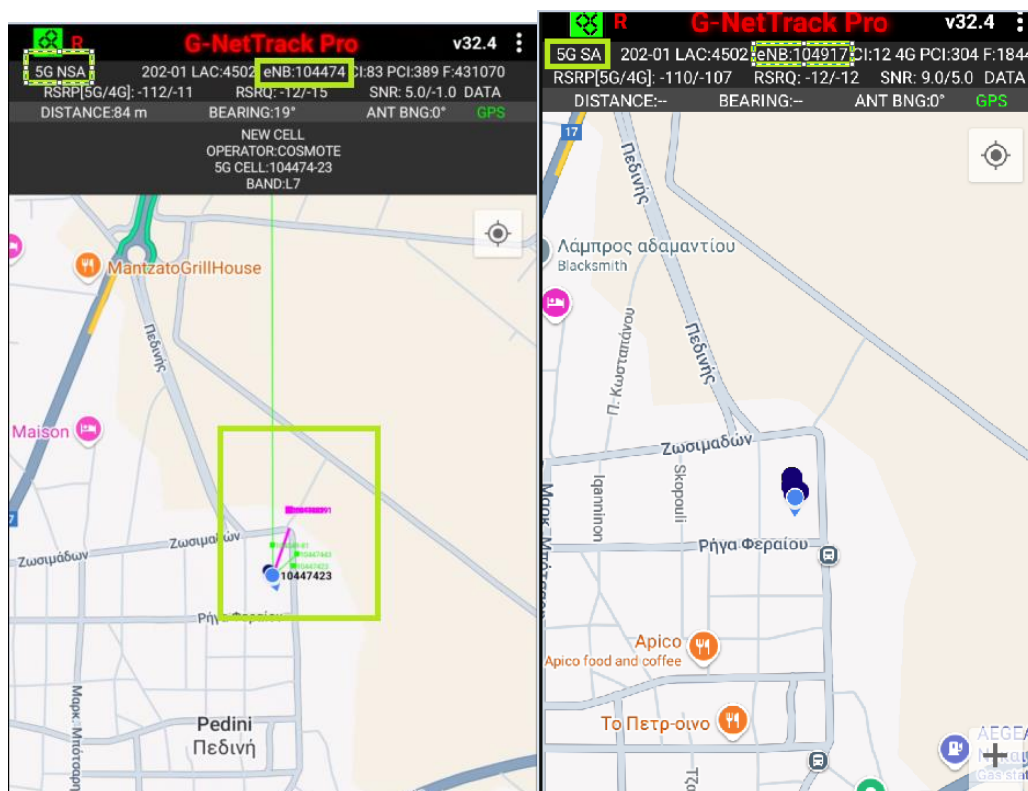
Οι διακυμάνσεις φαίνονται να είναι μεταξύ περίπου 10 dB και 35 dB, υποδεικνύοντας μεταβαλλόμενη ποιότητα σήματος που μπορεί να οφείλεται πιθανώς σε κινητικότητα του οχήματος, αλλαγές μεταξύ κεραιών και αλλαγές στο περιβάλλον του δικτύου.

4.2 Απόδοση και καθυστέρηση σε διαφορετικές συνθήκες

Παρακάτω παρουσιάζονται λεπτομερώς οι αναλύσεις των μετρήσεων πεδίου για κάθε ένα σενάριο ξεχωριστά.

4.2.1 Σενάριο 1

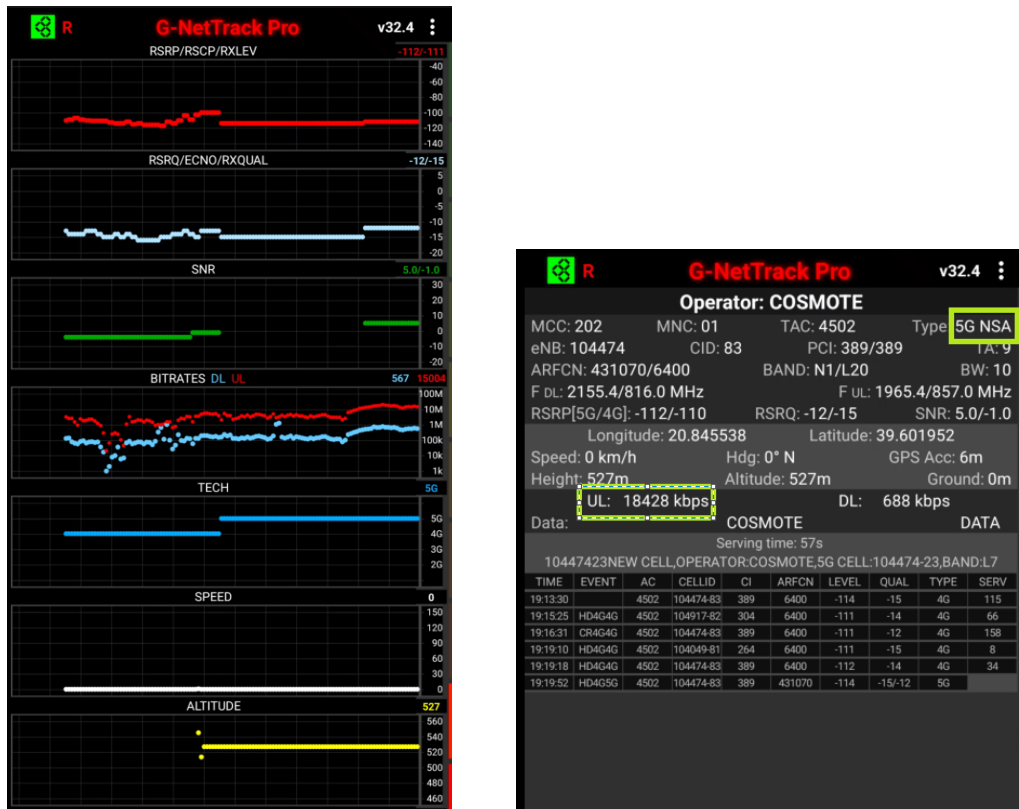
Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο τερματικών συσκευών (UE) που εξυπηρετούνται από διαφορετικές και ίδιες κυψέλες δικτύου αποκάλυψε πολύ ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Η Εικόνα 4.10 παραθέτει τις θέσεις από τα δύο endpoints στη διάρκεια εκτέλεσης του σεναρίου:



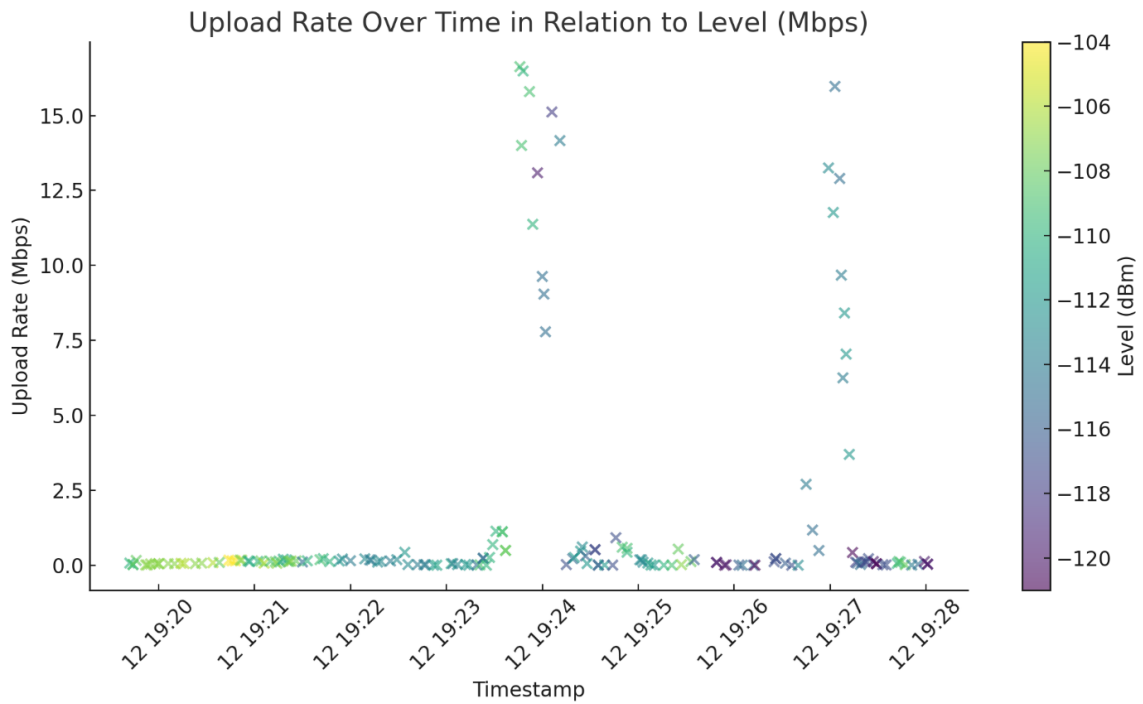
Εικόνα 4.10 Σημείο και εξυπηρετούμενη κεραία στο UE Nokia X10 και TCL

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται ξεκάθαρα πως τα δύο endpoints εξυπηρετούνται από δύο διαφορετικές κεραίες. Η πρώτη συσκευή εξυπηρετείται από την κεραία τύπου eNB με ID 104474 ενώ η δεύτερη ομοίως με κεραία τύπου eNB αλλά με ID 104917. Συνεπώς πρόκειται για δύο εντελώς διαφορετικές κεραίες, όχι απλά δύο διαφορετικές κυψέλες της ίδιας κεραίας. Επιπροσθέτως παρακάτω φαίνονται μερικές μετρικές από το

endpoint αποστολής δεδομένων. Όπως φαίνεται η ταχύτητα αποστολής κυμαινόταν περίπου στα 18Mbps η οποία ήταν σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Κάτι αξιο αναφοράς είναι ότι η ταχύτητα λήψης του άλλου endpoint ήταν περίπου η ίδια, κυμαινόταν δηλαδή περί τα 18Mbps κάτι που πιστοποιεί τη ταχύτητα σύνδεσης. Επίσης επιβεβαιώνεται και η ακεραιότητα των μεταφερομένων πακέτων μέσω μετρήσεων ποσότητας αποστολής δεδομένων από τη μία συσκευή και ταυτόχρονη μέτρηση ποσότητας παραλαβής δεδομένων από την άλλη.

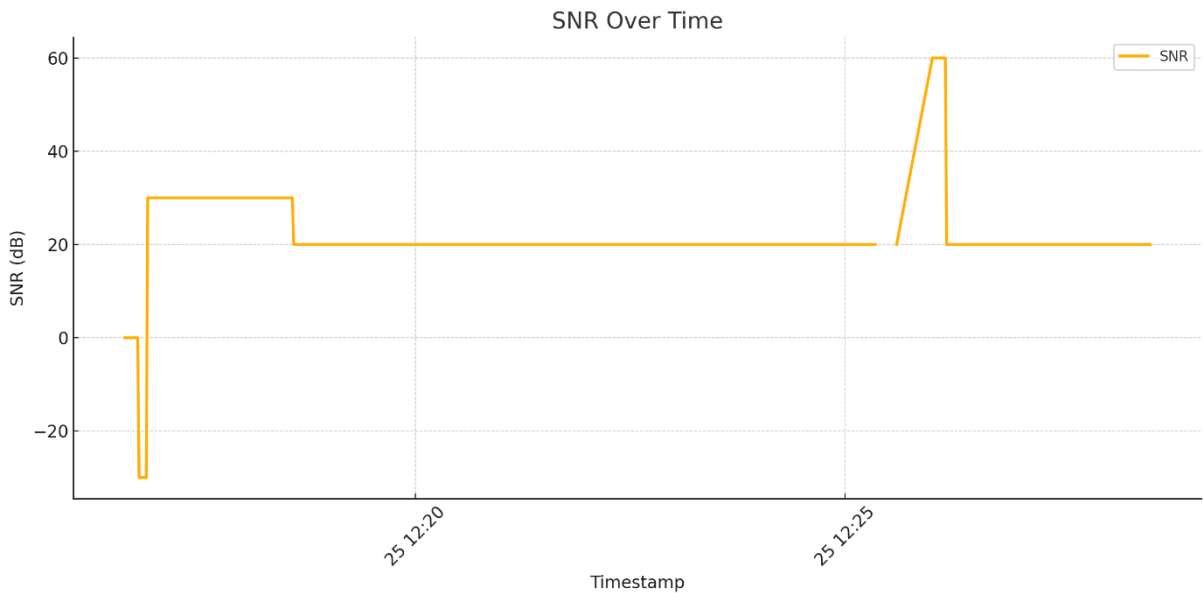


Εικόνα 4.11 Αναλυτικά στοιχεία και γραφικές παραστάσεις κατά τη διάρκεια μιας εκ των δοκιμών



Εικόνα 4.12 Bandwidth και Ποιότητα σήματος στη πορεία του χρόνου.

Ταυτόχρονα, στην Εικόνα 4.13, φαίνεται και ένα σχετικό γράφημα που δείχνει το SNR του UE που λειτουργούσε ως αποστολέας.

