



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Μελέτη Μηχανισμών Χρονοδρομολόγησης Πακέτων
Δεδομένων σε Κυψελωτά Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

Νικολέττα Γεώργιου Α.Μ. icSD14137

και

Τσαγκάρη Βασίλειου Α.Μ. icSD14205

Επιβλέπων :

Επ. Καθηγητής Δημήτριος Σκούτας

Μέλη εξεταστικής επιτροπής:

Καθηγητής Χαράλαμπος Σκιάνης

Καθηγητής Δημοσθένης Βουγιούκας

Σάμος ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

Διπλωματική εργασία:

Μελέτη Μηχανισμών Χρονοδρομολόγησης Πακέτων Δεδομένων σε Κυψελωτά Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς

Δήλωση

Είμαστε συγγραφείς αυτής της Διπλωματικής εργασίας και δηλώνουμε ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχουμε αναφέρει τις πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία.

Νικολέττας Γεώργιος, Τσαγκάρης Βασίλειος

© 2021

των

Νικολέττα Γεώργιου Α.Μ. iczd14137

και

Τσαγκάρη Βασίλειου Α.Μ. iczd14205

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Πρόλογος και ευχαριστίες

Ξεκινώντας τις πτυχιακές μας σπουδές οι πρώτες μας σκέψεις και αγωνίες για το τι θα συναντήσουμε, ήρθαν να αντικατασταθούν βαθμιαία από μια ευχάριστη έκπληξη, καθώς διαπιστώναμε ολοένα και περισσότερο την αξία και την ποιότητα των παρεχόμενων σπουδών που μας πρόσφερε η πολυτεχνική σχολή των Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Απορροφημένοι στις μελέτες μας και κυρίως όταν στένευαν τα περιθώρια παράδοσης εργασιών ή της πίεσης των εξεταστικών περιόδων, αισθανόμασταν κυριολεκτικά πως βρισκόμασταν σε έναν κόσμο που προσπαθούσαμε να ανακαλύψουμε, να δώσουμε απαντήσεις, να εμβαθύνουμε, αλλά και να αποσαφηνίσουμε πολλά θέματα τα οποία υπήρχαν συγκεχυμένα στις σκέψεις μας.

Αν και οι δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε στο ξεκίνημα των σπουδών ήταν αρκετές, παρόλα αυτά το ταξίδι πραγματικά άξιζε τον κόπο και τις θυσίες. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε από βάθους καρδιάς τους καθηγητές της σχολής μας, γιατί πέτυχαν με τον τρόπο που προσέγγιζαν τα θέματα να ανοίξουν νέους ορίζοντες και να προσδώσουν διαφορετικές προοπτικές στη σκέψη μας. Ιδιαίτερα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε, τον σύμβουλο και επιβλέποντα καθηγητή Δημήτριο Σκούτα για τις πολύτιμες οδηγίες του και την αμέριστη βοήθειά του στην εκπόνηση της διπλωματικής μας εργασίας.

Περίληψη

Στόχος της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι να καταγράψει την παρούσα κατάσταση στην περιοχή των κυψελωτών δικτύων πέμπτης γενιάς με έμφαση στους μηχανισμούς χρονοδρομολόγησης πακέτων δεδομένων. Τα κυψελωτά συστήματα δημιουργήθηκαν ως απαίτηση της αγοράς κινητής τηλεφωνίας προκειμένου να παρέχουν ποιοτική επικοινωνία. Τα κυψελωτά δίκτυα αποτελούν μια μορφή δικτύων τα οποία εξασφαλίζουν ασύρματη κάλυψη σε μία ευρεία περιοχή.

Οι κυψέλες είναι εκείνες που παρέχουν γεωγραφική τμηματοποίηση στην περιοχή της ασύρματης κάλυψης. Κάθε κυψέλη έχει ένα σταθμό βάσης στον οποίο βρίσκονται μια κεραία, ένας πομπός και ένας δέκτης προκειμένου να μπορέσει να επικοινωνήσει το δίκτυο με τους χρήστες του. Η μελέτη θα πραγματοποιηθεί αφενός μεν από την πλευρά των προτύπων (3GPP), αφετέρου δε από την πλευρά των ερευνητικών προτάσεων της επιστημονικής κοινότητας.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η τεχνολογία των ασύρματων τεχνολογιών από τον 1^η ως την 4^η ενώ δίνεται έμφαση στον τρόπο λειτουργίας της 5^{ης} γενιάς. Ειδικότερα, εξετάζονται οι τεχνολογίες της 5^{ης} γενιάς και η δυνατότητά τους να παρέχουν ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) μέσω αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης (packet schedulers).

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα δίκτυα και στο πως αυτά εξελίχθηκαν, στα κίνητρα ανάπτυξης των δικτύων 5G αλλά και στα χαρακτηριστικά τους, ενώ περιγράφεται η αναγκαιότητα για τη μετάβαση στα δίκτυα 5ης γενιάς και τονίζονται οι διαφορές τους με τα προγενέστερα δίκτυα. Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση των δικτύων 5G, όπου παρουσιάζεται η τεχνική ορολογία δικτύων και υπηρεσιών 5G, οι κυριότερες εφαρμογές τους και οι τυποποιήσεις τους. Επιπλέον, περιγράφονται τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, οι απαιτήσεις και οι προκλήσεις στο σχεδιασμό τους, ενώ αναλύεται και η αρχιτεκτονική τους. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κλασικοί αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης των δικτύων 5G και οι μηχανισμοί και τεχνικές που τους διέπουν. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται μια σειρά προχωρημένων αλγορίθμων χρονοδρομολόγησης 5G, όπως αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα, στον διακυβελικό προγραμματισμό κ.α. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας και τα τελικά συμπεράσματά της.

Λέξεις κλειδιά: Δίκτυο 5^{ης} γενιάς, κινητές επικοινωνίες, χρονοδρομολόγηση, QoS

Abstract

This dissertation aims to record the current status in the area of fifth-generation cellular networks with emphasis on data packet scheduling mechanisms. Cellular systems were created as a response of the mobile industry to the need for quality wireless communications. A cellular network is a form of wireless network that provides coverage in a wide geographic area by utilizing the cellular concept. Each cell has a base station that covers a specific area, thus facilitating communication between the network and the end-user. The current thesis has been conducted in two parts: first, in terms of standards (3GPP), and second, in terms of research proposals from the scientific community.

This work presents the technology of cellular networks from the 1st to the 4th, with emphasis on the 5th generation. In particular, the 5th generation technologies and their ability to provide quality communication services (QoS) through the use of scheduling algorithms (packet schedulers) are examined.

The first chapter provides a historical overview of the cellular networks and how they evolved, the motivations for the development of 5G networks and their characteristics while describing the need for the transition to 5th generation networks and highlighting their differences with previous networks. The second chapter analyzes 5G networks, which presents the most important terminology associated with them, their main applications as well as their standardizations and architecture. The third chapter presents classic scheduling algorithms for 5G networks as well as the mechanisms and techniques that govern them. Finally, the fourth chapter of the current work presents a series of advanced 5G packet scheduling algorithms, such as neural network-based algorithms, intercellular scheduling, etc. Finally, the fifth chapter of the paper presents the results of the current work and its conclusions.

Keywords: 5th generation, mobile communications, packet scheduling, QoS

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Δίκτυα 5G.....	15
1.1 Τηλεπικοινωνίες - ορισμός.....	15
1.2 Ιστορική αναδρομή - Από την πρώτη μέχρι την τέταρτη γενιά (1G to 4G).....	16
1.3 Γιατί υπάρχει ανάγκη για δίκτυο 5ης γενιάς και σε τι διαφέρει;.....	19
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Κατηγορίες Δικτύων	22
2.1 Τεχνολογία 5G – Εισαγωγή.....	22
2.1.1 Τεχνική ορολογία δικτύων και υπηρεσιών 5G.....	23
2.1.2 Κύριες Εφαρμογές 5G.....	26
2.1.3 Τυποποίηση των δικτύων 5G.....	28
2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Δικτύου 5G	33
2.2.1 Απαιτήσεις και Προκλήσεις Σχεδίασης.....	38
2.2.2 Αρχιτεκτονική του Δικτύου 5G.....	40
2.2.3 Δίκτυα Κορμού 5G.....	43
2.3 Σύστημα Κινητής Επικοινωνίας Πέμπτης Γενιάς.....	48
2.3.1 Υψηλή ταχύτητα, υψηλή χωρητικότητα.....	49
2.3.2 Μαζικές συνδέσεις συσκευών	49
2.3.3 Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία.....	50
2.3.4 Εξοικονόμηση ενέργειας, Εξοικονόμηση κόστους	51
2.3.5 Ασύρματη τεχνολογία 5G: Αξιοποίηση ζωνών υψηλότερης συχνότητας και τεχνολογιών MIMO με συστοιχίες μεγάλου αριθμού κεραιοστοιχείων	51
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Κλασικοί Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης	54
3.1 Χρονοδρομολόγηση (Scheduling).....	55
3.1.1 First-in, First-out (FIFO) Queueing	57
3.1.2 Priority Queueing (PQ)	59
3.1.3 Fair Queueing (FQ).....	61
3.1.4 Σταθμισμένη Δίκαιη Ουρά (Weighted Fair Queueing – WFQ).....	62
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ Προχωρημένοι Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης 5G	66
4.1 Διαχείριση Ασύρματων Πόρων	66

4.2 Μηχανισμοί Χρονοδρομολόγησης σε 5G και Προχωρημένες Τεχνικές Χρονοδρομολόγησης	69
4.2.1 Προγραμματισμός κατερχόμενης ζεύξης και κατανομή πόρων για πολυκαναλικά συστήματα 5G MIMO	72
4.2.2 Αποτελεσματικός προγραμματισμός ασύρματου καναλιού κατερχόμενης ζεύξης και κατανομή πόρων σε 5G Cyber-Physical συστήματα	73
4.2.3 Χρονοδρομολόγηση βασισμένη στην ενισχυτική μάθηση	73
4.2.4 Βελτιωμένη απόδοση E2E και ευελιξία για διαφορετικές υλοποιήσεις δικτύου	74
4.2.5 Χρονοδρομολόγηση μεγέθους ωφέλιμου φορτίου και προθεσμίας για τα δίκτυα 5G.....	74
4.2.6 Διακυβελικός χρονοδρομολογητής για ασύρματα δίκτυα 5G.....	74
4.2.7 Σύγκριση τεχνικών χρονοδρομολόγησης δεδομένων για κατηγοριοποίηση με βάση το QoS σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G	75
4.2.8 Προγραμματισμός QoS-Driven για δίκτυα 5G.....	75
4.2.9 Χρονοδρομολογητής βασισμένος σε Νευρωνικά Δίκτυα	76
4.2.10 Σχήμα εκθετικής / αναλογικής δικαιουσύνης (EXP/PF) και λογαριθμικός κανόνας (LOG) 76	
4.2.11 Συνοπτικός Πίνακας 5G Χρονοδρομολογητών	77
5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ Συζήτηση – Αποτελέσματα	79
Βιβλιογραφία (Διαδικτυακές πηγές).....	85
Βιβλιογραφία (Ερευνητικές εργασίες)	88

Ακρωνύμια

1G	1st Generation
2G	2nd Generation
3G	3rd Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4thGeneration
5G	5th Generation
FIFO	First In First Out
GPS	Generalized Processor Sharing
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IntServ	Integrated Services
IP	Internet Protocol
PQ	Priority Queueing
QoS	Quality of Service
RED	Random Early Detection
RRM	Radio Resource Management
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
WFQ	Weighted Fair Queueing
WRR	Weighted Round Robin

Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1 Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας προς τα δίκτυα 5G [32]	21
Εικόνα 2 MASSIVE MIMO [33]	25
Εικόνα 3 Επικοινωνία D2D (Device-to-Device Communication) [33]	26
Εικόνα 4 Τεχνολογίες 5G [50]	28
Εικόνα 5 Εξέλιξη του 5G από Rel-15 σε Rel-17 [40].	31
Εικόνα 6 Χρονοδιάγραμμα εκδόσεων των προτύπων της 3GPP [17]	31
Εικόνα 7 Χρονοδιάγραμμα του Rel-17 [40]	32
Εικόνα 8 Εξέλιξη της 5G αρχιτεκτονικής (Rel-15, Rel-16, Rel-17) [40].	33
Εικόνα 9 Διάγραμμα των κύριων τεχνολογικών στόχων των δικτύων 5G [25]	35
Εικόνα 10 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5 ^{ης} γενιάς [24]	36
Εικόνα 11 Επισκόπηση των επιλογών υλοποίησης SA και NSA [50].	41
Εικόνα 12 Φάσεις Υλοποίησης Δικτύου 5G [50].	42
Εικόνα 13 Συνύπαρξη δικτύων GSM, UMTS και LTE [47]	44
Εικόνα 14 Συνδέσεις fronthaul, midhaul και backhaul σε δίκτυο 5G [47]	45
Εικόνα 15 Δίκτυο 5G με χρήση της λογικής RANaaS (RAN as a Service) και BHaaS (Backhaul as a Service) [47]	46
Εικόνα 16 Αρχιτεκτονική NTN δικτύου κορμού [40].	47
Εικόνα 17 Λειτουργική Δομή του Δρομολογητή Διαδικτύου [66]	55
Εικόνα 18 Δρομολογητής για κάθε γραμμή εξόδου [82]	56
Εικόνα 19 Χρονοδρομολόγηση FIFO [60]	57
Εικόνα 20 Τεχνική FIFO [57]	58
Εικόνα 21 Μηχανισμός Χρονοδρομολόγησης Priority Queueing (PQ) [60]	60
Εικόνα 22 Μηχανισμός Χρονοδρομολόγησης Fair Queueing (FQ) [60]	62
Εικόνα 23 Η Χρονοδρομολόγηση Weighted Fair Queueing [39]	63
Εικόνα 24 Διαχείριση ασύρματων πόρων σε 5G Ετερογενή Δίκτυα [54]	67
Εικόνα 25 Επισκόπηση λειτουργιών διαχείρισης ασύρματων πόρων 5G [53]	68
Εικόνα 26 Δεδομένα εισόδου σε έναν χρονοδρομολογητή πακέτων δικτύου 5G [53]	70

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 Γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας [14]	19
Πίνακας 2 Συνοπτικός Πίνακας 5G Χρονοδρομολογητών.....	77

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα μέχρι πρότινος χαρακτηριζόταν ως ψηφιακά ανώριμη, σε υποδομές, υπηρεσίες και γενικότερα στην ψηφιακή κουλτούρα καθώς υστερούσε ψηφιακά από τον μέσο όρο των λοιπών Ευρωπαϊκών κρατών. Ωστόσο, τα οφέλη που προκύπτουν από τον ψηφιακό μετασχηματισμό είναι τεράστια καθώς δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας, παρέχονται καινοτόμες υπηρεσίες, γεφυρώνει το ψηφιακό χάσμα. Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς και στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν συγκαταλέγονται η ταχύτητα με την οποία μεταδίδονται τα δεδομένα, η παροχή επιπλέον χωρητικότητας μέσω συχνοτήτων που έως σήμερα παρέμεναν ανεκμετάλλευτες, η ελαχιστοποίηση της χρονοκαθυστέρησης και του χρόνου απόκρισης, κ.α.[1].

