



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΜΕΤΑ ΤΗΝ 5Η ΓΕΝΙΑ (BEYOND 5G)**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΜΙΛΚΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ
(ΑΕΜ: 2751)**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Ι. Βέργαδος, Επίκουρος Καθηγητής
του τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Καστοριά, 2022



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ 5Η ΓΕΝΙΑ (BEYOND 5G)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΜΙΛΚΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ
(ΑΕΜ: 2751)

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28/09/2022

Δημήτριος
Βέργαδος
Ον/μο Μέλους
Ιδιότητα Μέλους

Επιβλέπων

Σπύρος Νικολάου
Ον/μο Μέλους
Ιδιότητα Μέλους

Μέλος

Νίκος Δημόκας
Ον/μο Μέλους
Ιδιότητα Μέλους

Μέλος

Καστοριά, 2022

Copyright © 2022 – Μιλκόπουλος Γεώργιος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ως συγγραφέας της παρούσας εργασίας δηλώνω πως η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και δεν περιέχει υλικό από μη αναφερόμενες πηγές.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν εφικτή, χωρίς την υποστήριξη ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω. Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Δημήτριο Βέργαδο Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, ο οποίος τέλεσε Επόπτης της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας. Τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, καθώς και για την επιστημονική του καθοδήγηση και τη συνεχή υποστήριξή του, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Η συμβολή του, μέσω της διαρκής ανατροφοδότησης που μου παρείχε, σε κάθε μου βήμα υπήρξε πολύτιμη.

Ευχαριστίες οφείλω, επίσης, σε εκείνους τους ανθρώπους, συγγενείς και φίλους, που με υποστήριξαν, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κλείνοντας, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η κατανόηση και συμπαράσταση της οποίας ήταν, όχι μόνο σημαντική, αλλά και καθοριστική, για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής και, γενικότερα, των πτυχιακών μου σπουδών. Για τον λόγο αυτόν, η παρούσα εργασία αφιερώνεται στην οικογένειά μου.

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής σχετίζεται με τη μελέτη των δικτύων επικοινωνιών μετά την 5^η γενιά. Στόχος της είναι να πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση προκειμένου να εντοπιστούν πληροφορίες σχετικά με το δίκτυο 5G, το Beyond 5G, τις δοκιμαστικές εγκαταστάσεις του 5G και τις πλατφόρμες προσομοίωσης 5G. Έτσι σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση έγινε φανερό πως μιας και τις περισσότερες φορές χρειάζονται δέκα χρόνια προκειμένου να αναπτυχθεί ένα καινούργιο πρότυπο κυψελοειδούς επικοινωνίας, είναι τώρα η ιδανική στιγμή για να βρεθούν πολλά σημαντικά κατευθύνσεις και θέματα έρευνας για την επόμενη δεκαετία, που θα ορίσουν τα θεμέλια για ένα σύστημα 6G. Προχωρώντας από το 4G στο 5G, δεν πραγματοποιήθηκαν διασπαστικές αλλαγές στο φυσικό επίπεδο. Πολύ πιθανόν το 6G θα καθοδηγείται από κάποιο συνδυασμό προηγούμενων τάσεων (για παράδειγμα κατανεμημένες και μεγαλύτερες συστοιχίες, υψηλότερο φάσμα περισσότερες κυψέλες, κεραιών) και από καινούργιες υπηρεσίες, τεχνολογίες, συσκευές και εφαρμογές.

Λέξεις κλειδιά: δίκτυα επικοινωνιών, δίκτυο 5G, πλατφόρμες προσομοίωσης, δοκιμαστικές εγκαταστάσεις

Abstract

The topic of this dissertation is related to the study of communication networks after the 5th generation. Its purpose is to carry out a literature review in order to find information about the 5G network, Beyond 5G, 5G test facilities and 5G simulation platforms. Thus, according to the literature review, it became clear that since most of the time it takes ten years to develop a new model of cellular communication, now is the ideal time to find many important directions and research topics for the next decade, which will lay the foundations for a 6G system. Moving from 4G to 5G, there were no split changes at the physical level. Most likely 6G will be driven by a combination of previous trends (for example distributed and larger arrays, higher range more cells, antennas) and new services, technologies, devices and applications.

Keywords: *communication networks, 5G network, simulation platforms, test installations*

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Εισαγωγή..... | 10 |
| Κεφάλαιο 1 – Δίκτυο 5G..... | 11 |
| 1.1 Τι είναι το δίκτυο 5G..... | 11 |
| 1.2 Υπηρεσίες..... | 14 |
| 1.3 Αρχιτεκτονική..... | 17 |
| 1.3.1 Εξαρτήματα..... | 17 |
| 1.3.2 Δίκτυο ραδιοπρόσβασης..... | 21 |
| 1.3.3 Mobile Core..... | 24 |
| 1.3.4 Ασφάλεια και κινητικότητα..... | 27 |
| 1.3.5 Επιλογές ανάπτυξης..... | 31 |
| 1.4 Ασύρματες τεχνολογίες..... | 32 |
| 1.5 Βαθμός υλοποίησης εγκατάστασης..... | 34 |
| Κεφάλαιο 2 – Beyond 5G..... | 38 |
| 2.1 Περιορισμός του 5G..... | 38 |
| 2.2 Υπηρεσίες που θα παρέχει το 6G πέρα από το 5G..... | 39 |
| 2.3 Τεχνολογίες για το Beyond 5G..... | 42 |
| Κεφάλαιο 3 – Δοκιμαστικές εγκαταστάσεις σε 5G..... | 44 |
| 3.1 Δοκιμαστικές εγκαταστάσεις σε 5G..... | 44 |
| Κεφάλαιο 4 - Πλατφόρμες προσομοίωσης 5G..... | 48 |
| 4.1 Πλατφόρμες προσομοίωσης 5G..... | 48 |
| Συμπεράσματα..... | 58 |
| Βιβλιογραφικές αναφορές..... | 60 |

Πίνακας Εικόνων

| | |
|---|----|
| <u>Εικόνα 1: Δίκτυο 5G</u> | 13 |
| <u>Εικόνα 2: Internet of Things</u> | 14 |
| <u>Εικόνα 3: Από το 1G στο 5G</u> | 15 |
| <u>Εικόνα 4: Δυνατότητες του δικτύου 5G</u> | 17 |
| <u>Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική C - RAN</u> | 18 |
| <u>Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική του δικτύου 5G</u> | 20 |
| <u>Εικόνα 7: Δίκτυο ραδιοπρόσβασης του δικτύου 5G</u> | 23 |
| <u>Εικόνα 8: Mobile Core</u> | 27 |
| <u>Εικόνα 9: MNOs</u> | 37 |

Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα τα δίκτυα επικοινωνιών μετά την 5η γενιά και έχει ως βασικό στόχο τη βιβλιογραφική διερεύνηση αυτού του θέματος. Η διερεύνηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια δύο βάσεων δεδομένων, τη βάση δεδομένων PubMed και Google Scholar. Έτσι η δομή της παρούσας εργασίας έχει ως εξής. Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται το δίκτυο 5G, δηλαδή υπηρεσίες, η αρχιτεκτονική, οι ασύρματες τεχνολογίες και ο βαθμός υλοποίησης της εγκατάστασης του. Στο δεύτερο αναπτύσσεται το Beyond 5G, δηλαδή ο περιορισμός του 5G, οι υπηρεσίες που θα παρέχει το 6G πέρα από το 5G, οι τεχνολογίες για το Beyond 5G. Στο τρίτο αναλύονται οι δοκιμαστικές εγκαταστάσεις του 5G και στο τέταρτο οι πλατφόρμες προσομοίωσης 5G. Τέλος, η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα όσα βρέθηκαν και καταγράφηκαν.

Κεφάλαιο 1 – Δίκτυο 5G

1.1 Τι είναι το δίκτυο 5G

Ως 5G δίκτυο νοείται η πέμπτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας, μετά από παλαιότερες γενιές, 2G, 3G και 4G. Αυτό το δίκτυο έχει ρυθμιστεί για να δίνει πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες σύνδεσης από άλλα δίκτυα προηγούμενης γενιάς. Επιπλέον, είναι πολύ αξιόπιστο με μεγαλύτερη χωρητικότητα και χαμηλότερους χρόνους απόκρισης (Patil, & Wankhade, 2014).

Το πρώτο έθνος το οποίο υιοθέτησε σε ιδιαίτερα μεγάλη κλίμακα τον Απρίλιο του 2019 ήταν η Νότια Κορέα και υπήρχαν σχεδόν 224 φορείς εκμετάλλευσης σε 88 χώρες σε ολόκληρο τον κόσμο που επένδυσαν στην τεχνολογία.

Όλοι οι πάροχοι 5G στη Νότια Κορέα, χρησιμοποιούσαν εξοπλισμό Samsung, Nokia και Ericsson καθώς και σταθμούς βάσης εκτός από έναν που χρησιμοποιούσε εξοπλισμό Huawei. Η Samsung ήταν ένας από τους μεγαλύτερους προμηθευτές ο οποίος είχε αποστείλει 53.000 σταθμούς βάσης από 86.000 σταθμούς βάσης συνολικά οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι στη χώρα τη δεδομένη εποχή (Salih, Zeebaree, Abdulraheem, Zebari, Sadeeq, & Ahmed, 2020).

Αυτή τη στιγμή έχουμε 9 εταιρείες οι οποίες πωλούν συστήματα και υλικό ραδιοφώνου 5G για παρόχους. Παραδείγματα αυτών είναι η Ericsson, η Cisco η Altiostar, η Systems, η Datang Telecom, η Nokia, η Huawei, η Qualcomm, η ZTE και η Samsung (Salih, Zeebaree, Abdulraheem, Zebari, Sadeeq, & Ahmed, 2020).

Ένα σημαντικό και εμφανές πλεονέκτημα των δικτύων 5G έναντι του 4G αποτελεί η ταχύτητα του δικτύου. Βέβαια, υπάρχουν πλεονεκτήματα τα οποία σχετίζονται με τη μειωμένη καθυστέρηση – η οποία σημαίνει γρήγορες ταχύτητες λήψης και ταχύτερους χρόνους απόκρισης. Έτσι προκύπτει η εμφάνιση πλήθους πιθανών εφαρμογών σε ολόκληρη τη βιομηχανία εξαιτίας της βελτιωμένης λειτουργικής αποτελεσματικότητας (Moysen, & Giurroni, 2018).

Μεταξύ των εφαρμογών για το 5G είναι η υπερταχεία ευρυζωνική σύνδεση χωρίς την ανάγκη σταθερών γραμμών, οι κινητές τηλεπικοινωνίες 5G, η δημιουργία έξυπνων εργοστασίων, οι ολογραφικές τεχνολογίες, οι τηλεοράσεις, η απομακρυσμένη υγειονομική περίθαλψη και τα αυτοκίνητα χωρίς οδηγό με επικοινωνία 5G καθώς και η επικοινωνία από αυτοκίνητο σε αυτοκίνητο (Ahmad, Radzi, Samidi, Ismail, Abdullah, Jamaludin, & Zakaria, 2020).

Πολλές από αυτές τις τεχνολογικές προόδους θα επιτευχθούν λόγω μειωμένης καθυστέρησης, επιτρέποντας στις συσκευές 5G να ανταποκρίνονται στις εντολές πιο γρήγορα. Η καθυστέρηση σημαίνει καθυστέρηση ανάμεσα στην έκδοση μιας εντολής και της λήψης της απάντησης. Το δίκτυο 3G έχει καθυστέρηση 65 χιλιοστών του δευτερολέπτου, το προηγμένο δίκτυο 4G είναι σχεδόν 40 χιλιοστά του δευτερολέπτου, από την άλλη πλευρά στο σταθερό ευρυζωνικό διαπιστώνεται καθυστέρηση μεταξύ 10-20 χιλιοστών του δευτερολέπτου. Συγκριτικά, το 5G αναμένεται να λειτουργεί με μόλις 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου καθυστέρησης, επιτρέποντας στις κρίσιμες για την αποστολή εφαρμογές και στο Διαδίκτυο των πραγμάτων να λειτουργούν κάτω από τον στόχο των 4 χιλιοστών του δευτερολέπτου για μια βελτιωμένη ευρυζωνική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας (Moysen, & Giurroni, 2018) .

Επίσης μεγάλο θετικό της τεχνολογίας είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις προηγούμενες τεχνολογίες δικτύου. Δηλαδή υπάρχει πρόσβαση σε πολύ μεγάλο φάσμα σε υψηλότερες συχνότητες, γεγονός που σημαίνει πως τα δίκτυα είναι σε θέση να χειρίζονται ταυτόχρονα πολλές εφαρμογές υψηλής ζήτησης. Ως εκ τούτου μπορούν να προσφέρουν μια εμπειρία όμοια με τις ίνες για σταθερές ασύρματες εφαρμογές, δίνοντας πρόσβαση σε όσους βρίσκονται σε περιοχές που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν απολαμβάνοντας μια πολύ βελτιωμένη ευρυζωνική υπηρεσία (Patil, & Wankhade, 2014).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί πιο πάνω το βασικό σημείο πώλησης του 5G έχει σχέση με την ταχύτητα του δικτύου. Μάλιστα κάποιοι υποστηρίζουν πως κάποιους οι μέγιστες ταχύτητες είναι δυνατόν να ξεπεράσουν τα 10Gps.

Οι ταχύτητες που έχουν οριστεί αρχικά είναι χαμηλότερες και σχετικά με αυτό η ΕΕ ισχυρίζεται πως οι μέγιστες ταχύτητες υπερβαίνουν το 1Gbps, το οποίο εξακολουθεί να είναι μεταξύ 100-150 Mbps ταχύτερες από τις ταχύτητες 4G (κατά μέσο όρο), ενώ θα έπρεπε να είναι 130-240 Mbps συνολικά (περίπου) (Moysen, & Giurroni, 2018).

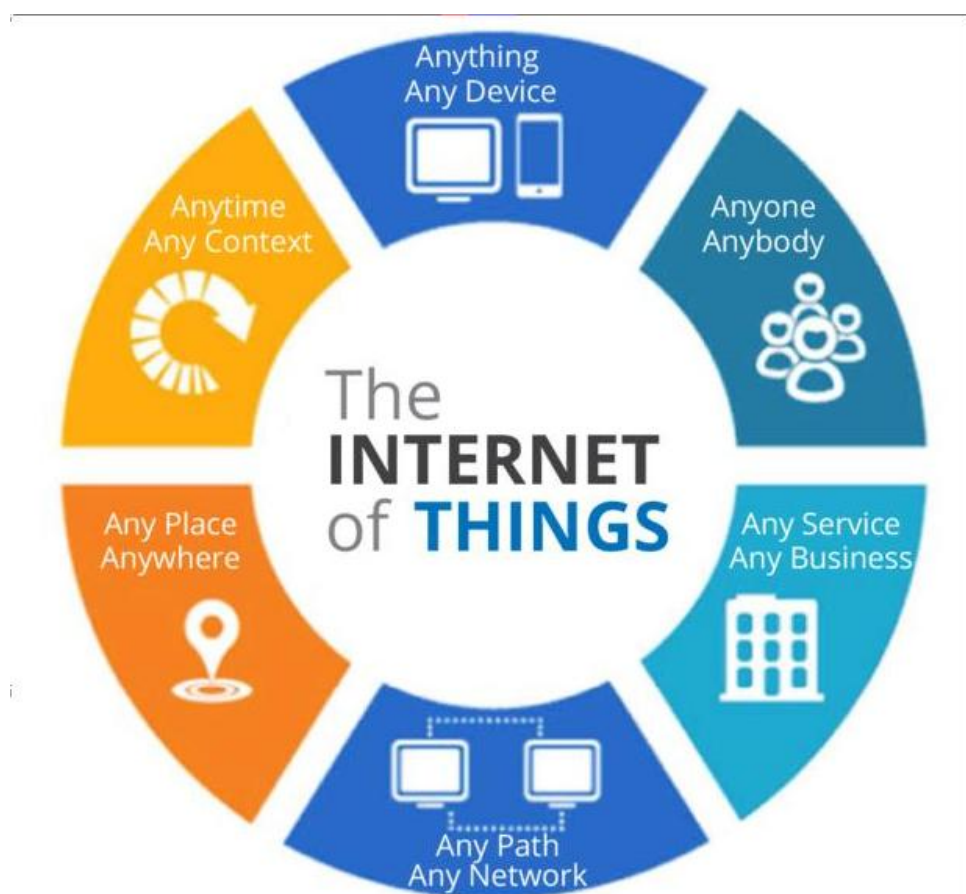
Εντούτοις, υπάρχουν παράγοντες του αληθινού κόσμου οι οποίοι είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη, για παράδειγμα η απόσταση από έναν σταθμό βάσης και το πόσα άτομα συγχρόνως συνδέονται στο δίκτυο. Ωστόσο, ακόμη και κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο ρυθμός δεδομένων που βίωσε ο χρήστης για λήψεις εξακολουθεί να αναμένεται να είναι τουλάχιστον 100 Mbps – κάτι που εξακολουθεί να είναι πολύ πιο γρήγορο από ό,τι με το 4G (Moysen, & Giurroni, 2018).



Εικόνα 1: Δίκτυο 5G

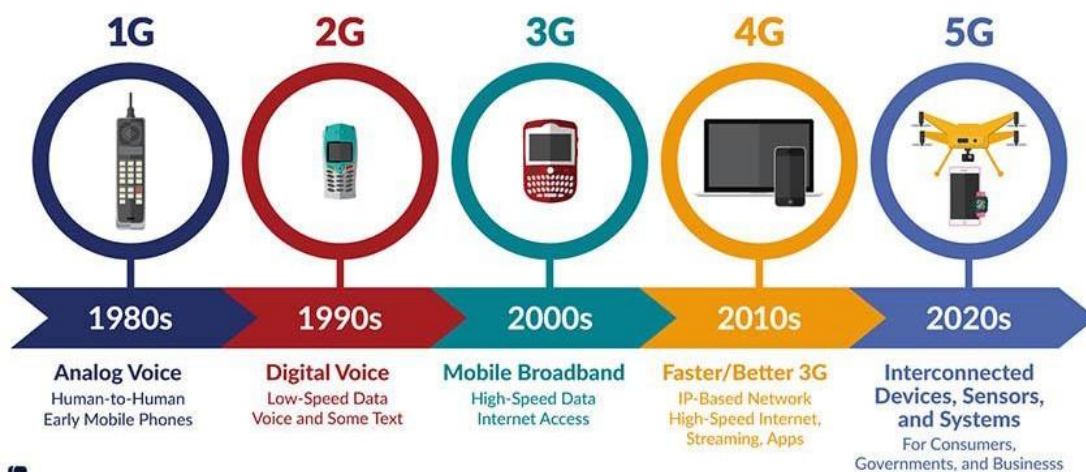
1.2 Υπηρεσίες

Η πέμπτη γενιά τηλεπικοινωνιών ή η γενιά 5G ξεκίνησε να βγαίνει στην αγορά στο τέλος του έτους 2018 και επεκτείνεται συνεχώς. Το δίκτυο 5G αποτελεί τη πέμπτη γενιά τεχνολογίας κυψελοειδούς δικτύου. Παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, υψηλότερες ταχύτητες, χαμηλότερο λανθάνον χρόνο καθώς και πιο ανεπτυγμένες δυνατότητες από τους προκατόχους του. Εκτός από τη βελτίωση της ταχύτητας, η τεχνολογία προσδοκείται να απελευθερώσει ένα μεγάλο οικοσύστημα 5G Internet of Things (IoT) όπου τα δίκτυα είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες επικοινωνίας για δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές, με τις κατάλληλες ανταλλαγές ανάμεσα στη ταχύτητα, καθυστέρηση και το κόστος.