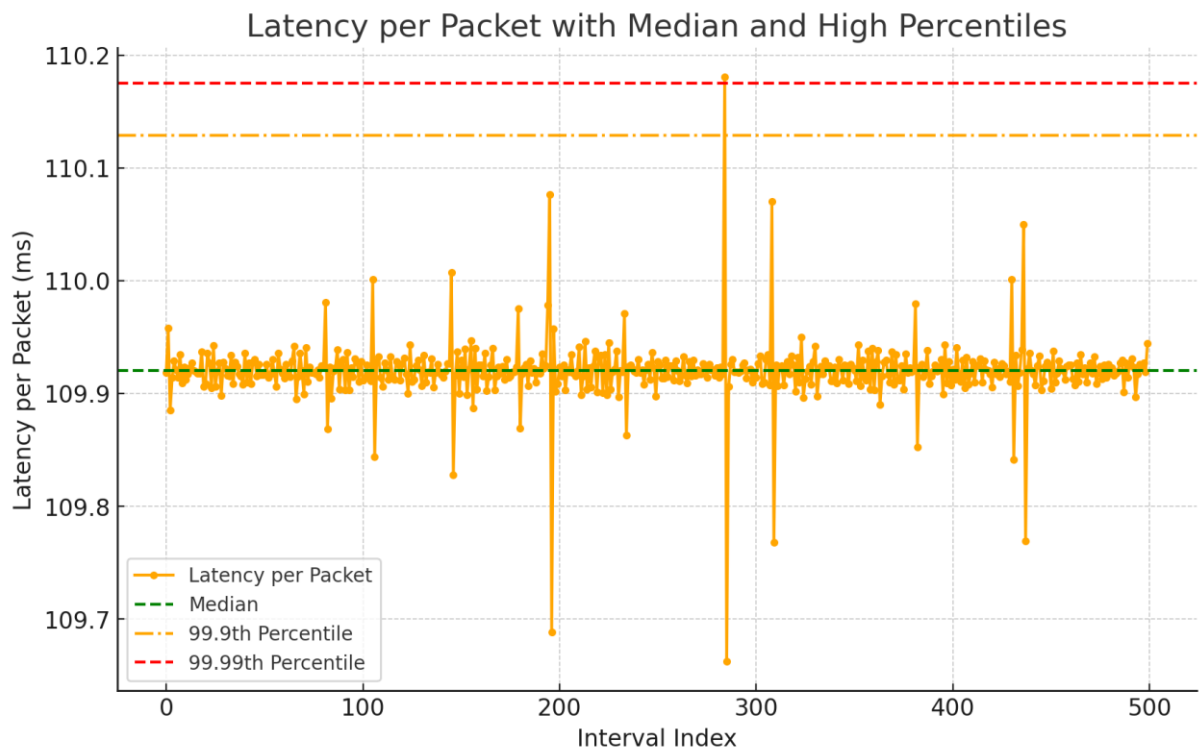


Εικόνα 4.13 SNR Αποστολέα Σεναρίου 1 στη πορεία του χρόνου.

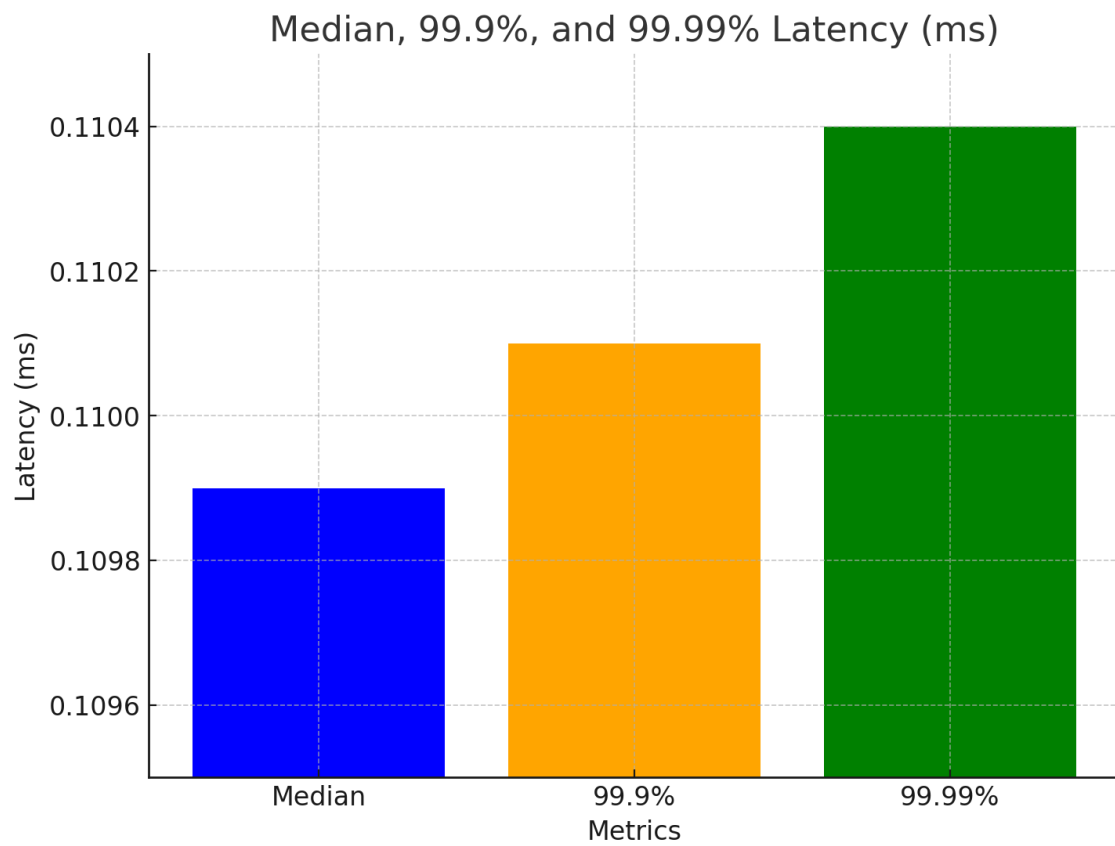
Παρακάτω φαίνονται δύο πολύ σημαντικές μετρικές. Και οι δύο αφορούν το Latency. Η Εικόνα 4.14 παρουσιάζει την καθυστέρηση ανά πακέτο (Latency per Packet) σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) στη πορεία του χρόνου.

- Η πορτοκαλί γραμμή δείχνει τη καθυστέρηση κάθε πακέτου.
- Η πράσινη διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη μέση (median) καθυστέρηση, η οποία είναι κοντά στα 109.9 ms. Το 50% των πακέτων έχει καθυστέρηση μικρότερη από αυτήν την τιμή
- Η κίτρινη διακεκομμένη γραμμή (99.9th percentile) δείχνει τις υψηλές καθυστερήσεις που αντιμετωπίζουν το 99.9% των πακέτων και ονομάζεται διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων. Για καλύτερη κατανόηση θεωρείται ότι το 99.9% των πακέτων έχει καθυστέρηση μικρότερη από αυτήν την τιμή, δείχνοντας περιοχές υψηλής καθυστέρησης
- Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή (99.99th percentile) δείχνει τις μέγιστες καθυστερήσεις στο 99.99%. Αντιπροσωπεύει ακραίες καθυστερήσεις στα πακέτα, οι οποίες συναντώνται σπάνια.

Η Εικόνα 4.15 δείχνει την μέση και τις υψηλές καθυστερήσεις (99,9% και 99,99%) σε ένα διαφορετικού τύπου γράφημα. Γενικά παρατηρείται ότι οι περισσότερες καθυστερήσεις είναι σταθερές γύρω από τα 109.9 ms, αλλά υπάρχουν στιγμές με απότομες αιχμές ή μειώσεις. Αυτά μπορεί να οφείλονται σε παροδικά προβλήματα του δικτύου, όπως συμφόρηση, θόρυβος στο ραδιοφάσμα, κακή ποιότητα σήματος, απώλειες πακέτων ή ίσως άλλοι παράγοντες.



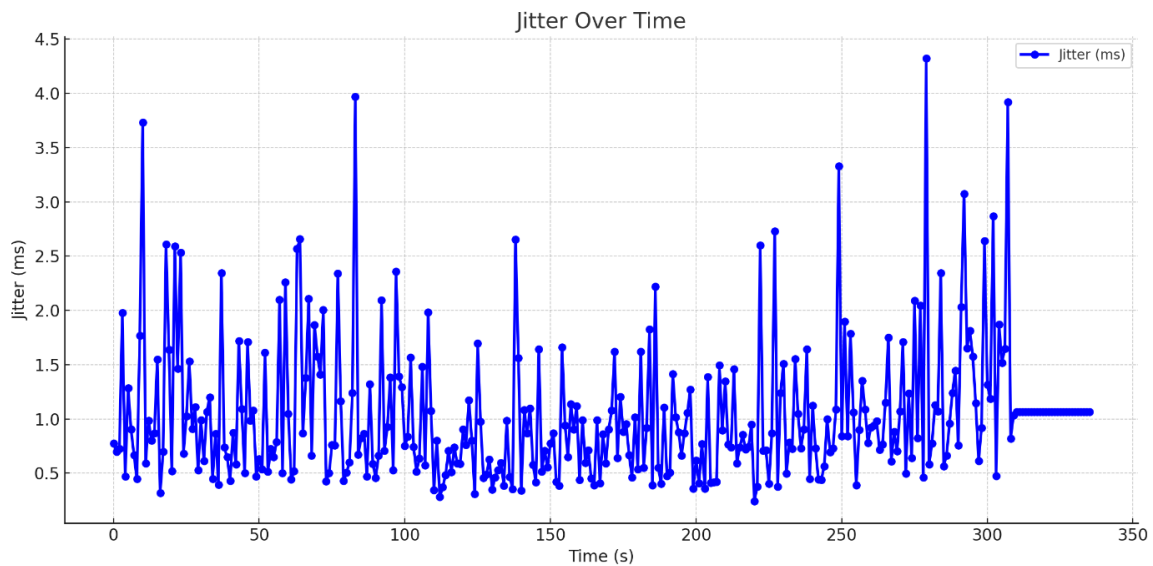
Εικόνα 4.14 Latency Σεναρίου 1 στη πορεία του χρόνου



Εικόνα 4.15 Διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων Latency Σεναρίου 1

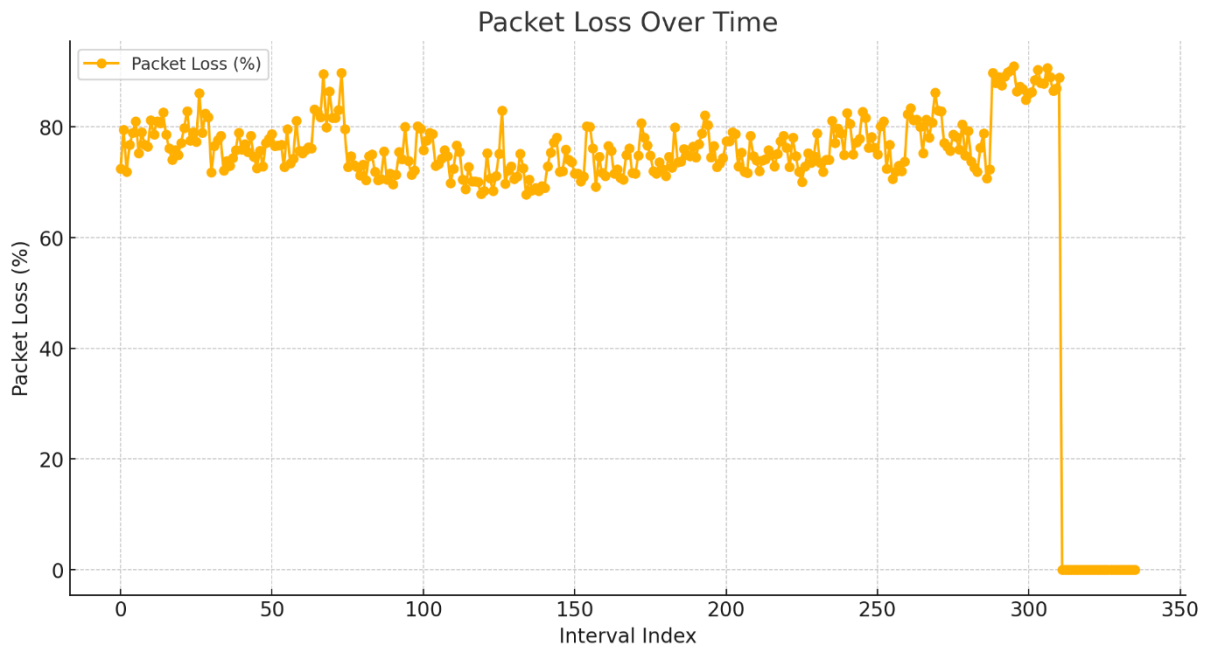
Η Εικόνα 4.16 δείχνει το jitter (παραλλαγή καθυστέρησης) σε χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) με την πάροδο του χρόνου . Παρατηρούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- Το jitter εδώ φαίνεται να έχει διακυμάνσεις με αιχμές που φτάνουν έως και τα 4 ms.
- Παρότι υπάρχουν διακυμάνσεις είναι μικρές και δείχνουν μια γενικά σταθερότητα της σύνδεσης.



Εικόνα 4.16 Jitter Σεναρίου 1 στη πορεία του χρόνου.

Σχετικά με το Packet Loss/Error παρατηρήθηκε από το λειτουργικό των δύο UE πως τα δεδομένα που στάλθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν και αυτά που λήφθηκαν με μια μικρή, αμελητέα, απόκλιση περίπου του 1%. Με αυτό υπόψιν είναι κατανοητό ότι το packet loss ήταν ελάχιστο. Κατά τη διάρκεια ενός έντονου stress testing με ταχύτητα upload τα 200Mbps, με τη χρήση του iperf3, όπου το ένα τερματικό έπαιξε το ρόλο του server και το άλλο του client τα ποσά του packet loss ήταν πολύ υψηλά, περίπου στο 75%.



Εικόνα 4.17 Διάγραμμα χαμένων πακέτων στην διάρκεια του Σεναρίου 1

Ο λόγος είναι κυρίως λόγω της πίεσης που ασκήθηκε. Ως προς αυτό δόθηκε η παρακάτω εντολή στο iperf3

```
iperf3 -c 172.23.166.78 -u -b 200M -t 500
```

Ο client προσπάθησε να στείλει δεδομένα με upload bandwidth 200Mbps. Όπως είναι λογικό αυτό είναι πολύ υψηλό και οδήγησε σε πολύ μεγάλη απώλεια δεδομένων. Όπως χρησιμοποιήθηκε μια πιο λογική προσέγγιση το packet loss ήταν σχεδόν μηδαμινό.