Η έως τώρα εμπειρία δείχνει ότι γύρω από τα δίκτυα αναπτύσσεται ένα σύστημα το οποίο επηρεάζει τόσο τους ιδιώτες όσο και τις επιχειρήσεις. Εκμεταλλευόμενοι λοιπόν τα οφέλη που προσφέρει ο ψηφιακός μετασχηματισμός τόσο οι ιδιώτες όσο και οι επιχειρήσεις θέλουν να τις αξιοποιήσουν αυτές τις τεχνολογίες. Ο ψηφιακός αυτός μετασχηματισμός αναμφίβολα επηρεάζει το ηλεκτρονικό εμπόριο, τον ηλεκτρονικό τύπο, υπηρεσίες εκπαίδευσης καθώς και υπηρεσίες δημόσιας διοίκησης οι οποίες είναι πλέον προσβάσιμες μέσω διαδικτύου.[1]. Η εξέλιξη της παγκόσμιας οικονομίας, με την αξιοποίηση των ψηφιακών τεχνολογιών, δίνει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις αλλά και στους πολίτες να αναπτυχθούν επιχειρηματικά.

Κάθε επιχείρηση σήμερα αναπτύσσεται σε μια παγκοσμιοποιημένη οικονομία, ενώ η ανάπτυξη της τεχνολογίας είναι εκείνη η οποία θα επιτρέψει τη βιώσιμη ανάπτυξη κάθε επιχείρησης. Ο κλάδος του τουρισμού οφείλει να αξιοποιεί όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η σύγχρονη τεχνολογία για την διευκόλυνση των τουριστών / επισκεπτών. Το εμπόριο, οι δημόσιες και οι δημοτικές υπηρεσίες βασίζονται στις «έξυπνες τεχνολογίες» για την ασφάλεια, την ταχύτητα της εξυπηρέτησης, αλλά και την εξοικονόμηση πόρων [1].

Τα παραπάνω αποτελούν μερικά μόνο παραδείγματα τα οποία αποτυπώνουν την εικόνα μιας σύγχρονης οικονομίας με ποιοτικές και ανταγωνιστικές υπηρεσίες όπου οι

σύγχρονες τεχνολογίες αξιοποιούνται πλήρως όχι μόνο για την εξοικονόμηση πόρων αλλά κυρίως για τη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών [1]. Ο ρυθμός με τον οποίο αναπτύσσεται η τεχνολογία φέρνει αλλαγές σε όλους τους τομείς της κοινωνίας όπως, στις επιστήμες και στον επιχειρηματικό κόσμο. Η εξάπλωση της ψηφιακής τεχνολογίας σε όλο τον κόσμο είναι μεγάλη ενώ όλο και περισσότερες εφαρμογές αναπτύσσονται ραγδαία.

Οι υποδομές των τηλεπικοινωνιών θα πρέπει να συμβαδίζουν με τις περισσότερες τεχνολογικές υποδομές ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στον ανταγωνισμό ο οποίος εξελίσσεται διαρκώς. Στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες υπάρχουν πολλά είδη δικτύων (δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ασύρματα δίκτυα, δίκτυα υπολογιστών και επίγεια δίκτυα). Με το πέρασμα των χρόνων, η χρήση των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας έγινε σημαντική, γι' αυτό το λόγο η ανάπτυξη των δικτύων 5^{ης} γενιάς είναι απαραίτητη, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου. Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς δημιουργήθηκαν ως απάντηση στην ανάγκη για βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας εξυπηρέτησης. Η ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε αρχικά λίγα χρόνια αφού υλοποιήθηκαν τα πρώτα δίκτυα και αυξήθηκε η ζήτηση για οικονομικές και ευρείας αποδοχής υπηρεσίες διασύνδεσης. Έτσι η χρήση και μετάδοσης ροών βίντεο και ήχου μέσω του ίντερνετ αποτέλεσε μέρος της καθημερινότητας των οικιακών χρηστών αλλά και των επιχειρήσεων.

Από την αρχή της δημιουργίας του το διαδίκτυο βασίστηκε στη φιλοσοφία-αρχιτεκτονική της «βέλτιστης προσπάθειας» (best-effort). Τα δίκτυα αρχικά τα πρώτα χρόνια δεν αντιμετώπιζαν πρόβλημα καθώς οι απαιτήσεις που είχαν οι εφαρμογές δεν απαιτούσαν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αναφορικά με την ταχύτητα, το χρόνο και τον τρόπο διαμεταγωγής και μετάδοσης. Η ζήτηση περιοριζόταν στην αποστολή μηνυμάτων κειμένου μικρού μεγέθους και μη διαδραστικού τύπου, όπου δεν απαιτούνταν μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση υπερφόρτωσης της ουράς ενός δρομολογητή, η απόρριψη πακέτων θα γίνει χωρίς να ληφθεί υπόψη η προτεραιότητα των πακέτων που πρέπει να απορριφθούν.

Κατά τις περιόδους αιχμής σε ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων IP, υπερφορτώνονται οι καταχωρητές των ενδιάμεσων δρομολογητών και έτσι δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος για τα νέα εισερχόμενα πακέτα με αποτέλεσμα πολλά πακέτα να απορρίπτονται, οι ρυθμοί μεταφοράς να μειώνονται δραματικά και η συνολική απόδοση του δικτύου να δημιουργεί

προβλήματα στους χρήστες. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η ανάγκη ύπαρξης εγγυήσεων και μηχανισμών παροχής ποιότητας εξυπηρέτησης στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών με την δημιουργία πρωτοκόλλων για εγγυημένες και ποιοτικές υπηρεσίες στους χρήστες, την ώρα αιχμής.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Δίκτυα 5G

1.1 Τηλεπικοινωνίες - ορισμός

Με τον γενικό όρο τηλεπικοινωνίες, αναφερόμαστε σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών που περιλαμβάνει ποικίλους τρόπους μετάδοσης της πληροφορίας από μια πηγή σε μια άλλη ανεξαρτήτως απόστασης. Σήμερα, η μετάδοση της πληροφορίας πραγματοποιείται με την αποστολή είτε ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είτε ηλεκτρικών σημάτων τα οποία χρησιμοποιώντας κατάλληλες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως για παράδειγμα το κινητό τηλέφωνο. Σε αντιδιαστολή με αυτό που συμβαίνει σήμερα, όπου μας δίνεται η δυνατότητα να τηλεφωνούμε μέσα από το αυτοκίνητο ή το τρένο με τη χρήση ενός κινητού, εάν δεν υπήρχαν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, θα εξακολουθούσαμε να χρησιμοποιούμε τον τηλεφωνικό θάλαμο για τις τηλεφωνικές μας κλήσεις [3]. Σήμερα οι τηλεπικοινωνίες είναι εξαιρετικά διαδεδομένες στα περισσότερα μέρη του πλανήτη ενώ οι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε αυτή την διαδικασία, είναι το τηλέφωνο (κινητή και σταθερή τηλεφωνία), το ραδιόφωνο, η τηλεόραση, κ.α.. Αντίστοιχα, προκειμένου αυτές οι συσκευές να συνδεθούν, υπάρχουν μια σειρά από δίκτυα, όπως για παράδειγμα τα δίκτυα υπολογιστών, τα δημόσια τηλεφωνικά δίκτυα, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, τα ραδιοφωνικά και τα τηλεοπτικά δίκτυα.

Η ανάγκη που έχει ο άνθρωπος για επικοινωνία και για ενημέρωση αποτελούν στοιχεία έκφρασης της ανθρώπινης φύσης και στοιχείο κοινωνικότητας. Η αυξημένη ανάγκη που έχει ο άνθρωπος για επικοινωνία δημιούργησε την κινητή τηλεφωνία η οποία από το ξεκίνημά της εισήχθη δυναμικά σε παγκόσμιο επίπεδο [2]. Η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια για αυτοματοποιημένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας πραγματοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 στη Σκανδιναβία. Έως τα τέλη της δεκαετίας του '80 τα κινητά τηλέφωνα ήταν ογκώδη και υπήρχε δυσκολία στην μεταφορά τους και για το λόγο αυτό, κυρίως τα εγκαθιστούσαν σε αυτοκίνητα. Τα κινητά τηλέφωνα είχαν μεγάλη άνοδο και παρουσίασαν μεγάλη εξέλιξη στις αρχές της δεκαετίας του '90, όταν ολοκληρώθηκε η ψηφιοποίηση των δικτύων (Global System for Mobile Communications - GSM) και των

συσκευών. Πιο συγκεκριμένα, μειώθηκε το βάρος των κινητών συσκευών και κυμαίνονταν από 100 έως 200 γραμμάρια, ενώ το μέγεθος τους αντιστοιχούσε στην παλάμη ενός χεριού [4]. Στα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) η αποστολή σύντομων γραπτών μηνυμάτων (Short Message Service - SMS) καθώς και η λήψη φωτογραφιών γινόταν πολύ εύκολα [5]. Τον Οκτώβριο του 2001 εμφανίσθηκαν τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τρίτης γενιάς (3G), με σημαντικά μεγαλύτερες δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων [6]. Στη συνέχεια η κινητή τηλεφωνία μαζί με το ίντερνετ θα συγχωνευθούν σε μια πλατφόρμα επικοινωνίας όπου θα προσφέρουν υψηλές ταχύτητες και πλήθος υπηρεσιών και θα εισάγουν την τέταρτη γενιά (4G) κινητής τηλεφωνίας [8]. Σήμερα έχουμε φτάσει στην 5^η γενιά κινητής τηλεφωνίας με τα οφέλη που η τεχνολογία αυτή έχει να μας προσφέρει [9].

1.2 Ιστορική αναδρομή - Από την πρώτη μέχρι την τέταρτη γενιά (1G to 4G)

Ξεκινώντας από τα **δίκτυα πρώτης γενιάς** εκείνο που τα κάνει να ξεχωρίζουν από όλα τα υπόλοιπα αρχικά είναι το γεγονός ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιούσαν ήταν αναλογική. Από τη δεύτερη γενιά και έπειτα χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή τεχνολογία. Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων 1^{ης} γενιάς είναι η αναλογική διαμόρφωση (FM - Frequency Modulation), η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (FDMA - Frequency Division Multiple Access) και η τεχνική διαμόρφωσης (FDD - Frequency Division Duplexing).

Από τα βασικά μειονεκτήματα των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 1^{ης} γενιάς ήταν η ασυμβατότητα με τα πρότυπά τους καθώς και τα προβλήματα που σχετίζονταν με τον θόρυβο. Η μετάδοση των δεδομένων ήταν γενικά αργή και κακής ποιότητας και η πληροφορία που μετέφεραν ήταν για σήματα ομιλίας και μόνο. Προβλήματα αντιμετώπιζε αυτή η γενιά και σε θέματα που αφορούσαν την ασφάλεια καθώς ήταν πολύ εύκολο τα σήματα αυτά να υποκλαπούν. Οι ταχύτητες (1G) κυμαίνονται μεταξύ των 28kbps και 56kbps.

Οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης ενός κυψελωτού δικτύου έγινε από την εταιρία Bell Labs μετά από έρευνα που διεξήγαγε η εταιρία κινητών Motorola. Η Motorola παρήγαγε για καιρό κινητά τηλέφωνα για αυτοκίνητα, αλλά καθώς αυτά τα μοντέλα ήταν μεγάλα και βαριά, καταλάωναν υπερβολική ισχύ και έτσι ήταν αδύνατο να επιτραπεί η χρήση τους χωρίς να λειτουργεί ο κινητήρας του αυτοκινήτου. Έτσι, ο John F. Mitchell, μηχανικός της Motorola, και η ομάδα του ανέπτυξαν μια νέα τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας και του χορηγήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το έργο αυτό το 1973.

Παρόλο που η Motorola ανέπτυξε πρώτη τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας, από το 1968-1983 η εταιρία Bell Labs επεξεργάστηκε ένα σύστημα το οποίο ονομάζεται Advanced Mobile Phone System (AMPS), και το οποίο και αποτέλεσε το πρώτο πρότυπο κυψελοειδούς δικτύου στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το πρώτο σύστημα εγκαταστάθηκε με επιτυχία στο Σικάγο, Ιλλινόις, το 1979. Ο Martin Cooper, πρώην γενικός διευθυντής του τμήματος συστημάτων στη Motorola, καθοδηγώντας την ομάδα του παρήγαγε το Dyna TAC 8000x, το πρώτο δηλαδή εμπορικά διαθέσιμο κινητό τηλέφωνο που ήταν αρκετά μικρό για να μεταφερθεί εύκολα, ενώ ο ίδιος έκανε το πρώτο τηλεφώνημα από αυτό. Στη συνέχεια, ακολούθησαν αρκετές χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, το Μεξικό και τον Καναδάς [10]. Την πρώτη γενιά ακολούθησε η δεύτερη η οποία ήρθε να καλύψει τα κενά της πρώτης που ήταν η προβληματική μετάδοση των δεδομένων μεταξύ του χρήστη και του σταθμού βάσης.

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν ψηφιακή διαμόρφωση ενώ η μετάδοση των δεδομένων ήταν ασφαλέστερη και περισσότερο λειτουργική σε σχέση με τα δίκτυα προηγούμενης τεχνολογίας. Τα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς εισήχθησαν στην αγορά έχοντας ως βάση το πρότυπο GSM και χρησιμοποίησαν την έννοια της διαπομπής. Η διαπομπή δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης σε διαφορετικές κυψέλες κατά τη διάρκεια μιας κλήσης, προκειμένου να μην διακόπτεται η σύνδεση κατά την κίνηση του χρήστη [11].

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς χρησιμοποιώντας ψηφιακό σήμα εφάρμοσαν τεχνολογίες πολύπλεξης όπως η TDMA (Time Division Multiple Access) και η CDMA (Code Division Multiple Access). Έτσι επιτυγχάνουν να αυξήσουν την αποδοτικότητά τους τρεις φορές περισσότερο σε σχέση με τις αποδόσεις που είχαν τα δίκτυα προηγούμενων γενεών [5].