Εικόνα 2: Internet of Things

Η συνεχής ανάπτυξη του δικτύου 4G των ασύρματων κινητών συστημάτων παρότρυνε κάποιες εταιρείες τηλεπικοινωνιών να ελέγξουν περισσότερο την ανάπτυξη του δικτύου 5G. Από το 1981 με την εμφάνιση του δικτύου 1G, ανά 10 χρόνια περίπου, προκύπτουν νέα δίκτυα. Το όραμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέσα σε 10 περίπου χρόνια ή και σε μικρότερο χρονικό διάστημα είναι οι τομείς IT και telecom να ενοποιηθούν ως κοινή υποδομή υψηλής χωρητικότητας. Η IEEE και άλλοι οργανισμοί τυποποίησης τις περισσότερες φορές αναπτύσσουν τις τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων παρόλο που κυμαίνεται πιο μικρή μετάδοση στις πιο πολλές περιπτώσεις. Βάση αυτών των προδιαγραφών τα συστήματα των προκάτοχων εισέρχονται στην αγορά μέσα σε πολύ λίγα χρόνια πριν από τη καινούργια γενιά κυψελοειδών κινητών. Όπως, τα WiMAX δίκτυα όπου αναπτύχθηκαν το 2006 και προσδοκάται πως είναι προκάτοχοί σε 4G. Το δίκτυο 5G προσδοκάται να παράγει κέρδη πάνω από το 4G, επιθυμώντας να προσφέρει καλύτερα επίπεδα συνδεσιμότητας, υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, καθώς και βελτίωση της κάλυψης. Επιπλέον, η δημιουργία τους έχει ως στόχο την ολοκλήρωση των υπολογιστικών, αποθηκευτικών και τηλεπικοινωνιακών πόρων σε μια προγραμματιζόμενη ενοποιημένη υποδομή η οποία θα συμβάλει στη βέλτιστη χρήση των κατανεμημένων πόρων (Mehta, Patel, Joshi & Modi, 2014).



Εικόνα 3: Από το 1G στο 5G

Το 5G δίκτυο, σε γενικές γραμμές, χρησιμοποιείται σε 3 βασικούς τύπους συνδεδεμένων υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων του τεράστιου IoT, των κρίσιμων για την αποστολή επικοινωνιών και των βελτιωμένων ευρυζωνικών συνδέσεων για κινητά. Μια σημαντική ικανότητα του δικτύου 5G σχετίζεται με το γεγονός ότι έχει σχεδιαστεί για συμβατότητα προς τα εμπρός, την ικανότητα, δηλαδή, να υποστηρίζει με μεγάλη ευλυγισία μελλοντικές υπηρεσίες οι οποίες δεν είναι γνωστές σήμερα. Η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας 5G, πέρα από τη βελτίωση των smartphone, είναι πιθανόν να εισάγει καινούργιες καθηλωτικές εμπειρίες, για παράδειγμα το AR και το VR με ταχύτερους, πιο ομοιόμορφους ρυθμούς δεδομένων, χαμηλότερο κόστος ανά bit και χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο. Οι επικοινωνίες κρίσιμης σημασίας για την αποστολή 5G δικτύου είναι δυνατόν να επιτρέψουν καινούργιες υπηρεσίες οι οποίες είναι σε θέση να μεταμορφώσουν βιομηχανίες με διαθέσιμες, αξιόπιστες συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης, για παράδειγμα ο τηλεχειρισμός κρίσιμων υποδομών, ιατρικών διαδικασιών και οχημάτων. Το Massive IoT 5G δημιουργήθηκε για να συνδέει απρόσκοπτα έναν μεγάλο αριθμό ενσωματωμένων αισθητήρων περίπου σε όλα μέσω της δυνατότητας μείωσης της ισχύος, των ρυθμών δεδομένων και της κινητικότητας, δίνοντας πολύ λιτές και χαμηλού κόστους λύσεις συνδεσιμότητας (Dangi, Lalwani, Choudhary, You, & Pau, 2021).

Το 5G έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μέγιστες ταχύτητες δεδομένων έως και 20 Gbps βάσει των απαιτήσεων IMT-2020. Όμως, το 5G δίκτυο είναι κάτι πολύ περισσότερο από το πόσο γρήγορο είναι. Πέρα από τους πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων αιχμής, το δίκτυο 5G έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου επεκτείνοντας σε καινούργιο φάσμα, για παράδειγμα το mmWave. Το 5G δίκτυο είναι δυνατόν να προσφέρει χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο για άμεση απόκριση και ίσως να προσφέρει μια συνολική πιο ομοιόμορφη εμπειρία στο χρήστη, προκειμένου οι ρυθμοί δεδομένων να μένουν σταθερά υψηλοί, ακόμη και αν οι χρήστες μετακινούνται. Επίσης, το καινούργιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5G NR υποστηρίζεται από μια βάση κάλυψης Gigabit LTE, όπου είναι δυνατόν να προσφέρει σε πολλαπλά σημεία συνδεσιμότητα κατηγορίας Gigabit (Al-Namari, Mansoor, & Idris, 2017).

1.3 Αρχιτεκτονική

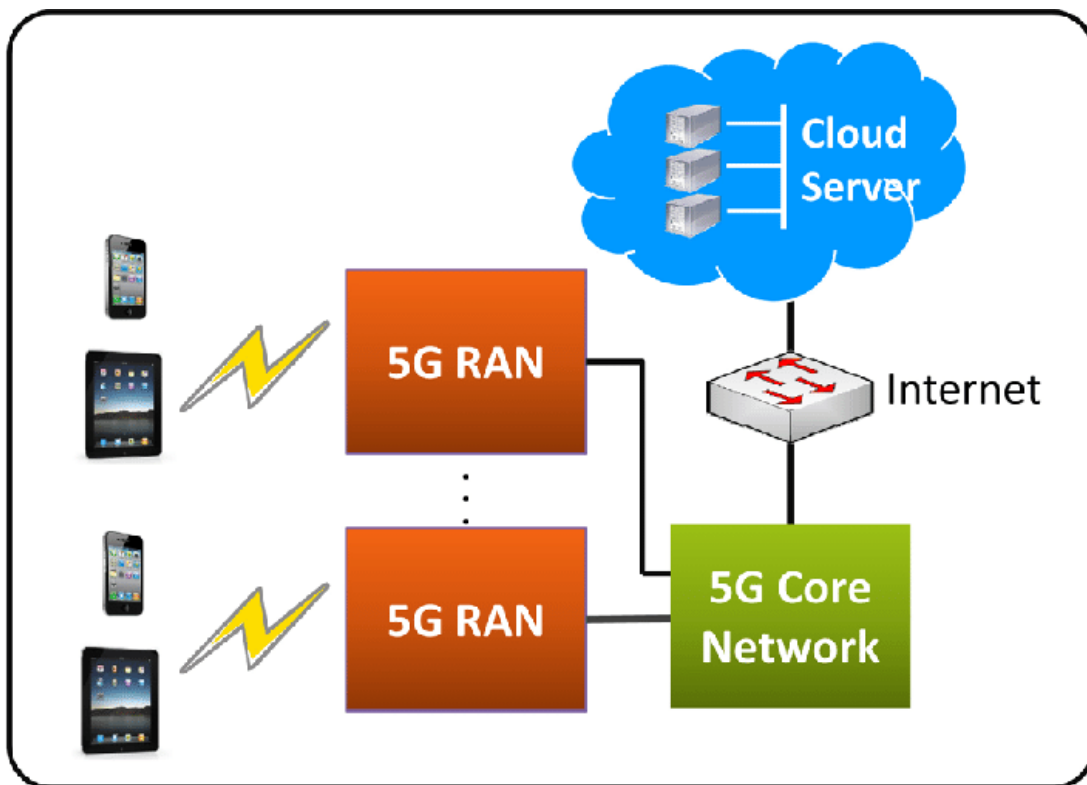
1.3.1 Εξαρτήματα

Το κυψελοειδές δίκτυο προσφέρει ασύρματη σύνδεση σε όσες συσκευές βρίσκονται σε κίνηση. Οι αναφερόμενες συσκευές όπου είναι γνωστές ως Εξοπλισμός Χρήστη (UE), αντιστοιχούν παραδοσιακά σε tablet και smartphone, όμως ολοένα και περισσότερο θα περιλαμβάνουν drones, αυτοκίνητα, οικιακές συσκευές, γεωργικά και βιομηχανικά μηχανήματα, ρομπότ, ιατρικές συσκευές και άλλα.



Εικόνα 4: Δυνατότητες του δικτύου 5G

Επίσης, το κυψελοειδές δίκτυο αποτελείται από δύο (2) βασικά υποσυστήματα: τον Πυρήνα κινητής τηλεφωνίας και το Δίκτυο Πρόσβασης Ραδιοφώνου (RAN). Το δεύτερο διαχειρίζεται το ραδιοφάσμα, διασφαλίζοντας πως χρησιμοποιείται με αποτελεσματικό τρόπο και πληροί τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας του κάθε χρήστη. Αντιστοιχεί σε μια κατανεμημένη συλλογή σταθμών βάσης. Στο 4G αυτά ονομάζονται (κάπως κρυπτικά) eNodeB (ή eNB), που είναι συντομογραφία του εξελιγμένου κόμβου B. Στο 5G δίκτυο είναι γνωστά ως gNB (Sabella, Serrano, Stea, Virdis, Tinnirello, Giuliano, Garlisi, Vlacheas, Demestichas, Foteinos, Bartzoudis & Payaró, 2018).



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική C - RAN

Το Mobile Core είναι μια δέσμη λειτουργιών (σε αντίθεση με μια συσκευή) που εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς. Ειδικότερα (5GPPP, 2021):

- Προσφέρει συνδεσιμότητα Internet (IP) τόσο για υπηρεσίες φωνής όσο και για υπηρεσίες δεδομένων.
- Παρακολουθεί τη χρήση των συνδρομητών για χρέωση.
- Εξασφαλίζει πως αυτή η συνδεσιμότητα πληροί όλες απαιτήσεις έχει υποσχεθεί το QoS.
- Παρακολουθεί την κινητικότητα των χρηστών προκειμένου να εξασφαλίσει αδιάλειπτη εξυπηρέτηση.

Το Mobile Core θεωρείται ένα διαφορετικό παράδειγμα ενός γενικού όρου. Στο 4G δίκτυο το Mobile Core ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC) και στο 5G δίκτυο ονομάζεται Next Generation Core (NG-Core) (5GPPP, 2021).

Αν και η λέξη "Core" είναι στο όνομά του, από την άποψη του Διαδικτύου, ο Mobile Core παραμένει να αποτελεί κομμάτι του δικτύου πρόσβασης, προσφέροντας ουσιαστικά μια γέφυρα ανάμεσα στο RAN σε κάποια γεωγραφική περιοχή και στο ευρύτερο Διαδίκτυο που στηρίζεται σε IP. Το 3GPP προσφέρει σπουδαία ευελιξία στον τρόπο όπου βελτιώνεται γεωγραφικά ο Mobile Core, όμως για τους σκοπούς μας, το να υποθέσουμε πως κάθε εγκατάσταση του Mobile Core εξυπηρετεί μια μητροπολιτική περιοχή είναι ένα καλό μοντέλο λειτουργίας. Άρα το αντίστοιχο RAN θα κάλυπτε πολλές δεκάδες (ή ακόμα και εκατοντάδες) πύργους κυττάρων (GSMA, 2018).

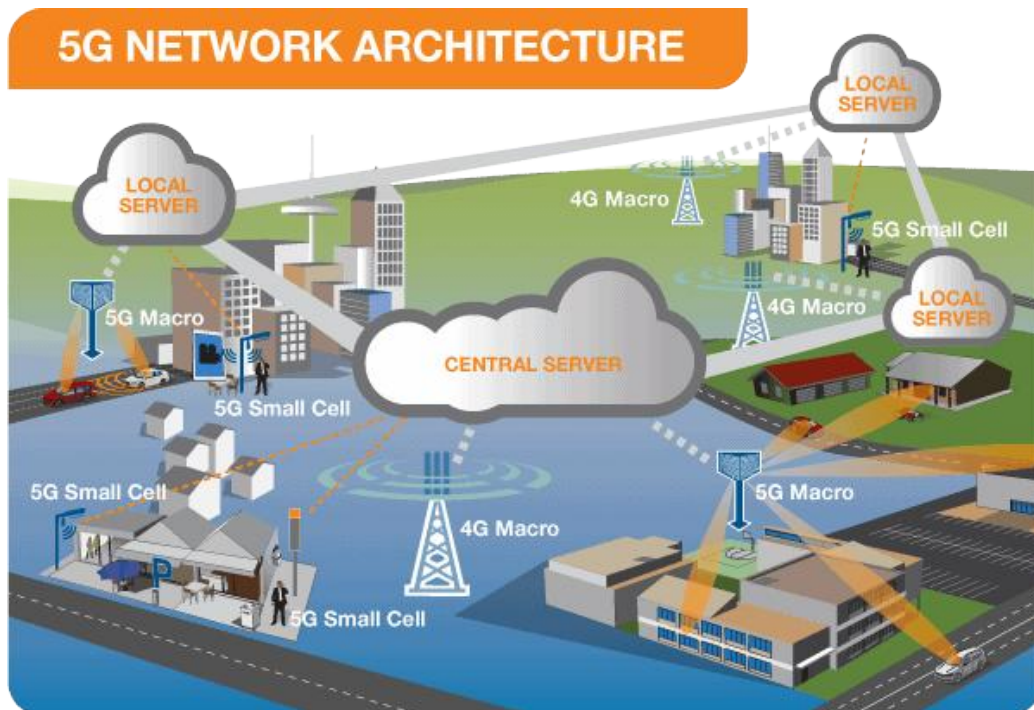
Ένα δίκτυο Backhaul έχει την δυνατότητα να διασυνδέει τους σταθμούς βάσης που υλοποιούν το RAN με τον Mobile Core. Το συγκεκριμένο δίκτυο θεωρείται κατά βάση ενσύρματο και συχνά κατασκευάζεται από εξαρτήματα εμπορευμάτων τα οποία υπάρχουν αλλού στο Διαδίκτυο. Όπως, το Παθητικό Οπτικό Δίκτυο (PON) όπου υλοποιεί το Fiber-to-the-Home είναι ο βασικός υποψήφιος για την υλοποίηση του backhaul RAN. Προφανώς, το δίκτυο backhaul είναι απαραίτητο μέρος του RAN, όμως είναι μια επιλογή υλοποίησης και δεν προδιαγράφεται από το πρότυπο 3GPP (Tezergil & Onur, 2021).

Πίσω από την αρχιτεκτονική του δικτύου 5G τα πρότυπα 3GPP εισήχθησαν από το 3rd Generation Partnership Project, έναν οργανισμό ο οποίος αναπτύσσει διεθνή πρότυπα για κάθε κινητή επικοινωνία. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών καθώς και οι εταίροι της θέτουν το χρονοδιάγραμμα και τις απαιτήσεις για τα συστήματα κινητής επικοινωνίας, ορίζοντας μια καινούργια γενιά σχεδόν κάθε δεκαετία. Το 3GPP βελτιώνει προδιαγραφές για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις σε μια σειρά εκδόσεων (GSMA, 2018).

Το γράμμα "G" στο 5G ορίζεται ως η "γενιά". Η αρχιτεκτονική τεχνολογίας 5G δικτύου δείχνει σπουδαίες προόδους εκτός από την τεχνολογία 4G LTE (μακροπρόθεσμη εξέλιξη), όπου έρχεται αμέσως μετά το 3G και το 2G. Όπως και οι προκάτοχοί του, το 5G πρέπει να συνυπάρχει με προηγούμενα δίκτυα για δύο σημαντικούς λόγους (Dangi, Lalwani, Choudhary, You, & Pau, 2021):

- Η ανάπτυξη και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών δικτύου απαιτεί τεράστιο χρόνο, επενδύσεις και συνεργασία μεγάλων οντοτήτων και φορέων.
- Οι πρώτοι χρήστες θα έχουν πάντα την επιθυμία να χρησιμοποιούν καινούργιες τεχνολογίες οι οποίες διακρίνονται για το πόσο γρήγορες είναι, αντίθετα, αυτοί που έχουν επενδύσει σε μεγάλες αναπτύξεις με υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύου, όπως 2G, 3G και 4G LTE, έχουν την επιθυμία να τις χρησιμοποιήσουν όσο το δυνατόν περισσότερο, και σίγουρα μέχρι το καινούργιο δίκτυο να είναι πλήρως βιώσιμο. (Σημειώστε ότι τα δίκτυα 2G και 3G κλείνουν για να δημιουργηθεί χώρος για την ανάπτυξη 5G

Η αρχιτεκτονική δικτύου της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας 5g βελτιώνεται σημαντικά σε σχέση με παλαιότερες αρχιτεκτονικές. Τα μεγάλα δίκτυα πυκνότητας κυψελών επιτρέπουν τεράστια άλματα στην απόδοση. Και επιπλέον, η αρχιτεκτονική των δικτύων 5G προσφέρει καλύτερη ασφάλεια σε σύγκριση με τα δίκτυα 4G LTE (Bergren, w.d).



Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική του δικτύου 5G

1.3.2 Δίκτυο ραδιοπρόσβασης

Κάθε σταθμός βάσης δημιουργεί το ασύρματο κανάλι για το UE ενός συνδρομητή κατά την ενεργοποίηση ή την παράδοση όταν το UE είναι ενεργό. Το συγκεκριμένο κανάλι απελευθερώνεται αν το UE μένει αδρανής για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Λαμβάνοντας υπόψη το 3GPP, αυτό το ασύρματο κανάλι ίσως να παρέχει υπηρεσία φορέα . Ο "κομιστής" έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς στις τηλεπικοινωνίες (ακόμα και στις πρώιμες τεχνολογίες ενσύρματης γραμμής όπως το ISDN) προκειμένου να υποδηλώσει ένα κανάλι δεδομένων, εν αντιθέσει με ένα κανάλι το οποίο μεταφέρει πληροφορίες σήματος (Gonçaves, Santos, Ferreira, Rocha, de Souza, Moreira, Kelner & Sadok, 2020).