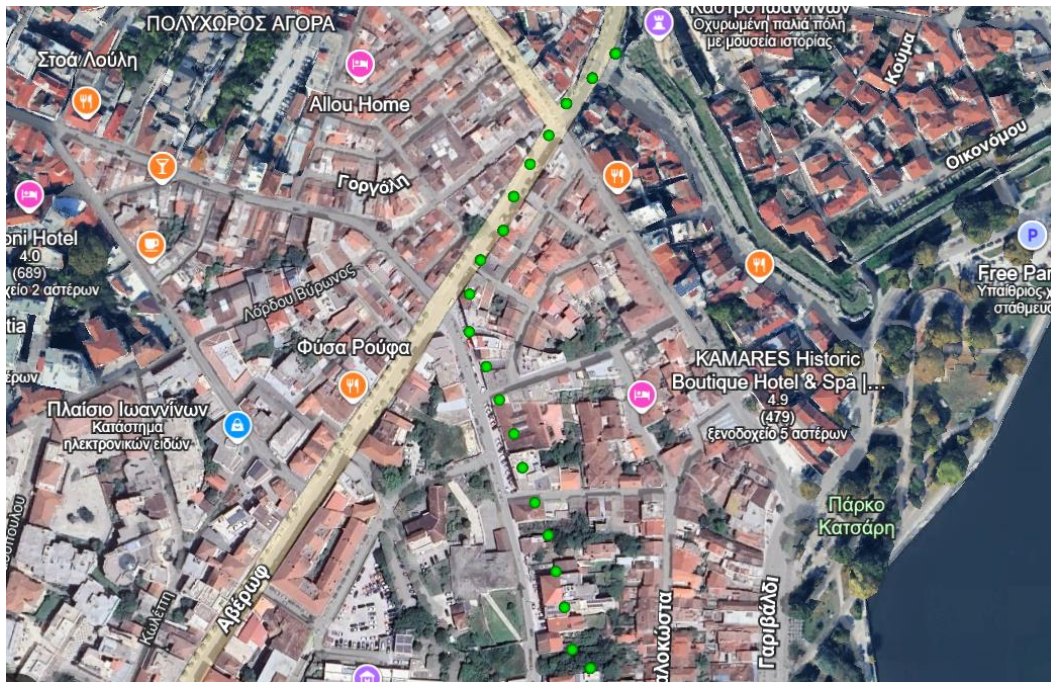
Συνοψίζοντας όταν οι συσκευές εξυπηρετούνταν από την ίδια κυψέλη, το Latency διατηρήθηκε σταθερό σε επίπεδα περίπου των 20 ms, όπως αναμενόταν για δίκτυα 5G NSA.

Σε περιπτώσεις εξυπηρέτησης από διαφορετικές κυψέλες, παρατηρήθηκε αύξηση της καθυστέρησης, της τάξης των 15ms. Δυστυχώς δεν ήταν εφικτό να γίνει σενάριο όπου τα δύο endpoints να είναι σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους παραδείγματος χάριν σε άλλες πόλεις. Επίσης δεν ήταν εφικτό να υπάρχει γνώση του αν οι δύο γειτονικές κεραιές που εξυπηρέτησαν την μεταξύ των δύο endpoints τερματικών επικοινωνία ανήκαν στο ίδιο υποδίκτυο του τηλεπικοινωνιακού παρόχου ή όχι ή αν εξυπηρετούνταν από το ίδιο τμήμα του LTE Core δηλαδή από το ίδιο MME. Τέλος δεν εφαρμόστηκε το σενάριο μεταφοράς

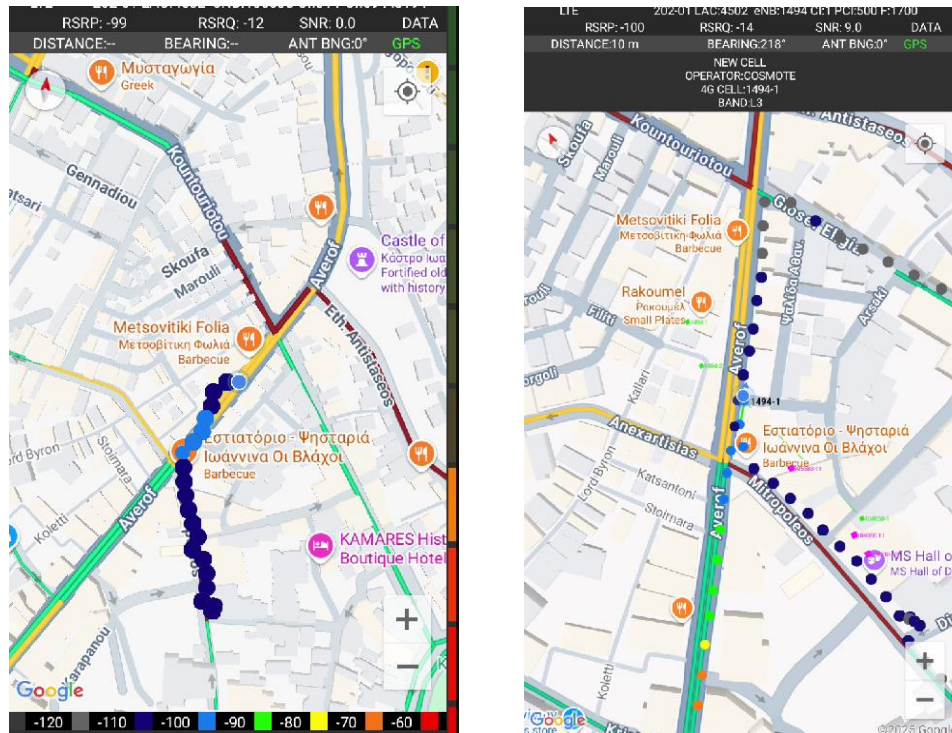
δεδομένων σε endpoints που εξυπηρετούνταν από δύο διαφορετικούς τηλεπικοινωνιακούς παρόχους.

4.2.2 Σενάριο 2

Η κύρια περιοχή πειραμάτων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.18. Η πορεία του χρήστη και συνεπώς και των δύο UE αποτυπώνεται στο χάρτη της περιοχής στην Εικόνα 4.19.

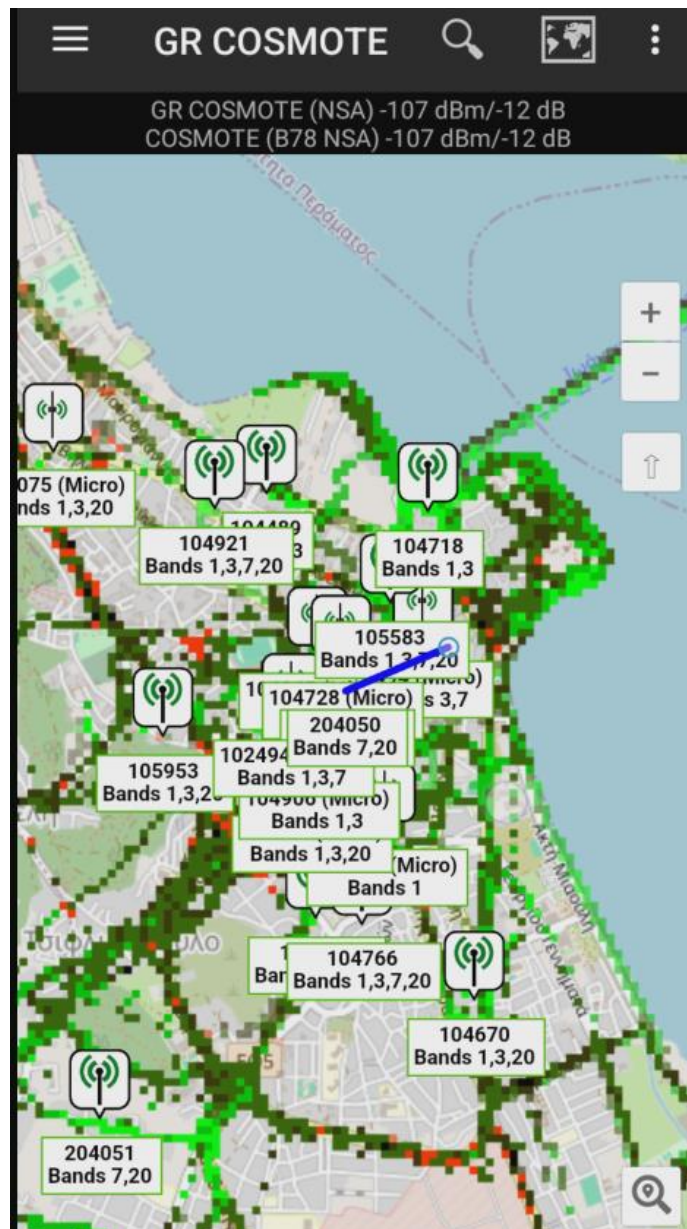


Εικόνα 4.18 Περιοχή δοκιμών Σεναρίου 2



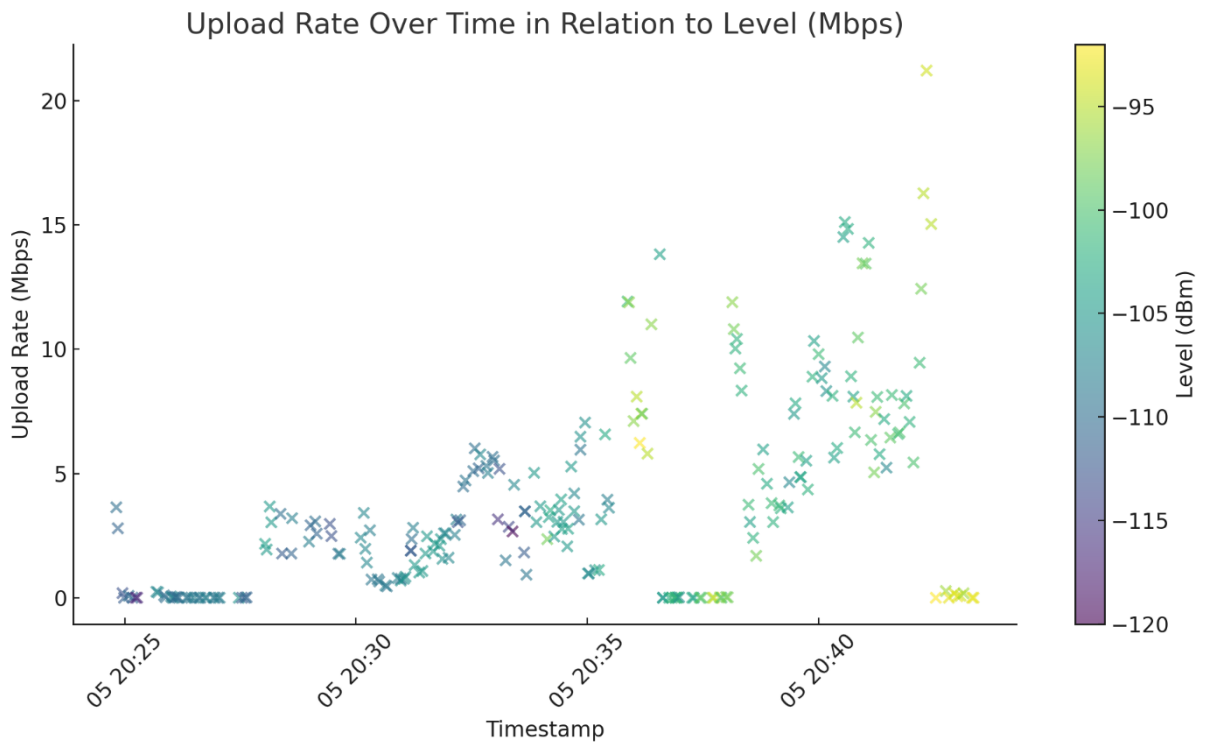
Εικόνα 4.19 Κύρια πορεία και εξυπηρετούμενες κεραιές κατά τη διάρκεια των δοκιμών

Όπως φαίνεται και παρακάτω, υπάρχουν πάρα πολλές κεραιές του ίδιου παρόχου που εξυπηρετούν την περιοχή του πειράματος. Αυτό δείχνει πως η μελέτη του τηλεπικοινωνιακού παρόχου, έχει δείξει την αναγκαιότητα της ποιότητας υπηρεσίας συνεπώς εγκαταστάθηκε πλήθος κεραιών.



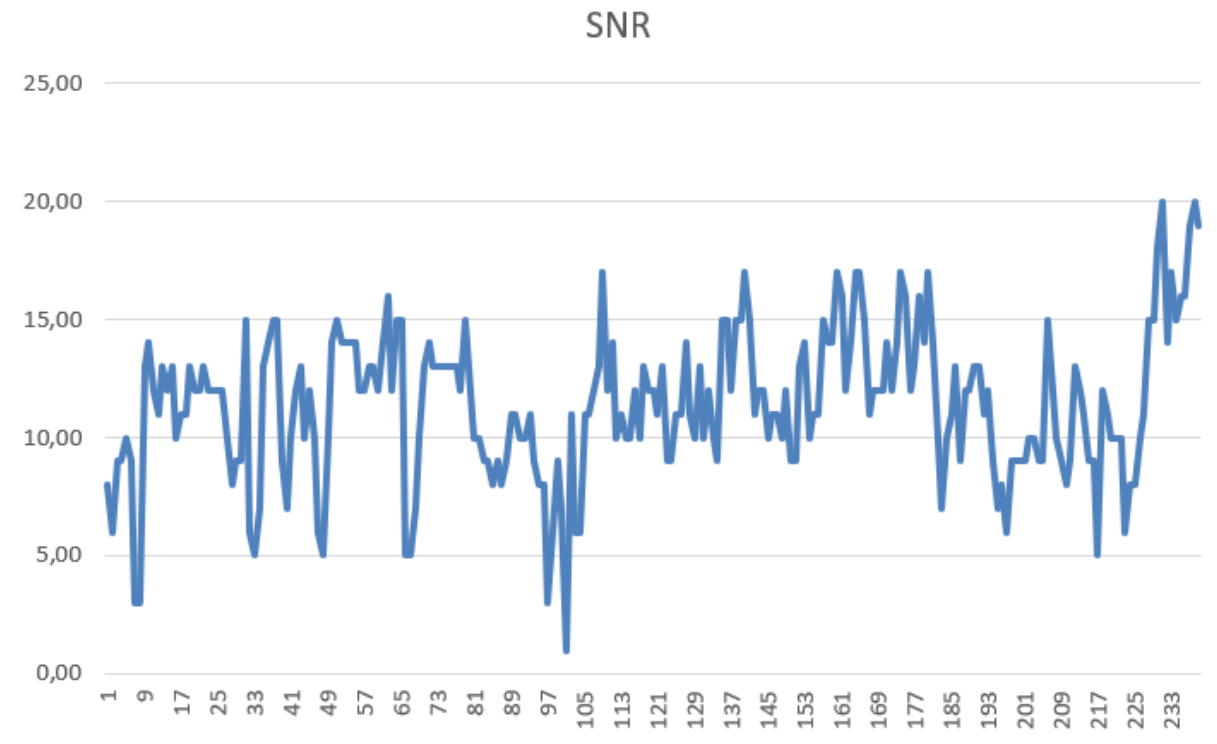
Εικόνα 4.20 Λίστα κεραιών του παρόχου Cosmote στη περιοχή δοκιμών.