Τα δίκτυα 2G παρουσιάζουν τρία βασικά πλεονεκτήματα, τα οποία είναι:

- Υπάρχει δυνατότητα κρυπτογράφησης των τηλεφωνικών συνομιλιών.
- Τα συστήματα 2G ήταν πιο αποτελεσματικά στην χρήση του φάσματος σε σχέση με τα παλαιότερης τεχνολογίας δίκτυα και αυτό επέτρεπε στους χρήστες να έχουν βελτιωμένη ασύρματη σύνδεση, και τέλος
- Παρείχαν υπηρεσίες δεδομένων ενώ οι χρήστες είχαν τη δυνατότητα να αποστέλλουν μηνύματα (πολυμέσων και απλά) και να λαμβάνουν φωτογραφίες. Τα μηνύματα όταν αποστέλλονται μέσω της τεχνολογίας 2G κρυπτογραφούνται ώστε κανείς άλλος εκτός από τον αποδέκτη να μην μπορεί να λάβει και να διαβάσει το μήνυμα.

Τα πρώτα δίκτυα τρίτης γενιάς 3G εισήχθησαν το 2001 ώστε να αντικαταστήσουν τα αντίστοιχα δίκτυα δεύτερης γενιάς αλλά και τα δίκτυα 2.5G [5]. Σκοπός των δικτύων 3G ήταν να δώσουν πρόσβαση στο ίντερνετ, τις βιντεοκλήσεις και την κινητή τηλεόραση.

Επίσης τα δίκτυα 3G στο πλαίσιο αναβάθμισης των δικτύων 2G που προϋπήρχαν, βασίστηκαν σε νέα πρότυπα προκειμένου να μεταφέρονται δεδομένα πιο γρήγορα υποστηρίζοντας υπηρεσίες που παρέχουν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερο από 14,4 Mbit/s [12]. Οι επόμενες αναβαθμίσεις του 3G δικτύου, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως 3.5G και 3.75G, παρέχουν ευρυζωνική πρόσβαση κινητής τηλεφωνίας έως και 42.2 Mbit/s. Η τρίτη γενιά στην τεχνολογία της κινητής τηλεφωνίας βασίζεται σε μια σειρά προτύπων τα οποία στηρίζονται στις προδιαγραφές της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union) και του οργανισμού Διεθνών Κινητών Τηλεπικοινωνιών-2000 (International Mobile Telecommunications-2000).

Κάθε γενιά κυψελωιδών προτύπων εμφανίζεται περίπου κάθε δέκα χρόνια από το ξεκίνημά τους έως και σήμερα. Από το δίκτυο πρώτης γενιάς που εισήχθη το 1981/1982 τα δίκτυα 2G εισήχθησαν το 1993, τα 3G εισήχθησαν το 2001 ενώ τα 4G δίκτυα εισήχθησαν το 2009. Το 2008 ο ITU Radiocommunication Sector (ITU-R) προσδιόρισε το σύνολο των προδιαγραφών των δικτύων 4G στο πρότυπο International Mobile

Telecommunications Advanced (IMT Advanced). Το πρότυπο αυτό προσδιορίζει τις απαιτήσεις λειτουργίας αιχμής για τις υπηρεσίες των δικτύων 4G στα 100 Mbit/s για ασύρματες συνδέσεις υψηλής κινητικότητας (όπως για παράδειγμα συνδέσεις με τρένα ή αυτοκίνητα) και 1 Gbit/s για συνδέσεις χαμηλής κινητικότητας (όπως για παράδειγμα συνδέσεις με πεζούς ή ακίνητους χρήστες) [15].

Πίνακας 1 Γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας [14]

Name	1st Generation Mobile Network	2nd Generation Mobile Network	3rd Generation Mobile Network	4th Generation Mobile Network
Introduced in year	1980s	1993	2001	2009
Technology	AMPS (Advanced Mobile Phone System), NMT, TACS	IS-95, GSM	IMT2000, WCDMA	LTE, WiMAX
Multiple Address /Access system	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA	CDMA
Speed (data rates)	2.4 Kbps to 14.4 kbps	14.4 Kbps	3.1 Mbps	100 Mbps
Special Characteristic	First wireless communication	Digital version of 1G technology	Digital broadband, speed increments	Very high speeds, All IP
Features	Voice only	Multiple users on single channel	Multimedia features, Video Call	High Speed, real time streaming
Bandwidth	Analog	25 MHz	25 MHz	100 MHz

Παρόλο που οι εφαρμογές των δικτύων αυτών δεν άλλαξαν πολύ σε ότι αφορά τις προσφερόμενες υπηρεσίες προς τους χρήστες, οι νέες γενιές έφεραν ευρυζωνικότητα και μεγαλύτερες ταχύτητες. Τα δίκτυα 4G στηρίζονται στην τεχνολογία LTE Advanced η οποία βελτίωσε την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σχεδόν στα 100Mbps [16]. Τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς (4G) δίκτυα, πρωτοεμφανίστηκαν το 2009 ωστόσο έως και σήμερα, αποτελούν την τελευταία γενιά κυψελωτών δικτύων που διατίθενται ευρέως στην αγορά.

1.3 Γιατί υπάρχει ανάγκη για δίκτυο 5ης γενιάς και σε τι διαφέρει;

Τα τελευταία χρόνια η ραγδαία αύξηση της ζήτησης σε tablets και έξυπνα κινητά τηλέφωνα, οδήγησε στην παράλληλη αύξηση της ζήτησης για δεδομένα στο διαδίκτυο. Μεγάλο μέρος της παγκόσμιας οικονομίας κινείται μέσω διαδικτύου, ενώ αναμένεται πως τα δίκτυα 5G θα έχουν καταλυτικό ρόλο και θα καλύπτουν πάνω από 1,5 δις. συνδέσεις (Internet of Things) σε σχέση με τα 400 εκατ. συνδέσεις που υπάρχουν σήμερα.

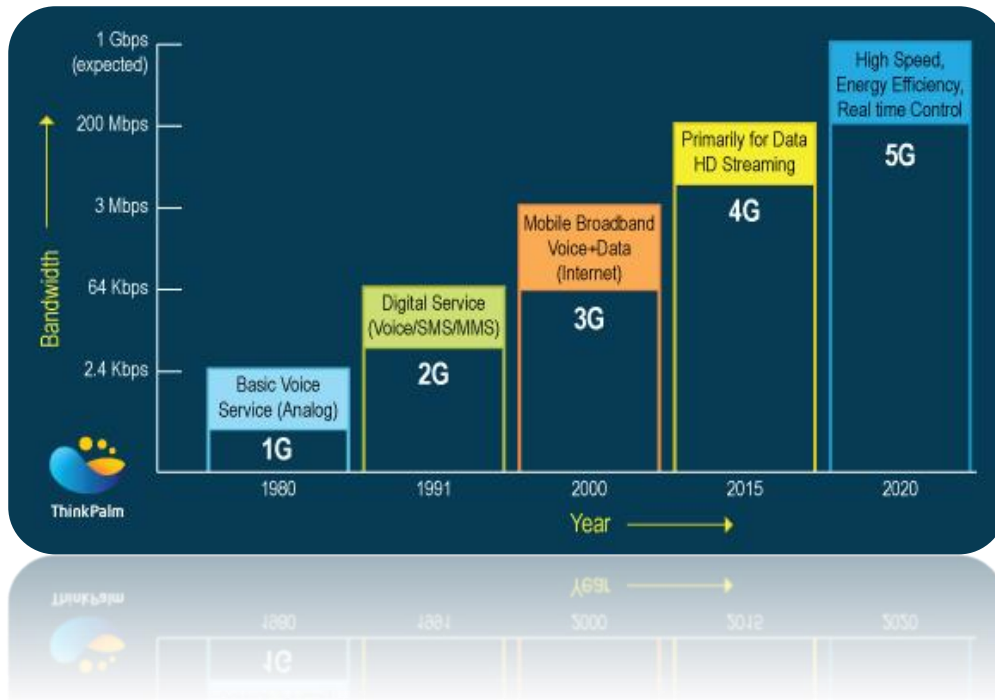
Στις προηγούμενες γενιές δικτύων στόχος ήταν η εξυπηρέτηση των πελατών για κλήσεις και μηνύματα (2G δίκτυο), για περιήγηση στο διαδίκτυο (3G) και τέλος, για μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και βίντεο (4G). Στα δίκτυα 5G η χωρητικότητα των σημερινών ασύρματων δικτύων που εξυπηρετούν πάνω από 7 δις συσκευές τετραπλασιάζεται ενώ ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα πιο ασφαλές και αξιόπιστο δίκτυο με ελάχιστες καθυστερήσεις.

Τα **δίκτυα 5G** απευθύνονται σε πολλούς κλάδους της οικονομίας καθώς επίσης και στο δημόσιο τομέα καθώς θα οδηγήσει στον ψηφιακό μετασχηματισμό και στην ανάπτυξη νέων αγορών της οικονομίας, νέων επιχειρηματικών μοντέλων. Επίσης θα ευνοήσει τις νέες ευκαιρίες για κέρδη μέσω του IoT διασυνδέοντας αντικείμενα και συσκευές του περιβάλλοντος.

Υπάρχουν 3 κατηγορίες όπου το δίκτυο 5G αναμένεται να χρησιμοποιηθεί και πιο συγκεκριμένα:

- Προκειμένου να υπάρχει κάλυψη παντού και συνδεσιμότητα εξαιρετικής ποιότητας.
- Για να υπάρχει μαζική επικοινωνία μεταξύ συσκευών (όπως υπολογιστές, κινητά) συμπεριλαμβανομένου και των νέων συσκευών που θα προστεθούν.
- Επιπλέον, για να υπάρχει συνδεσιμότητα παντού χωρίς πολύπλοκο υλικό και λογισμικό και με εξοικονόμηση ενέργειας.

Τα δίκτυα 5G πρόκειται να είναι από 10 έως 100 φορές πιο γρήγορα σε σύγκριση με την ταχύτητα που έχουν τα σημερινά δίκτυα, ενώ θα μπορούν να διακινούν 1000 φορές περισσότερο όγκο δεδομένων, με πέντε φορές μικρότερη καθυστέρηση στο δίκτυο. Θα προσφέρουν επίσης ρυθμούς μετάδοσης μεταξύ 1 έως 5 Gbps αλλά και σημαντικά μικρότερη καθυστέρηση συγκριτικά με τα δίκτυα 4G [1].



Εικόνα 1 Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας προς τα δίκτυα 5G [32]

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Κατηγορίες Δικτύων

2.1 Τεχνολογία 5G – Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική εξέλιξη όσον αφορά την ανάπτυξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς που εμφανίστηκαν ως εξέλιξη των δικτύων 4^{ης} γενιάς υποστηρίζουν τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και τη διασύνδεση εκατομμυρίων συσκευών. Οι στόχοι που καλούνται να πραγματοποιηθούν είναι η αύξηση της χωρητικότητας και η καλύτερη ποιότητα στις παρεχόμενες υπηρεσίες. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι, και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών, απαιτούνται αλλαγές και βελτιώσεις στην αρχιτεκτονική των δικτύων.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση είχε σαν όραμα στο μέλλον (μέσα στα επόμενα 10 χρόνια) τα δίκτυα επόμενης γενιάς να ενοποιηθούν και να έχουν μια κοινή διεπαφή διασύνδεσης. Για την υλοποίηση του οράματος αυτού, απαιτείται ο συνδυασμός δύο βασικών κριτηρίων, της ευελιξίας και της επεκτασιμότητας των υποδομών, το οποίο συνεπάγεται εικονικά διαμορφωμένες λειτουργίες δικτύου, υλοποιούμενες με προγραμματιζόμενο υλικό υψηλών επιδόσεων για την μεταφορά, δρομολόγηση, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων [15]. Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς έρχονται για να αναβαθμίσουν και να βελτιώσουν τις υποδομές των τηλεπικοινωνιακών παρόχων μέσα από προσεγγίσεις και τεχνολογίες οι οποίες απαιτούν διαφορετικό εξοπλισμό αλλά και αλλαγές στα δίκτυα.

Τα συγκεκριμένα δίκτυα πρόκειται να αυξήσουν την ταχύτητα σύνδεσης στο διαδίκτυο 10 φορές σε σχέση με αυτά της 4^{ης} γενιάς, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες του δικτύου να παρακολουθούν βίντεο, να λαμβάνουν πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων, να έχουν υψηλή ποιότητα εξυπηρέτησης και διάχυτη επικοινωνία, καλύτερες και πιο αξιόπιστες συνδέσεις.

2.1.1 Τεχνική ορολογία δικτύων και υπηρεσιών 5G

Με βάση τις πρώτες κοινοπραξίες κατά την ανάπτυξη του 5G, έχουν προσδιοριστεί πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες:

- Υπερ-πυκνά δίκτυα (Ultra-Dense Networks - UDN),
- Προηγμένα συστήματα συντονισμού διακυψελικών παρεμβολών (Inter-Cell Interference Coordination - ICIC),
- Συντονισμένη επεξεργασία μετάδοσης πολλαπλών σημείων (Coordinated Multi-Point Processing - CoMP),
- Κεντροποιημένος έλεγχος και αποσύζευξη των επιπέδων δεδομένων/ελέγχου.

Τα UDNs είναι ετερογενή δίκτυα (HetNets), που συμπεριλαμβάνουν μακροκυψέλες υψηλής ισχύος και πολύ πυκνές κυψέλες χαμηλότερης ισχύος (μικρές κυψέλες). Οι μικρές κυψέλες διαθέτουν τεχνολογίες πολλαπλής ασύρματης πρόσβασης (multi-RAT) οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα ουσιαστικό μέρος των UDNs, και αποτελούν επιτακτική λύση στα 5G. Η κοινή χρήση του φάσματος σε ένα UDN απαιτεί έξυπνο συντονισμό και εξουδετέρωση των παρεμβολών ανάμεσα στις κυψέλες. Η αυξανόμενη ανάγκη διαχείρισης της ισχύος σε συνδυασμό με την ποικιλομορφία των μικρών κυψελών και των πρότυπων κίνησης, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, καθιστούν την έννοια του κεντροποιημένου δικτύου ασύρματης πρόσβασης (C-RAN) πολύ ελκυστική.

Το C-RAN συνίσταται στο:

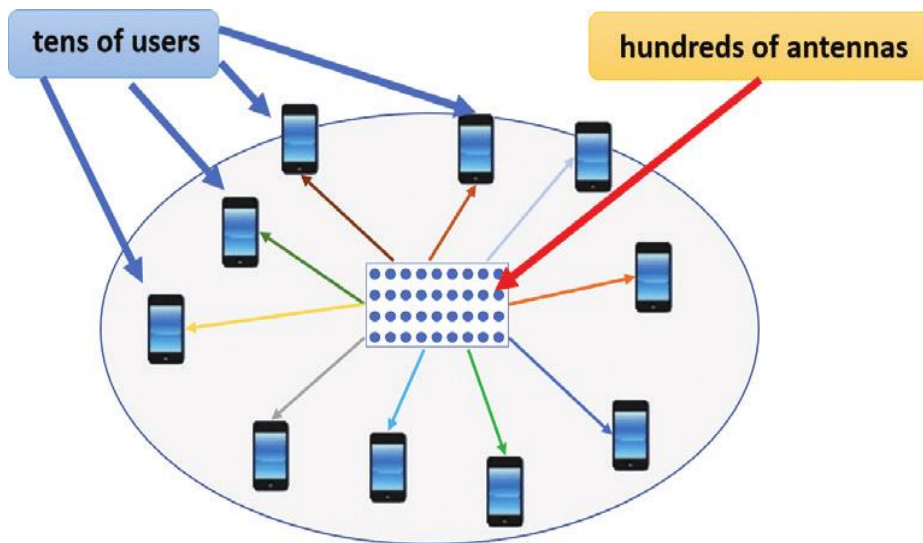
- διαχωρισμό των λειτουργιών του παραδοσιακού εξελιγμένου κόμβου B (Evolved Node B – eNB) και
- της μετεγκατάστασής τους σε μια κοινόχρηστη ομάδα πόρων που αναφέρεται ως μονάδα βασικής ζώνης (Baseband Unit - BBU).