Κάθε σταθμός βάσης μπορεί να διακριθεί για τη συνδεσιμότητα «3GPP Control Plane» ανάμεσα στο UE και στο αντίστοιχο στοιχείο Mobile Core Control Plane και να προωθεί την κυκλοφορία σηματοδότησης ανάμεσα σε αυτά τα δύο. Αυτή η κίνηση σηματοδότησης επιτρέπει τον έλεγχο ταυτότητας UE, την εγγραφή και την παρακολούθηση κινητικότητας.

Ο σταθμός βάσης για κάθε ενεργό UE δημιουργεί μία ή πολλές σήραγγες ανάμεσα στο αντίστοιχο στοιχείο Mobile Core User Plane. Επίσης προωθεί πακέτα επιπέδου ελέγχου και χρήστη μεταξύ του UE και του Mobile Core. Αυτά τα πακέτα διοχετεύονται σε σήραγγα μέσω SCTP/IP και GTP/UDP/IP, αντίστοιχα. Το SCTP (Stream Control Transport Protocol) θεωρείται μια εναλλακτική αξιόπιστη μεταφορά στο TCP, η οποία είναι προσαρμοσμένη για τη μεταφορά των δεδομένων του σήματος (έλεγχος) για υπηρεσίες τηλεφωνίας. Το GTP (ένα ένθετο ακρωνύμιο που αντιστοιχεί στο (General Packet Radio Service) Tunneling Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο σήραγγας ειδικά για 3GPP που έχει σχεδιαστεί για εκτέλεση μέσω UDP (Säily, Barjau, Navrátil, Prasad, Gomez-Barquero & Tesema, 2019).

Επιπρόσθετα, η συνδεσιμότητα ανάμεσα στο RAN και στο Mobile Core στηρίζεται στο IP. Αυτό εισήχθη σαν μία από τις βασικές αλλαγές μεταξύ των δικτύων 3G και 4G. Πριν από το 4G, τα εσωτερικά του κυψελοειδούς δικτύου βασιζόνταν σε κύκλωμα, κάτι που δεν προκαλεί έκπληξη δεδομένης της προέλευσής του ως

φωνητικού δικτύου (Säily, Barjau, Navrátil, Prasad, Gomez-Barquero & Tesema, 2019).

Κάθε σταθμός βάσης ρυθμίζει τις μεταδόσεις UE με σταθμούς βάσης που βρίσκονται στην ευρεία περιοχή, χρησιμοποιώντας επιτόπιες συνδέσεις σταθμού σε σταθμό. Αυτοί οι σύνδεσμοι χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πακέτων επιπέδου χρήστη (GTP μέσω UDP/IP) και επιπέδου ελέγχου (SCTP μέσω IP).

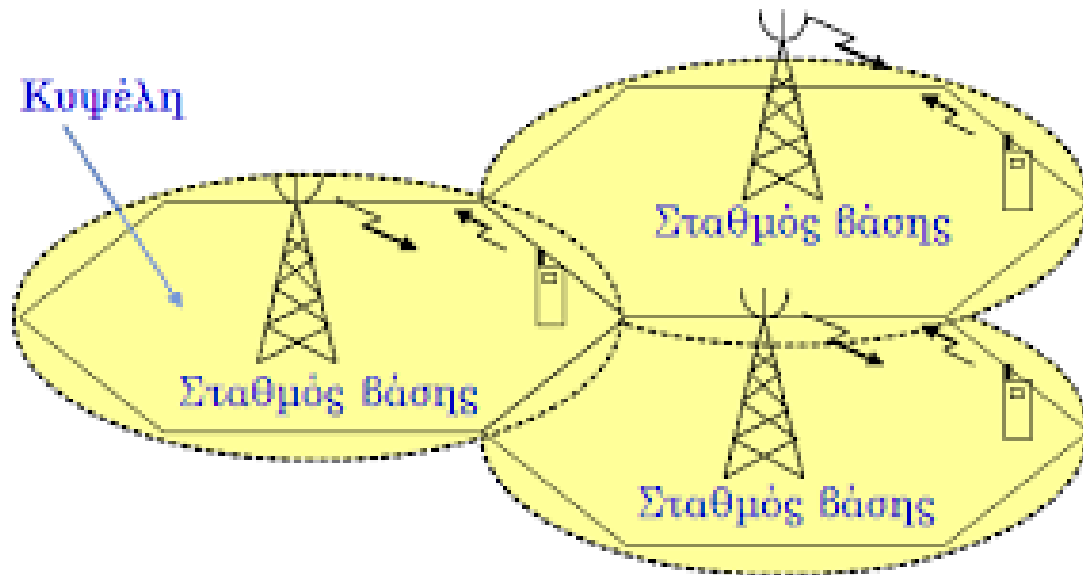
Οι σταθμοί βάσης συντονίζουν την ασύρματη μετάδοση πολλαπλών σημείων σε ένα UE από πολλαπλούς σταθμούς βάσης, οι οποίοι μπορεί ή όχι να αποτελούν μέρος μιας μεταβίβασης UE από έναν σταθμό βάσης σε έναν άλλο (Säily, Barjau, Navrátil, Prasad, Gomez-Barquero & Tesema, 2019)

Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι ο σταθμός βάσης μπορεί να θεωρηθεί ως εξειδικευμένος μεταφορέας. Στην κατεύθυνση Internet-to-UE, σπάει τα εξερχόμενα πακέτα IP σε τμήματα φυσικού επιπέδου και τα προγραμματίζει για μετάδοση δια μέσω του ραδιοφάσματος που διατίθεται, και στην κατεύθυνση UE-to-Internet μαζεύει τμήματα φυσικού επιπέδου σε πακέτα IP και τα προωθεί (πάνω από μια σήραγγα GTP/UDP/IP) στο επίπεδο χρήστη ανάντη του Mobile Core. Επιπλέον σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της ποιότητας του ασύρματου καναλιού καθώς και των πολιτικών ανά συνδρομητή, λαμβάνει την απόφαση εάν, πρώτον, θα προωθηθούν τα εξερχόμενα πακέτα απευθείας στο UE, δεύτερον, θα προωθηθούν έμμεσα πακέτα στον UE δια μέσω ενός γειτονικού σταθμού βάσης ή τρίτον, χρησιμοποιηθούν πολλαπλές διαδρομές οι οποίες θα καταλήξουν στο UE (Alba & Kellerer, 2019).

Ο προγραμματισμός είναι πολύπλευρος αλλά και περίπλοκος, ακόμη και αν αντιμετωπίζεται σαν τοπική απόφαση σε έναν μόνο σταθμό βάσης. Αυτό που βλέπουμε τώρα είναι ότι υπάρχει επίσης ένα παγκόσμιο στοιχείο, σύμφωνα με το οποίο είναι δυνατή η προώθηση της κυκλοφορίας σε διαφορετικό σταθμό βάσης (ή σε πολλούς σταθμούς βάσης) σε μια προσπάθεια αποτελεσματικής χρήσης του ραδιοφάσματος σε μια μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή.

Ουσιαστικά το RAN στο σύνολό του (όχι μόνο ένας σταθμός βάσης) εκτός από το να υποστηρίζει μεταδόσεις (απαίτηση για κινητικότητα), υποστηρίζει συνάθροιση

συνδέσεων και εξισορρόπηση φορτίου, εννοώντας μηχανισμούς οι οποίοι είναι οικείοι σε όσους κατανοούν το Διαδίκτυο (Alba & Kellerer, 2019).



Εικόνα 7: Δίκτυο ραδιοπρόσβασης του δικτύου 5G

1.3.3 Mobile Core

Η βασική λειτουργία του Mobile Core είναι να προσφέρει συνδεσιμότητα εξωτερικού δικτύου πακέτων δεδομένων (όπως είναι το Διαδίκτυο) σε συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας, εξασφαλίζοντας συγχρόνως πως έχουν πιστοποιηθεί και πως οι παρατηρούμενες ποιότητες υπηρεσιών τους ικανοποιούν τα SLA συνδρομής τους. Μια πτυχή του Mobile Core που είναι σημαντικό να αναφερθεί είναι πως πρέπει να διαχειρίζεται την κινητικότητα κάθε συνδρομητή παρατηρώντας την τελευταία θέση τους στην ευαισθησία του σταθμού βάσης εξυπηρέτησης. Είναι το γεγονός ότι το Mobile Core παρακολουθεί μεμονωμένους συνδρομητές, κάτι που δεν κάνει ο πυρήνας του Διαδικτύου, που δημιουργεί μεγάλη πολυπλοκότητα στην αρχιτεκτονική του, ειδικά δεδομένου ότι αυτοί οι συνδρομητές μετακινούνται (Baumgartner, Reddy & Bauschert, 2015).

Ο πυρήνας κινητής τηλεφωνίας 5G επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την πορεία του cloud προς μια αρχιτεκτονική που βασίζεται σε μικροϋπηρεσίες (εγγενής στο cloud). Αυτή η στροφή στο cloud είναι πιο βαθιά από ό,τι φαίνεται αρχικά, εν μέρει επειδή ανοίγει την πόρτα στην προσαρμογή και την εξειδίκευση. Αντί να στηρίζει μόνο ευρυζωνική και φωνητική συνδεσιμότητα, το 5G Mobile Core είναι δυνατόν να εξελιχθεί προκειμένου να υποστηρίζει, μαζικό IoT για παράδειγμα, όπου έχει μοτίβο χρήσης και θεμελιωδώς διαφορετική απαίτηση καθυστέρησης. Αυτό τονίζει, αν όχι διακόπτει, μια ενιαία προσέγγιση για τη διαχείριση συνεδριών (Sattar & Matrawy, 2019).

Ο 5G Mobile Core όπου το 3GPP αναφέρει ως NG-Core, υιοθετεί μια αρχιτεκτονική όμοια με το microservice, όπου αναφέρουμε "microservice-like" καθώς αν και η προδιαγραφή 3GPP ορίζει αυτό το επίπεδο διαχωρισμού, ουσιαστικά απλώς θέτει ένα σύνολο λειτουργικών μπλοκ. Ένα σύνολο λειτουργικών μπλοκ θεωρείται αρκετά διαφορετικό από τη συλλογή μηχανικών αποφάσεων οι οποίες σχετίζονται με το σχεδιασμό ενός συστήματος που στηρίζεται σε μικροϋπηρεσίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η προβολή της συλλογής εξαρτημάτων που φαίνεται σαν ένα σύνολο μικροϋπηρεσιών είναι ένα καλό μοντέλο λειτουργίας (Sattar & Matrawy, 2019).

Το πιο κάτω χωρίζει το σύνολο των λειτουργικών μπλοκ σε τρεις (3) ομάδες. Η πρώτη ομάδα εκτελείται στο επίπεδο ελέγχου (CP) και έχει ένα αντίστοιχο στο EPC (Peterson & Sunay, 2019):

- AMF (Core Access and Mobility Management Function): Υπεύθυνος για τη διαχείριση σύνδεσης και προσβασιμότητας, διαχείριση κινητικότητας, έλεγχο ταυτότητας και εξουσιοδότηση πρόσβασης και υπηρεσίες τοποθεσίας. Χειρίζεται τις πτυχές που αφορούν την κινητικότητα του EPC και του MME.
- SMF (Session Management Function): Χειρίζεται κάθε περίοδο λειτουργίας UE, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής της σχετικής λειτουργίας UP, της εκχώρησης διεύθυνσης IP, των πτυχών ελέγχου του QoS και των πτυχών ελέγχου της δρομολόγησης UP. Κατά προσέγγιση αντιστοιχεί σε μέρος του MME του EPC και στις πτυχές που αφορούν τον έλεγχο του PGW του EPC.
- PCF (Λειτουργία ελέγχου πολιτικής): Χειρίζεται τους κανόνες πολιτικής οι οποίοι εν συνεχεία επιβάλλουν διαφορετικές λειτουργίες CP. Αντιστοιχεί περίπου στο PCRF του EPC.
- UDM (Unified Data Management): Χειρίζεται την ταυτότητα χρήστη, καθώς και τη δημιουργία διαπιστευτηρίων ελέγχου ταυτότητας. Περιέχει μέρος της λειτουργικότητας στο HSS του EPC.
- AUSF (Λειτουργία διακομιστή ελέγχου ταυτότητας): Είναι ένας διακομιστής ελέγχου ταυτότητας, ο οποίος περιέχει μέρος της λειτουργικότητας στο HSS του EPC.

Η επόμενη ομάδα, η δεύτερη, πραγματοποιείται στο επίπεδο ελέγχου (CP), όμως δεν έχει άμεσο αντίστοιχο στο EPC (Peterson & Sunay, 2019):

- SDSF (Λειτουργία δικτύου αποθήκευσης δομημένων δεδομένων): Αφορά μια υπηρεσία «βοηθού» η οποία χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει δομημένα δεδομένα. Η συγκεκριμένη θα μπορούσε να υλοποιηθεί από μια «βάση δεδομένων SQL» σε ένα σύστημα που στηρίζεται σε μικροϋπηρεσίες.
- UDSF (Unstructured Data Storage Network Function): Αφορά μια υπηρεσία «βοηθού» η οποία χρησιμοποιείται προκειμένου να αποθηκεύσει μη δομημένα δεδομένα. Είναι πιθανόν να μπορεί να υλοποιηθεί από ένα "Κατάστημα Κλειδιών/Αξίας" σε σύστημα που στηρίζεται σε μικροϋπηρεσίες.

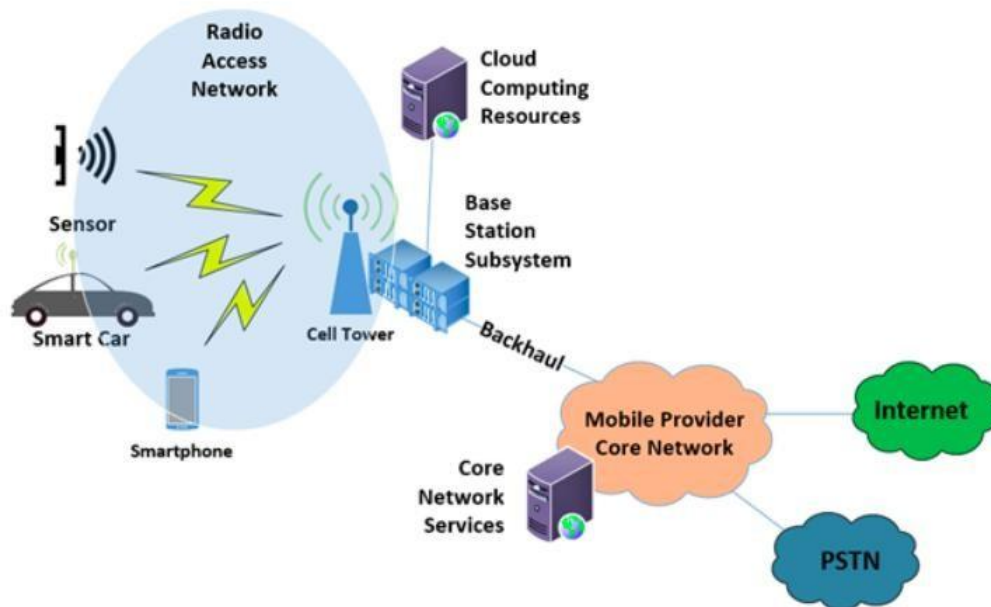
- NEF (Network Exposure Function): Αφορά ένα μέσο για την έκθεση συγκεκριμένων δυνατοτήτων σε υπηρεσίες τρίτων, καθώς και τη μετάφραση ανάμεσα σε εσωτερικές και εξωτερικές αναπαραστάσεις για δεδομένα. Αυτή είναι πιθανόν να μπορεί να υλοποιηθεί από έναν «Διακομιστή API» σε ένα σύστημα που στηρίζεται σε μικροϋπηρεσίες.
- NRF (NF Repository Function): Αφορά ένα μέσο το οποίο μπορεί να βοηθήσει στην ανακάλυψη διαθέσιμων υπηρεσιών. Αυτή είναι πιθανόν να μπορεί να εφαρμοστεί από μια «Υπηρεσία Discovery» σε ένα σύστημα που στηρίζεται σε μικροϋπηρεσίες.
- NSSF (Network Slicing Selector Function): Αφορά ένα μέσο για την επιλογή ενός τμήματος δικτύου για την εξυπηρέτηση ενός δεδομένου UE. Τα slices δικτύου είναι με άλλα λόγια ένας τρόπος διαχωρισμού πόρων δικτύου έτσι ώστε να διαφοροποιηθεί η υπηρεσία που προσφέρεται σε πολλούς και διαφορετικούς χρήστες.

Η τρίτη ομάδα αποτελείται από ένα στοιχείο που εκτελείται στο User Plane (UP) (Peterson & Sunay, 2019):

- UPF (User Plane Function): Αυτό προωθεί την κίνηση ανάμεσα σε RAN και Διαδίκτυο, που αντιστοιχεί στον συνδυασμό S/PGW στο EPC. Πέρα από την προώθηση πακέτων, αυτό είναι υπεύθυνο για τη νόμιμη παρακολούθηση, την επιβολή πολιτικής, την αστυνόμευση QoS και την αναφορά χρήσης κίνησης

Από τις αναφερόμενες ομάδες, η πρώτη και η τρίτη είναι οι καλύτερες από άποψη ανακατασκευής του EPC του 4G, αντίθετα η δεύτερη ομάδα είναι ο τρόπος του 3GPP να δείχνει μια εγγενή λύση cloud σαν μια επιθυμητή τελική κατάσταση για το Mobile Core. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως η εισαγωγή διακριτών υπηρεσιών αποθήκευσης θεωρείται σαν όλες τις άλλες υπηρεσίες οι οποίες είναι πιο εύκολα επεκτάσιμες. Υιοθετεί μια ιδέα που είναι κοινή σε συστήματα που βασίζονται σε μικροϋπηρεσίες, δηλαδή, να δείχνει έναν *διάλογο μηνυμάτων που* διασυνδέει όλα τα εξαρτήματα αντί να περιλαμβάνει ένα πλήρες σύνολο συνδέσεων ανά ζεύγη. Αυτό δείχνει πως είναι μια καλά κατανοητή στρατηγική υλοποίησης (Peterson & Sunay, 2019).

Κάνοντας ένα βήμα πίσω από αυτές τις λεπτομέρειες, και με την προειδοποίηση ότι υποθέτουμε μια εφαρμογή, το βασικότερο σημείο είναι ότι μπορούμε να συλλάβουμε τον Mobile Core ως ένα γράφημα υπηρεσιών. Μερικές φορές θα το ακούσετε αυτό που ονομάζεται Γράφημα Υπηρεσιών ή Αλυσίδα Υπηρεσιών, με το τελευταίο να είναι πιο διαδεδομένο σε έγγραφα προσανατολισμένα στο NFV (Weissberger, 2022).