Με βάση τα δεδομένα αυτά ήταν εφικτό να παρθούν μετρήσεις και να αναλυθούν τέσσερις από τις πέντε ελεγχόμενες μετρικές. Στην Εικόνα 4.21 παρουσιάζεται ο ρυθμός μεταφόρτωσης δεδομένων (Upload Rate) σε Mbps σε σχέση με το χρονικό στίγμα και την ισχύ σήματος (Level) σε dBm. Το χρώμα των σημείων υποδεικνύει την ισχύ του σήματος, όπου το κίτρινο αντιστοιχεί σε καλύτερη ισχύ (-95 dBm) και το μωβ σε χαμηλή ισχύ (-120 dBm). Παρατηρείται ότι στις περιοχές με καλύτερη ισχύ σήματος (κίτρινα σημεία), οι ρυθμοί ανόδου είναι υψηλότεροι (15-20 Mbps). Σε περιοχές με κακή ισχύ (μωβ/μπλε σημεία), ο ρυθμός ανόδου παραμένει χαμηλός (< 5 Mbps). Αυτό δείχνει ότι η ποιότητα του σήματος επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του ρυθμού ανόδου.



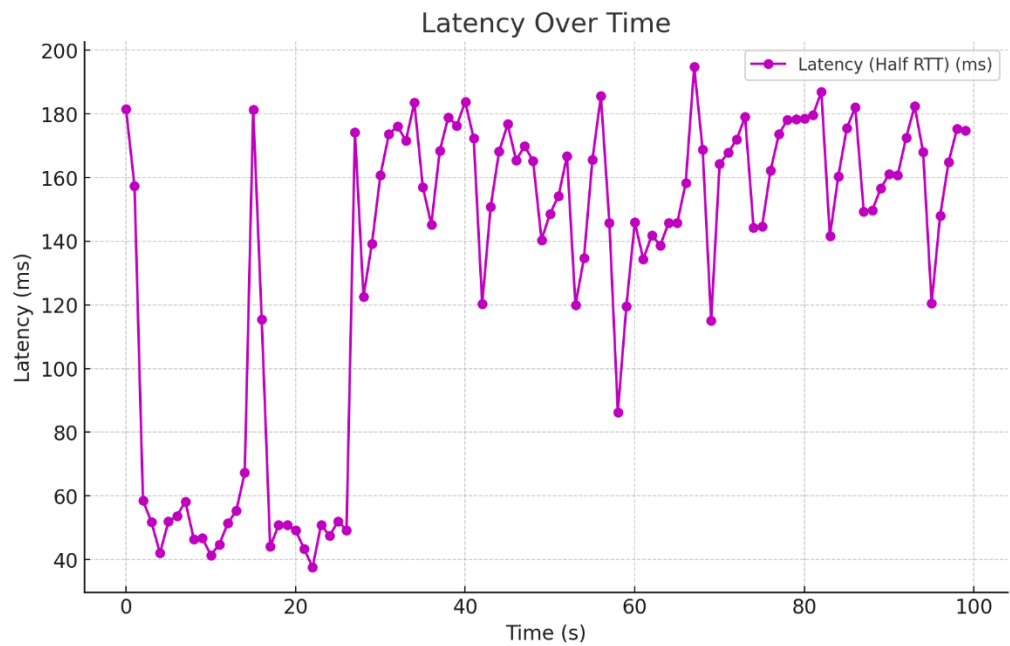
Εικόνα 4.21 Upload Bandwidth και ποιότητα σήματος Σεναρίου 2

Η Εικόνα 4.22 παρουσιάζει την τιμή του Signal-to-Noise Ratio (SNR) με την πάροδο του χρόνου. Φαίνεται ότι υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές του SNR, με συχνές πτώσεις κάτω από τα 5 dB και αιχμές πάνω από τα 15 dB. Προς το τέλος της περιόδου, το SNR σταθεροποιείται κάπως κοντά στα 20 dB, υποδηλώνοντας πιθανή βελτίωση της ποιότητας του σήματος, αλλά όχι πλήρης σταθερότητα. Η διακύμανση του SNR μπορεί να υποδηλώνει αστάθειες στο δίκτυο, συμφόρηση, εμπόδια ή περιβαλλοντικές επιρροές (π.χ. θόρυβος).



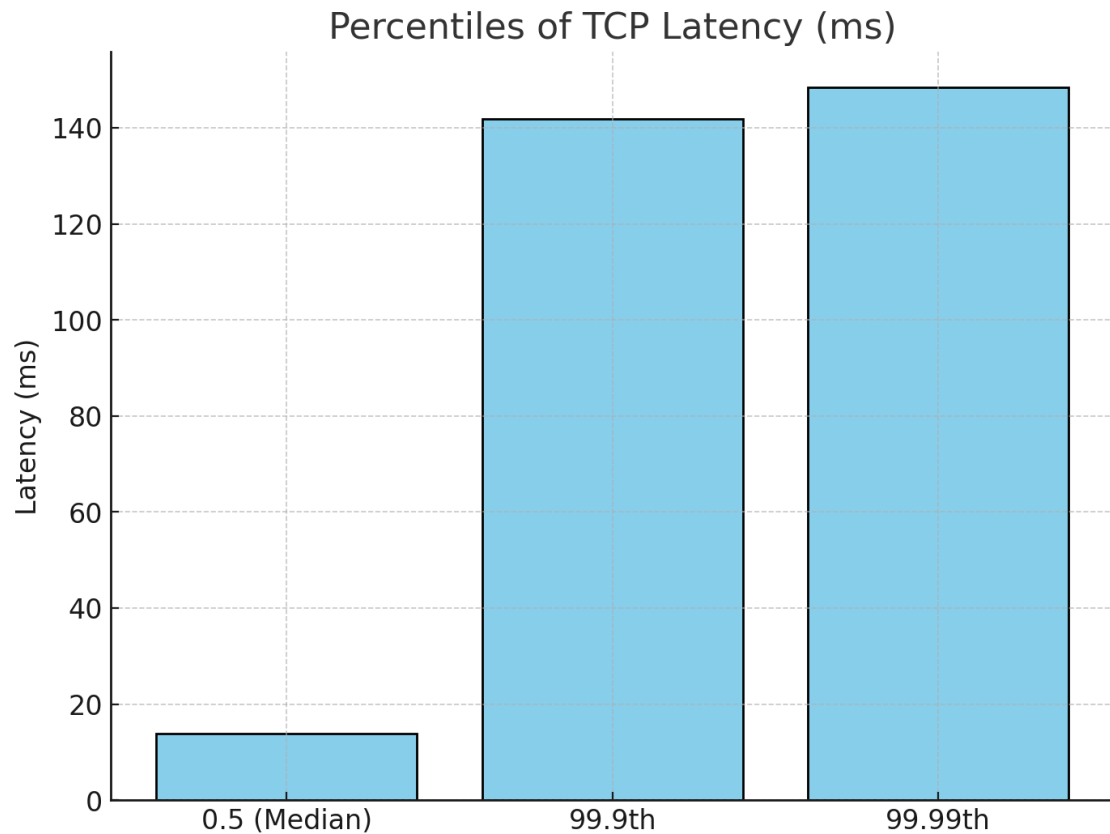
Εικόνα 4.22 SNR Σεναρίου 2 στη πορεία του χρόνου.

Στην Εικόνα 4.23 παρουσιάζεται το Latency στη πορεία του χρόνου δοκιμής.



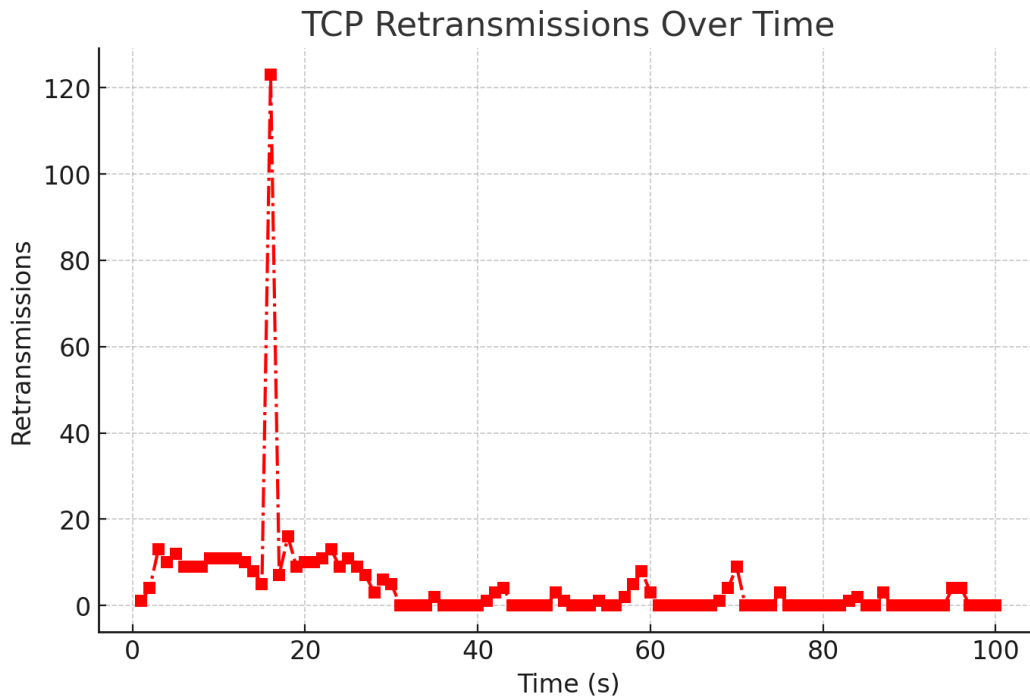
Εικόνα 4.23 Latency Σεναρίου 2 στη πορεία του χρόνου.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα απεικονίζεται η καθυστέρηση (latency) της σύνδεσης τύπου TCP. Οι διακυμάνσεις στον χρόνο απόκρισης καταδεικνύουν πιθανές αλλαγές στην κατάσταση του δικτύου, όπως αυξημένη συμφόρηση, πολλαπλά εμπόδια, θόρυβος από άλλους χρήστες ή άλλα. Υψηλότερες τιμές καθυστέρησης υποδηλώνουν μεγαλύτερες περιόδους αναμονής πριν την ολοκλήρωση της μετάδοσης δεδομένων.



Εικόνα 4.24 Διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων latency Σεναρίου 2

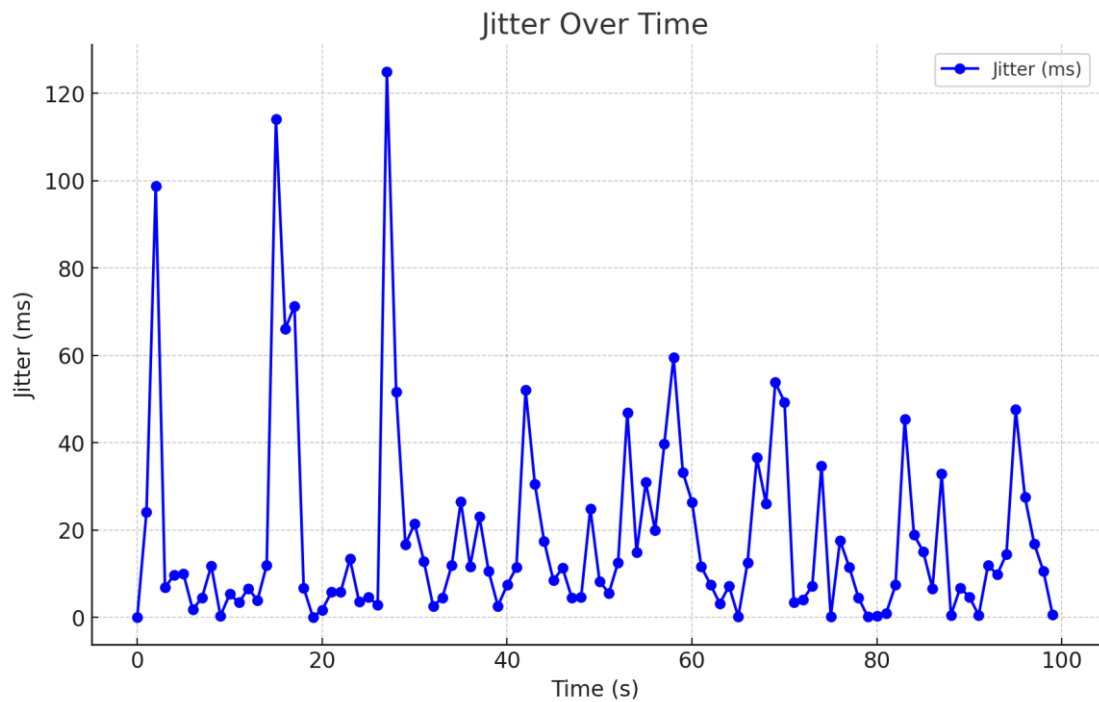
Το διάγραμμα δείχνει αρκετά καθαρά τη διαφορά μεταξύ της διάμεσης τιμής και των υψηλότερων αιχμών, τονίζοντας την αστάθεια που μπορεί να προκύψει σε συγκεκριμένα σημεία της σύνδεσης.