Η αρχιτεκτονική C-RAN αξιοποιεί την ποικιλομορφία των αιχμών κίνησης (traffic peaks) με συνέπεια τη βελτίωση της αποδοτικότητας της υποδομής. Ταυτόχρονα, προωθείται η πράσινη ανάπτυξη του 5G, χάρη στην εγγύτητα των κυψελών και των χρηστών και τις απαιτήσεις για χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης.

Το 5G αναμένεται να υποστηρίξει τρεις γενικούς τύπους υπηρεσιών:

- Βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία (enhanced Mobile Broadband-eMBB),
 - Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (massive Machine-Type Communications-mMTC) και
 - Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (ultra-reliable and low-latency communications - URLLC) με βάση διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) του 5G [73],[61].
- **Βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία (eMBB):** Στόχος είναι να παρέχει ταχύτητα δεδομένων 20 Gbit/s στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και 10 Gbit/s στην ανερχόμενη (uplink) καθώς και μικρής καθυστέρησης επικοινωνίες. Οι Mmwave και Massive-MIMO αποτελούν δύο βασικές τεχνολογίες που υποστηρίζουν αυτόν τον υψηλό ρυθμό δεδομένων και το υπερ-πυκνό δίκτυο, το οποίο παρέχει τις ταχύτητες αυτές [56],[58].
- **Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC):** Σκοπός είναι η παροχή επεκτάσιμων λύσεων συνδεσιμότητας για τον τεράστιο αριθμό συσκευών που χρησιμοποιούν MEC ως τεχνολογική λύση.
- **Εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (URLLC):** Παρέχει επικοινωνίες εξαιρετικής αξιοπιστίας με ποσοστά σφάλματος πακέτου της τάξης των $\leq 10^{-5}$ και χαμηλή End-to-End (E2E) καθυστέρηση για την υποστήριξη εφαρμογών 5G. Βασίζεται σε τεχνολογίες NFV, NS και MEC.
- **Massive MIMO:** Πρόκειται για σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιοστοιχείων, που εξυπηρετούν ταυτόχρονα πολλές δεκάδες τερματικά. Χάρη στο Massive MIMO μπορεί υπάρξει σημαντική βελτίωση της ισχύος του σήματος, κάτι που

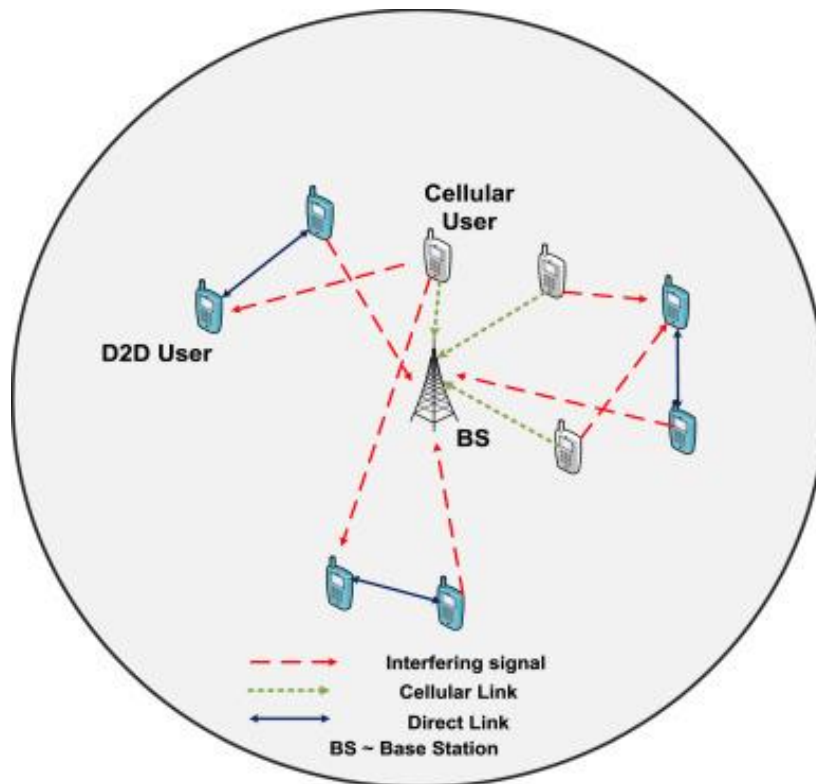
συνεπάγεται πολύ υψηλότερη και καλύτερη απόδοση από πλευράς κυψέλης σε σχέση με τα δίκτυα παλαιότερων γενεών.



Εικόνα 2 MASSIVE MIMO [33]

- **Millimeter Waves:** Τα συστήματα επικοινωνίας των χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) είναι αρκετά ενδιαφέροντα αναφορικά με την ικανοποίηση των απαιτήσεων του δικτύου 5G. Μεταδίδονται σε συχνότητες μεταξύ 30 και 300 GHz. Παρόλο που το διαθέσιμο εύρος ζώνης των συχνοτήτων mmWave είναι πολλά υποσχόμενο, τα χαρακτηριστικά διάδοσης διαφέρουν σημαντικά από τις ζώνες ραδιοκυμάτων όσον αφορά την απώλεια του σήματος καθώς τα σήματα mmWave δεν μπορούν να διαδίδονται μέσα από τα κτίρια. Σε γενικές γραμμές, η συνολικές απώλειες ισχύος των συστημάτων mmWave είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές των κλασικών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας.
- **Device-to-Device Communication (D2D):** Η επικοινωνία D2D στα κυψελοειδή δίκτυα ορίζεται ως άμεση επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών κινητής τηλεφωνίας (χωρίς το σήμα να περνά από το σταθμό βάσης (BS) ή το κεντρικό δίκτυο). Λειτουργεί όπως μια συμβατική χαμηλού ρυθμού δεδομένων επικοινωνία (π.χ. φωνητική κλήση, η ανταλλαγή μηνυμάτων κειμένου κ.λ.π.), όπου οι χρήστες σπάνια είναι αρκετά κοντά για άμεση επικοινωνία. Ωστόσο, οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας στα σημερινά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιούν υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων (π.χ. κοινή χρήση βίντεο) στις οποίες θα μπορούσαν ενδεχομένως να βρίσκονται σε κοντινή εμβέλεια

για άμεση επικοινωνία (δηλαδή D2D) έτσι ώστε να αυξηθεί σημαντικά η φασματική απόδοση του δικτύου.



Εικόνα 3 Επικοινωνία D2D (Device-to-Device Communication) [33]

2.1.2 Κύριες Εφαρμογές 5G

Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα τρία κύρια σενάρια χρήσης 5G είναι:

1. Βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία,
2. Μαζική συνδεσιμότητα και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και
3. Χαμηλός χρόνος καθυστέρησης

Όμως ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών αναμένεται να βελτιωθούν με τη χρήση του 5G:

- **Internet of things (IoT):** Επιτρέπει τη διασύνδεση μεταξύ του Διαδικτύου και έξυπνων φυσικών αντικειμένων. Τα παραπάνω αντικείμενα είναι συνδεδεμένα με το διαδίκτυο με σκοπό τη συλλογή και ανταλλαγή δεδομένων, ενώ είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες και υπολογιστική ισχύ ώστε να έχουν την δυνατότητα

να αναπτυχθούν σε πολλά περιβάλλοντα [72], [44]. Επομένως, ένα IoT οικοσύστημα απαρτίζεται από έξυπνα αντικείμενα που συλλέγουν, αποστέλλουν και επεξεργάζονται δεδομένα από το περιβάλλον τους με την χρήση ενσωματωμένων επεξεργαστών, αισθητήρων και εξοπλισμού δικτύωσης. Τα δεδομένα αυτά αποστέλλονται είτε στο νέφος (όπου και αναλύονται) μέσω μιας πύλης IoT, είτε αναλύονται τοπικά. Οι συσκευές πραγματοποιούν το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών τους χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, αν και οι άνθρωποι συνεχίζουν να έχουν τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν με αυτές.

— **Επικοινωνία M2M (Machine to Machine):** Τα χαρακτηριστικά επικοινωνίας M2M είναι :

1. Η παραγωγή,
2. Η επεξεργασία,
3. Η μεταφορά και
4. Η ανταλλαγή αυτοματοποιημένων δεδομένων μεταξύ έξυπνων μηχανών.

Η επικοινωνία M2M σε ένα σύστημα 5G στοχεύει σε καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End to End) μικρότερης των 5ms αλλά και περισσότερης αξιοπιστίας στο σύστημα.

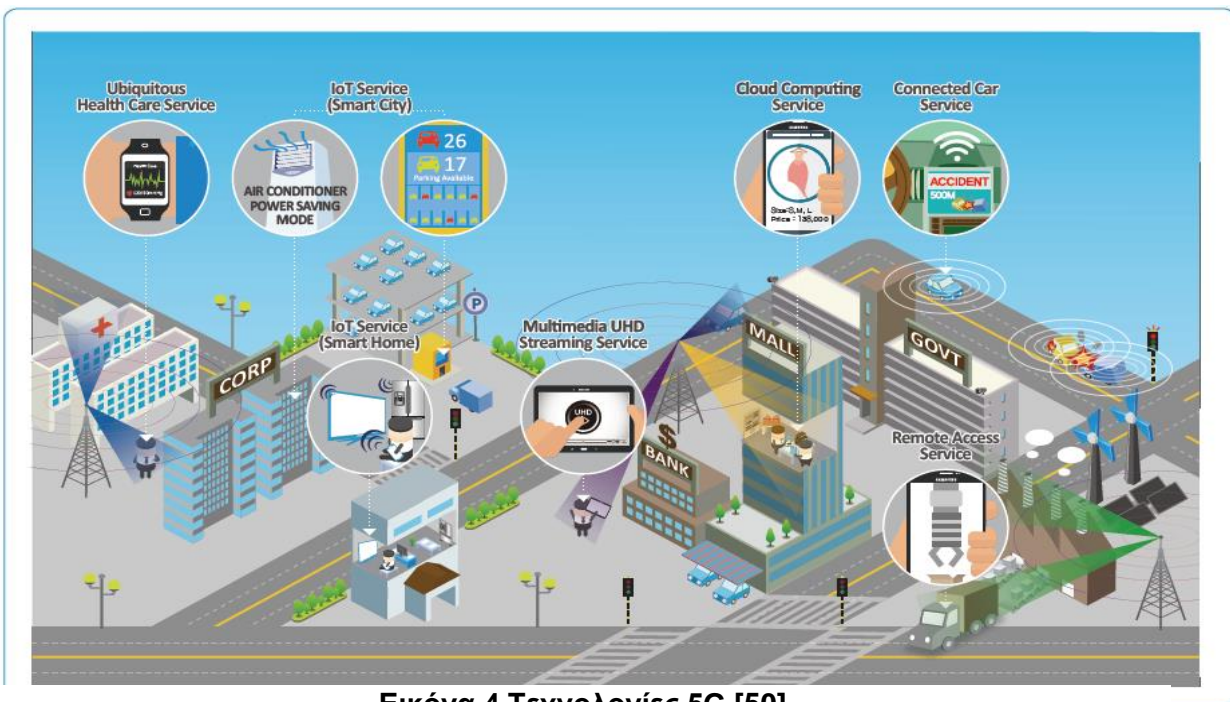
— **Διαδίκτυο οχημάτων (Internet of Vehicles - IoV):** Το IoV επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων ή την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και αισθητήρων σε δρόμους και ανθρώπων για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον τους [71]. Η εξέλιξη του IoT συνεπάγεται στην εξέλιξη του IoV [51].

— **Υγειονομική Περίθαλψη:** Με την εξέλιξη του 5G και τη βελτίωση των τεχνολογιών ανίχνευσης και ασφάλειας, δίνεται η ευκαιρία ανάπτυξης λύσεων στην υγειονομική περίθαλψη χάρη στην αποστολή δεδομένων του οργανισμού του ασθενούς στο υπολογιστικό νέφος ή σε μονάδες υγείας. Η διάγνωση μιας νόσου θα μπορεί να παρέχεται στους ασθενείς άμεσα, βασισμένη σε απομακρυσμένες ιατρικές υπηρεσίες.

— **Έξυπνο δίκτυο (Smart Grid - SG):** Το SG αποτελεί μια έξυπνη υποδομή ενεργειακού δικτύου προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα, η αξιοπιστία και η

ασφάλεια. Ουσιαστικά βοηθά στην ομαλή ενσωμάτωση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

- **Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing):** Πρόκειται για μία αρχιτεκτονική η οποία κάνει δυνατή την παράλληλη λειτουργία ανεξάρτητων λογικών/εικονικών δικτύων πάνω από μια κοινή φυσική υποδομή. Κάθε εικονικό δίκτυο αποτελεί ουσιαστικά ένα από άκρο-σε-άκρο απομονωμένο δίκτυο προσαρμοσμένο έτσι ώστε να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις όπως αυτές ζητούνται από τις εφαρμογές. Ο τεμαχισμός δικτύου επιτρέπει πολλαπλές λογικές «φέτες» λειτουργικότητας βελτιστοποιημένες για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, που όλες όμως υλοποιούνται σε έναν φυσικό κορμό εντός της υποδομής δικτύου 5G [50].



Εικόνα 4 Τεχνολογίες 5G [50]

2.1.3 Τυποποίηση των δικτύων 5G

Τα πρότυπα 5G αναπτύσσονται από πολλούς φορείς τυποποίησης, μεταξύ των οποίων είναι οι 3GPP, IETF και ITU. Μεταξύ των οργανισμών υπάρχει συνεργασία (π.χ. η 3GPP στέλνει τυποποιημένες δημοσιεύσεις στην ITU για να συμπεριληφθούν στο

πρότυπο IMT-2020 της ITU. Μερικές από τις τεχνολογίες που τυποποιούνται περιλαμβάνουν τη 5G ασύρματη επικοινωνία (New Radio - NR), την δημιουργία αλυσίδων λειτουργιών εξυπηρέτησής (Service Function Chaining) και τη χρήση νέου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων.