Εικόνα 8: Mobile Core

1.3.4 Ασφάλεια και κινητικότητα

Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά του κυψελοειδούς δικτύου θεωρούνται η υποστήριξή του για κινητικότητα και για ασφάλεια. Αυτά διαφοροποιούν το κυψελοειδή δίκτυο από το WiFi. Τα παρακάτω χρησιμεύουν επίσης για να συμπληρώσετε ορισμένες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο κάθε μεμονωμένο UE συνδέεται στο δίκτυο (Khan, Ramos, Paulo & Velez, w.d).

Ξεκινώντας η αρχιτεκτονική ασφάλειας στηρίζεται σε δύο υποθέσεις εμπιστοσύνης. Η πρώτη υπόθεση σχετίζεται με κάθε Σταθμό Βάσης, ο οποίος εμπιστεύεται πως συνδέεται με τον Φορητό Πυρήνα δια μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου, μέσω του οποίου φτιάχνει τις σήραγγες : μια σήραγγα SCTP/IP στο επίπεδο ελέγχου του πυρήνα (Core-CP) και μια σήραγγα GTP/UDP/IP στο επίπεδο χρήστη του πυρήνα (Core-UP). Η δεύτερη υπόθεση σχετίζεται με το γεγονός ότι κάθε UE έχει μια κάρτα SIM η οποία παρέχεται από τον χειριστή, προσδιορίζει μοναδικά τον συνδρομητή (δηλαδή τον αριθμό τηλεφώνου) και ορίζει τις ραδιοπαραμέτρους (για παράδειγμα, τη ζώνη συχνοτήτων) που είναι σημαντικές για την επικοινωνία με τους Σταθμούς Βάσης του εν λόγω χειριστή. Επίσης, η κάρτα SIM αποτελείται από ένα μυστικό κλειδί που χρησιμοποιεί η UE προκειμένου να ελέγχει την ταυτότητα (Li, Xu, & Zhao, 2018).

Με αυτό το σημείο εκκίνησης, φαίνεται η ακολουθία σύνδεσης ανά UE. Αν ένας UE τίθεται σε ενεργοποίηση για πρώτη φορά, έρχεται σε επικοινωνία με έναν κοντινό Σταθμό Βάσης δια μέσω μιας προσωρινής (χωρίς έλεγχο ταυτότητας) ραδιοζεύξης (πρώτο Βήμα). Ο Σταθμός Βάσης στέλνει το αίτημα στο Core-CP διά μέσω της υπάρχουσας σήραγγας και το Core-CP (συγκεκριμένα, το MME στο 4G και το AMF στο 5G) αρχίζει ένα πρωτόκολλο ελέγχου ταυτότητας με το UE (δεύτερο Βήμα). Το 3GPP ορίζει ένα σύνολο επιλογών προκειμένου να γίνει έλεγχος ταυτότητας και κρυπτογράφηση, και στον οποίο τα πραγματικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται θεωρούνται επιλογή υλοποίησης. Παραδείγματος χάριν, το Advanced Encryption Standard (AES) θεωρείται μία από τις επιλογές για κρυπτογράφηση. Η συγκεκριμένη ανταλλαγή ελέγχου ταυτότητας είναι πρώτα πρώτα ξεκάθαρη, μιας και η σύνδεση Σταθμού βάσης προς UE δεν είναι ασφαλής (Kim, Astillo, & You, 2020).

Μόλις το UE και το Core-CP ικανοποιηθούν ο ένας με την ταυτότητα του άλλου, το Core-CP ενημερώνει τα άλλα στοιχεία για τις παραμέτρους που θα χρειαστούν για την εξυπηρέτηση του UE (Βήμα 3). Αυτό περιέχει: πρώτον εντολή στο Core-UP να προετοιμάσει το επίπεδο χρήστη (για παράδειγμα να εκχωρήσει μια διεύθυνση IP στο UE και να ορίσει την κατάλληλη παράμετρο QCI). Δεύτερον εντολή στον Σταθμό Βάσης να φτιάξει ένα κρυπτογραφημένο κανάλι προς τον UE και τρίτον να δώσει στο UE το συμμετρικό κλειδί το οποίο θα χρειαστεί προκειμένου να χρησιμοποιήσει το κρυπτογραφημένο κανάλι με τον Σταθμό Βάσης. Αυτό το κλειδί κρυπτογραφείται

χρησιμοποιώντας το δημόσιο κλειδί του UE (αφού μόνο με αυτόν τον τρόπο το UE μπορεί να το αποκρυπτογραφήσει, χρησιμοποιώντας δηλαδή το μυστικό του κλειδί). Όταν ολοκληρωθεί, το UE είναι πιθανόν να χρησιμοποιήσει το κανάλι επιπέδου χρήστη από άκρο σε άκρο μέσω του Core-UP (Βήμα 4) (Kim, Astillo, & You, 2020).

Διακρίνονται τρεις (3) πρόσθετες πληροφορίες αναφορικά με αυτή τη διαδικασία (Li, Xu, & Zhao, 2018):

1. το ασφαλές κανάλι ελέγχου ανάμεσα στο UE και στο Core-CP έχει ρυθμιστεί κατά το Βήμα 2 και μένει διαθέσιμο. Χρησιμοποιείται από το Core-CP για την αποστολή επιπλέον οδηγιών ελέγχου στον UE στο πλαίσιο της συνεδρίας.
2. το κανάλι επίπεδου χρήστη το οποίο φτιάχτηκε κατά το Βήμα 4 αναφέρεται σαν μια υπηρεσία προεπιλεγμένου φορέα, όμως μπορούν να δημιουργηθούν επιπλέον κανάλια ανάμεσα στο UE και στο Core-UP, το καθένα με μια διαφορετική τιμή QCI. Αυτό είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ανά εφαρμογή, όπως, υπό τον έλεγχο του Mobile Core που κάνει Deep Packet Inspection (DPI) στην κυκλοφορία, αναζητώντας ροές που πρέπει να έχουν συγκεκριμένη μεταχείριση
3. Αν τα προκύπτοντα κανάλια επιπέδου χρήστη είναι λογικά από άκρο σε άκρο, κάθε ένα από αυτά υλοποιείται πρακτικά σαν μια ακολουθία σήραγγων ανά άλμα. Ως εκ τούτου κάθε στοιχείο στη διαδρομή από άκρο σε άκρο τερματίζει μια κατάντη σήραγγα κάνοντας χρήση ένα τοπικό αναγνωριστικό για μια δεδομένη UE και αρχίζει μια ανάντη σήραγγα χρησιμοποιώντας ένα άλλο τοπικό αναγνωριστικό για το εν λόγω UE. Πρακτικά οι συγκεκριμένες σήραγγες ανά ροή τις περισσότερες φορές ομαδοποιούνται σε μια ενιαία σήραγγα ανάμεσα στα συστατικά, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διαφοροποίηση του επιπέδου υπηρεσίας που προσφέρεται σε κάθε κανάλι UE από άκρο σε άκρο. Αυτός είναι ένας περιορισμός του 4G που φιλοδοξεί να διορθώσει το 5G.

Η υποστήριξη για κινητικότητα είναι δυνατόν να γίνει κατανοητή σαν η διαδικασία επανεκτέλεσης ενός ή πολλών βημάτων αφού το UE μεταφέρεται σε όλο το RAN. Ο μη επαληθευμένος σύνδεσμος ο οποίος διαφαίνεται στο (1) αφήνει τον UE να είναι γνωστός σε όλους τους Σταθμούς Βάσης εντός εμβέλειας. Σύμφωνα με το

μετρούμενο CQI του σήματος, οι Σταθμοί Βάσης μπορούν και επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους προκειμένου να λάβουν μια απόφαση παράδοσης. Αμέσως μόλις ληφθεί αυτή η απόφαση κοινοποιείται έπειτα ο Mobile Core, ενεργοποιώντας ξανά τις λειτουργίες ρύθμισης, ο οποίος με τη σειρά του φτιάχνει ξανά τη σήραγγα επιπέδου χρήστη ανάμεσα στο Σταθμό Βάσης και στο SGW (ή αντίστοιχα, μεταξύ του Σταθμού Βάσης και του UPF σε 5G). Από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του κυψελοειδούς δικτύου είναι πως το επίπεδο χρήστη του Mobile Core (για παράδειγμα, UPF σε 5G) αποθηκεύει τις πληροφορίες κατά τη μετάβαση μεταβίβασης, αποφεύγοντας επακόλουθες αναμεταδόσεις από άκρο σε άκρο και πακέτα που πέφτουν (Rahman, Hossain, Rashid, Barnes, & Hassanain, 2020).

Με άλλα λόγια, το κυψελοειδές δίκτυο διατηρεί τη *συνεδρία UE* έναντι της κινητικότητας αλλά μπορεί να το κάνει μόνο όταν ο ίδιος Mobile Core εξυπηρετεί το UE (δηλαδή, αλλάζει μόνο ο Σταθμός Βάσης). Συνήθως αυτό ισχύει για μια UE η οποία κινείται μέσα σε μια μητροπολιτική περιοχή. Η μετακίνηση ανάμεσα σε περιοχές του μετρό, και άρα μεταξύ Κινητών Πυρήνων, δεν διακρίνεται από την ανακύκλωση ισχύος σε UE. Στο UE εκχωρείται μια καινούργια διεύθυνση IP και δεν πραγματοποιείται καμία προσπάθεια αποθήκευσης και εν συνεχεία παράδοσης δεδομένων κατά την πτήση. Ανεξαρτήτου κινητικότητας αλλά σχετική με αυτήν τη συζήτηση, κάθε UE που καθίσταται ανενεργός για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα χάνει τη σύννοδό του, με τη δημιουργία μιας καινούργιας συνεδρίας και την εκχώρηση μιας καινούργιας διεύθυνσης IP όταν το UE τεθεί σε ενεργοποίηση εκ νέου (Rehman, Haseeb, Saba, Lloret & Ahmed, 2021).

Αξίζει να σημειωθεί πως η προσέγγιση που βασίζεται σε συνεδρίες μπορεί να εντοπιστεί στις ρίζες του κυψελοειδούς δικτύου ως δίκτυο προσανατολισμένο στη σύνδεση. Άξιο αναφοράς είναι ένα πείραμα σκέψης, αν ο Mobile Core θα συνεχίσει να αναπτύσσεται προκειμένου να ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό με τις υποθέσεις χωρίς σύνδεση των πρωτοκόλλων Διαδικτύου που τις περισσότερες φορές τρέχουν πάνω του (Rehman, Haseeb, Saba, Lloret & Ahmed, 2021).

1.3.5 Επιλογές ανάπτυξης

Με ένα ήδη εξελισσόμενο 4G RAN/EPC στο πεδίο και μια καινούργια ανάπτυξη 5G RAN/NG-Core σε εξέλιξη, δεν είναι δυνατόν να μην δοθεί σημασία στο ζήτημα της μετάβασης από το 4G στο 5G (ένα θέμα το οποίο ο κόσμος IP αντιμετωπίζει πάνω από περίπου 20 χρόνια). Το 3GPP ορίζει επίσημα πολλαπλές επιλογές ανάπτυξης, οι οποίες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (GSMA, 2020):

- Αυτόνομο 4G / Αυτόνομο 5G
- Μη αυτόνομο (4G+5G RAN) μέσω EPC του 4G
- Μη αυτόνομο (4G+5G RAN) έναντι του NG-Core του 5G

Η δεύτερη από τις τρεις επιλογές, η οποία γενικά αναφέρεται ως "NSA", περιλαμβάνει σταθμούς βάσης 5G που αναπτύσσονται παράλληλα με τους υπάρχοντες σταθμούς βάσης 4G σε μια δεδομένη γεωγραφία για να παρέχουν αύξηση του ρυθμού δεδομένων και της χωρητικότητας. Η κυκλοφορία επιπέδου ελέγχου στην NSA ανάμεσα στον εξοπλισμό χρήστη και στο 4G Mobile Core χρησιμοποιείται (δηλαδή προωθείται μέσω) για τους σταθμούς βάσης 4G και οι σταθμοί βάσης 5G χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη μεταφορά της κίνησης των χρηστών. Τελικά, αναμένεται ότι οι φορείς εκμετάλλευσης ολοκληρώσουν τη μετάβασή τους στο 5G αναπτύσσοντας το NG Core και συνδέοντας τους σταθμούς βάσης 5G σε αυτό για αυτόνομη λειτουργία (SA) (GSMA, 2020).

Ένας λόγος που εφιστούμε την προσοχή στο θέμα της σταδιακής αλλαγής είναι ότι αντιμετωπίζουμε μια παρόμοια πρόκληση στα κεφάλαια που ακολουθούν. Κατά γενικό κανόνα, χρησιμοποιούμε στοιχεία 4G, ιδιαίτερα σε σχέση με τον Mobile Core, καθώς αυτό είναι διαθέσιμο στον ανοιχτό κώδικα σήμερα, και εμπιστευόμαστε ότι ο αναγνώστης μπορεί να κάνει την κατάλληλη αντικατάσταση χωρίς απώλεια γενικότητας. Η κοινότητα ανοιχτού κώδικα, όπως και ο ευρύτερος κλάδος, βρίσκεται στη διαδικασία της σταδιακής βελτίωσης της βάσης κώδικα 4G σε ανάλογη συμβατή με το 5G δίκτυο (GSMA, 2020).

1.4 Ασύρματες τεχνολογίες

Αρχικά, υπολογίζεται ότι ο όγκος κινητής και ασύρματης κίνησης πρόκειται να αυξηθεί κατά ένα μεγάλο αριθμό μέσα στην επόμενη δεκαετία το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι θα υπάρχουν 50 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές έως το 2020 και αυτό σημαίνει πως όλοι θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα να μοιράζονται δεδομένα παντού και πάντα. Με τη μεγάλη αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών, υπάρχουν κάποιες προκλήσεις οι οποίες είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν. Αυτό θα πραγματοποιηθεί με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την αύξηση της χωρητικότητας, τη χρήση του φάσματος και το κόστος, όπως επίσης και την καλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης για τον αυξανόμενο αριθμό των συσκευών που έχουν συνδεθεί. Για το όραμα του παγκόσμιου επικοινωνιακού κόσμου που σχετίζεται με το σημερινό δίκτυο, ο γενικός στόχος είναι να παρέχει μια ιδέα συστήματος που υποστηρίζει (Alsharif, Nordin, Abdullah, & Kelechi, 2017):

- 1000 φορές μεγαλύτερη αύξηση στον όγκο δεδομένων ανά περιοχή.
- 10 έως 100 φορές μεγαλύτερη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών.
- 10 έως 100 φορές αύξηση των δεδομένων των χρηστών.
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης μαζικής επικοινωνίας .
- 5 φορές μειωμένη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.

Για να δοθεί μια βάση που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του δικτύου 5G και ταυτόχρονα θα παρέχει εφαρμόγες κατάλληλες στους χρήστες είναι ωφέλιμο να μελετήσουμε τις παρακάτω τεχνολογίες (Malini, Chandrakala, 2022) :

- Ραδιο-συνδέσεις: οι οποίες περιλαμβάνουν την δημιουργία νέων κυματομορφών μετάδοσης και την διαχείριση ραδιοφωνικών πόρων.
- Μεταδόσεις πολλαπλών κόμβων και πολλαπλών κεραιών : οι οποίες περιλαμβάνουν σχεδιασμό τεχνολογιών μετάδοσης / λήψης ενός μεγάλου όγκου κεραιών που βασίζονται σε πολλαπλές διαμορφώσεις κεραιών και αναπτύσσουν προηγμένα συστήματα συντονισμού μεταξύ των κόμβων.
- Η διάσταση του δικτύου: η οποία περιλαμβάνει την εξέταση της ζήτησης, της έκτασης, της διαχείρισης της κυκλοφορίας και της κινητικότητας των καινοτόμων προσεγγίσεων για την αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών σε πολύπλοκες διαφορετικές αναπτύξεις.

- Η χρήση του φάσματος: περιλαμβάνει την εξέταση της εκτεταμένης ζώνης λειτουργίας του φάσματος, καθώς και τη λειτουργία σε νέα φάσματα.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία τρόπους και λύσεις ώστε να ολοκληρωθούν και να επιτευχθούν οι στόχοι που αναπτύξαμε νωρίτερα (Dragičević, Siano, & Prabaharan, 2019):

- Device-to-Device (D2D) επικοινωνίες (συσκευή προς συσκευή) οι οποίες αναφέρονται στην άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών.
- Massive Machine Communications (MMC) (μαζικές μηχανές επικοινωνίας) οι οποίες θα αποτελέσουν την βασική πλατφόρμα του Διαδικτύου με διάφορα πεδία εφαρμογής όπως η αυτοκινητοβιομηχανία , η δημόσια ασφάλεια και ο ιατρικός τομέας .
- Τα μετακινούμενα δίκτυα (MN) θα ενισχύσουν και θα επεκτείνουν τη σύνδεση μεγάλων πληθυσμών με κοινές συσκευές επικοινωνίας.
- Τα εξαιρετικά πυκνά δίκτυα (UDN) τα οποία έχουν ως στόχο την αύξηση της δυναμικότητας και της ενεργειακής απόδοσης.
- Τα εξαιρετικά αξιόπιστα δίκτυα (URN) θα επιτρέψουν υψηλούς βαθμούς διαθεσιμότητας.

1.5 Βαθμός υλοποίησης εγκατάστασης

Το 5G δίκτυο θα εξελιχθεί σταδιακά, στα εξής δύο (2) στάδια: στο στάδιο Non-Stand-Alone (μη αυτόνομα - NSA) και στο στάδιο Stand-Alone (αυτόνομα - SA). Αρχικά, οι MNO θα χρησιμοποιήσουν την έκδοση 3GPP 15 (New Radio) αξιοποιώντας το υφιστάμενο κεντρικό δίκτυο 4G (μη αυτόνομη αρχιτεκτονική-NSA) ενώ θα εγκαθίσταται νέος ραδιοεξοπλισμός σε υπάρχουσες ή νέες μακροκυψέλες. Στην περίπτωση αυτή, οι MNO θα επικεντρωθούν κυρίως στην καταναλωτική αγορά και στην παροχή ενισχυμένων ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας (eMBB). Μόλις εδραιωθεί η κάλυψη 5G και προκύψουν εφαρμογές 5G που απαιτούν επικοινωνία μεταξύ μηχανών, εξαιρετικά χαμηλό latency και πολύ υψηλότερη χωρητικότητα, οι MNO θα κινηθούν προς αυτόνομη αρχιτεκτονική (SA) όπου το δίκτυο κορμού είναι εξ ολοκλήρου 5G. Τα δίκτυα SA 5G απαιτούν μια εντελώς νέα αρχιτεκτονική, με δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό (SDN) και εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες (NFV). Οι τεχνολογίες SDN και NFV επιτρέπουν την ταχύτερη είσοδο στην αγορά (go-to-market) επιτρέποντας στους MNO να διαχειρίζονται και να επεκτείνουν τις δυνατότητες του δικτύου τους κατά παραγγελία χρησιμοποιώντας εικονικές εφαρμογές software αντί να χρησιμοποιούν hardware. Ενώ τα μη αυτόνομα δίκτυα 5G αναπτύσσονται ήδη στις περισσότερες χώρες, λίγοι μόνο πάροχοι έχουν επιβεβαιώσει την ανάπτυξη αυτόνομων 5G δικτύων έως το 2020, ενώ οι περισσότεροι αναμένεται να αρχίσουν την εγκατάσταση αυτόνομων δικτύων μελλοντικά, με τα δύο δίκτυα να συνυπάρχουν για αρκετά χρόνια. Η μετάβαση από την μη αυτόνομη στην αυτόνομη αρχιτεκτονική είναι απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση των βασικών χαρακτηριστικών του 5G και την επίτευξη λειτουργικών επιδόσεων του δικτύου (Krawiec, & Zurek, 2019).