Εικόνα 4.25 Διάγραμμα αναμεταδόσεων πακέτων Σεναρίου 2

Το παραπάνω διάγραμμα, στην Εικόνα 4.25 καταγράφει τον αριθμό των επανεκπομπών δεδομένων (retransmissions) ανά χρονικό διάστημα. Οι επανεκπομπές προκύπτουν όταν πακέτα δεδομένων αποτυγχάνουν να παραδοθούν επιτυχώς και χρειάζονται επαναποστολή. Συνεπώς αυτό το διάγραμμα μπορεί εν μέρει να εξυπηρετήσει ως μετρική το Packet Loss. Η αυξημένη συχνότητα επανεκπομπών μπορεί να αποτελεί ένδειξη προβλημάτων στο δίκτυο όταν υπάρχει αρκετή συμφόρηση.

Τέλος στην Εικόνα 4.26 φαίνεται το Jitter



Εικόνα 4.26 Jitter Σεναρίου 2 στη πορεία του χρόνου.

Το ανέβασμα μεγάλου αρχείου βίντεο κατά τη διάρκεια ώρας αιχμής έδειξε σημαντική αύξηση του jitter, του latency και αρκετές αυξήσεις στην καθυστέρηση όταν η κυψέλη βρισκόταν υπό μεγάλη πίεση δεδομένων.

Ένας καθοριστικός παράγοντας που έπαιξε ρολό ήταν η περιοχή της κίνησης. Όταν το endpoint βρισκόταν σε σημεία με αρκετά εμπόδια, κτήρια καθώς και λόγω του πιθανού θορύβου στο ραδιοφάσμα (spectrum) από τους πολλούς χρήστες, η απόδοση σε όλες τις μετρικές είχε πολύ μεγάλη επιρροή.

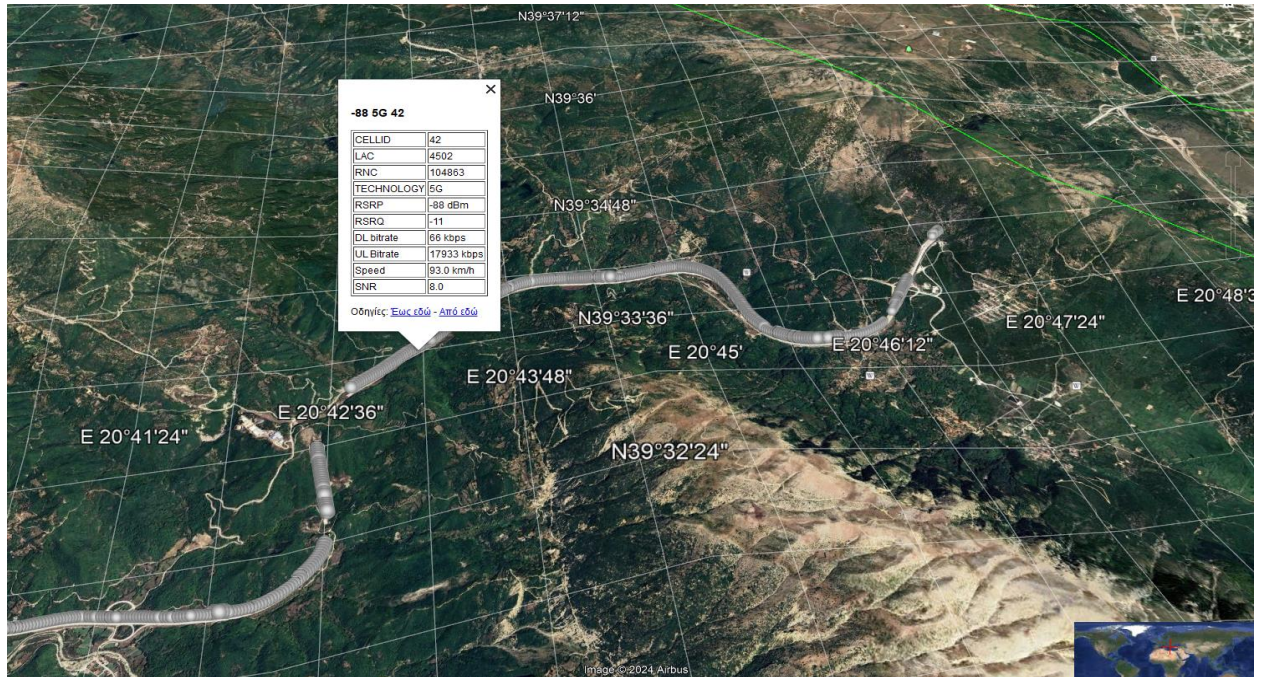
Το bandwidth μειώθηκε κατά 30-40% σε σύγκριση με ώρες χαμηλής κυκλοφορίας, φανερώνοντας τα όρια της αρχιτεκτονικής Non-Standalone (NSA).

Για να γίνει και μια πιο ακριβής καταγραφή παρατηρήθηκαν συνολικά τα ακόλουθα:

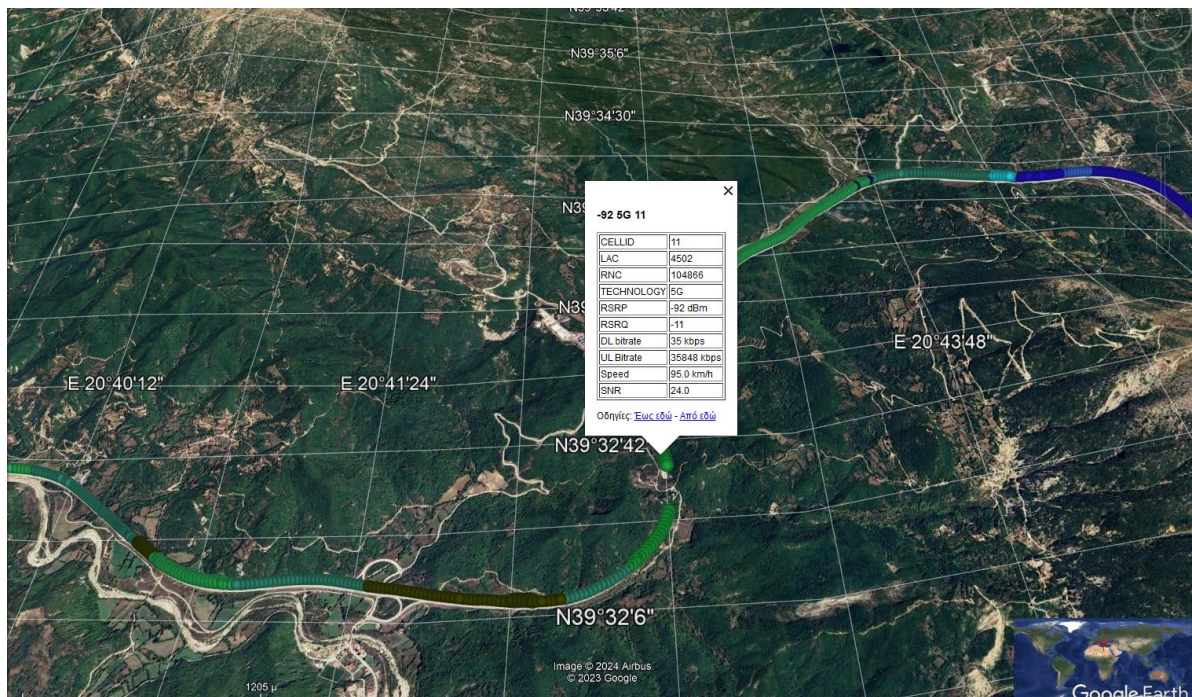
- Bandwidth: εύρος από 2332Kbps ως 13664Kbps.
- Jitter: μέσο εύρος από 5ms ως 20ms
- Latency: μέσο εύρος από 20ms ως 180ms

4.2.3 Σενάριο 3

Το ανέβασμα μεγάλου αρχείου από κινούμενο όχημα κατέδειξε τις προκλήσεις αλλά και τελικά την αποτελεσματικότητα της διατήρησης της σύνδεσης σε υψηλές ταχύτητες. Παρακάτω, στις Εικόνες 4.27 και 4.28, φαίνονται δειγματοληπτικά δεδομένα εν μέσω διαδικασίας δοκιμών σε κίνηση.

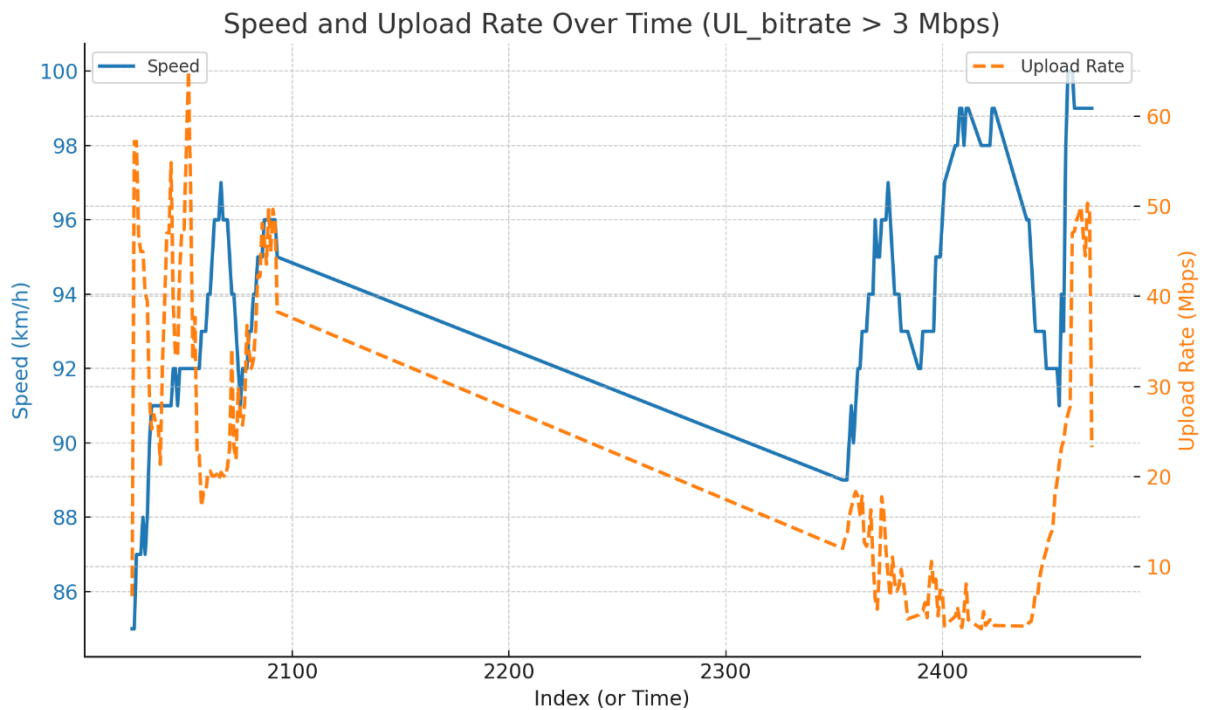


Εικόνα 4.27 Τυχαίο δειγματοληπτικό σημείο αναφοράς Σεναρίου 3



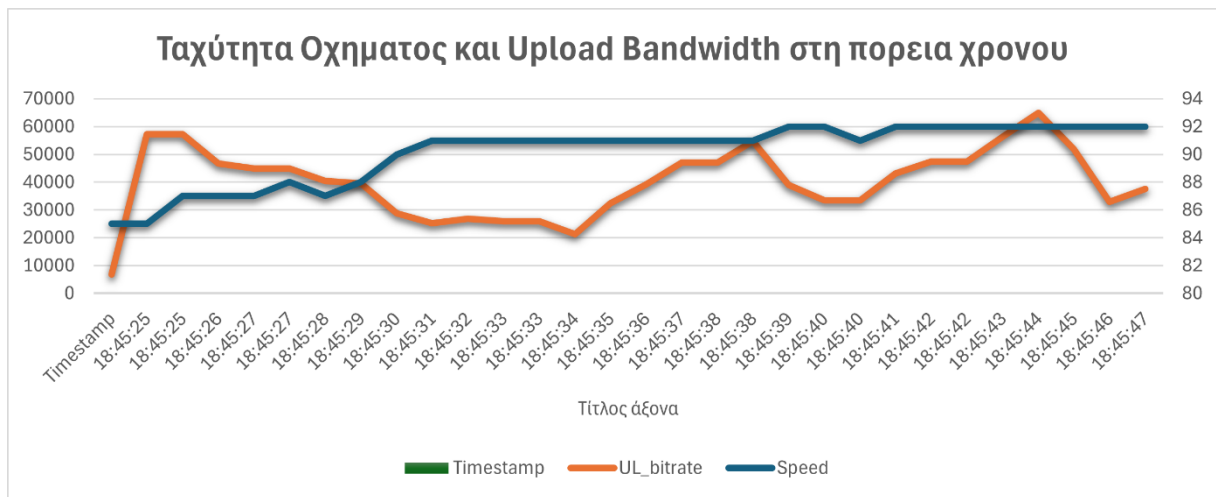
Εικόνα 4.28 Τυχαίο δειγματοληπτικό σημείο αναφοράς Σεναρίου 3

Στην Εικόνα 4.29 φαίνεται ξεκάθαρα από το διάγραμμα οι τιμές της ταχύτητας Upload Bandwidth και ταχύτητας οχήματος συνολικά από το σενάριο που πραγματοποιήθηκε. Στο γράφημα έχουν εξαλειφθεί οι ταχύτητες κάτω από 3 Mbps καθώς το δίκτυο δε χρησιμοποιούνταν σε αυτές τις περιπτώσεις. Επίσης έχουν εξαλειφθεί όλες οι τιμές όταν το δίκτυο μεταφερόταν από 5G σε 4G καθώς αυτές είναι εκτός ελέγχου στη παρούσα εργασία.