Οι πάροχοι και οι προμηθευτές που έχουν μερίδιο στο μέλλον των δικτύων 5G συμμετέχουν και στη διαδικασία προτυποποίησης τους. Οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι μία από τις πολλές χώρες με παρόχους και προμηθευτές 5G που εργάζονται για να υλοποιηθούν τα δίκτυα αυτά. Φορείς όπως η AT&T, η Sprint, η T-Mobile και η Verizon συμμετέχουν σε συνεχείς δοκιμές 5G προκειμένου να συμβάλουν στην υλοποίηση των προτύπων. Προμηθευτές όπως οι Cisco, Ericsson, Intel, LG, Nokia, Qualcomm και Samsung έχουν οικονομικά κίνητρα για να δουν τις πνευματικές τους ιδιοκτησίες να περιλαμβάνονται στη διαδικασία προτύπων 5G. Οι κύριοι φορείς προτυποποίησης 5G που εμπλέκονται σε αυτές τις διαδικασίες είναι οι ακόλουθοι:

- Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-ITU).
- Η οργανισμός τυποποίησης IETF (Internet Engineering Task Force) και
- Το έργο συνεργασίας για τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

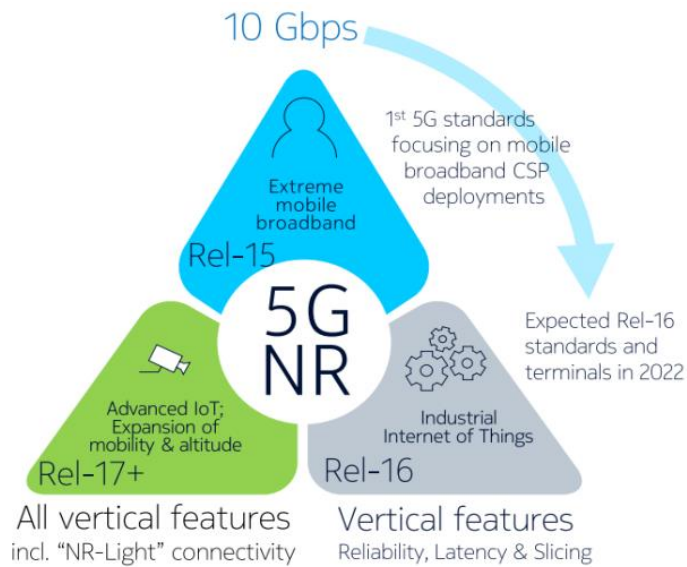
— **Οργανισμός Τυποποίησης ITU (International Telecommunication Union):**

Πρόκειται για οργανισμό με έδρα τη Γενεύη που επικεντρώνεται στις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών. Συντονίζει την παγκόσμια κατανομή του ραδιοφάσματος. Το 2015, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών εντόπισε τρεις ζώνες φάσματος που θα χρησιμοποιούνταν για τα συστήματα 5G και το 2016, βελτίωσε τα κριτήρια για την επιλογή τεχνολογιών 5G. Στα τέλη του 2016, ειδική ομάδα ολοκλήρωσε μια προκαταρκτική μελέτη σχετικά με τα πρότυπα που είναι απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων απόδοσης του 5G καθώς και τις απαιτήσεις και το πλαίσιο διαχείρισης του δικτύου.

— **Ο Οργανισμός Τυποποίησης IETF (Internet Engineering Task Force):** Πρόκειται για έναν οργανισμό τυποποίησης που καθορίζει τις βασικές προδιαγραφές για

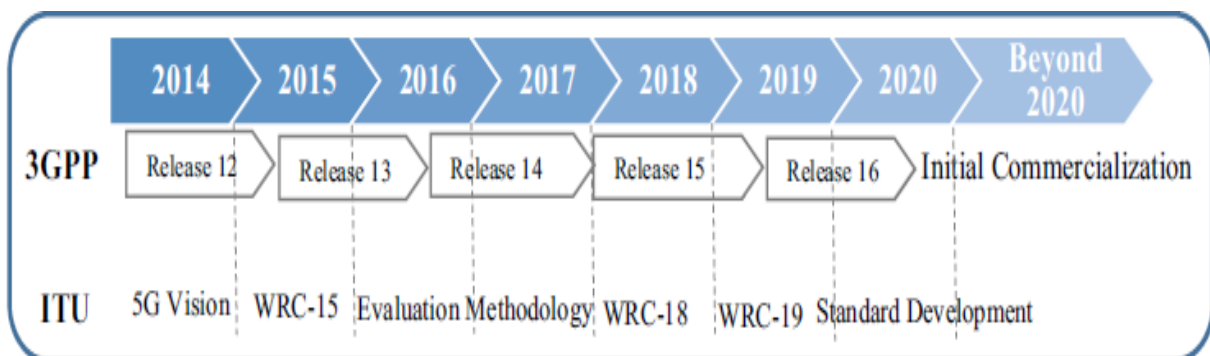
λειτουργίες εικονικοποίησης. Ο IETF προτείνει ένα πρωτοποριακό Service Function Chaining (SFC), το οποίο θα συνδέσει τα εικονικοποιημένα στοιχεία της αρχιτεκτονικής 5G (σταθμός βάσης, πύλη πακέτων δεδομένων και πύλη εξυπηρέτησης), με συνέπεια να καταστεί δυνατή η δυναμική δημιουργία και σύνδεση εικονικών δικτυακών λειτουργιών (Virtual Network Functions-VNFs). Άλλες νέες υπό ανάπτυξη τεχνολογίες από τον IETF περιλαμβάνουν δοκιμές που σχετίζονται με δρομολόγηση (συμπεριλαμβάνονται τα πρωτόκολλα για κατανεμημένη δικτύωση) καθώς και για υπολογισμό διαδρομής για την αντιμετώπιση των περιορισμών του 5G NR. Ο IETF συνεργάζεται με την 3GPP για την ανάπτυξη των προτύπων 5G, καλύπτοντας τόσο τη νέα υπό ανάπτυξη τεχνολογία από τον IETF όσο και τις νέες χρήσεις των διαφόρων σύγχρονων τεχνολογιών.

- **Ο Διεθνής Οργανισμός 3GPP:** Πρόκειται για έναν διεθνή οργανισμό που εστιάζει στις τηλεπικοινωνίες και αποτελείται από επτά οργανωτικούς εταίρους. Είναι επιφορτισμένος με τη διαμόρφωση των τεχνικών προδιαγραφών 5G, οι οποίες εν συνεχεία γίνονται πρότυπα. Στα μέσα του 2017, οι ομάδες τεχνικών προδιαγραφών 3GPP συμφώνησαν σε ένα λεπτομερές πρόγραμμα εργασίας για το Release 15 - την πρώτη έκδοση των προδιαγραφών 5G. Το πρόγραμμα εργασίας περιλάμβανε ένα σύνολο σημείων ελέγχου και εργασιών προκειμένου να καθοδηγήσει τις τρέχουσες μελέτες της αρχιτεκτονικής επόμενης γενιάς 5G και εστίαζε σε βελτιωμένες ευρυζωνικές κινητές συνδέσεις, εξαιρετική αξιοπιστία, εύρη συχνοτήτων, χαμηλή καθυστέρηση κ.λ.π.



Εικόνα 5 Εξέλιξη του 5G από Rel-15 σε Rel-17 [40].

Οι επακόλουθες εκδόσεις των προδιαγραφών της 3GPP θα υλοποιηθούν με προς τα πίσω συμβατότητα στη βάση που παρέχεται από το Rel-15, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

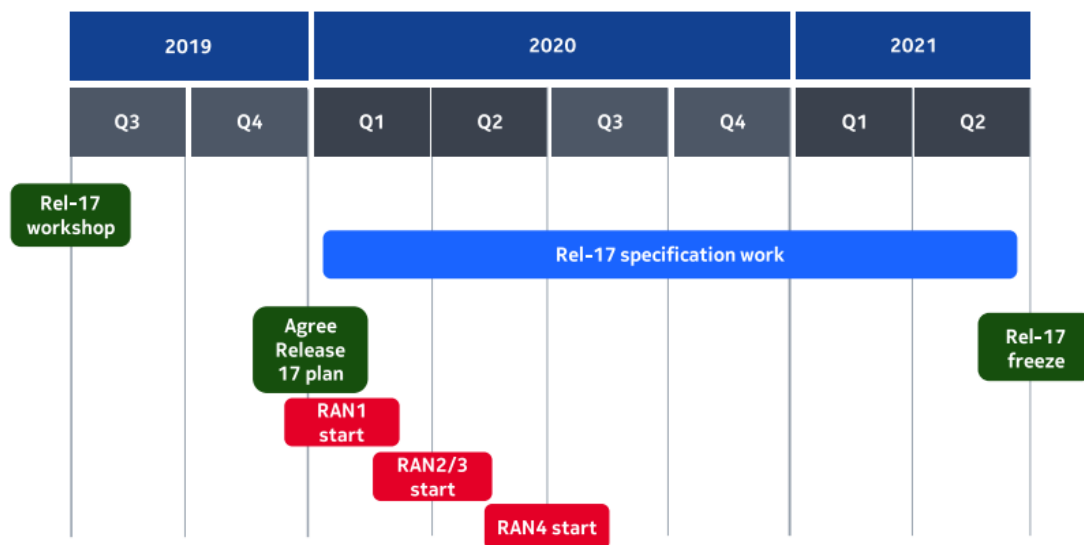


Εικόνα 6 Χρονοδιάγραμμα εκδόσεων των προτύπων της 3GPP [17]

Η δεύτερη φάση των δικτύων 5G τυποποιήθηκε στο Rel-16 και έχει ήδη ολοκληρωθεί από τον Μάρτιο του 2020. Εκτός από την βελτίωση των λειτουργιών που περιγράφονται στο Rel-15, το Rel-16 επικεντρώνεται στην ενεργοποίηση της πλήρους υποστήριξης για το Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Industrial IoT - IIoT), συμπεριλαμβανομένων των βελτιωμένων υπηρεσιών URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications), της ευαίσθητης ως προς το χρόνο επικοινωνίας (Time Sensitive Communication – TSC), της εισαγωγής υποστήριξης για ιδιωτικά δίκτυα NPN (Non-Public Networks), της λειτουργίας σε μη-αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων και των βελτιώσεων ανάπτυξης μέσω της

λειτουργίας Integrated Access and Backhaul (IAB) που απευθύνεται κυρίως σε δίκτυα mmWave [40].

Ο προγραμματισμός για το περιεχόμενο των χαρακτηριστικών του Rel-17 βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη, στοχεύοντας να είναι διαθέσιμα μέσα στο 2021. Από την άποψη της αρχιτεκτονικής του συστήματος 5G, το Rel-17 θα περιλαμβάνει μεταξύ άλλων βελτιωμένη υποστήριξη του IIoT, των NPN, βελτιωμένη αρχιτεκτονική για την υποστήριξη πολλαπλής πρόσβασης και βελτιωμένη υποστήριξη αυτόματων δικτυακών λειτουργιών. Όσον αφορά το Δίκτυο Ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Network - RAN) απο τον Ιούνιο του 2019 η κοινότητα της 3GPP εντόπισε τα κύρια θέματα ενδιαφέροντος που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το Rel-17 [40]. Η φάση σχεδιασμού των προδιαγραφών αναμένεται να διαρκέσει 15 μήνες, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αναμένεται επίσης ότι χαρακτηριστικά που δεν θα περιλαμβάνονται στο Rel-17 θα συμπεριληφθούν σε μεταγενέστερες εκδόσεις [40].



Εικόνα 7 Χρονοδιάγραμμα του Rel-17 [40].

Συμπερασματικά, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 8, το Rel-16 επικεντρώνεται σε βελτιώσεις που σχετίζονται με τα IIoT (URLLC, TSC) και NPN και την γενικότερη βελτίωση της αρχιτεκτονικής του συστήματος. Επιπρόσθετα, η αρχιτεκτονική του Rel-17 θα παρέχει τα ακόλουθα [40]:

1. Περαιτέρω βελτιώσεις για την αυτοματοποίηση δικτύου (Network Automation - eNA),
2. Υποστήριξη για υπηρεσίες εγγύτητας (Proximity based Services - ProSe),
3. Βελτιώσεις στην υποστήριξη του edge computing,
4. Βελτιώσεις στην υποστήριξη του IIoT,
5. Υποστήριξη για μη επίγεια δίκτυα (Non Terrestrial Networks - NTN) με χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAVs - Unmanned Aerial Vehicles). Αναφέρονται επίσης και ως μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα - UAS.



Εικόνα 8 Εξέλιξη της 5G αρχιτεκτονικής (Rel-15, Rel-16, Rel-17) [40].

2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Δικτύου 5G

Το δίκτυο 5^{ης} γενιάς θα αλλάξει τα δεδομένα στο χώρο του διαδικτύου αλλά και της ψηφιακής τεχνολογίας καθώς η βελτίωση που θα έχουν τα δίκτυα αυτά σε σχέση με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς όχι μόνο θα είναι τεράστια αλλά θα έχει αντίκτυπο σε διάφορες πτυχές της καθημερινής ζωής. Ως συνέπεια αναμένονται σημαντικά και πολλαπλά οφέλη όχι μόνο για την ανάπτυξη της επιχειρηματικότητας αλλά και την βελτίωση της ποιότητας της ζωής των χρηστών – πελατών του διαδικτύου.

Ο κύριος στόχος που έρχονται να ικανοποιήσουν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς είναι η υποστήριξη σε εφαρμογές και τομείς που χρησιμοποιούν οι καταναλωτές και οι επιχειρήσεις, παρέχοντας μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Οι σύγχρονες τεχνολογίες 5^{ης} γενιάς θα παρέχουν οφέλη στην κοινωνία, στην οικονομία, αλλά και την καθημερινότητα των πολιτών ενώ παρέχουν τα μέσα που απαιτούνται για την τεχνολογική πρόοδο. Τα τελευταία χρόνια η ζήτηση δεδομένων αυξάνεται εκθετικά, το οποίο σημαίνει ότι

αυξάνεται η ανάγκη για δημιουργία ενός νέου δικτύου (όπως αυτό της 5^{ης} γενιάς) ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις που προκύπτουν. Η πρόβλεψη για το μέλλον δείχνει ότι η ζήτηση για το δίκτυο θα αυξάνεται με την αύξηση των διασυνδεδεμένων συσκευών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things).