Η τεχνολογία 5G θα αναπτυχθεί σταδιακά σε αρκετές φασματικές ζώνες: Οι ζώνες 700 MHz και οι ζώνες 3.5 GHz θα χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη υψηλής χωρητικότητας σε ευρεία κάλυψη (επαναχρησιμοποίηση των υφιστάμενων μακροκυψελών), ενώ η ζώνη 26 GHz είναι πιο κατάλληλη για χρήση σε περιοχές με πολύ υψηλή συγκέντρωση κίνησης ή ειδικές απαιτήσεις κάλυψης. Οι ιδιωτικές επενδύσεις στην τεχνολογία 5G έχουν ήδη ξεκινήσει από τις πιο πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, με την αναβάθμιση των υφιστάμενων μακρο-κυψελών με την τεχνολογία 5G New Radio. Καθώς η κάλυψη θα γίνεται πιο εκτεταμένη και τα

τερματικά 5G φθηνότερα, η διείσδυση της τεχνολογίας 5G θα αυξηθεί, ιδίως εάν οι φορείς εκμετάλλευσης επιλέξουν μια ανταγωνιστική στρατηγική τιμολόγησης. Κάποιες ζώνες οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα για τα δίκτυα 3G και 4G προσδοκείται να ανακατανεμηθούν για 5G δίκτυο, μια και η τεχνολογία 3G θα καταργηθεί σταδιακά και η τεχνολογία 4G θα είναι σε θέση να εξυπηρετεί ανάγκες μικρότερης χωρητικότητας. (O'Connell, Moore, & Newe, 2020).

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα δίκτυα 5G και οπτικών ινών συμβαδίζουν καθώς οι πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης που παρέχονται από το 5G καθώς και η ανάγκη των παρόχων να πυκνώσουν το ραδιοδίκτυο τους, θέτουν υψηλές απαιτήσεις για backhauling / fronthauling. Επομένως, η ανάπτυξη ενός πυκνού και αξιόπιστου δικτύου ινών, αποτελεί προϋπόθεση για την ανάπτυξη του 5G (Krawiec, & Zurek, 2019).

Αναφορικά με το οικονομικό - κοινωνικό αντίκτυπο, τα δίκτυα 5G, με τη μεγάλη αύξηση των χωρητικότητων μετάδοσης δεδομένων, του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών και των δυνατοτήτων διαχείρισης σε αληθινό χρόνο εξαιτίας του χαμηλού latency, προσδοκείται να είναι ο βασικός παράγοντας προώθησης του ψηφιακού μετασχηματισμού των ατόμων, των επιχειρήσεων, της κοινωνίας και των νοικοκυριών. Οι συγκεκριμένοι μετασχηματισμοί θα έχουν άμεσο αντίκτυπο στην οικονομική ανάπτυξη των διαφόρων περιφερειών και κρατών και στη δημιουργία πλούτου (Sarrigiannis, Ramantas, Kartsakli, Mekikis, Antonopoulos, & Verikoukis, 2019).

Ένας εκτενής κατάλογος εκθέσεων και μελετών έχει εντοπίσει οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη που αναμένεται να πραγματοποιηθούν με την υιοθέτηση της τεχνολογίας 5G στην παραγωγή, τη γεωργία, τις μεταφορές και πολλούς άλλους κάθετους τομείς (Jou, Vidal, Cahill, Arnal, Honssin, L.-M., Boutin, & Chau, 2018):

- Το παγκόσμιο εισόδημα από το 5G θα ανέλθει στο ισοδύναμο των 247 δισ. € έως το 2025 και τα οφέλη από την εισαγωγή της τεχνολογίας 5G σε τέσσερις βασικούς βιομηχανικούς τομείς για την ΕΕ, και συγκεκριμένα: την αυτοκινητοβιομηχανία, την υγεία, τις μεταφορές και την ενέργεια θα μπορούσαν να φθάσουν τα 114 δισεκατομμύρια ετησίως⁴⁰. Το 5G έχει τη δυνατότητα να συνεισφέρει 8 τρισεκατομμύρια δολάρια στην παγκόσμια

οικονομία έως το 2030⁴¹ και 13.2 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2035, δημιουργώντας 22.3 εκατομμύρια θέσεις εργασίας μόνο στην παγκόσμια αλυσίδα αξίας 5G⁴². Μεταξύ των πιθανών use-cases του 5G, το 55 % θα έχει Εθνικό Ευρυζωνικό Σχέδιο 2021-2027 19 / 64 άμεσο αντίκτυπο στους στόχους για την υγεία και την ευημερία και το 40 % στους στόχους για την καινοτομία και τις υποδομές.

- Στην Ευρώπη, η σωρευτική πρόσθετη συμβολή των νέων ψηφιακών τεχνολογιών στο ΑΕΠ θα μπορούσε να ανέλθει σε 2.2 τρισεκατομμύρια ευρώ στην ΕΕ έως το 2030, ήτοι αύξηση 14,1 % σε σχέση με το 2017⁴³. Ο αντίκτυπος του 5G στην ευρωπαϊκή οικονομία θα οδηγήσει σε συνολικές νέες πωλήσεις ύψους έως και 2 τρισεκατομμυρίων € σε όλους τους κύριους κλάδους της ευρωπαϊκής οικονομίας μεταξύ 2021 και 2025. Την ίδια περίοδο, το 5G δίκτυο θα προσθέσει 1 τρισεκατομμύριο € στο ευρωπαϊκό ΑΕΠ και μπορεί να μετασχηματίσει ή να δημιουργήσει έως και 20 εκατομμύρια θέσεις εργασίας σε κάθε τομέα της οικονομίας. Επιπλέον, για κάθε ευρώ που εισάγεται άμεσα ως αποτέλεσμα του 5G στις ΤΠΕ (Τεχνολογίες της Πληροφορίας και των Επικοινωνιών), προστίθεται 1 επιπλέον ευρώ σε άλλους τομείς της οικονομίας, με διπλάσιο πολλαπλασιαστικό αποτέλεσμα επί του συνολικού ΑΕΠ⁴⁴.
- Διάφορες μελέτες ποσοτικοποιούν τη συμβολή της τεχνολογίας 5G στην ελληνική οικονομία. Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την Ευρωπαϊκή Επιτροπή⁴⁵ εκτιμά ότι έως το 2025, η εισαγωγή του 5G θα σχετίζεται με επενδύσεις 1.220 εκατ. €⁴⁶, θα έχει επαγόμενη επίδραση⁴⁷ 7.290 εκατ. € και έμμεσο αντίκτυπο⁴⁸ 9.480 εκατ. €, και θα δημιουργήσει περισσότερες από 337.000 θέσεις εργασίας. Μια ακόμα μελέτη εκτιμά πως θα ήταν δυνατόν να προσθέσει μέχρι και 10 δισεκατομμύρια ευρώ στο ελληνικό ΑΕΠ και πως έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει ή να δημιουργήσει μέχρι και 190.000 θέσεις εργασίας σε κάθε τομέα της οικονομίας. Η μελέτη «Επισκόπηση σχεδίου δράσης 5G για την Ευρώπη: τελική έκθεση» εντοπίζει μια σειρά περιπτώσεων χρήσης που μπορούν να επωφεληθούν από το 5G, σε διάφορους τομείς της οικονομίας και παρέχει μια ποσοτική εκτίμηση του κόστους καθώς και του κοινωνικού, περιβαλλοντικού και οικονομικού οφέλους και, τέλος, εκτιμάται ο λόγος κόστους - οφέλους (CBR) για κάθε ομάδα περιπτώσεων χρήσης για διαφορετικά κράτη μέλη. Το CBR για την Ελλάδα υπολογίστηκε στο 2,8

υποδεικνύοντας μια μάλλον μέτρια συμβολή50 της τεχνολογίας 5G στην ελληνική οικονομία σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές οικονομίες. Η τελευταία μελέτη, η οποία είναι σύμφωνη με τα ευρήματα των προαναφερθέντων μελετών, διεξήχθη από το Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης στο πλαίσιο του Εθνικού Σχεδίου Δράσης 5G.

Biggest challenges MNOs face with 5G



Εικόνα 9: MNOs

Κεφάλαιο 2 – Beyond 5G

2.1 Περιορισμός του 5G

Οι ερευνητές, τα τελευταία χρόνια, μελετούν την αξιολόγηση και τον εντοπισμό της αρχιτεκτονικής δικτύου των συστημάτων 5G και εκτός αυτού μελετούν το αντίκτυπο της προσέγγισης δικτύωσης/υπολογιστικής «ομίχλης» που δύναται για το 5G δίκτυο στην εξέλιξη των τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης, την αξιολόγηση προσεγγίσεων RRM συμβατών με τις καινούργιες απαιτήσεις, αναφέροντας καινούργια παραδείγματα και έννοιες για να ληφθεί υπόψη το πλήθος καινούργιων εφαρμογών που προκύπτουν από το πλαίσιο του IoT (Pradhan, Sahu, Rajeswari & Tun, 2022).

Η κυκλοφορία του δικτύου 5G New Radio (5G NR) βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη παγκοσμίως, με την τυποποίηση να προχωρά και την εξέλιξη του παγκόσμιου προτύπου για την αντιμετώπιση νέων κάθετων της αγοράς, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (IIoT).

Ωστόσο, οι αρχικές αναπτύξεις δικτύου δεν χρησιμοποιούν όλες τις δυνατότητες που ορίζονται επί του παρόντος για το 5G. Ενώ η βελτιστοποίηση των δικτύων και των πρώιμων συσκευών 5G είναι μια συνεχής διαδικασία, οι ερευνητές έχουν ξεκινήσει συζητήσεις για το μέλλον, τι ξεπερνά το 5G και οδηγεί στην επόμενη γενιά ασύρματης επικοινωνίας (Chattopadhyay, & Rao, 2020).

2.2 Υπηρεσίες που θα παρέχει το 6G πέρα από το 5G

Το 5G προσπαθεί να ενεργοποιήσει το Διαδίκτυο των Πάντων και κάνει κάποια βήματα προς αυτό, αλλά το 6G θα τα καταφέρει πραγματικά σωστά, λέει ο Jeffrey Andrews, διευθυντής ενός ερευνητικού κέντρου στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Όστιν (David, & Berndt, 2018).

Συχνότητες φορέα άνω των 6 gigahertz με δυνατότητα 5G θα χρησιμοποιηθούν για πρώτη φορά σε ένα κυψελοειδές σύστημα. Το αποτέλεσμα είναι πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης και ταχύτητες δεδομένων από ό,τι με το 4G. Το 6G θα ανεβάσει τις δυνατότητες υψηλής απόδοσης του 5G σε ένα νέο επίπεδο, αξιοποιώντας τη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων terahertz, σύμφωνα με τον John Byrne, διευθυντή υπηρεσιών τεχνολογίας και λογισμικού τηλεπικοινωνιών στην εταιρεία ανάλυσης GlobalData (David, & Berndt, 2018).

Αυτό εκμεταλλεύεται κάθε πλεονέκτημα του 5G και το βάζει σε στεροειδή, λέει ο Byrne. Γίνεται λόγος για ίσως χίλιες φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα διακίνησης, ενώ με το 5G, το ιερό δισκοπότηρο είναι να μπορείτε να φτάσετε στο 1 gigabyte ανά δευτερόλεπτο στη συσκευή σας (Shafin, Liu, Chandrasekhar, Chen, Reed, & Zhang, 2020).

Τα δίκτυα 6G ήρθαν για να επεκτείνουν τα σενάρια εφαρμογών 5G (με άλλα λόγια περαιτέρω -eMBB, ultramMTC, ενισχυμένο- uRLLC) και να εισαγάγουν καινούργια σενάρια εφαρμογών, και εκτός αυτών δεδομένα εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης, επικοινωνία και πανταχού παρούσα κινητή υπερευρεία ζώνη. Σε αντίθεση με τα δίκτυα 5G, τα δίκτυα 6G είναι δυνατόν να προσφέρουν καινούργιες μετρήσεις απόδοσης και να επιτύχουν ανώτερη απόδοση. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων 6G είναι η φασματική απόδοση έως και 1000 bps/Hz/m² (σε σύγκριση με 10 bps/Hz/m² στο 5G), ο ρυθμός δεδομένων ανοδικής ζεύξης έως 1 Tbps (σε σύγκριση με 10 Gbps στο 5G), η χωρητικότητα κυκλοφορίας έως 1–10 Gbps/m² (σε σύγκριση με 10 Mbps/m² στο 5G), η αξιοπιστία, το ποσοστό σφάλματος καρέ έως και 10⁻⁹ (σε σύγκριση με το ποσοστό σφάλματος καρέ 10⁻⁵ στο 5G), η καθυστέρηση επιπέδου ελέγχου μικρότερη από 1 ms (σε σύγκριση με 10 ms στο 5G), η υποστήριξη κινητικότητας έως και 1000 km/h (σε σύγκριση με 500

km/h σε 5G), η καθυστέρηση επεξεργασίας 10 ns (σε σύγκριση με 100 ns στο 5G), η πλήρη ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI), η ακρίβεια εντοπισμού 1 cm σε 3D (σε σύγκριση με 10 cm σε 2D στο 5G), και η ομοιόμορφη εμπειρία χρήστη έως και 10 Gbps 3D (σε σύγκριση με 50 Mbps 2D σε 5G). Οι πιθανές εξελικτικές υπηρεσίες/τεχνολογίες των δικτύων 6G περιλαμβάνουν κοινή ανίχνευση και επικοινωνία, επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (RIS), ολογραφικές επιφάνειες MIMO και διαμόρφωση δέσμης, δωρεάν διπλή όψη και κοινή χρήση φάσματος, μαζική επικοινωνία συσκευής με συσκευή (D2D), μη επίγεια επικοινωνία, E- υγεία και βιοαισθητήρα, αυτοματοποιημένα οχήματα και ρομποτική για το Industry 4.0 και πέρα, απτικό Διαδίκτυο, δυναμική κοπή δικτύου και δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό και εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου. Επίσης, οι δυνατότητες της μέγιστης γνωστικής ικανότητας για ευφυή ραδιομετάδοση και της ραδιοφωνικής σηματοδότησης είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό μέσω συστημάτων που στηρίζονται από AI με τη βοήθεια αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (ML). Συγχρόνως, οι πιθανές μεγάλες προκλήσεις των δικτύων 6G περικλείουν δυνατότητες συσκευών, επικοινωνίες σε υψηλότερες ζώνες, ασφάλεια δικτύου και σχέδια πομποδέκτη και κεραιών (Hakeem, Hussein & Kima, 2022).

Το 6G θα μπορούσε να προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες ανίχνευσης, διευκολύνοντας την ενισχυμένη επίγνωση της κατάστασης για εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας και εικονικής πραγματικότητας για να παρέχει δυναμικά εντυπωσιακές εμπειρίες χρήστη (Gupta & Singh, 2018).

Για παράδειγμα, λέει ο Byrne, *Στο αεροδρόμιο αυτή τη στιγμή, μπορούσα να δω κάποιον σε μια οθόνη να μου λέει για τη διαδικασία του τελωνείου. Με το 6G, θα μπορούσε να είναι ένα πραγματικό ολόγραμμα. Για τηλεδιάσκεψη, θα μπορούσαμε να έχουμε μια προσομοιωμένη αίθουσα συνεδριάσεων όπου βλέπετε ολογράμματα των ανθρώπων αντί για μια οθόνη με τα πρόσωπά τους πάνω της* (Shafin, Liu, Chandrasekhar, Chen, Reed, & Zhang, 2020).

Εάν παίρνετε ένα περιβάλλον στο οποίο έχετε εκατοντάδες χιλιάδες αισθητήρες 6G και εφαρμόζετε αναλύσεις δεδομένων και έχετε μια δεξαμενή δεδομένων με όλα όσα υπάρχουν εκεί έξω, αρχίζετε να μιλάτε για κάποιες περιπτώσεις μετασχηματιστικής χρήσης. Τα δεδομένα από πολλά άτομα αρχίζουν να σας λένε πράγματα εκ των προτέρων (Shafin, Liu, Chandrasekhar, Chen, Reed, & Zhang, 2020).

Οι πύργοι που χρησιμοποιούνται για 5G πιθανότατα θα επαναχρησιμοποιηθούν για χρήση 6G, αλλά οι δορυφόροι μπορεί επίσης να διαδραματίσουν κάποιο ρόλο.

Βλέπετε πολλούς από αυτούς τους δορυφόρους σε χαμηλή τροχιά της Γης να ανεβαίνουν αυτή τη στιγμή, πράγμα που σημαίνει ότι θα έχουμε τελικά εκατοντάδες, ίσως χιλιάδες εκεί έξω - που θα μπορούσαν να αλλάζουν δραματικά τον αγωνιστικό χώρο εάν εμπλακούν στην ιστορία του 6G. λέει ο Μπερν. Αν τελικά θέλω ένα drone ή ένα δίκτυο υπηρεσιών για την εταιρεία μου, ένα φάσμα 6G terahertz και μια δορυφορική και επίγεια υποδομή είναι ένας ενδιαφέρον συνδυασμός (Katz, Pirinen, & Posti, 2019)

Στην πραγματικότητα, απέχουμε ακόμη λίγα χρόνια από την άφιξη αυτού του φουτουριστικού νέου κόσμου. Η γενική σκέψη αυτή τη στιγμή είναι το 2030, λέει ο Byrne, σημειώνοντας ότι οι καθυστερήσεις στη διαδικασία καθορισμού προτύπων για το 5G, η οποία είναι ακόμη σε εξέλιξη, μπορεί να ανατρέψουν κάπως τα πράγματα. Τείνει να είναι οι ίδιες εταιρείες και άνθρωποι που εμπλέκονται, επομένως τα πάντα στο 5G επηρεάζουν το χρονοδιάγραμμα και στο 6G (Hakeem, Hussein & Kima, 2022).