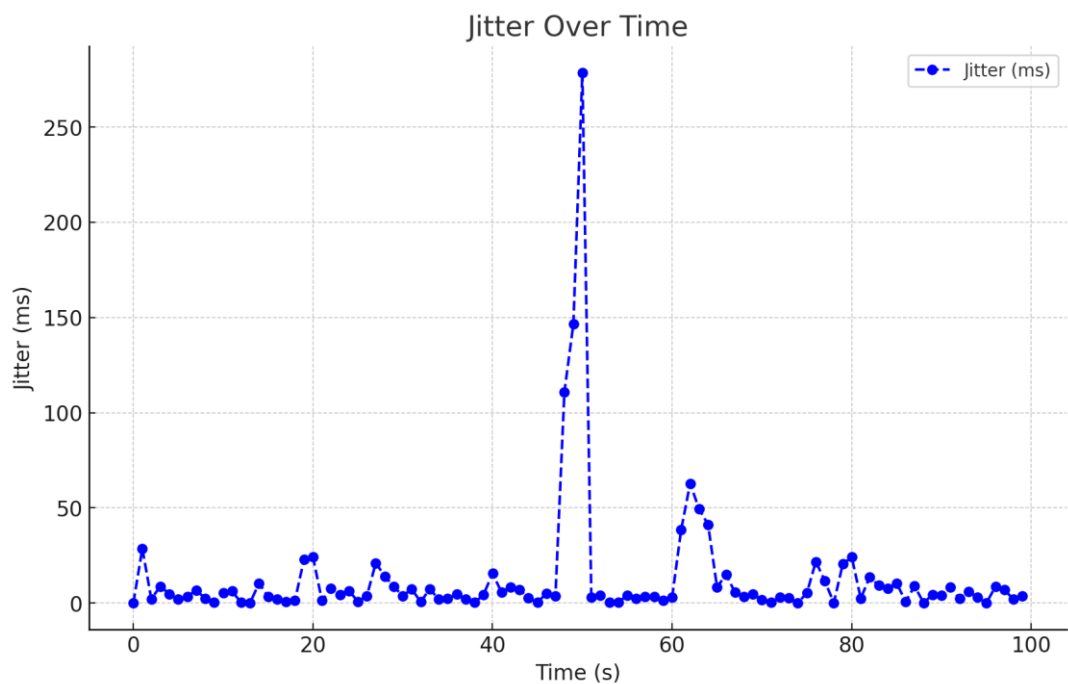
Εικόνα 4.29 Ταχύτητα οχήματος σε αντιπαράβολή με το Upload Bandwidth στη πορεία του χρόνου

Είναι κατανοητό πως υπάρχουν πολλές εναλλαγές αλλά λαβαίνοντάς υπόψιν τις γρήγορες αλλαγές στις συνθήκες όπως παραδείγματος χάρη είσοδος σε σήραγγα, αλλαγή κεραιών, ταχύτητα οχήματος και άλλα φαίνεται να υπάρχει καλή απόδοση του δικτύου. Στην Εικόνα 4.30 φαίνεται η ταχύτητα του οχήματος σε αντιπαράβολή με το Upload Bandwidth στη πορεία του χρόνου.



Εικόνα 4.30 Επιπρόσθετο διάγραμμα ταχύτητας οχήματος-Upload Bandwidth στη πορεία του χρόνου.

Για το Jitter αναλυθήκαν τα ακόλουθα:



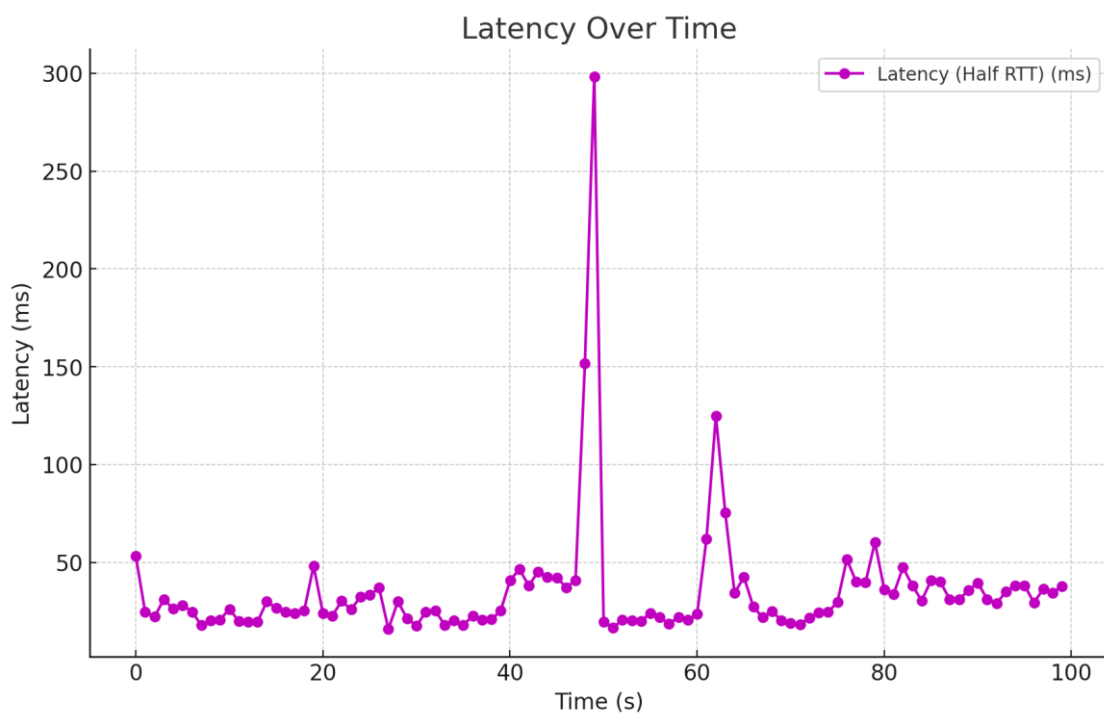
Εικόνα 4.31 Jitter Σεναρίου 3 στη πορεία του χρόνου.

Το jitter που εμφανίζεται στην Εικόνα 4.31 φαίνεται ότι είναι σχετικά χαμηλό και σταθερό (π.χ. κάτω από τα 5-10 ms), συνεπώς το δίκτυο θεωρείται σταθερό και κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές παρά τις απότομες περιβαλλοντολογικές και άλλες αλλαγές λόγω της κίνησης σε όχημα.

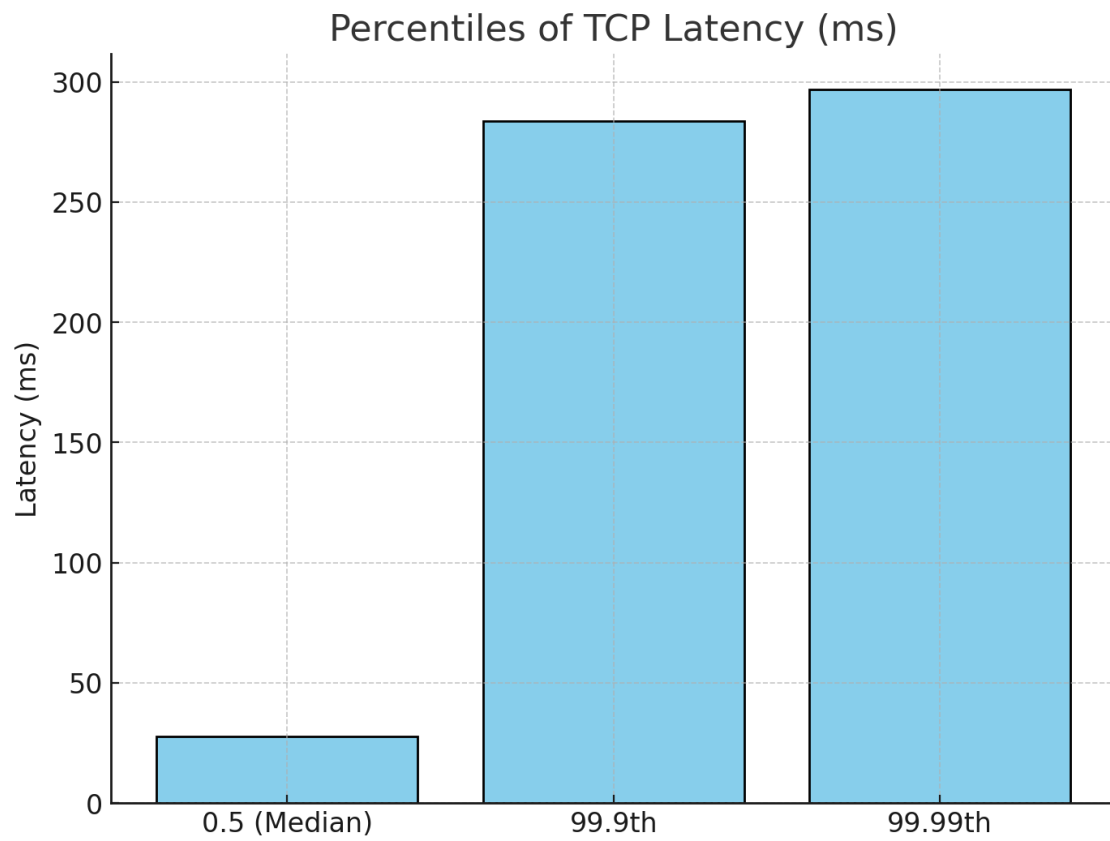
Παρατηρήθηκαν μικρές μεταπτώσεις στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων κατά την εναλλαγή κεραιών, με αυξομειώσεις στην καθυστέρηση (2-3 ms).

Σε σημεία με μειωμένη κάλυψη 5G, η απόδοση υποβαθμίστηκε, γεγονός που υποδεικνύει την εξάρτηση από το LTE όμως στη διαδρομή που ακολουθήθηκε τα σημεία ήταν ελάχιστα.

Στη παρακάτω Εικόνα 4.32 φαίνεται και το Latency στη πορεία του χρόνου καθώς επίσης και το διάγραμμα μέσων τιμών, 99,9% και 99,99% (Εικόνα 4.33). Παρατηρείται πως στις περισσότερες τιμές, η καθυστέρηση παραμένει γύρω στα 50 ms, κάτι που δείχνει σταθερότητα στο δίκτυο. Σημειώνονται δύο μεγάλες αιχμές (~300 ms και ~150 ms), οι οποίες δείχνουν περιόδους προβλήματος στη μετάδοση δεδομένων λόγω ταχυστατης εναλλαγής περιβαλλοντικών παραγόντων.

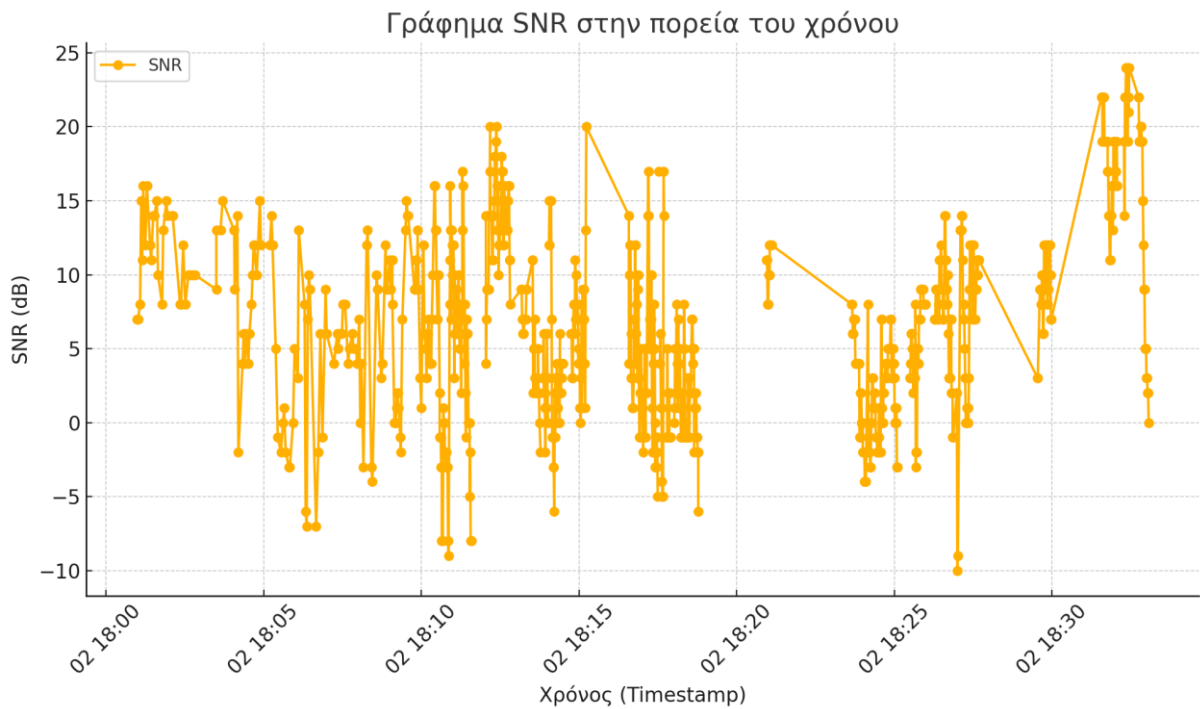


Εικόνα 4.32 Latency Σεναρίου 3 στη πορεία του χρόνου



Εικόνα 4.33 Διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων Latency

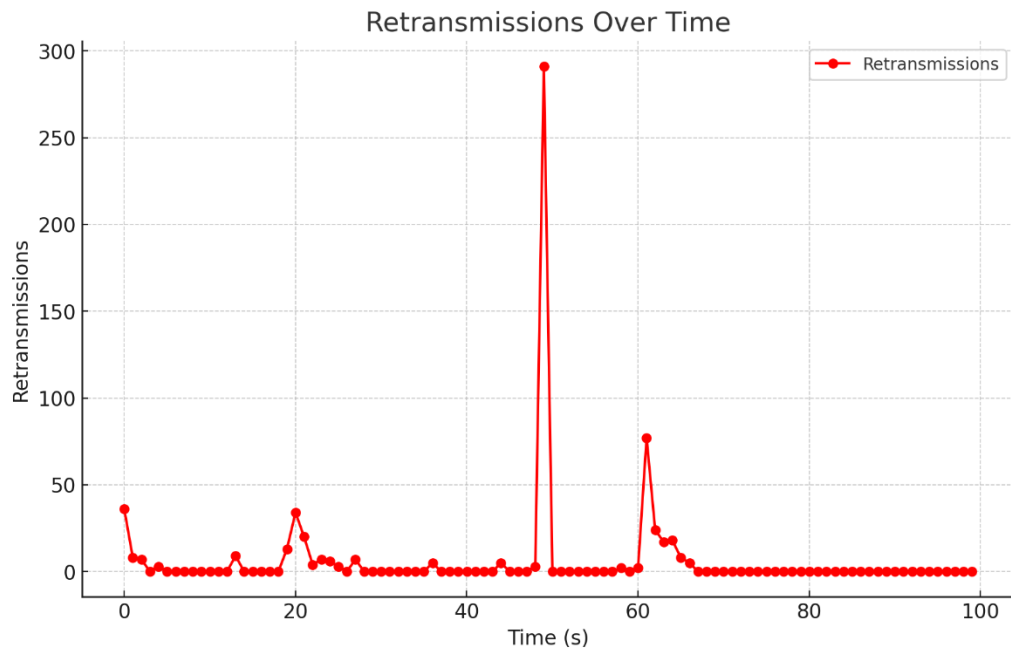
Στην Εικόνα 4.34 γίνεται αναπαράσταση του SNR καθ' όλη τη διαδρομή.