Μέσω του 5G θα μπορεί να επιτευχθεί η σύνδεση πολλών συσκευών με μειωμένο κόστος, όχι μόνο όσον αφορά την εγκατάσταση αλλά και την λειτουργία τους και με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η αρχιτεκτονική των δικτύων 5^{ης} γενιάς θα επηρεάσει διάφορες πτυχές των επικοινωνιών όπως:

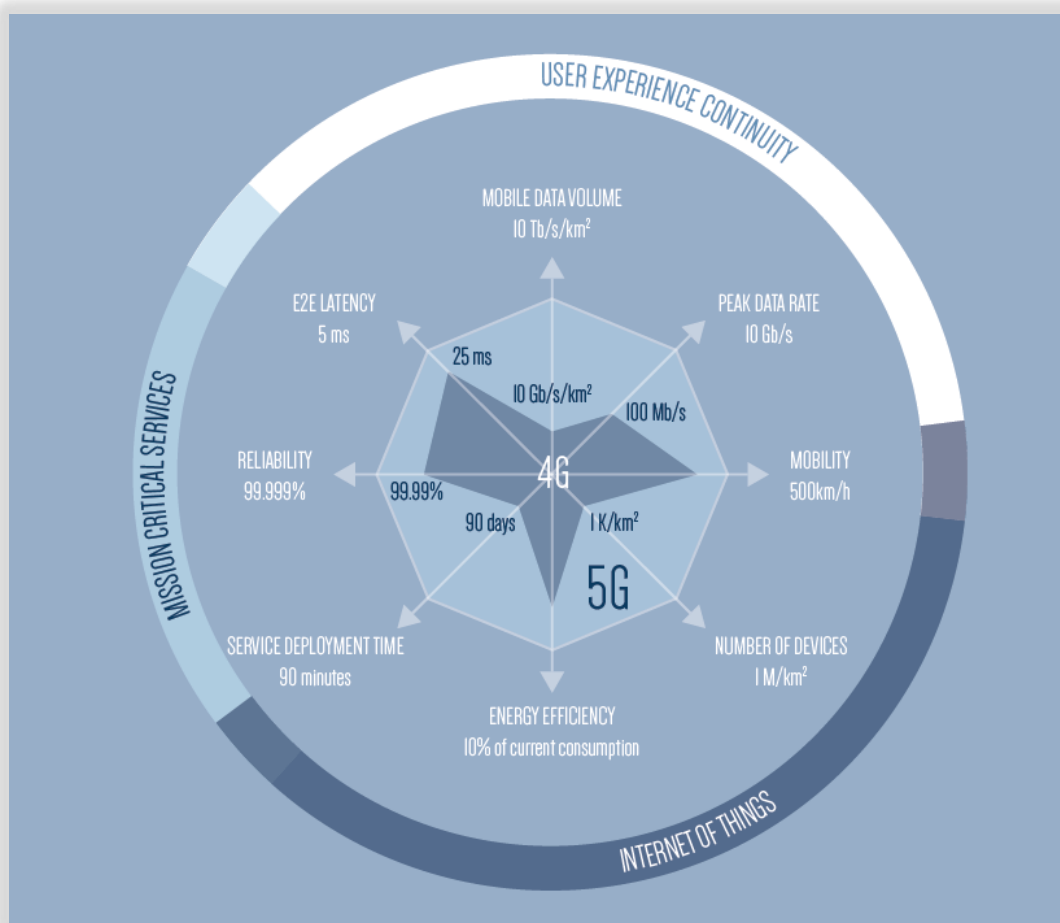
- το διαδίκτυο καθώς και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας,
- την φιλοξενία, ανάπτυξη και ενοποίηση υπηρεσιών και υποδομών.

Στην αρχιτεκτονική των δικτύων 5^{ης} γενιάς οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να καλύψουν τις ανάγκες για πυκνότερα κυψελωτά δίκτυα, υψηλότερη χωρητικότητα δικτύου και να υποστηρίξουν εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες (Virtual Network Functions -VNFs).

Με σκοπό να αντιμετωπιστεί το ευρύ φάσμα των προσφερόμενων και των αναμενόμενων μελλοντικών εφαρμογών, πρέπει να ικανοποιηθούν κάποιες απαιτήσεις. Στο πλαίσιο του **5G-PPP (5G Public Private Partnership)** το οποίο αποτελεί μια πρωτοβουλία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και της ευρωπαϊκής «βιομηχανίας τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ΤΠΕ)» καθορίστηκαν οι προδιαγραφές των δικτύων 5ης γενιάς τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων θα είναι τα εξής [65]:

- Τα δεδομένα που θα διακινούνται μέσω των δικτύων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να αυξηθούν. Υπολογίζεται ότι το ποσοστό της αύξησης θα κυμαίνεται στα 10TB/s/km².
- Αναμένεται να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία και εγκατάσταση κάποιας υπηρεσίας. Υπολογίζεται ότι ο χρόνος αυτός θα είναι λιγότερο από 90 λεπτά.
- Χαμηλότερο κόστος για την ανάπτυξη της υποδομής του δικτύου (Operating Expenses - OPEX).

- 90% χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για κάθε παρεχόμενη υπηρεσία σε σχέση με την κατανάλωση που υπήρχε το 2010.
- Αναμένεται αύξηση στον αριθμό των συσκευών που θα συνδέονται στο διαδίκτυο καθώς υπολογίζεται ότι θα υπάρχουν 1.000.000 συνδεδεμένες συσκευές ανά km².
- Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων αναμένεται να αυξηθεί από 1.000 Mbps που είναι σήμερα, σε ταχύτητες που θα φτάνουν τα 1-10 Gb/s.
- Διασφάλιση για πρόσβαση στο διαδίκτυο για όλους και μείωση στην καθυστέρηση του δικτύου σε 5ms έως 1ms.



Εικόνα 9 Διάγραμμα των κύριων τεχνολογικών στόχων των δικτύων 5G [25]

Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς θα δώσουν λύσεις στις υποδομές επικοινωνίας για την επόμενη δεκαετία. Μια σημαντική πρόκληση αποτελεί η εταιρική συνύπαρξη του ιδιωτικού και του δημόσιου τομέα 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP) ώστε η Ευρώπη

να είναι ηγέτιδα δύναμη στις νέες τεχνολογίες αλλά επιπλέον να δοθεί η δυνατότητα δημιουργίας νέων αγορών όπως οι υπηρεσίες ηλεκτρονικής υγείας, οι έξυπνες μεταφορές, οι έξυπνες πόλεις, η εκπαίδευση και η ψυχαγωγία. Επίσης, η ανάπτυξη του δικτύου 5ης γενιάς θα ενισχύσει την ευρωπαϊκή βιομηχανία στα πλαίσια του ανταγωνισμού σε παγκόσμιο επίπεδο [24].

Σε σχέση με τα προηγούμενα δίκτυα, τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς πρόκειται να τετραπλασιάσουν τη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων (σήμερα εξυπηρετούνται πάνω από 7 δις συσκευές) ώστε να προκύψει ένα δίκτυο πιο αξιόπιστο, πιο ασφαλές και χωρίς καθυστερήσεις. Το δίκτυο 5G, προβλέπεται ότι θα λειτουργεί σε υψηλές συχνότητες του ασύρματου φάσματος, στην περιοχή μεταξύ 30-300 GHz. Όμως η μεταφορά δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, περιορίζει την εμβέλεια λήψης σε σχέση με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Επιπλέον, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής συχνότητας δεν μπορούν να παρακάμπτουν εμπόδια όπως οι τοίχοι και τα κτίρια [24]. Επομένως, για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου 5^{ης} γενιάς και την παροχή της ίδιας κάλυψης με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς, θα πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των εγκατεστημένων κεραιών.



Εικόνα 10 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5^{ης} γενιάς [24]

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων 5^{ης} γενιάς είναι τα παρακάτω:

- **Πολύ υψηλή ρυθμαπόδοση (ταχύτητα μεταφοράς της πληροφορίας):** Οι ταχύτητες μεταφοράς της πληροφορίας αναμένεται να είναι από 10 έως 100 φορές υψηλότερες σε σχέση με αυτές των δικτύων των προηγούμενων γενεών (4^{ης} γενιάς και παλαιότερης). Έτσι οι ταχύτητες θα φτάνουν έως και 10Gbps σε κατάλληλες συνθήκες σε εσωτερικούς χώρους, τα 100Mbps-1Gbps σε αστικές περιοχές και τουλάχιστον τα 10Mbps σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές.
- **Χωρητικότητα:** Η αύξηση που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην κίνηση δεδομένων των δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι τεράστια, ενώ ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης αναμένεται ότι θα είναι εξίσου σημαντικός, στο προσεχές μέλλον. Οι συνδεδεμένες συσκευές εκτιμάται ότι θα αγγίξουν τα 7 τρις ενώ οι συνδεδεμένοι χρήστες τα 7 δις. Αντίστοιχα, η χωρητικότητα των δικτύων 5^{ης} γενιάς θα είναι 1000 φορές μεγαλύτερη, σε σχέση με τα δίκτυα της 4^{ης} γενιάς. Έτσι, οι δυνατότητες των δικτύων θα καλύπτουν την αύξηση της ζήτησης, με τέτοιο τρόπο που θα μπορεί να εφαρμοστεί οικονομικά αλλά και να είναι εφικτή ενεργειακά.
- **Σημαντικά μειωμένος χρόνος καθυστέρησης του δικτύου:** Το νέο σύστημα θα πρέπει να υποστηρίζει μικρότερη καθυστέρηση (end-to-end latency). Σαν πρώτος στόχος είναι να υποστηρίζει έως και 5 φορές μικρότερη καθυστέρηση δικτύου.
- **Ενεργειακή απόδοση δικτύου:** Ο στόχος για την ενεργειακή κατανάλωση των δικτύων 5^{ης} γενιάς είναι η μείωση κατά 90% σε σχέση με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς.
- **Ακόμα πιο αποδοτικές συσκευές:** Το 5G θα υποστηρίζει 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια μπαταρίας για τις συσκευές χαμηλής ισχύος, ενώ εάν ο αριθμός τους αυξηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, το κόστος της κάθε συσκευής θα πρέπει να μειωθεί για να παραμείνει το συνολικό κόστος διαχείρισιμο.

- **Δίκτυα πιο αξιόπιστα και άμεσα διαθέσιμα:** Το κριτήριο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς θα πρέπει το σύστημα να μπορεί να πετυχαίνει επικοινωνίες με εξαιρετική αξιοπιστία και διαθεσιμότητα (Ultra Reliable Communications - URC).

2.2.1 Απαιτήσεις και Προκλήσεις Σχεδίασης

Για να λειτουργήσει ένα δίκτυο 5^{ης} γενιάς θα πρέπει να υπάρξουν κάποιες αλλαγές στο τρέχον δίκτυο (4G). Ουσιαστικά γίνεται αναφορά για τους δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators KPIs) οι οποίοι ήδη αναλύθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, θα πρέπει να δοθούν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για τα χαρακτηριστικά σχεδίασης των δικτύων 5^{ης} γενιάς ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά αποτελέσματα και το δίκτυο να είναι ικανό να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του συστήματος:

- **QoS (Quality of Service):** Το δίκτυο 5^{ης} γενιάς σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει πολλές εμπορικές και κανονιστικές υπηρεσίες και ως εκ τούτου πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες του χρήστη ανεξάρτητα από το γεωγραφικό σημείο που αυτός βρίσκεται. Τα περισσότερα δίκτυα καλύπτουν τις υπηρεσίες που ζητούνται από το χρήστη, με την προϋπόθεση πάντα ότι ο χρήστης βρίσκεται κοντά σε ένα σταθμό βάσης. Δεν θα ισχύει αυτός ο περιορισμός με το νέο δίκτυο 5^{ης} γενιάς, το οποίο ωστόσο θα πρέπει να είναι ανθεκτικό και διαθέσιμο και να παρέχει κάλυψη με λογικό κόστος.
- **Manageability:** Στο σχεδιασμό για το νέο δίκτυο θα πρέπει να περιληφθεί ένα κέντρο απομακρυσμένου ελέγχου ολόκληρου του δικτύου ώστε να πετύχουμε να έχουμε την όσο το δυνατόν μικρότερη ανάμειξη του ανθρώπινου παράγοντα αλλά και τη μείωση του λειτουργικού κόστους [26].
- **Multi-tenancy:** Το 5G θα πρέπει να χρησιμοποιεί τους διαθέσιμους δικτυακούς πόρους και να εξυπηρετεί τους χρήστες ανεξάρτητα σε ποιόν ή ποιους παρόχους ανήκουν. Κατά συνέπεια θα πρέπει οι πάροχοι να συνεργάζονται μεταξύ τους για να εξασφαλίσουν ότι όλοι οι χρήστες θα έχουν θετική εμπειρία από την εξυπηρέτηση του συνολικού δικτύου [26].

- **Evolution:** Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου 5^{ης} γενιάς είναι το ότι θα μπορεί εύκολα να επεκταθεί. Δηλαδή κάθε νέα υπηρεσία ή πόρος θα πρέπει να μπορεί να εισαχθεί με ευκολία και με το ελάχιστο κόστος. Στόχος είναι η παρακίνηση όλων των παρόχων να συμμετέχουν στην κοινή αγορά ώστε να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας [26].
- **Density:** Προκειμένου να πετύχουμε την είσοδο όλων των διαθέσιμων συσκευών στο δίκτυο, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί όλο το διαθέσιμο φάσμα ενώ ίσως να απαιτείται και η επέκτασή του σε κάποιες περιοχές. Ωστόσο πρόβλημα δημιουργείται όταν μειώνεται το μέγεθος των κυψελών, οπότε το δίκτυο πυκνώνει και δημιουργούνται παρεμβολές. Ο έλεγχος των παρεμβολών γίνεται κυρίως με τη χρήση της τεχνολογίας CoMP (Coordinated Multi-Point transmission/reception) ή και με άλλους αλγορίθμους συντονισμού των μεταδόσεων που έχουν προταθεί [26].
- **Flexibility:** Οι διαφορετικές συσκευές, υπηρεσίες αλλά και τα δίκτυα πρόσβασης που θα υποστηρίζει το δίκτυο 5^{ης} γενιάς θα έχουν ως αποτέλεσμα να γίνουν δραστικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Κατά το σχεδιασμό του δικτύου, θα πρέπει να επιτυγχάνεται η ευελιξία του (flexibility) και να χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό νέες τεχνολογίες που βασίζονται την λογική της εικονικοποίησης (π.χ. Software Defined Networking - SDN, Network Function Virtualization - NFV και Cloud Computing) [26].
- **Resource management:** Στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, το επίπεδο ελέγχου θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα δυναμικής δέσμευσης πόρων (εύρος ζώνης, μνήμη, επεξεργαστική ισχύ κ.α.) αναλόγως την υπηρεσία και αναλόγως τη ζήτηση, ώστε να υπάρχει πλήρη εικόνα και βέλτιστος έλεγχος [26].
- **Compatibility:** Τέλος το δίκτυο πρέπει να μπορεί να υποστηρίζει και να είναι συμβατό με προηγούμενες δικτυακές τεχνολογίες ώστε να μην αποκλείει από αυτό χρήστες [26]. Όσον αφορά τα διάφορα δικτυακά υποσυστήματα θα πρέπει να συνεργάζονται ώστε να εξασφαλίζουν την προς τα πίσω

διαλειτουργικότητα (backward-compatibility). Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία εικονικοποίησης δικτύου (Network Virtualization), ώστε νεότερες και παλαιότερες τεχνολογικές γενιές να μπορούν να συνυπάρχουν απρόσκοπτα.