2.3 Τεχνολογίες για το Beyond 5G

Οι κύριες τεχνολογίες ενεργοποίησης των δικτύων 5G περικλείουν συλλογή ενέργειας και επικοινωνίες κυμάτων χιλιοστών (mmWave), μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (NOMA) και πολλές εισόδους πολλαπλής εξόδου (MIMO). Οι δραστηριότητες ανάπτυξης και τυποποίησης των δικτύων 5G αυξάνονται ραγδαία. Το 3GPP Release 17 (Rel-17) σηματοδοτεί ένα κύριο κεφάλαιο στην τυποποίηση του καινούργιου ραδιοφώνου 5G (NR). Οι δυνατότητες στόχου στο Rel-17 περικλείουν το MIMO, πλευρική σύνδεση 5G NR, υποστήριξη πολλαπλής μετάδοσης/μετάδοσης, υποστήριξη για τη ζώνη φάσματος 52,6–71 GHz, βελτιώσεις αναφορικά με την ενσωματωμένη πρόσβαση και backhaul, βιομηχανικό IoT/URLLC, και κοινή χρήση δυναμικού φάσματος. Πέρα από αυτά, το 5G βρίσκεται στα πρώτα του στάδια και ποικίλοι φορείς δεν έχουν αναφέρει την κυκλοφορία των εμπορικών υπηρεσιών 5G. Η σύλληψη δικτύων εκτός του 5G (B5G)/έκτης γενιάς (6G) έχει αρχίσει συγχρόνως τη διατήρηση του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας. Προσδοκάται πως ο παγκόσμιος αριθμός συσκευών συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο θα είναι πάνω από 50 δισεκατομμύρια και ο όγκος της ασύρματης κίνησης δεδομένων που προσφέρει αναδυόμενες υπηρεσίες IoT αναμένεται να είναι 5016 exabyte/μήνα (Zhang, Bjornson, Matthaiou, Ng, Yang, & Love, 2020).

Αναμένεται πως τα δίκτυα B5G/6G με τεχνολογικά πλεονεκτήματα και απαιτητικές ικανότητες αναστάτωσης θα προσφέρουν λύσεις σε κάθε απαίτηση και στις απανταχού απαντήσεις συνδεσιμότητας (Samdanis, & Taleb, 2020).

Το MIMO είναι μια βασική τεχνολογία ενεργοποίησης για δίκτυα 5G. Οι συγγραφείς της εργασίας με τίτλο A Two-Hop mmWave MIMO NR-Relay Nodes to Enhance the Average System Throughput and BER in Outdoor-to-Indoor Environments παρουσίασαν την αρχιτεκτονική των κόμβων αναμετάδοσης εκτός ζώνης δύο βημάτων (RN) με δυνατότητες MIMO για ενεργοποίηση επικοινωνιών 5G στη ζώνη mmWave. Αυτές είναι δύο (2) στρατηγικές αναμετάδοσης, με άλλα λόγια ενίσχυση και προώθηση και αποκωδικοποίηση και προώθηση, οι οποίες εφαρμόστηκαν προκειμένου να βοηθήσουν τις επικοινωνίες σε περιβάλλοντα εξωτερικού σε εσωτερικούς χώρους ανάμεσα στον εξοπλισμό του χρήστη NR και στο ραδιοκόμβο

5G. Έτσι εξετάστηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης καναλιών: η πρώτη αφορούσε την πλήρη γνώση ενός καναλιού, και η δεύτερη την εκτίμηση καναλιού διαμέσω του εκτιμητή λίγων τετραγώνων. Επίσης, βάση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπου εφαρμόστηκαν στο MATLAB και στο Simulink επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής mmWave MIMO NR-RN δύο άλματος. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που υλοποιήθηκαν με χαρακτηριστικά 5G, όπως είναι η δημιουργία ριπής σήματος συγχρονισμού, η κωδικοποίηση καναλιών μεταφοράς με κοινόχρηστο κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, και η φυσική παραγωγή κοινόχρηστου καναλιού κατερχόμενης ζεύξης, φανέρωσαν βελτιώσεις για το τον ρυθμό σφάλματος bit και την απόδοση (Mukherjee, Deng, Nodjiadjim, Riet, Mismar, Guendouz, Maneux, 2021).

Κεφάλαιο 3 – Δοκιμαστικές εγκαταστάσεις σε 5G

3.1 Δοκιμαστικές εγκαταστάσεις σε 5G

Νέες καινοτομίες όπως τα αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα, το *Διαδίκτυο των πραγμάτων* (IoT) και η εικονική πραγματικότητα οδηγούν την επόμενη αλλαγή παραδείγματος και το 5G θα προσφέρει την εκθετική βελτίωση στο εύρος ζώνης και τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου για να ενισχύσει αυτές τις εξελίξεις (Piri, Ruuska, Kanstren, Makela, Korva, Hekkala, Valasma, 2016).

Οι άνθρωποι απαιτούν την καλύτερη απόδοση όσον αφορά την ασύρματη τεχνολογία. Οι καινούργιες εξελίξεις 5G δίνουν τη δυνατότητα για ταχύτητες έως και 100 φορές πιο μεγάλες από τις ήδη υπάρχουσες συνδέσεις κινητής τηλεφωνίας και λανθάνοντα χρόνο στην περιοχή του 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου. Το 5G έχει ξεπεράσει ακόμη και τις υπάρχουσες δυνατότητες των φυσικών οπτικών ινών. Προκειμένου να υποστηριχθεί μια επιτυχής μετάβαση, βελτιώνονται και αναπτύσσονται πρακτικές δοκιμών 5G έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σταθερή απόδοση 5G που επιθυμούν οι τελικοί χρήστες. Το λογισμικό, τα συλλογικά εργαλεία, τα πρωτόκολλα και οι πρακτικές που είναι απαραίτητα για κάθε φάση ανάπτυξης 5G θεωρούνται ο πυρήνας του αναδυόμενου πεδίου δοκιμών 5G (Carrozzo, Siddiqui, Betzler, Bonnet, Perez, Ramos, & Subramanya, 2020).

Η δοκιμή 5G σημαίνει περισσότερο από την επαλήθευση των αστραπιαίων ταχυτήτων λήψης, της εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και της εκτεταμένης πυκνότητας κάλυψης. Οι απλές, ολοκληρωμένες λύσεις δοκιμών 5G έχουν ζωτικό ρόλο στην ανάπτυξη, και τη λειτουργική αριστεία των αναδυόμενων δικτύων 5G. Η παράλληλη εμπειρία αυτοματισμού της διαδικασίας δοκιμών και η τεχνογνωσία που κυμαίνεται από το εργαστήριο έως το πεδίο από τη VIAVI ξεκλειδώνει βελτιωμένη ορατότητα, ταχύτερο χρόνο κυκλοφορίας και βελτιστοποιημένες ροές εσόδων 5G (Vidal, Nogales, Valera, Gonzalez, Sanchez-Aguero, Jacob, & Cervello-Pastor, 2020).

Κάθε μεγάλη αλλαγή απαιτεί δέσμευση και η απόδοση 5G δεν θεωρείται η εξαίρεση. Τα καινούργια αρχιτεκτονικά στοιχεία που ορίζουν το 5G προσφέρουν τεχνικές προκλήσεις και πολυπλοκότητα στην αρένα δοκιμών όμοιες με το επίπεδο καινοτομίας του 5G New Radio. Η VIAVI, εταιρεία που ηγείται των δοκιμών

πρωτοκόλλου 5G έχει φτιάξει μια πλήρως και ολοκληρωμένη ενσωματωμένη επιλογή δοκιμών δικτύου 5G από εξοπλισμό δοκιμών με δυνατότητα cloud, από συσκευές και από υπηρεσίες αυτοματισμού λογισμικού καθώς και λύσεις δοκιμών δικτύου. Για τους φορείς εκμετάλλευσης και τους προγραμματιστές αυτή η δέσμευση για την υπηρεσία 5G και απόδοση του έχει μεταφραστεί σε επιτυχημένες αναπτύξεις και αειφόρο διασφάλιση δικτύου 5G (Vidal, Nogales, Valera, Gonzalez, Sanchez-Aguero, Jacob, & Cervello-Pastor, 2020).

Η δοκιμή 5G έχει γίνει ένας κρίσιμος παράγοντας δυνατότητας 5G. Οι δοκιμαστικές λύσεις προσαρμόστηκαν με γρήγορους ρυθμούς σε δύσκολες αρχιτεκτονικές προόδους χονδρικής και περιπτώσεις χρήσης που περικλείουν στοιχεία δικτύου μεταφοράς, πυρήνα, οπτικών ινών και RAN ταυτόχρονα. Για αυτό απαιτείται έχει προηγμένη τεχνολογία επαλήθευσης και εξομοίωσης στο εργαστήριο δοκιμών 5G που είναι δυνατόν να κλιμακωθεί σε πλήρη ανάπτυξη 5G στο πεδίο (Volk, & Sterle, 2021).

Τα δίκτυα οπτικών ινών 5G θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις backhaul και fronthaul με τη γραμμή ρυθμισμένη υψηλότερα για εύρος ζώνης, ταχύτητα, συγχρονισμό και αξιοπιστία, ενώ η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) και ο υπολογισμός άκρων εισάγουν επιπλέον εμπόδια ορατότητας. Η σύγκλιση αυτή οδηγεί τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος σε αυτοματοποιημένες πλατφόρμες ευφυΐας σε αληθινό χρόνο και σε έναν άλλο σημαντικό πυλώνα δοκιμών απόδοσης δικτύου 5G και βελτιστοποίησης που είναι σημαντικός για την εφαρμογή της λύσης 5G (Carrozzo, Siddiqui, Betzler, Bonnet, Perez, Ramos, & Subramanya, 2020).

Ο συνδυασμός χρήσης κυμάτων χιλιοστών, MIMO και διαμόρφωσης δέσμης προσφέρει την υποδομή του 5G και οδηγεί σε μεγάλες βελτιώσεις απόδοσης για τον αναπτυσσόμενο ψηφιακό μας κόσμο. Η μεγάλη πολυπλοκότητα που εισάγουν οι συγκεκριμένες καινοτομίες μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για τη συνολική διαδικασία δοκιμών 5G όπως επίσης και για τα δίκτυα δοκιμών 5G. Ουσιαστικά το MIMO θεωρείται πολλές περισσότερες κεραιές, κάτι που αντιπροσωπεύει μεγάλο φόρτο δοκιμής για να εξασφαλιστεί πως κάθε ενσωματωμένη κεραία είναι πλήρως

λειτουργική. Οι σύνδεσμοι μέτρησης για την κάθε κεραία δεν μπορεί να είναι εφικτές σύμφωνα με τη συμπαγή αρχιτεκτονική και πυκνότητα (Volk, & Sterle, 2021).

Η διαμόρφωση δέσμης και η χρήση του κύματος χλυστού σε πολύ υψηλές συχνότητες παρουσιάζουν επιπλέον εμπόδια. Λαμβάνοντας υπόψη πως αυτές οι συχνότητες είναι αρκετά επιρρεπείς σε απώλεια διάδοσης από περιβαλλοντικές συνθήκες, οι δοκιμές over-the-air (OTA) είναι πιθανόν να είναι περισσότερο περίπλοκες και λιγότερο συνεπείς. Ωστόσο, δεδομένου ότι η δοκιμή διεξαγωγής λειτουργίας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς διακριτά σημεία σύνδεσης, θα απαιτείται συχνότερα OTA για την αποφυγή περιορισμένων αποτελεσμάτων (Si-Mohammed, Bouaziz, Hellaoui, Bekkouche, Ksentini, Taleb, Montowtt, 2021).

Αρκετά περίπλοκη γίνεται η εξομοίωση καναλιών με το 5G, μιας και ο αριθμός των απαραίτητων καναλιών RF θα αυξηθεί αρκετά σε αντίθεση με τη γραμμική επέκταση που διαφέρεται με τις εκδόσεις 3G και 4G. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών προκειμένου να είναι πρακτικός ο εξοπλισμός δοκιμής 5G, θα πρέπει να προχωρήσει με γρήγορους ρυθμούς έτσι ώστε να αντισταθμίσει την πολυπλοκότητα. Επίσης, θα πρέπει να συνεχίσουν να διερευνώνται στην αγορά δημιουργικές λύσεις που ελαχιστοποιούν τις δοκιμές θαλάμου καθώς και άλλα ακριβά στοιχεία δοκιμών, χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια και η κάλυψη των δοκιμών, (Carrozzo, Siddiqui, Betzler, Bonnet, Perez, Ramos, & Subramanya, 2020).

Αν και για το 3GPP έχει κυκλοφορήσει το προκαταρκτικό πρότυπο για το 5G NR, υπάρχουν πολλοί τομείς που είναι σημαντικοί για επιπλέον βελτίωση. Η λειτουργία μη αυτόνομης λειτουργίας (NSA) έχει αντιμετωπιστεί στην κυκλοφορία του 2017, παρόλο που επιπλέον πληροφορίες αναφορικά με την απουσία της σύμβασης της κάλυψης LTE ως τεχνολογία αγκύρωσης και τις προδιαγραφές λειτουργίας αυτόνομης λειτουργίας 5G (SA) δεν έχουν τεθεί (Si-Mohammed, Bouaziz, Hellaoui, Bekkouche, Ksentini, Taleb, Montowtt, 2021).

Ως συμπέρασμα προκύπτει πως η τυποποίηση είναι το κλειδί για την βελτίωση ακριβών μοντέλων δοκιμών 5G, όπου με τη σειρά τους προβαίνουν σε πιο εναρμονισμένες πρακτικές δοκιμών. Ακολουθώντας το πρότυπο LTE το οποίο έχει υιοθετηθεί παγκοσμίως για κινητές συσκευές και τηλέφωνα, υπάρχει κάθε λόγος να

περιμένουμε όμοια εξέλιξη για τις βέλτιστες πρακτικές δοκιμών 5G (Gao, Wang, Zhang, Kyosti, Jing, Wang, Wu, Pedersen, & Fan, 2022).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως η τυποποίηση των βέλτιστων πρακτικών, το τεράστιο εύρος συχνοτήτων και οι υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης οι οποίες είναι εγγενείς με την τεχνολογία 5G, θα συνεχίσουν να εξελίσσονται μιας και αναπτύσσεται η τεχνολογία, τα εργαλεία και οι εφαρμογές (Gao, Wang, Zhang, Kyosti, Jing, Wang, Wu, Pedersen, & Fan, 2022).

Κεφάλαιο 4 - Πλατφόρμες προσομοίωσης 5G

4.1 Πλατφόρμες προσομοίωσης 5G

Το λογισμικό προσομοίωσης 5G παρέχει σημαντικές εφαρμογές στους ερευνητές για την αξιολόγηση της απόδοσης των έργων τους. Βοηθούν τους ερευνητές να έχουν καλύτερες ιδέες για την προσομοίωση ερευνητικών έργων 5G. Η τεχνολογία κινητής επικοινωνίας πέμπτης γενιάς (5G) έχει σχεδιαστεί για να παρέχει πολλά χαρακτηριστικά όπως μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, μειωμένη καθυστέρηση και αυξημένη αξιοπιστία (Li, 2021).

Ακολουθούν διάφορες πτυχές του λογισμικού προσομοίωσης 5G που πρέπει να γνωρίζει κανείς (Liao, Zhan, Shi & Yang, 2021):

- Προσομοίωση επιπέδου GATE (ακρίβεια χρόνου)
- Προσομοίωση RTL (ακριβής κύκλου)
- Μοντελοποίηση επιπέδου συναλλαγής (κατά προσέγγιση κύκλου)
- Προσομοίωση ροής δεδομένων (λειτουργική ακρίβεια)

Οι παραπάνω πτυχές δίνουν ένα αυξανόμενο εύρος ευελιξίας και παρατηρητικότητας σε επίπεδα αφαίρεσης και ακρίβειας. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι εφαρμογές του 5G μπορούν να επεκταθούν πέρα από τη φαντασία μας. Μέσω της υπηρεσίας μας σε λογισμικό προσομοίωσης 5G, προσφέρουμε ερευνητική υποστήριξη για την επίλυση κάθε είδους ζητημάτων που σχετίζονται με αυτό (Liao, Zhan, Shi & Yang, 2021).

Έχουμε επίσης έναν εμπορικό βραχίονα μέσω του οποίου υποστηρίζουμε τους χρήστες σχετικά με τυχόν ζητήματα εφαρμογής στην τεχνολογία 5G. Ποιοι είναι οι τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται ευρέως το 5G; Ας δούμε την απάντηση παρακάτω. Τα εργαλεία προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απόδοσης του έργου σας. Με μια τέτοια ανάλυση, μπορείτε να πάρετε μια καλή ιδέα για τη βελτίωση του έργου σας. Ακολουθούν οι χρήσεις διαφόρων εργαλείων προσομοίωσης 5G (Li, 2021).

Οι τεχνικοί ειδικοί μπορούν να προσφέρουν οποιαδήποτε συμβουλή σχετικά με αυτό το λογισμικό προσομοίωσης 5G από το βασικό έως το προχωρημένο επίπεδο (Puttonen, Sormunen, Martikainen, Rantanen & Kurjenniemi, 2021):

- Εξέταση σχεδιασμού δικτύου 5G (εφαρμογές)
- Υλοποίηση και σχεδιασμός προηγμένων βιομηχανικών εφαρμογών
- Στιγμιότυπα εφαρμογών για διαφορετικές καινοτομίες (μαζί με την αρχιτεκτονική)
- Στρατηγικές για επιτυχημένη εφαρμογή 5G
- Μοντέλα συστημάτων μαζί με περιπτώσεις χρήσης
- Μοντέλο διάδοσης στο 5G (σχέδιο και σχεδιασμός)
- Διαφοροποίηση βασικών υπηρεσιών 5G
- Κατανόηση των διαφορετικών προσεγγίσεων για την ανάπτυξη διαφόρων δικτύων

Οι μηχανικοί μπορούν να καθοδηγήσουν έργα σχεδόν σε όλα τα παρακάτω λογισμικά προσομοίωσης 5G (Lee, Han, Rim & Kang, 2021):

- OPNET
- GloMosim
- NS3
- NS2
- NetSim
- Επίπεδο συστήματος 5G της Βιέννης

Οι Fazeli & Vaziri, (2011) μελετούν τα αποτελέσματα της απόδοσης του Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) και συγκρίνουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κλίνης δοκιμής με τα αποτελέσματα προσομοίωσης από το OPNET (Optimized Network Engineering Tool). Η απόδοση των Mobile Ad Hoc Networks είναι πολύ ευαίσθητη στον αριθμό των χρηστών και στο προσφερόμενο φορτίο. Όταν ο αριθμός των χρηστών/προσφερόμενο φορτίο είναι υψηλός, τότε οι συγκρούσεις αυξάνονται με αποτέλεσμα μεγαλύτερη σπατάλη του μέσου και μείωση της συνολικής απόδοσης. Ο στόχος αυτής της έρευνας ήταν να συγκρίνει την απόδοση των δικτύων Ad Hoc Mobile χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά σενάρια: 10, 15 και 20 χρήστες που χρησιμοποιούν προσομοιωτή OPNET Modeler 14.0. Με την ανάλυση των γραφημάτων στα MANET, συμπεραίνεται ότι όταν ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται πέρα από το συγκεκριμένο όριο, η απόδοση μειώνεται.