Εικόνα 4.34 SNR Σεναρίου 3 στη πορεία του χρόνου.

Το SNR κυμαίνεται σε διάφορες τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της καταγραφής. Υπάρχουν σημεία όπου το SNR είναι υψηλό (δηλαδή, καλύτερη ποιότητα σήματος) και σημεία όπου πέφτει (πιθανώς λόγω παρεμβολών, ή αλλαγής του δικτύου και περιβάλλοντος). Τα πολύ χαμηλά SNR σημεία πιθανώς σχετίζονται με περιοχές με χαμηλή κάλυψη ή παρεμβολές.

Τέλος, στην Εικόνα 4.35, παρατείθονται και οι επανεκπομπές πακέτων στο παρακάτω διάγραμμα. Είναι ξεκάθαρη η σταθερότητα του δικτύου μέσα στη πορεία του χρόνου. Υπήρξε κάποια στιγμή μια μεγάλη επανεκπομπή αλλά αυτό θα έγινε λόγω ξαφνικής αλλαγής, παραδείγματος χάρι εισαγωγή σε τούνελ, χωρίς να προλάβει το 5G να μεταπηδήσει σε 4G.



Εικόνα 4.35 Επαναποστολές χαμένων πακέτων στη πορεία του χρόνου.

4.3 Συγκριτική ανάλυση μεταξύ 5G και άλλων τεχνολογιών

Η σύγκριση του 5G με τις τεχνολογίες 4G και Wi-Fi βασίστηκε σε κρίσιμες μετρικές, όπως η καθυστέρηση, το εύρος ζώνης και η σταθερότητα της σύνδεσης.

Ταχύτητα: Το 5G NSA προσέφερε ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων περίπου 4 φορές μεγαλύτερες από το 4G, ενώ ήταν συγκρίσιμο με τις ταχύτητες Wi-Fi σε ιδανικές συνθήκες. Φυσικά στη περίπτωση του Wi-Fi υπάρχει ο περιορισμός της απόδοσης της γραμμής στο δρομολογητή (router). Συνεπώς οι μετρικές μεταξύ του δρομολογητή και της ασύρματης συσκευής δεν μπορούν να αξιολογηθούν ώστε να θεωρηθούν αποδοτικές η όχι.

Καθυστέρηση: Ενώ το 5G NSA παρουσίασε εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση για τα τωρινά δεδομένα (20 ms), το 4G είχε καθυστέρηση 50ms. Φυσικά σε 5G Standalone implementation η καθυστέρηση θα είναι πιθανότατα αρκετά διαφορετική όντας μικρότερη σύμφωνα με τα πρότυπα που ορίζει το 3GPP.

Σταθερότητα: Σε περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας χρηστών, το 5G NSA δεν έδειξε να υπερείχε σε σχέση με το 4G. Αυτό φαίνεται λογικό μας και η χρήση του

5G στο περιβάλλον που έγιναν οι μετρήσεις βασίζεται στο 4G Core και στις υπάρχουσες LTE κεραίες (eNB-A). Υπήρξε για πολύ μικρό χρονικό περιθώριο μεταφορά της σύνδεσης σε 5G Standalone (SA) κατάσταση αλλά ήταν για λίγα δευτερόλεπτα συνεπώς δε μπορεί να αξιολογηθεί. Σε αυτή τη κατάσταση φάνηκε να μεταφέρεται η διασύνδεση σε ειδική κεραία του 5G που ονομάζεται gNB. Παρακάτω παρατίθεται μια σχετική εικόνα που το αποδεικνύει:

TIME	EVENT	AC	CELLID	CI	ARFCN	LEVEL	QUAL	TYPE	SERV
20:38:59	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-101	-11	5G	2
20:39:01	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-102	-12/-13	5G	8
20:39:09	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-101	-11	5G	2
20:39:11	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-102	-12/-16	5G	9
20:39:20	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-104	-11	5G	2
20:39:22	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-107	-12/-15	5G	6
20:39:28	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-105	-11	5G	2
20:39:30	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-103	-12/-13	5G	4
20:39:34	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-101	-11	5G	2
20:39:36	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-105	-12/-13	5G	8
20:39:44	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-104	-11	5G	2
20:39:46	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-102	-12/-12	5G	6
20:39:52	HD5G5G	4502	32767-8	84	634080	-102	-11	5G	2
20:39:54	HD5G5G	4502	104718-2	265	1700	-104	-12/-13	5G	6

Εικόνα 4.36 Μεμονωμένη περίπτωση χρήσης του 5G Standalone με χρήση gNB

4.4 Ερμηνεία των ευρημάτων

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ανέδειξαν τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς της αρχιτεκτονικής NSA του 5G:

Η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και η υψηλή ταχύτητα του 5G υποστηρίζουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Η εξάρτηση του NSA από το LTE αποτελεί περιοριστικό παράγοντα, ειδικά σε περιοχές με ανεπαρκείς υποδομές.

Το stress testing απέδειξε την εν μέρει την ανθεκτικότητα του 5G NSA, αν και η διαμοίραση πόρων (spectrum sharing) μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση. Αυτό το σημείο έγινε φανερό στο ιδιαίτερα στο σενάριο 2, όταν δηλαδή υπήρχε κίνηση δεδομένων σε πολυσύχναστα σημεία καθώς επίσης και από το Σενάριο 1 όπου στάλθηκαν με πίεση Bandwidth υψηλός όγκος δεδομένων και χάθηκαν περίπου το 75% αυτών.

Η κατανόηση αυτών των αποτελεσμάτων προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων 5G, καθώς και για τη στρατηγική υλοποίησης μελλοντικών δικτύων Standalone (SA).

4.5 Συμπεράσματα σύγκρισης Πραγματικών Δοκιμών και Προσομοίωσης

Όπως ήταν λογικό και επόμενο υπάρχει μεγάλη διαφορά από τα πραγματικά σενάρια δοκιμών που οφείλονται σε πιθανούς μεταβλητούς και τυχαίους παράγοντες. Αυτά μπορεί να είναι η θερμοκρασία, τα εμπόδια και οι συχνά μεταβαλλόμενες καταστάσεις στα πραγματικά σενάρια. Στα προσομοιωτικά σενάρια δεν ήταν εφικτό να μπουν ή να μετρηθούν όλοι οι παράγοντες όπως παραδείγματος χάρη το ότι η πραγματική δοκιμή έγινε από εσωτερικό χώρο για το σενάριο 1 και επίσης οι πολλές και γρήγορες εναλλαγές που υπήρχαν στο σενάριο 3. Στο περιβάλλον προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κεραίες τύπου gNB και οι συνθήκες θεωρούνται μερικώς ιδανικές.

Γενικά φαίνεται να υπάρχουν πολλοί αστάθμητοι και μεταβλητοί παράγοντες στο πραγματικό περιβάλλον δοκιμών που δεν υλοποιήθηκαν στα σενάρια προσομοίωσης. Φυσικά ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο έλεγχος των πραγματικών δεδομένων. Με κατάλληλη διαμόρφωση και χρήση και άλλων λογισμικών προσομοίωσης, πιθανότατα θα ήταν εφικτή η προσέγγιση των πραγματικών σεναρίων δοκιμών από άποψη προσομοίωσης και αυτό μπορεί να αποτελεί ευκαιρίας μελλοντικής έρευνας.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η συζήτηση σχετικά με τα ευρήματα της μελέτης για την απόδοση του δικτύου 5G αναδεικνύει τόσο τις δυνατότητες όσο και τις αδυναμίες της τεχνολογίας αυτής. Η τεχνολογία 5G παρουσιάζεται ως ένας σημαντικός καταλύτης για την ανάπτυξη εφαρμογών αιχμής, προσφέροντας εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, ελάχιστες καθυστερήσεις και τη δυνατότητα υποστήριξης μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών. Παράλληλα, όμως, οι περιορισμοί που προκύπτουν από την εξάρτηση της αρχιτεκτονικής Non-Standalone (NSA) από την τεχνολογία LTE υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις και στρατηγική ανάπτυξη.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η ανάλυση επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της απόδοσης του 5G NSA μέσα από συγκεκριμένα πειραματικά σενάρια, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για τις πραγματικές δυνατότητες του δικτύου. Τα ευρήματα ενίσχυσαν την άποψη ότι το 5G αποτελεί την τεχνολογία που θα καθορίσει την πορεία της συνδεσιμότητας στο άμεσο μέλλον, αν και απαιτούνται σημαντικές βελτιώσεις για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού της.

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη είχε ως στόχο να αναδείξει τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της τεχνολογίας 5G, όπως αυτή εφαρμόζεται μέσω της αρχιτεκτονικής Non-Standalone (NSA). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το 5G προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά την ταχύτητα, την καθυστέρηση και τη δυνατότητα υποστήριξης εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο. Ειδικότερα:

Εξαιρετικά Χαμηλή Καθυστέρηση: Το 5G NSA πέτυχε καθυστερήσεις της τάξης των 10-15 ms υπό ιδανικές συνθήκες, τιμές που το καθιστούν κατάλληλο για κρίσιμες εφαρμογές, όπως τηλεχειρουργική, αυτόνομα οχήματα και βιομηχανικό αυτοματισμό.

Ωστόσο, σε περιοχές με μεγάλη κυκλοφορία δεδομένων, η καθυστέρηση αυξανόταν σε 20-50 ms, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω βελτιστοποίηση.

Υψηλή Ταχύτητα Μετάδοσης Δεδομένων: Σε συνθήκες με καλή κάλυψη, η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων έφτασε τα 18 Mbps κατά μέσο όρο, με μέγιστες ταχύτητες που προσεγγίζουν τα 136 Mbps σε μερικά σημεία. Αυτές οι επιδόσεις είναι υπερδιπλάσιες των ταχυτήτων που προσφέρει το δίκτυο 4G.

Υποστήριξη Εφαρμογών Πραγματικού Χρόνου: Το δίκτυο 5G NSA απέδειξε ότι μπορεί να υποστηρίξει απαιτητικές εφαρμογές, όπως παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο (real-time gaming), video streaming υψηλής ανάλυσης, και IoT συσκευές, οι οποίες απαιτούν σταθερή συνδεσιμότητα και χαμηλές καθυστερήσεις.

Ωστόσο, η εξάρτηση της αρχιτεκτονικής NSA από την τεχνολογία 4G αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Οι κεραιές LTE που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων δημιουργούν προβλήματα διαμοιρασμού πόρων (spectrum sharing), επηρεάζοντας την απόδοση σε συνθήκες υψηλής ζήτησης. Επιπλέον, σε περιοχές όπου η κάλυψη 5G είναι ανεπαρκής, η σύνδεση βασίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στο δίκτυο LTE, με αποτέλεσμα την αυξημένη καθυστέρηση και τη μειωμένη απόδοση.

5.2 Περιορισμοί της μελέτης

Παρά τη συλλογή πολύτιμων δεδομένων, η έρευνα αυτή περιλαμβάνει ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

Γεωγραφική Περιοριστικότητα: Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κυρίως στην περιοχή των Ιωαννίνων, περιορίζοντας τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων. Για παράδειγμα, η απόδοση σε περιοχές με πυκνότερες πληθυσμιακές συγκεντρώσεις,

όπως μεγάλες πόλεις, ή σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

Έλλειψη Υποδομών Standalone: Η μελέτη επικεντρώθηκε αποκλειστικά σε δίκτυα NSA, καθώς οι υποδομές Standalone (SA) δεν είναι ακόμη διαδεδομένες. Η αρχιτεκτονική NSA επηρεάζει άμεσα την απόδοση του δικτύου, καθώς εξαρτάται από το LTE για τη διαχείριση της σύνδεσης (control plane).

Περιορισμένη Δοκιμή Υποθέσεων: Δεν κατέστη δυνατή η εκτέλεση πειραμάτων μεταξύ διαφορετικών παρόχων τηλεπικοινωνιών ή η αξιολόγηση της απόδοσης σε σενάρια με μεγαλύτερες αποστάσεις, όπως μεταξύ διαφορετικών πόλεων.

Έλλειψη Δεδομένων Προσομοίωσης: Η απουσία εκτεταμένης προσομοίωσης περιορίζει την κατανόηση της απόδοσης του δικτύου σε ιδανικές συνθήκες ή σε σενάρια που δεν είναι εύκολο να αναπαραχθούν στο πεδίο.

Αυτοί οι περιορισμοί υποδεικνύουν την ανάγκη για πιο εκτεταμένες και διαφοροποιημένες δοκιμές στο μέλλον.

5.3 Μελλοντική έρευνα

Η μελλοντική έρευνα στον τομέα της τεχνολογίας 5G μπορεί να εστιάσει στις εξής κατευθύνσεις:

Αρχιτεκτονική Standalone (SA): Η ανάλυση της απόδοσης του δικτύου 5G σε πλήρως αυτόνομη μορφή (SA) θα επιτρέψει την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων του, χωρίς τους περιορισμούς του LTE. Τα δίκτυα SA μπορούν να επιτύχουν χαμηλότερες καθυστερήσεις και υψηλότερη σταθερότητα, ιδανικές για εφαρμογές όπως τα αυτόνομα οχήματα και οι έξυπνες πόλεις.