2.2.2 Αρχιτεκτονική του Δικτύου 5G

Όπως και με τις προηγούμενες γενιές, η 3GPP καθόρισε ένα νέο δίκτυο κορμού 5G, που αναφέρεται ως 5GC (5G Core) και μια νέα τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης που ονομάζεται 5G «New Radio» (NR). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, στο 5G είναι δυνατό να ενσωματωθούν στοιχεία διαφορετικών γενεών σε διαφορετικές διαμορφώσεις, και συγκεκριμένα [50] :

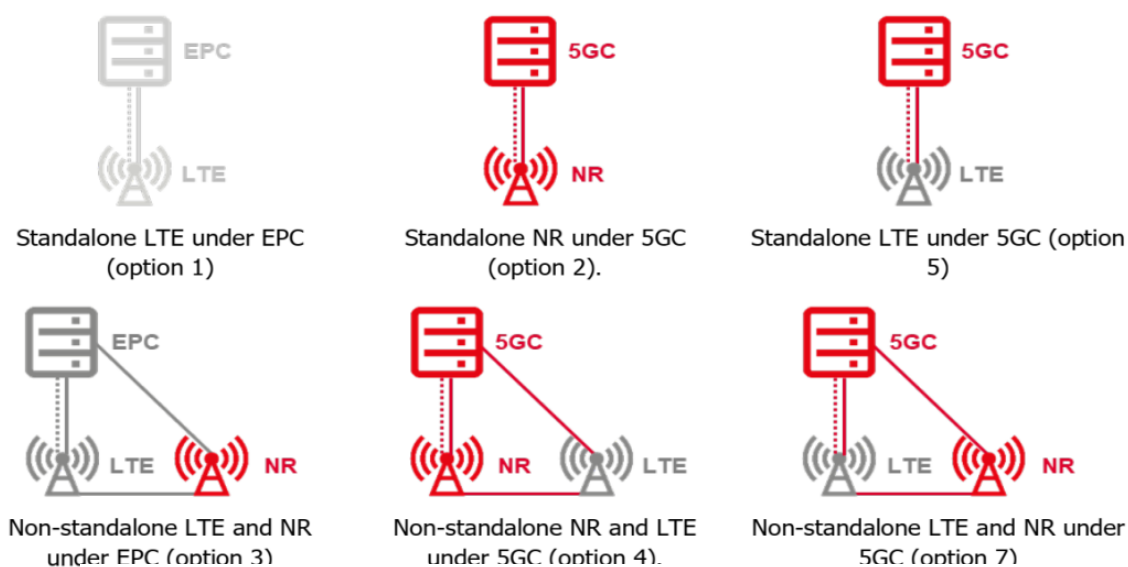
1. **Αυτόνομο (Standalone – SA)** χρησιμοποιώντας μόνο μία τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης και
2. **Μη αυτόνομο (Non-Standalone – NSA)** που συνδυάζει πολλαπλές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης.

Στο αυτόνομο σενάριο, το ασύρματο μέρος του 5G δικτύου και το δίκτυο κορμού λειτουργούν αυτόνομα. Η επιλογή αυτή αποτελεί μια απλή διαχειριστικά λύση εκ μέρους των παρόχων ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί κανονική διαπομπή (handover) μεταξύ των δικτύων 4G και 5G προκειμένου να επιτευχθεί συνέχεια της υπηρεσίας. Τρεις παραλλαγές του σεναρίου SA καθορίζονται στο 3GPP:

1. **Περίπτωση 1** χρησιμοποιώντας το δίκτυο κορμού EPC (Evolved Packet Core) και με πρόσβαση LTE eNB (δηλαδή έχοντας ως βάση με τα υπάρχοντα δίκτυα 4G LTE).
2. **Περίπτωση 2** με δίκτυο κορμού 5GC και ασύρματη πρόσβαση NR gNB και
3. **Περίπτωση 5** με δίκτυο κορμού 5GC και ασύρματη πρόσβαση LTE ng-eNB.

Στην περίπτωση του μη αυτόνομου σεναρίου (NSA), οι κυψέλες NR συνδυάζονται με κυψέλες LTE για την παροχή ασύρματης πρόσβασης και το δίκτυο κορμού μπορεί να είναι είτε EPC είτε 5GC σύμφωνα πάντα με το τί επιθυμεί ο πάροχος. Αυτή η επιλογή μπορεί να ακολουθηθεί από παρόχους που επιθυμούν να αξιοποιήσουν υπάρχουσες υλοποιήσεις 4G, συνδυάζοντας ραδιοπόρους LTE και NR με υπάρχον EPC ή / και που επιθυμούν την εφαρμογή ενός νέου κορμού 5GC για την παροχή των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας 5G [50]. Τρεις παραλλαγές του NSA ορίζονται με βάση τα προτυπα της 3GPP:

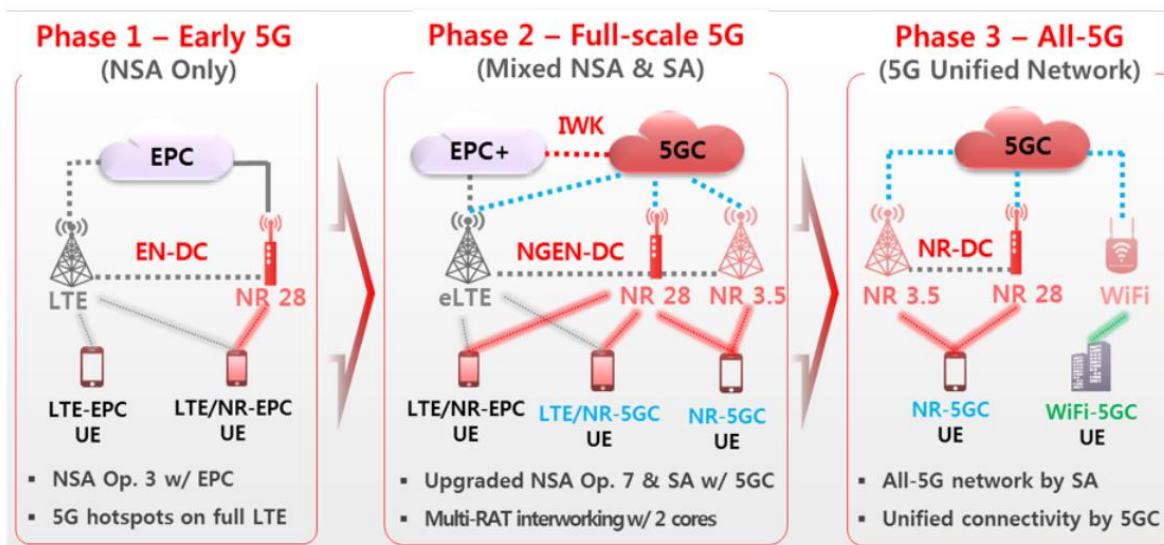
1. **Περίπτωση 3** με χρήση EPC και LTE eNB ως πρωτεύουσα δίκτυακή πρόσβαση και NR en-gNB ως δευτερεύουσα δίκτυακή πρόσβαση.
2. **Περίπτωση 4** με χρήση 5GC και NR gNB ως πρωτεύουσα δίκτυακή πρόσβαση και LTE ng-eNB ως δευτερεύουσα δίκτυακή πρόσβαση και
3. **Περίπτωση 7** με χρήση 5GC και LTE ng-eNB ως πρωτεύουσα δίκτυακή πρόσβαση και NR gNB ως δευτερεύουσα δίκτυακή πρόσβαση.



Εικόνα 11 Επισκόπηση των επιλογών υλοποίησης SA και NSA [50].

— **Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου 5G:** Η Error! Reference source not found. παρουσιάζει το σχέδιο εγκατάστασης ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G που αποτελείται από τρεις φάσεις ανάπτυξης [50]:

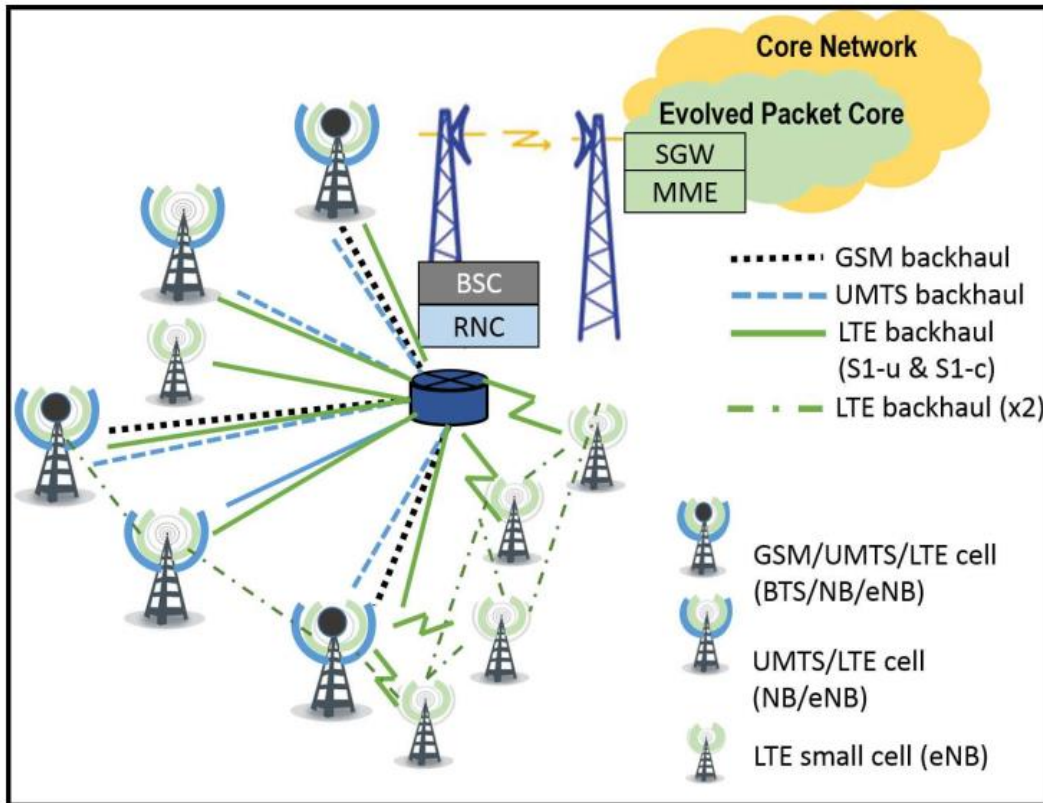
- **Φάση 1 (Early 5G):** Υλοποιείται το δίκτυο NSA (Περίπτωση 3) όπου το NR και οι κυψέλες LTE συνεργάζονται μέσω του EN-DC (E-UTRAN New Radio – Dual Connectivity). Οι κυψέλες NR χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της πρόσβασης στο διαδίκτυο σε περιοχές hot-spot.
- **Φάση 2 (Πλήρης κλίμακας 5G):** Το δίκτυο NSA (Περίπτωση 3) μπορεί να μετραπεί στο δίκτυο NSA (Περίπτωση 7) με βάση το NGEN-DC (NG-RAN E-UTRA-NR Dual Connectivity). Το LTE eNB αναβαθμίζεται για να υποστηρίξει το εξελιγμένο LTE (eLTE) του Release-15 και μετά. Είναι επίσης πιθανό ότι το δίκτυο SA (Περίπτωση 2) θα συνυπάρχει με το δίκτυο NSA ή θα αντικαθιστά το δίκτυο NSA..
- **Φάση 3 (All-5G):** Στην τελική φάση, θα λειτουργεί το ολοκληρωμένο δίκτυο 5G που βασίζεται στην SA (Περίπτωση 2) μαζί με αυτόνομο δίκτυο LTE. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να εκτελεστεί επαναπροσδιορισμός των ζωνών λειτουργείας του LTE. Επιπλέον, το 5GC μπορεί να ελέγχει τόσο το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας όσο και τα σημεία πρόσβασης WiFi.



Εικόνα 12 Φάσεις Υλοποίησης Δικτύου 5G [50].

2.2.3 Δίκτυα Κορμού 5G

- **Επίγεια Δίκτυα Κορμού:** Το backhaul (αλλιώς αναφέρεται ως back-net ή backbone ή δίκτυο κορμού), σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, είναι το δίκτυο που συνδέει τα eNBs με το κεντρικό δίκτυο και αποτελείται κυρίως από αποκλειστικές γραμμές οπτικών ίνων, χαλκού, ζεύξεις μικροκυμάτων και περιστασιακά δορυφορικές συνδέσεις. Στις δικτυακές γενιές πριν από το LTE, ο κόμβος του ασύρματου δικτυακού ελεγκτή (RNC) συχνά λειτουργούσε ως σημείο συγκέντρωσης (aggregation point), των συνδέσεων backhaul από όλους τους σταθμούς βάσης της περιοχής. Στο LTE, η αρχιτεκτονική του δεν χρησιμοποιεί κόμβο ασύρματου ελεγκτή, παρόλα αυτά, η συγκέντρωση των συνδέσεων backhaul παραμένει επιθυμητή είτε για ενσύρματες είτε για ασύρματες συνδέσεις. Όπως φαίνεται παρακάτω εικόνα ο ελεγκτής σταθμών βάσης του δικτύου GSM (BSC) και ο ασύρματος δικτυακός ελεγκτής (RNC) συχνά συμπίπτουν τοπικά και χρησιμοποιούνται ως σημεία συγκέντρωσης για τις backhaul συνδέσεις των σταθμών BTS, Node B και eNB [47].