Στην έρευνα τους οι Das & Lobiya (w.d) αναλύουν την απόδοση του πρωτοκόλλου Location Aided Routing (LAR) σε διαφορετικά σενάρια πόλης. Το μοντέλο κινητικότητας που εξετάζεται είναι το μοντέλο του Μανχάταν. Αυτό το μοντέλο κινητικότητας χρησιμοποιήθηκε για να μιμηθεί το μοτίβο κίνησης των κόμβων, δηλαδή των οχημάτων σε δρόμους που ορίζονται από χάρτες. Στόχος είναι να παραχθεί μια ποιοτική ανάλυση του πρωτοκόλλου LAR σε διαφορετικά σενάρια πόλεων σε δίκτυα ad hoc οχημάτων. Εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια πόλης για την ανάλυση του πρωτοκόλλου. Η συγκεκριμένη έρευνα προσομοίωσης έχει διεξαχθεί χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή Glomosim 2.03. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πρωτόκολλο LAR1 επιτυγχάνει τη μέγιστη αναλογία παράδοσης πακέτων, όπου είναι 99,68 %, και η μέγιστη μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι 7,319969 ms όταν το δίκτυο είναι αραιοκατοικημένο. Επιπλέον, για πυκνοκατοικημένο δίκτυο η μέγιστη επιτυγχανόμενη αναλογία παράδοσης πακέτων είναι 87,58% και η μέση καθυστέρηση από άκρο σε άκρο είναι 0,017684 ms

Οι Lord, & Memmi, (2008) παρουσίασαν το NetSim, ένα γενικό εργαλείο λογισμικού για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση διαφόρων δομών δικτύου. Αυτό το σύστημα βρέθηκε πως χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και την οπτικοποίηση δύο εντελώς διαφορετικών τύπων δικτύων: ένα προτιμησιακό μοντέλο προσάρτησης σύμφωνα με έναν νόμο ισχύος και ένα τυπικό κοινωνικό δίκτυο που χαρακτηρίζεται από μια τάση κλεισίματος τριγώνου. Η γλώσσα μοντελοποίησης που έπρεπε αρχικά να αναπτυχθεί για σκοπούς μοντελοποίησης είναι πιθανώς από μόνη της ενδιαφέρουσα, ως ένας τρόπος έκφρασης και σύγκρισης διαφορετικών τύπων δικτύων. Αλλά αυτή η γλώσσα υψηλού επιπέδου επιτρέπει επίσης στους χρήστες να ορίζουν και να δοκιμάζουν μοντέλα δικτύου χωρίς να χρειάζεται να γράφουν προγράμματα υπολογιστή, επειδή στη συνέχεια ερμηνεύεται από το σύστημα NetSim.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να ληφθεί ερευνητική υποστήριξη σε όλους τους παραπάνω προσομοιωτές για 5G. Μερικές ιδέες για ένα από τα σημαντικά εργαλεία προσομοίωσης: τον προσομοιωτή σε επίπεδο συστήματος Vienna 5G (Li, 2021).

Τα ακόλουθα είναι τα σημαντικά χαρακτηριστικά του λογισμικού προσομοίωσης 5G της Βιέννης. Οι προσομοιώσεις Monte Carlo χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση

της μέσης απόδοσης των δικτύων μεγάλου μεγέθους (Puttonen, Sormunen, Martikainen, Rantanen & Kurjenniemi, 2021):

- Χρησιμοποιούνται τεράστιοι χρήστες, συσκευές, σταθμοί βάσης και εξοπλισμός
- Για την προσομοίωση MATLAB, ο προγραμματισμός αντικειμενικού προσανατολισμού (OOP) είναι πολύ ευέλικτος
- Η απόδοση που μοιάζει με Matrix και η αναλογία σήματος προς θόρυβο αξιολογούνται αποτελεσματικά
- Βοηθά στη μετάδοση μαζί με την κατερχόμενη ζεύξη

Η προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα για την αξιολόγηση διαφορετικών τύπων μπλοκαρίσματος, χρηστών και σταθμών βάσης. Τα στοιχεία δικτύου που εμπλέκονται στο εργαλείο προσομοιωτή περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (Puttonen, Sormunen, Martikainen, Rantanen & Kurjenniemi, 2021):

- Κτίρια (μαζί με αποφράξεις)
- Χρήσεις διαφορετικών τύπων (οχήματα για πεζούς και χρήσεις σε εσωτερικούς χώρους)
- Κύτταρα διαφορετικών τύπων (Femto, Pico και micro)
- Επιτρέπεται η παραλληλοποίηση (για πολλούς πυρήνες)
- LTE – Υποστηρίζεται η συμμόρφωση
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε επίπεδο συνδέσμου όσο και σε επίπεδο συστήματος

Όσον αφορά την προσομοίωση σε επίπεδο συνδέσμου χρησιμοποιώντας VCCS υπάρχουν τα εξής (Lee, Han, Rim & Kang, 2021):

- Τα κυψελωτά δίκτυα σε μικρή κλίμακα μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια
- Μοντελοποίηση καναλιών με βάση το Doppler και τα μοντέλα καθυστέρησης βρύσης
- Η μοντελοποίηση της απώλειας διαδρομής μπορεί να αποφευχθεί
- Η γεωμετρία του δικτύου δεν είναι επίσης πολύ σημαντική
- Η μετάδοση κυματομορφής υλοποιείται ανοιχτά (με βάση το χρόνο δειγματοληψίας)

- Η απώλεια διαδρομής προσδιορίζεται εκ των προτέρων.
- Λαμβάνεται η τιμή του λόγου σήματος προς θόρυβο του μέσου αποτελέσματος

Οποιοδήποτε εργαλείο προσομοίωσης αξιολογείται επίσης με βάση το μοντέλο διάδοσής του. Τα αποτελέσματα της διάδοσης που ενσωματώνονται σε ένα μοντέλο βασίζονται σε διαφορετικές ιδιότητες, όπως αναφέρονται παρακάτω (Weerasinghe, Hewa, Liyanage, 2021):

- Επίδραση των αντικειμένων που λειτουργούν ως εμπόδια
- Το σχέδιο της κεραίας
- Απώλεια διαδρομής σε μεγάλη κλίμακα
- Μικρής κλίμακας ξεθώριασμα
- Ξεθώριασμα σκιών

Κάποια διαφορετικά εργαλεία προσομοίωσης του 5G είναι τα εξής (Puttonen, Sormunen, Martikainen, Rantanen & Kurjenniemi, 2021):

- NetSim
 - Καθορίζεται η θέση του σταθμού μεταξύ τους στο δίκτυο
 - Μοντελοποίηση της διάδοσης του σήματος με ρεαλιστικό τρόπο
 - Ο χειρισμός της ανίχνευσης σύγκρουσης γίνεται σωστά
- OMNET++
 - Παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό των παρακάτω
 - Jitter
 - Καθυστέρηση
 - Απώλεια πακέτων
- OPNET
 - Οι υπηρεσίες ουράς αντιμετωπίζονται με προτεραιότητα
 - Λειτουργεί με βάση το πρωτόκολλο round Robin
 - Υποστηρίζει FIFO, LIFO
- QualNet
 - Διαφορετικά πρωτόκολλα μπορούν να αξιολογηθούν αποτελεσματικά
- GloMosim
 - Αξιολογούνται τα πρωτόκολλα για ή ασύρματο δίκτυο
 - Βοηθά επίσης στην ανάλυση των πρωτοκόλλων Mac
- NS 2

- Βοηθάει στα παρακάτω
- Ουρά
- Δρομολόγηση
- Multicasting
- Υπερφόρτωση
- Shubra VE

Τα παρακάτω μπορούν εύκολα να αναλυθούν χρησιμοποιώντας αυτό το εργαλείο προσομοίωσης

- Απώλεια πακέτων
- Περιορισμοί στο εύρος ζώνης
- Τρέμουλο και καθυστέρηση
- GTNets

Οι ακόλουθες παράμετροι αναλύονται καλά χρησιμοποιώντας GTNets

- Παρακολούθηση πακέτων
- Μέθοδοι για την ουρά
- Αναλυτικές μέθοδοι βασισμένες σε στατιστικές
- Δημιουργία τυχαίων αριθμών

Γενικά, οποιοσδήποτε προσομοιωτής δικτύου πρέπει να διασφαλίζει τις ακόλουθες πτυχές μιας έρευνας (Xu, Hei, Qu & Li, 2021):

- Συμβάντα και καταγραφή πακέτων (για εντοπισμό σφαλμάτων και ανάλυση –αναλυτική εξέταση)
- Οπτικοποίηση ροής πακέτων
- Η ροή της κυκλοφορίας μεταξύ των κόμβων
- Αξιολόγηση οποιουδήποτε πρωτοκόλλου και σχεδίασης διαφορετικών συσκευών
- Οι μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απόδοσης του δικτύου παρέχονται ως έξοδο
- Η τοπολογία δικτύου μοντελοποιείται με βάση κόμβους και συνδέσμους

Τα μοντέλα σε πραγματικό χρόνο σε διαφορετικά εργαλεία προσομοίωσης μπορούν να σας δώσουν μια καλύτερη ιδέα για τις χρήσεις τους. Θα σας παρέχουμε αρκετές λεπτομέρειες για τους τρέχοντες προσομοιωτές τάσεων που χρησιμοποιούν οι ερευνητές σε όλο τον κόσμο. Οι προγραμματιστές μας θα σας κατευθύνουν να

παρακολουθήσετε τα πιο απαραίτητα σεμινάρια και ερευνητικές συναντήσεις για το θέμα σας, ώστε να αποκτήσετε καλύτερη γνώση του πεδίου (Li, 2021).

Οι μετρήσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της απόδοσης οποιωνδήποτε έργων δικτύου 5G είναι οι εξής (Lee, Han, Rim & Kang, 2021):

- Πρωτόκολλο MAC
- Η χωρητικότητα του καναλιού σε MB ανά δευτερόλεπτο
- Μέγεθος των πακέτων σε byte
- Χρονοδιακόπτης εκπομπής σε δευτερόλεπτα
- Μέγεθος μηνύματος φάρου σε byte
- Ταχύτητα δημιουργίας πακέτων ανά δευτερόλεπτο
- Ουρά διεπαφής
- Εύρος μετάδοσης σε μετρητή (μέγιστο επίπεδο)
- Τύπος πακέτου
- Περίοδος φάρου σε δευτερόλεπτα
- Ρυθμός δεδομένων αιχμής
- Αποδοτικότητα φάσματος
- Καθυστέρηση (στο επίπεδο χρήστη)
- Ρυθμός δεδομένων χρήστη (ακμή κυψέλης)
- Διάρκεια ζωής της μπαταρίας (UE)
- Κόστος τερματικού
- Τεράστια σύνδεση
- Πυκνότητα (χωρητικότητα δικτύου)
- Καθυστέρηση στο επίπεδο ελέγχου
- Η απόδοση της χρήσης ενέργειας σε ενέργεια ανά bit
- Διαθεσιμότητα, Αξιοπιστία και Κινητικότητα

Η προσομοίωση χωρητικότητας δικτύου 5G της Qualcomm Technologies απέδειξε τις σημαντικές δυνατότητες του 5G, παρέχοντας ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με την αναμενόμενη πραγματική απόδοση και την εμπειρία χρήστη των συσκευών 5G και Gigabit LTE, που λειτουργούν σε δίκτυα πολλαπλών λειτουργιών 4G/5G NR μη αυτόνομων (NSA). Τα αποτελέσματα προσφέρουν επίσης ποσοτική υποστήριξη για τα σπουδαία κέρδη σε χωρητικότητα τα οποία είναι πιθανόν να πραγματοποιήσει το 5G NR σε αντίθεση με το 4G LTE, μιας και η βιομηχανία ετοιμάζεται για το

πρώτο κύμα συσκευών και δικτύων 5G το πρώτο εξάμηνο του 2019 (Qualcomm, 2018).

«Υπάρχει έντονο ενδιαφέρον από ποικίλους ενδιαφερόμενους φορείς στο οικοσύστημα κινητής τηλεφωνίας – προγραμματιστές εφαρμογών, πάροχοι πλατφορμών cloud, OEM συσκευών και άλλους – για την κατανόηση της απόδοσης που θα παρέχουν τα δίκτυα και οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας 5G NR», σύμφωνα με τον Alex Holcman, ο ανώτερος Αντιπρόεδρος Μηχανικής, Qualcomm Technologies, Inc. Ανέφερε επίσης, πως "Αναλάβαμε τη συγκεκριμένη ολοκληρωμένη μελέτη γιατί επιθυμούμε να βοηθήσουμε το οικοσύστημα να ετοιμαστεί για την εισβολή στο 5G, προκειμένου, για παράδειγμα, οι προγραμματιστές εφαρμογών να είναι σε θέση να ξεκινήσουν να σχεδιάζουν καινούργιες υπηρεσίες και εμπειρίες για χρήστες με συσκευές 5G." (Qualcomm, 2018).

Σε αυτό τα σημείο θα αναφερθούν δύο ξεχωριστά σεντ προσομοιώσεων. Το πρώτο, μοντελοποίησε ένα δίκτυο NSA 5G NR στη Φρανκφούρτη της Γερμανίας, που λειτουργεί σε 100 MHz φάσματος 3,5 GHz, με ένα υποκείμενο δίκτυο Gigabit LTE που λειτουργεί σε 5 ζώνες φάσματος LTE. Στο Σαν Φρανσίσκο της Καλιφόρνια πραγματοποιήθηκε η δεύτερη προσομοίωση η οποία μοντελοποίησε ένα υποθετικό δίκτυο NSA 5G NR, που λειτουργεί σε 800 MHz φάσματος 28 GHz mmWave, με ένα υποκείμενο δίκτυο Gigabit LTE που λειτουργεί σε 4 αδειοδοτημένες ζώνες φάσματος LTE συν ζώνες Υποβοηθούμενης πρόσβασης με Άδεια Χρήσης (LAA). Στις αναφερόμενες προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκαν υφιστάμενες τοποθεσίες κυψελών στο Σαν Φρανσίσκο και τη Φρανκφούρτη όπου οι τοποθεσίες κυψελών 5G NR συντοποθετούνται με υπάρχουσες, αληθινές τοποθεσίες LTE (Nardini, Stea, Viridis, & Sabella, 2020).

Η προσομοίωση της Φρανκφούρτης παρουσίασε αύξηση χωρητικότητας κατερχόμενης ζεύξης έως και 5 φορές κατά τη μετάβαση από ένα δίκτυο μόνο LTE, με συνδυασμό συσκευών LTE διαφόρων δυνατοτήτων, σε ένα δίκτυο 5G NR με συσκευές 5G NR πολλαπλών λειτουργιών και έναν αυξημένο συνδυασμό προηγμένων Gigabit συσκευές LTE. Η συγκεκριμένη προσομοίωση πρόσφερε συναρπαστικά στοιχεία για τα οφέλη της τεχνολογίας Massive MIMO, με μέση

αύξηση της φασματικής απόδοσης μέχρι και 4 φορές σε φάσμα 3,5 GHz (Nardini, Stea, Viridis, & Sabella, 2020).

Πέρα από τις βελτιώσεις χωρητικότητας δικτύου, η προσομοίωση έδειξε επίσης σημαντικά κέρδη από την εμπειρία χρήστη για συσκευές με δυνατότητα 5G NR σε σύγκριση με συσκευές LTE, όπως:

- Οι ταχύτητες λήψης περιήγησης αυξάνονται από 56 Mbps για τον διάμεσο χρήστη 4G σε περισσότερα από 490 Mbps για τον διάμεσο χρήστη 5G, ένα κέρδος περίπου 900 τοις εκατό
- Περίπου 7 φορές ταχύτερη απόκριση, με μέση καθυστέρηση λήψης περιήγησης μειωμένη από 116 ms σε 17 ms
- Ταχύτητες λήψης αρχείων 100 Mbps για τον 10ο εκατοστημόριο χρήστη 5G, που σημαίνει ότι το 90 τοις εκατό των χρηστών 5G έχουν ταχύτητες λήψης άνω των 100 Mbps. Το συγκεκριμένο συγκρίνεται με 8 Mbps για το 10ο εκατοστημόριο χρήστη LTE.
- Ο μέσος όρος της ποιότητας της ροής βίντεο αυξάνεται από 2K/30 FPS/8-bit χρώμα για χρήστες LTE σε 8K/120 FPS/10-bit χρώμα και πέρα για χρήστες 5G.

Από την άλλη πλευρά η προσομοίωση του Σαν Φρανσίσκο πρόσφερε την πρώτη ματιά στον αντίκτυπο της σημαντικά αυξημένης χωρητικότητας που δίνεται από τα 800 MHz πρόσθετου φάσματος mmWave στην αληθινή εμπειρία χρήστη. Τα κύρια αποτελέσματα περίκλειαν:

- Οι ταχύτητες λήψης περιήγησης αυξάνονται από 71 Mbps για τον διάμεσο χρήστη 4G σε 1,4 Gbps για τον διάμεσο χρήστη 5G σε κάλυψη mmWave, ένα κέρδος περίπου 2000 τοις εκατό
- Περίπου 23 φορές ταχύτερη απόκριση, με μέση καθυστέρηση λήψης περιήγησης μειωμένη από 115 ms σε 4,9 ms
- Ταχύτητες λήψης αρχείων άνω των 186 Mbps για το 90 τοις εκατό των χρηστών 5G, σε σύγκριση με 10 Mbps για το LTE, ένα κέρδος 1.826 τοις εκατό. Ο μέσος όρος της ταχύτητας λήψης αρχείων 5G ήταν 442 Mbps.
- Ο μέσος όρος της ποιότητας ροής βίντεο αυξάνεται από 2K/30 FPS/8-bit χρώμα για χρήστες LTE σε 8K/120 FPS/10-bit χρώμα και πέρα για χρήστες 5G.

Τα ευρήματα από την Προσομοίωση Χωρητικότητας Δικτύου 5G αναφέρουν αξιοπιστία στην υπόσχεση του 5G, με αναμενόμενη απόδοση στον αληθινό κόσμο που είναι ιδιαίτερα καλύτερη από ό,τι είναι σήμερα δυνατό με το 4G σε πολλές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα αναφέρουν επίσης πως αυτά τα αναδυόμενα δίκτυα 5G θα έχουν την απόδοση και την ικανότητα να στηρίζουν μια σειρά από καινούργιες υπηρεσίες και εμπειρίες πέρα από τις παραδοσιακές κατηγορίες ροής, λήψης και περιήγησης. Με δέκα οκτώ (18) παγκόσμιους χειριστές και είκοσι (20) κορυφαίους κατασκευαστές συσκευών να προτιμούν το μόντεμ Qualcomm® Snapdragon™ X50 5G για το πρώτο κύμα δοκιμών δικτύου 5G και συσκευές καταναλωτή, το στάδιο έχει σχηματιστεί προκειμένου αυτές οι απίστευτες εμπειρίες χρηστών 5G να έρθουν στα χέρια των χρηστών το 2019, στο πρώτο εξάμηνο (Qualcomm, 2018).