Εξερεύνηση Αγροτικών και Απομακρυσμένων Περιοχών: Παρά την έμφαση στις αστικές περιοχές, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί η απόδοση του 5G σε αγροτικές περιοχές, όπου η κάλυψη μπορεί να είναι πιο περιορισμένη. Η κατανόηση αυτών των διαφορών είναι κρίσιμη για την ισότιμη πρόσβαση στις νέες τεχνολογίες.

Edge Computing και Network Slicing: Η ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής, όπως το edge computing και το network slicing, μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου, επιτρέποντας την παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο.

Συνεργασία μεταξύ Παρόχων: Η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών παρόχων τηλεπικοινωνιών και η δημιουργία κοινών υποδομών μπορούν να επιταχύνουν την υιοθέτηση του 5G και να εξασφαλίσουν καλύτερη κάλυψη και απόδοση.

Προσομοίωση και Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων: Η χρήση προσομοιώσεων και εργαλείων ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data analytics) μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του δικτύου σε σενάρια υψηλής πίεσης, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα: Με την αυξανόμενη χρήση του 5G για την υποστήριξη κρίσιμων εφαρμογών, η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας αποτελούν βασικές προτεραιότητες. Μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να εστιάζουν στις απειλές και τις λύσεις για την ασφάλεια δικτύων 5G.

Η κατανόηση και η αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με το 5G είναι κρίσιμη για τη διαμόρφωση του μέλλοντος των επικοινωνιών. Η τεχνολογία 5G, παρά τους περιορισμούς της, προσφέρει τη βάση για τη δημιουργία ενός δικτύου συνδεσιμότητας που θα υποστηρίξει την ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών και την υιοθέτηση καινοτομιών σε παγκόσμιο επίπεδο. Με τη σωστή στρατηγική και επενδύσεις, το 5G μπορεί να αποτελέσει τον ακρογωνιαίο λίθο για το μέλλον των τηλεπικοινωνιών και της κοινωνίας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Cainelli, G.P. and Underberg, L., 2023. Performance testing of a 5G campus network in real-world propagation conditions from the application's point of view. *IFAC-Papers OnLine*, 56(2), pp.9837-9842.
- [2] Yuan, X., Wu, M., Wang, Z., Zhu, Y., Ma, M., Guo, J., Zhang, Z.L. and Zhu, W., 2022, August. Understanding 5g performance for real-world services: A content provider's perspective. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference* (pp. 101-113).
- [3] Soós, D. Ficzer, P. Varga and Z. Szalay, "Practical 5G KPI Measurement Results on a Non-Standalone Architecture," *NOMS 2020 - 2020 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Budapest, Hungary, 2020, pp. 1-5.
- [4] A. K. Thyagarajan, P. Balasubramanian, V. D and K. M, "SNR-CQI Mapping for 5G Downlink Network," *2021 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, Bandung, Indonesia, 2021, pp. 173-177.
- [5] Pyatin, I., Boiko, J., Eromenko, O., & Parkhomey, I. (2023). Implementation and analysis of 5G network identification operations at low signal-to-noise ratio. In *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* (Vol. 21, Issue 3, p. 496). Universitas Ahmad Dahlan.
- [6] Fehmi, H., Amr, M. F., Bahnasse, A., & Talea, M. (2022). 5G Network: Analysis and Compare 5G NSA /5G SA. In *Procedia Computer Science* (Vol. 203, pp. 594–598). Elsevier BV.
- [7] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Munoz and J. M. Lopez-Soler, "A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 905-929, Secondquarter 2020.
- [8] E. Hajlaoui, A. Zaier, A. Khelifi, J. Ghodhbane, M. B. Hamed and L. Sbita, "4G and 5G technologies: A Comparative Study," *2020 5th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Sousse, Tunisia, 2020, pp. 1-6.
- [9] H. Yuliana, Iskandar and Hendrawan, "Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for 5G Coverage Prediction: Identification of Dominant Feature Parameters and Prediction Accuracy," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 18939-18956, 2024.
- [10] Ayman A. El-Saleh, Abdulraqueb Alhammadi, Ibraheem Shayea, Wan Haslina Hassan, Mohamed Shaik Honnurvali, Yousef Ibrahim Daradkeh, Measurement analysis and performance evaluation of mobile broadband cellular networks in a populated city, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 66, 2023, Pages 927-946, ISSN 1110-0168.

- [11] Kilpeläinen, T. (2020). *Performance analysis of 5G network implementations*. Retrieved from https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/343017/Kilpel%C3%A4inen_Teemu.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [12] Qureshi, H. N., Manalastas, M., Ijaz, A., Imran, A., Liu, Y., & Al Kalaa, M. O. (2022). Communication Requirements in 5G-Enabled Healthcare Applications: Review and Considerations. *Healthcare*, 10(2), 293.
- [13] T. Norp, "5G Requirements and Key Performance Indicators," in *Journal of ICT Standardization*, vol. 6, no. 1-2, pp. 15-30, 2018.
- [14] Díaz Zayas A, Caso G, Alay Ö, Merino P, Brunstrom A, Tsolkas D, Koumaras H. A Modular Experimentation Methodology for 5G Deployments: The 5GENESIS Approach. *Sensors*. 2020; 20(22):6652.
- [15] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang and B. Ottersten, "Dynamic Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks With Full-Duplex Technology: Recent Advances and Research Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 674-707, Firstquarter 2018.
- [16] W. S. H. M. W. Ahmad et al., "5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14460-14488, 2020.
- [17] W. -E. Chen, X. -Y. Fan and L. -X. Chen, "A CNN-based Packet Classification of eMBB, mMTC and URLLC Applications for 5G," 2019 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications (ICEA), Tainan, Taiwan, 2019, pp. 140-145.
- [18] E. C. Chukwu, U. S. Abdullahi, G. Koyunlu, J. Sanusi, G. Sani and I. A. Gangfada, "Performance Evaluation of Multiplexed 5G-New Radio Network Services of Different Usage Scenarios," 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2020, pp. 335-342.
- [19] J. Gómez-Jerez, J. Cañete-Martin, M. C. Lucas-Estaó and J. Gozalvez, "5G UE and Network Asset Administration Shells for the Integration of 5G and Industry 4.0 Systems," 2024 IEEE 29th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Padova, Italy, 2024, pp. 1-8.
- [20] Y. R. Wei, A. S. Keshavamurthy, R. Wittmann and A. R. Zahonero, "A Standalone 5G Industrial Testbed Design Considerations for Industry 4.0," 2022 52nd European Microwave Conference (EuMC), Milan, Italy, 2022, pp. 884-887.
- [21] G. Tsoulos, G. Athanasiadou, D. Zarbouti, G. Nikitopoulos, V. Tsoulos and N. Christopoulos, "Comparative Field Trials for different 5G-4G Cellular Networks," 2024

- Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET), Thessaloniki, Greece, 2024, pp. 1-4.
- [22]G. V. Tsoulos, G. Athanasiadou, G. Nikitopoulos and V. Tsoulos, "Non-standalone (NSA) 5G system measurements," 2023 12th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST), Athens, Greece, 2023, pp. 1-4.
- [23]L. -A. Phan, D. Pesch, U. Roedig and C. J. Sreenan, "Building a 5G Core Network Testbed: Open-Source Solutions, Lessons Learned, and Research Directions," 2024 International Conference on Information Networking (ICOIN), Ho Chi Minh City, Vietnam, 2024, pp. 641-646.
- [24]W. d. S. Coelho, A. Benhamiche, N. Perrot and S. Secci, "Network Function Mapping: From 3G Entities to 5G Service-Based Functions Decomposition," in IEEE Communications Standards Magazine, vol. 4, no. 3, pp. 46-52, September 2020.
- [25]G. Nardini, G. Stea and A. Viridis, "Scalable Real-Time Emulation of 5G Networks With Simu5G," in IEEE Access, vol. 9, pp. 148504-148520, 2021.
- [26]Raca, D., Leahy, D., Sreenan, C. J., & Quinlan, J. J. (2020). Beyond throughput, the next generation. In Proceedings of the 11th ACM Multimedia Systems Conference. MMSys '20: 11th ACM Multimedia Systems Conference. ACM.
- [27]Lazar, R.-G., Militaru, A.-V., Caruntu, C.-F., Pascal, C., & Patachia-Sultanoiu, C. (2023). Real-Time Data Measurement Methodology to Evaluate the 5G Network Performance Indicators. In IEEE Access (Vol. 11, pp. 43909–43924). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [28]Valcarengi, L., Amadou Kountché, D., Dieudonne, M., Gavras, A., Gramaglia, M., Kosmatos, E., Nielsen, L., Patsouras, I., Sgambelluri, A., Sterle, J., & Verrios, P. (2023). KPIs Measurement Tools - From KPI definition to KPI validation enablement.
- [29]Hellenic Telecommunications & Post Commission (EETT). (2020, February). PUBLIC CONSULTATION WITH REFERENCE TO THE GRANTING OF SPECTRUM USAGE RIGHTS IN THE 700 MHz, 2 GHz, 3400 - 3800 MHz AND 26 GHz FREQUENCY BANDS. Marousi; Hellenic Telecommunications & Post Commission (EETT).
https://www.eett.gr/opencms/export/sites/default/admin/downloads/Consultations/RadioCommunications/PC_5G/PublicConsultation5GBriefENGfinal.pdf
- [30]5G; Management and orchestration; 5G performance measurements (3GPP TS 28.552 version 16.10.0 Release 16)
- [31]M. Giordani, M. Mezzavilla, A. Dhananjay, S. Rangan and M. Zorzi, "Channel Dynamics and SNR Tracking in Millimeter Wave Cellular Systems," European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference, Oulu, Finland, 2016, pp. 1-8.

- [32]A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," in IEEE Access, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015.
- [33]E. Ezhilarasan and M. Dinakaran, "A Review on Mobile Technologies: 3G, 4G and 5G," 2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM), Tindivanam, India, 2017, pp. 369-373.
- [34]Fuentes, M., Carcel, J. L., Dietrich, C., Yu, L., Garro, E., Pauli, V., Lazarakis, F. I., Grondalen, O., Bulakci, O., Yu, J., Mohr, W., & Gomez-Barquero, D. (2020). 5G New Radio Evaluation Against IMT-2020 Key Performance Indicators. In IEEE Access (Vol. 8, pp. 110880–110896). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [35]Rendon Schneir, J., Ajibulu, A., Konstantinou, K., Bradford, J., Zimmermann, G., Droste, H., & Canto, R. (2019). A business case for 5G mobile broadband in a dense urban area. In Telecommunications Policy (Vol. 43, Issue 7, p. 101813). Elsevier BV.
- [36]S. Chatchalernpun, P. Pornpongtechavanich, K. Phanrattanachai and T. Daengsi, "Comparison of 5G-QoS After Merger Between Two Mobile Network Operators in Urban Areas Using Mobility Tests," 2023 6th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Batam, Indonesia, 2023, pp. 164-168.
- [37]Comparison of 5G-QoS After Merger Between Two Mobile Network Operators in Urban Areas Using Mobility Tests.
- [38]EY (2024) 5G Observatory Biannual Report, Study on “European 5G Observatory phase III” (CNECT/2021/OP/0008). Available at: https://5gobservatory.eu/wp-content/uploads/2024/07/BR-20_5G-Observatory-Report-June-2024-2.pdf
- [39]Caso, G., Alay, Ö., Brunstrom, A., Koumaras, H., Díaz Zayas, A., & Frascolla, V. (2023). Experimentation in 5G and beyond Networks: State of the Art and the Way Forward. Sensors, 23(24), 9671.
- [40]Xinjie Yuan, Mingzhou Wu, Zhi Wang, Yifei Zhu, Ming Ma, Junjian Guo, Zhi-Li Zhang, and Wenwu Zhu. 2022. Understanding 5G performance for real-world services: a content provider's perspective. In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference (SIGCOMM '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 101–113.
- [41]Hodara, H., & Skaljo, E. (2021). From 1G to 5G. *Fiber and Integrated Optics*, 40(2–3), 85–183.
- [42]Kabalci, Y. (2019). 5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies. In: Kabalci, E., Kabalci, Y. (eds) Smart Grids and Their Communication Systems. Energy Systems in Electrical Engineering. Springer, Singapore.

- [43]G. D'Onghia, F. Ciravegna, G. Bruno, M. A. Elorza Forcada, A. Pastor and A. Lioy, "Securing 5G: Trusted Execution Environments for Centrally Controlled IPsec Integrity," 2024 IFIP Networking Conference (IFIP Networking), Thessaloniki, Greece, 2024, pp. 595-597.
- [44]Holtrup, G., Lacube, W., David, D. P., Mermoud, A., Bovet, G., & Lenders, V. (2021). 5G System Security Analysis (Version 2). arXiv.
- [45]F. Polunin, D. C. Melgarejo, T. Lindh, A. Pinömaa, P. H. J. Nardelli and O. Pyrhonen, "Demonstrating the Impact of LTE Communication Latency for Industrial Applications," 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, Finland, 2019, pp. 977-982.
- [46]M. Shafi et al., "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017.
- [47]Kabalci, Y. (2018). 5G Mobile Communication Systems: Fundamentals, Challenges, and Key Technologies. In Energy Systems in Electrical Engineering (pp. 329–359). Springer Singapore.
- [48]5G NR. (2019). Elsevier.
- [49]Akhundov, Z. (2020) 5G Core Network Overview, Telecompedia. Available at: <https://telecompedia.net/5g-core-network-overview/> (Accessed: 10 February 2025).
- [50]Flavien Ronteix--Jacquet. Reducing latency and jitter in 5G radio access networks. Networking and Internet Architecture [cs.NI]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2022. English.
- [51]ELLIOTT, B. J. (2000). Communications theory. In Cable Engineering for Local Area Networks (pp. 31–57). Elsevier.
- [52]Harvanek, M., Bolcek, J., Kufa, J., Polak, L., Simka, M., & Marsalek, R. (2024). Survey on 5G Physical Layer Security Threats and Countermeasures. Sensors, 24(17), 5523.

[Οπισθόφυλλο. Κενή σελίδα]