Συμπεράσματα

Συμπερασματικά από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε βρέθηκε πως ο πρωταρχικός στόχος των προηγούμενων γενεών δικτύων κινητής τηλεφωνίας ήταν να προσφέρουν απλώς γρήγορες, αξιόπιστες υπηρεσίες δεδομένων κινητής τηλεφωνίας στους χρήστες του δικτύου. Το δίκτυο 5G έχει διευρύνει το συγκεκριμένο πεδίο προκειμένου να δώσει ένα ευρύ φάσμα ασύρματων υπηρεσιών που προσφέρονται στον τελικό χρήστη σε δίκτυα πολλαπλών επιπέδων και πλατφόρμες πολλαπλής πρόσβασης. Το δίκτυο 5G θεωρείται ένα ευέλικτο, συνεκτικό και δυναμικό πλαίσιο πολλαπλών προηγμένων τεχνολογιών που στηρίζονται από ποικίλες εφαρμογές. Αυτό χρησιμοποιεί μια πολύ έξυπνη αρχιτεκτονική, με τα RAN να μην περιορίζονται από την πολύπλοκη υποδομή και την εγγύτητα του σταθμού βάσης. Επίσης, αυτό οδηγεί το δρόμο προς το ευέλικτο, εικονικό και διαχωρισμένο, RAN με καινούργιες διεπαφές που δημιουργούν επιπλέον σημεία πρόσβασης δεδομένων.

Το 3rd Generation Partnership Project (3GPP) υποστηρίζει τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, καθώς επίσης και RAN, των βασικών δικτύων μεταφορών και των δυνατοτήτων εξυπηρέτησης. Αυτό αποτελείται από πλήρεις προδιαγραφές συστήματος που αφορούν την αρχιτεκτονική δικτύου 5G που είναι πολύ πιο προσανατολισμένη στις υπηρεσίες από τις άλλες γενιές. Οι υπηρεσίες προσφέρονται μέσω ενός κοινού πλαισίου σε λειτουργίες δικτύου που δίνεται η δυνατότητα να κάνουν χρήση των συγκεκριμένων υπηρεσιών. Η αυτοσυγκράτηση η επαναχρησιμοποίηση και η αρθρότητα, των λειτουργιών του δικτύου είναι επιπλέον θέματα σχεδιασμού για μια αρχιτεκτονική δικτύου 5G που περιγράφεται από τις προδιαγραφές 3GPP.

Ο κόσμος των τηλεπικοινωνιών έχει δει μια σειρά από βελτιώσεις κατά καιρούς. Αυτή η γρήγορη επανάσταση στο tablet διαμορφώνει την καθημερινότητά των ανθρώπων, με άλλα λόγια, τον τρόπο με τον οποίο εργάζεται ο άνθρωπος, αλληλεπιδρά, μαθαίνει και άλλα, και εστιάζει κάθε προηγούμενη γενιά κινητής επικοινωνίας μαζί με την τεχνολογία πέμπτης γενιάς. Το δίκτυο 5G προσδοκάτε να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις πελατών που θέλουν πάντα προηγμένες δυνατότητες σε κινητά τηλέφωνα. Τα κύρια χαρακτηριστικά στο δίκτυο κινητής

τηλεφωνίας 5G είναι αυτός ο χρήστης να μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα με τις πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες και να μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ τους. Επίσης, η τεχνολογία πέμπτης γενιάς θα προσφέρει υπηρεσίες όπως η τεκμηρίωση, υποστήριξη ηλεκτρονικές συναλλαγές (ηλεκτρονικές πληρωμές, ηλεκτρονικές συναλλαγές) κ.λπ. Τα τελευταία χρόνια οι ερευνητές κάνουν προσπάθειες να αξιολογήσουν και να εντοπίσουν την αρχιτεκτονική δικτύου των συστημάτων 5G και πέραν αυτού. Με την εφαρμογή ανάλυσης δεδομένων και τεχνητής νοημοσύνης, το 6G θα μπορούσε να κάνει τα δίκτυα πιο έξυπνα και πιο αυτοματοποιημένα. Οι εταιρίες δεν αρκεί που έχουν εντοπίσει τη σπουδαιότητα χρήσης του 5G αλλά θα πρέπει να σκεφτούν το περιβάλλον δοκιμών προκειμένου εύκολα να πραγματοποιήσουν διαφορετικούς τύπους δοκιμών και πειραμάτων για την επικύρωση νέων προϊόντων και υπηρεσιών. Το λογισμικό προσομοίωσης 5G προσφέρει εφαρμογές στους ερευνητές για την αξιολόγηση της απόδοσης των έργων τους 5G.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ξενόγλωσση

Alsharif, M. H., Nordin, R., Abdullah, N. F., & Kelechi, A. H. (2017). How to make key 5G wireless technologies environmental friendly: A review. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 29(1), e3254. doi:10.1002/ett.3254

Al-Namari, M.A., Mansoor, A.M. & Idris, M.Y.I. (2017). A brief survey on 5G wireless mobile network. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **8**:52–59.

Ahmad, W. S. H. M. W., Radzi, N. A. M., Samidi, F. S., Ismail, A., Abdullah, F., Jamaludin, M. Z., & Zakaria, M. N. (2020). 5G technology: towards dynamic spectrum sharing using cognitive radio networks. *IEEE Access*, 1–1. doi:10.1109/access.2020.2966271

Baumgartner, A., Reddy, V. S. & Bauschert, T. (2015). Mobile core network virtualization: A model for combined virtual core network function placement and topology optimization, *Proc. NetSoft*, pp. 1-9,

Carrozzo, G., Siddiqui, M. S., Betzler, A., Bonnet, J., Perez, G. M., Ramos, A., & Subramanya, T. (2020). AI-driven Zero-touch Operations, Security and Trust in Multi-operator 5G Networks: a Conceptual Architecture. 2020 European Conference on
Networks and Communications
(EuCNC). doi:10.1109/eucnc48522.2020.9200928

Chattopadhyay, J., & Rao, S. P. V. S. (2020). Task identification in Massive MIMO Technology for Its Effective Implementation in 5G and Satellite Communication. 2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). doi:10.1109/iccsp48568.2020.9182

Dangi, R., Lalwani, P., Choudhary, G., You, I., & Pau, G. (2021). Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(1), 26. <https://doi.org/10.3390/s22010026>

David, K., & Berndt, H. (2018). 6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G? IEEE Vehicular Technology Magazine, 1–1. doi:10.1109/mvt.2018.2848498

Dragičević, S. S. R., Siano, T. P., & Prabakaran, S. R. S. (2019). Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review. Energies, 12(11), 2140. doi:10.3390/en12112140

Fazeli, M. & Vaziri, H. (2011), Assessment of Throughput Performance Under OPNET Modeler Simulation Tools in Mobile Ad Hoc Networks (MANETs), Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, 2011, pp. 328-331.

Gao, H., Wang, Z., Zhang, X., Kyosti, P., Jing, Y., Wang, W., Wu, Y., Pedersen, G. F., & Fan, W. (2022). Over-the-Air Performance Testing of 5G New Radio User Equipment: Standardization and Challenges. IEEE Communications Standards Magazine.

Gonçalves, G. E., Santos, G. L., Ferreira, L., Rocha, E., de Souza, L. M. F., Moreira, A. L. C., Kelner, J. & Sadok, D. (2020). Flying to the Clouds: The Evolution of the 5G Radio Access Networks. In: Lynn, T., Mooney, J., Lee, B., Endo, P. (eds) The Cloud-to-Thing Continuum. Palgrave Studies in Digital Business & Enabling Technologies. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41110-7_3

Gupta, A. K. & Singh, M.P. (2018). A STUDY OF WIRELESS NETWORK: 6G TECHNOLOGY, Int. J. Creat. Res. Thoughts IJCRT, 6(2):489–492.

Hakeem, S. A. A. Hussein, H. H. & Kima, H. (2022). Vision and research directions of 6G technologies and applications. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.019>

Jou, B. T., Vidal, O., Cahill, J., Arnal, F., Honssin, L.-M., Boutin, M., & Chau, D. K. (2018). Architecture Options for Satellite Integration into 5G Networks. 2018

European Conference on Networks and Communications (EuCNC).
doi:10.1109/eucnc.2018.8442436

Katz, M., Pirinen, P., & Posti, H. (2019). Towards 6G: Getting Ready for the Next Decade. 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). doi:10.1109/iswcs.2019.8877155

Kim, J., Astillo, P. V., & You, I. (2020). DMM-SEP: Secure and Efficient Protocol for Distributed Mobility Management based on 5G Networks. IEEE Access, 1–1. doi:10.1109/access.2020.2985448

Krawiec, R. P., & Zurek, J. (2019). Date of publication xxxx 00 0000 date of current version xxxx 00 0000 Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2017.Doi Number
On measuring Electromagnetic Fields in 5G technology The work presented in this article is co-funded by Polish National Centre for Research and Development, GOSPOSTRATEG Programme, under the project 5G@PL: Implementation of 5G network in the Polish economy. IEEE Access, 1–1. doi:10.1109/access.2019.2902481

Lee, J., Han, M., Rim, M. & Kang, C. G. (2021). 5G K-SimSys for Open/Modular/Flexible System-Level Simulation: Overview and its Application to Evaluation of 5G Massive MIMO, in IEEE Access, vol. 9, pp. 94017-94032, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3093460.

Li, Z. (2021). Simulation of English education translation platform based on web remote embedded platform and 5G network. Microprocessors and Microsystems, 81, 103775. doi:10.1016/j.micpro.2020.103775

Li, S., Xu, L. D., & Zhao, S. (2018). 5G Internet of Things: A survey. Journal of Industrial Information Integration, 10, 1–9. doi:10.1016/j.jii.2018.01.005

Liao, S., Zhan, Y., Shi Z. & Yang L. (2021). A High Throughput and Flexible Rate 5G NR LDPC Encoder on a Single GPU," 2021 23rd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), pp. 29-34, doi: 10.23919/ICACT51234.2021.9370366.

Lord, M. & Memmi, D. (2008). *NetSim: a Simulation and Visualization Software for Information Network Modeling*. 2008 International MCETECH Conference on e-Technologies (mcetech 2008).

Malini, M.C., Chandrakala, N. (2022). Emerging 5G Wireless Technologies: Overview, Evolution, and Applications. In: Suma, V., Fernando, X., Du, KL., Wang, H. (eds) *Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks*. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 116. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9605-3_23

Martinez, A. A. & Kellerer, W. (2019). A Dynamic Functional Split in 5G Radio Access Networks, *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013336.

Mehta, H., Patel, D., Joshi, B. & Modi, H. (2014). 0G to 5G mobile technology: A survey. *J. Basic Appl. Eng. Res.* 5:56–60.

Moysen, J., & Giupponi, L. (2018). From 4G to 5G: Self-organized Network Management meets Machine Learning. *Computer Communications*. doi:10.1016/j.comcom.2018.07.015

Mukherjee, C., Deng, M., Nodjiadjim, V., Riet, M., Mismar, C., Guendouz, D., ... Maneux, C. (2021). Towards Monolithic Indium Phosphide (InP)-Based Electronic Photonic Technologies for beyond 5G Communication Systems. *Applied Sciences*, 11(5), 2393. doi: 10.3390/app11052393

Nardini, G., Stea, G., Viridis, A. & Sabella, D. (2020). Simu5G: A System-level Simulator for 5G Networks. *10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, 68-80 doi: 10.5220/0009826400680080

O'Connell, E., Moore, D., & Newe, T. (2020). Challenges Associated with Implementing 5G in Manufacturing. *Telecom*, 1(1), 48–67. doi:10.3390/telecom1010005

Patil, G. R. & Wankhade, P. S. (2014). 5g Wireless Technology. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 3(10):203-207.

Pradhan, D., Sahu, P.K., Rajeswari & Tun, H.M. (2022). A Study of Localization in 5G Green Network (5G-GN) for Futuristic Cellular Communication. In: Sikdar, B., Prasad Maity, S., Samanta, J., Roy, A. (eds) *Proceedings of the 3rd International Conference on Communication, Devices and Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 851. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9154-6_43

Piri, E., Ruuska, P., Kanstren, T., Makela, J., Korva, J., Hekkala, A., ... Valasma, H. (2016). 5GTN: A test network for 5G application development and testing. 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). doi:10.1109/eucnc.2016.7561054

Puttonen, J., Sormunen, L., Martikainen, H., Rantanen, S. & Kurjenniemi, J. (2021). A System Simulator for 5G Non-Terrestrial Network Evaluations," 2021 IEEE 22nd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), pp. 292-297, doi: 10.1109/WoWMoM51794.2021.00054.

Rehman, A., Haseeb, K., Saba, T., Lloret, J. & Ahmed, Z. (2021). Mobility Support 5G Architecture with Real-Time Routing for Sustainable Smart Cities. *Sustainability*, 13(16):9092. <https://doi.org/10.3390/su13169092>

Rahman, M. A., Hossain, M. S., Rashid, M. M., Barnes, S., & Hassanain, E. (2020). IoEV-Chain: A 5G-Based Secure Inter-Connected Mobility Framework for the Internet of Electric Vehicles. *IEEE Network*, 1–8. doi:10.1109/mnet.001.1900597

Säily, M., Barjau, C., Navrátil, D., Prasad, A., Gomez-Barquero, D. & Tesema, FB. (2019). 5G Radio Access Networks Enabling Efficient Point-to-Multipoint Transmissions. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 14(4):29-37. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2936657>

Sabella, D., Serrano, P., Stea, G., Viridis, A., Tinnirello, I., Giuliano, F., Garlisi, D., Vlacheas, P., Demestichas, P., Foteinos, V., Bartzoudis, N. & Payaró, M. (2018). Designing the 5G network infrastructure: a flexible and reconfigurable architecture based on context and content information. *J Wireless Com Network*, 199.

Salih, A. A., Zeebaree, S. R. M., Abdulraheem, A. S., Zebari, R. R., Sadeeq, M. A. M. & Ahmed, O. M. (2020). Evolution of Mobile Wireless Communication to 5G Revolution. 62(05). Technology Reports of Kansai University.

Sattar, D. & Matrawy, A. (2019). Optimal Slice Allocation in 5G Core Networks, in *IEEE Networking Letters*, 1(2): 48-51, doi: 10.1109/LNET.2019.2908351.

Sarrigiannis, I., Ramantas, K., Kartsakli, E., Mekikis, P.-V., Antonopoulos, A., & Verikoukis, C. (2019). Online VNF Lifecycle Management in a MEC-enabled 5G IoT Architecture. *IEEE Internet of Things Journal*, 1–1. doi:10.1109/jiot.2019.2944695

Samdanis, K., & Taleb, T. (2020). The Road beyond 5G: A Vision and Insight of the Key Technologies. *IEEE Network*, 1–7. doi:10.1109/mnet.001.1900228

Shafin, R., Liu, L., Chandrasekhar, V., Chen, H., Reed, J., & Zhang, J. C. (2020). Artificial Intelligence-Enabled Cellular Networks: A Critical Path to Beyond-5G and 6G. *IEEE Wireless Communications*, 1–6. doi:10.1109/mwc.001.1900323

Si-Mohammed, S., Bouaziz, M., Hellaoui, H., Bekkouche, O., Ksentini, A., Taleb, T., ... Montowtt, P. (2021). Supporting Unmanned Aerial Vehicle Services in 5G Networks: New High-Level Architecture Integrating 5G With U-Space. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 16(1), 57–65. doi:10.1109/mvt.2020.3036374

Tezergil, B. & Onur, E. (2021). Wireless Backhaul in 5G and Beyond: Issues, Challenges and Opportunities. arXiv:2103.08234v1 [cs.NI].

Vidal, I., Nogales, B., Valera, F., Gonzalez, L. F., Sanchez-Aguero, V., Jacob, E., & Cervello-Pastor, C. (2020). A Multi-site NFV Testbed for Experimentation with

SUAV-based 5G Vertical Services. IEEE Access, 1–1. doi:10.1109/access.2020.3001985

Volk, M., & Sterle, J. (2021). 5G Experimentation for Public Safety: Technologies, Facilities and Use Cases. IEEE Access, 9, 41184–41217. doi:10.1109/access.2021.3064405

Xu, Z., Hei, X., Qu, D. & Li, W. (2021). Pushing the 5G edge into the Principles of Communications Course based on a blended lab platform, IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), pp. 339-343, doi: 10.1109/EDUCON46332.2021.9453970.

Weerasinghe, N., Hewa, T., Liyanage, M., Kanhere, S. S. & Ylianttila, M. (2021). A Novel Blockchain-as-a-Service (BaaS) Platform for Local 5G Operators, in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 575-601, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3066284.

Zhang, J., Bjornson, E., Matthaiou, M., Ng, D. W. K., Yang, H., & Love, D. J. (2020). Prospective Multiple Antenna Technologies for Beyond 5G. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1–1. doi:10.1109/jsac.2020.3000826

Διαδίκτυο

Bergren, S. (w.d). Design Considerations for a 5G Network Architecture Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1705/1705.02902.pdf>

Das, S. & Lobiya, D. K. (w.d). A Performance Analysis of LAR Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks in City Scenarios. Available on internet: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.3047.pdf>

GSMA, (2020). 5G Implementation Guidelines: NSA Option 3. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2019/03/5G-Implementation-Guidelines-NSA-Option-3-v2.1.pdf>

GSMA, (2018). Road to 5G: Introduction and Migration. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf

Khan, B., Ramos, A. R., Paulo, R. R. & Velez, F. J. (w.d). Deployment of Beyond 4G Wireless Communication Networks with Carrier Aggregation. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο:

https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/10346/1/journal_final_by_Rui.pdf

Peterson, L. & Sunay, O. (2019). 5G Mobile Networks: A Systems Approach. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: <https://5g.systemsapproach.org/index.html>

Qualcomm, (2018). Qualcomm Network Simulation Shows Significant 5G User Experience Gains Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2018/02/qualcomm-network-simulation-shows-significant-5g-user-experience-gains>

Weissberger, A (2022). Mobile Core Network (MCN) growth to slow due to slow roll-out of 5G SA networks. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: <https://techblog.comsoc.org/2022/01/19/mobile-core-network-mcn-growth-to-slow-due-to-slow-roll-out-of-5g-sa-networks/>

5GPPP, (2021). Service performance measurement methods over 5G experimental networks. White paper – ICT-19 performance KPIs. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2021/06/Service-performance-measurement-methods-over-5G-experimental-networks_08052021-Final.pdf