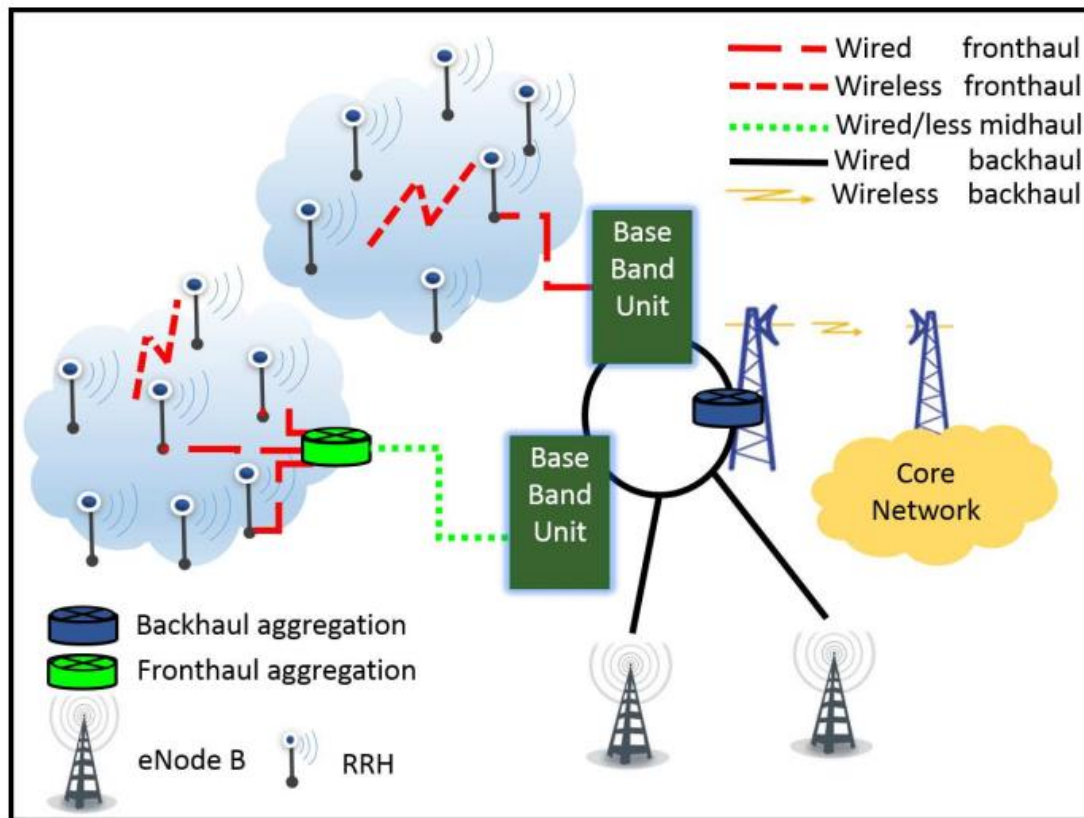


Εικόνα 13 Συνύπαρξη δικτύων GSM, UMTS και LTE [47].

Με την άνοδο της αρχιτεκτονικής C-RAN (Cloud-RAN), το 5G backhaul έχει εξελιχθεί σε ένα πιο περίπλοκο δίκτυο που αποτελείται από τα τμήματα:

- *fronthaul*,
- *midhaul* και
- *backhaul*.

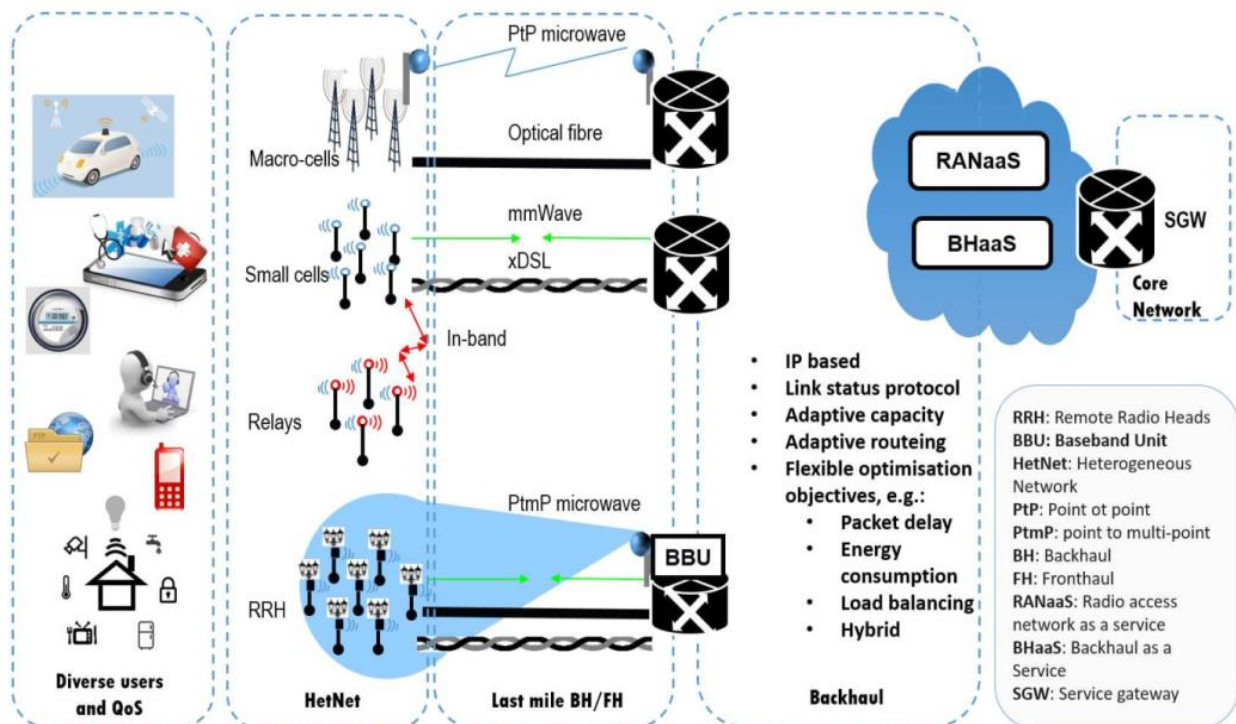
Το τμήμα backhaul που συνδέει την απομακρυσμένη κεφαλή ασύρματης πρόσβασης (Remote Radio Head - RRH) με τη μονάδα βασικής ζώνης (BBU) απευθείας ή σε ένα ενδιάμεσο σημείο συγκέντρωσης, ονομάζεται fronthaul [47]. Στην Εικόνα 14 βλέπουμε ένα παράδειγμα 5G δικτύου κινητής τηλεφωνίας που αποτελείται από fronthaul, midhaul και το παραδοσιακό backhaul. Το fronthaul αναφέρεται στις συνδέσεις μεταφοράς τελευταίων μιλίων που συνδέουν το RRH με το δίκτυο. Το midhaul είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του σημείου συγκέντρωσης των fronthaul και του δικτύου backhaul. Οι συνδέσεις backhaul είναι εκείνοι που συνδέουν τα BBU με το δίκτυο.



Εικόνα 14 Συνδέσεις fronthaul, midhaul και backhaul σε δίκτυο 5G [47].

Τα εύρη ζώνης που είναι μεγαλύτερα από 10 Gbps και ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος καθυστέρησης (σε εκατοντάδες μικροδευτερόλεπτα), καθιστούν τις οπτικές ίνες, ενδεχόμενως τη μόνη βιώσιμη λύση για το fronthaul. Ωστόσο, η τοποθέτηση ινών για τη σύνδεση όλων των προβλεπόμενων RRH στον κορμό σίγουρα είναι πολύ δαπανηρή ενώ είναι πιθανόν να είναι αδύνατη σε ορισμένες περιπτώσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη την τεράστια πρόκληση που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη των δικτύων 5G, έχει αναπτυχθεί η έρευνα για το 5G backhaul, με στόχο τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των απαιτήσεων που ορίζονται από το 5G RAN και των ρεαλιστικών δυνατοτήτων του δικτύου backhaul. Η εξέλιξη του παρόντος backhaul δικτύου (ζεύξεις μικροκυμάτων, οπτικών ινών, χαλκού κ.λπ.) για να ανταποκριθεί στις προσδοκίες 5G και να περιλαμβάνει νέες ασύρματες τεχνολογίες όπως in-band ζεύξεις (επαναχρησιμοποίηση του φάσματος ασύρματης πρόσβασης), χιλιοστομετρικά κύματα (mmWave), οπτικές επικοινωνίες ελευθέρου χώρου (Free Space Optics - FSO) και sub-6GHz (π.χ. WiMAX, WiFi) [47].



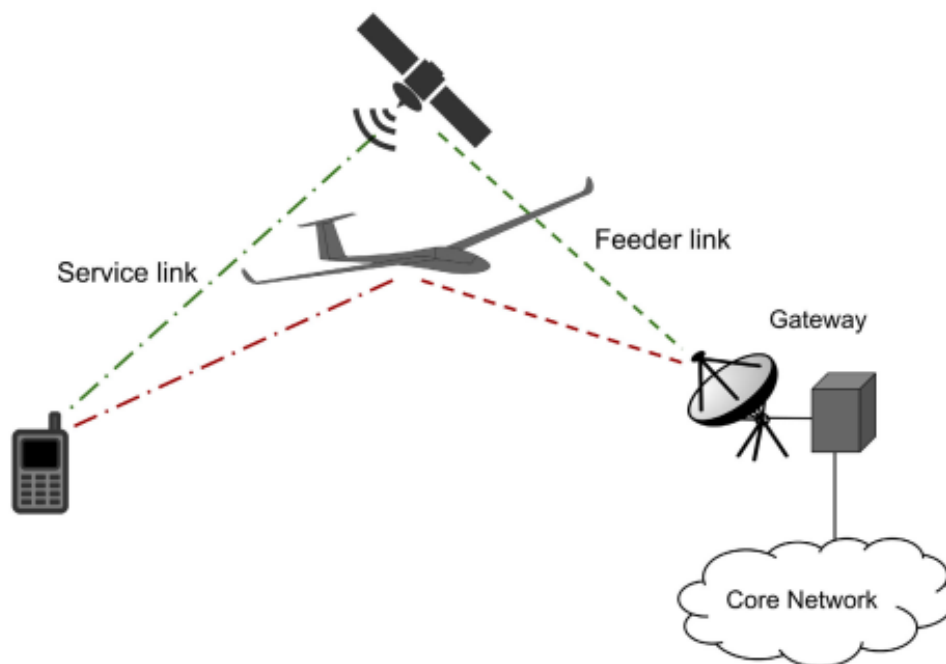
Εικόνα 15 Δίκτυο 5G με χρήση της λογικής RANaaS (RAN as a Service) και BHaaS (Backhaul as a Service) [47].

Στην Εικόνα 15 βλέπουμε ετερογενή δίκτυα ασύρματης τα οποία λειτουργούν κάτω από την λογική του συνδυασμού RANaaS (RAN as a Service) και BHaaS (Backhaul as a Service). Η συνεργασία BHaaS / RANaaS επιτρέπει δυναμική βελτιστοποίηση της λειτουργίας δικτύου. Το BHaaS επιβλέπει τη λειτουργία δικτύου backhaul και το προσαρμόζει βάσει πληροφοριών από το RANaaS, με προσαρμογή πινάκων δρομολόγησης, βελτιστοποίηση της κατανομής εύρους ζώνης για ροές κυκλοφορίας εξόδου / εισόδου, εξισορρόπηση φορτίου κ.λπ.

Η ενοποιημένη λύση για το 5G backhaul, μπορεί να παρέχεται ως υπηρεσία (Backhaul as a Service - BHaaS), η οποία αποτελεί μέρος ενός δικτύου καθορισμένου από λογισμικό, με κοινές δυνατότητες, RAN, αυτοοργανούμενου δικτύου (Self-Organizing Network – SON) και αποθήκευσης και το οποίο λειτουργεί μέσα σε ένα ετερογενές δικτυακό περιβάλλον φυσικών ενσύρματων και ασύρματων συνδέσεων. Η συνεργασία BHaaS / RANaaS εξασφαλίζει μια ολιστική ορατότητα από άκρο-σε-άκρο στο δίκτυο και επιτρέπει συντονισμένη βελτιστοποίηση και λειτουργία [47]. Το δεύτερο επίπεδο

βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται κατά κύριο λόγο σε λειτουργίες SON και καθοδηγεί στοιχεία του δικτύου (π.χ. δρομολογητές, πολυπλέκτες, σημεία συγκέντρωσης, πύλες δικτύου, κ.λπ.), βασίζεται σε πληροφορίες που προέρχονται από το BHaaS. Συνεπώς το δίκτυο backhaul είναι άμεσα ενήμερο για το RAN ενώ μπορεί και προσαρμόζεται δυναμικά σε οποιοσδήποτε αλλαγές στις συνθήκες του δικτύου [47].

— **Μη – Επίγεια Δίκτυα Κορμού (Non-Terrestrial Networks – NTN):** Στην ουσία αποτελούν το κλειδί για τη ολοκλήρωση της επίγειας κάλυψης δικτύου και της επέκτασης της παροχής υπηρεσιών σε απομακρυσμένες περιοχές της Γης. Όσον αφορά μερικές από τις πιο σημαντικές εφαρμογές υλοποίησης των NTN φαίνεται ότι στηρίζονται στη χρήση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO) και HAPS (High-Altitude Platform Systems) όπως μπαλόνια και αεροπλάνα. Οι γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Earth Orbit - GEO) έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να επιτύχουν πλήρη παγκόσμια κάλυψη με μόνο 3 δορυφόρους, αλλά είναι ακριβοί να αναπτυχθούν και εισάγουν μεγάλη καθυστέρηση RTT [40].



Εικόνα 16 Αρχιτεκτονική NTN δικτύου κορμού [40].

Η Εικόνα 16 δείχνει την NTN αρχιτεκτονική με σταθμούς βάσης τοποθετημένους σε δορυφόρους ή HAPS. Αποτελείται από μια ζεύξη υπηρεσίας (γνωστή ως σύνδεσμος

πρόσβασης) και μια ζεύξη τροφοδοσίας (ή αλλιώς ζεύξη κορμού). Η ζεύξη τροφοδοσίας τερματίζεται στην επίγεια πύλη δικτύου που είναι συνδεδεμένη στο 5GC [40]. Η πρόοδος από την ερευνητική κοινότητα μειώνει το χάσμα μεταξύ των απαιτήσεων 5G backhaul και των δυνατοτήτων backhaul. Η αξιοπιστία και η ασφάλεια του backhaul αποτελούν και αυτές κρίσιμα χαρακτηριστικά και είναι σίγουρα μια βασική ερευνητική κατεύθυνση που απαιτεί ακόμη ανάπτυξη. Συμπερασματικά οι πιο σημαντικές διαφορές είναι:

- η χωρητικότητα,
- ο συγχρονισμός και
- ο χρόνος καθυστέρησης.

Η μεγαλύτερη δυσκολία όσον αφορά τον συγχρονισμό έγκειται στο να μειωθεί ο χρόνος καθυστέρησης στα απαιτούμενα επίπεδα για τα C-RAN και CoMP, δηλαδή κάτω από 150 μ sec. Τελικώς μέχρι στιγμής μόνο οι οπτικές ίνες και το mmWave είναι τεχνολογίες ικανές ώστε να ανταποκριθούν σε απαιτήσεις για τόσο χαμηλή καθυστέρηση, αλλά η μελλοντική έρευνα αναμένεται να καταστήσει διαθέσιμες περισσότερες επιλογές [47].

2.3 Σύστημα Κινητής Επικοινωνίας Πέμπτης Γενιάς

Η ανάπτυξη του συστήματος κινητής επικοινωνίας Πέμπτης Γενιάς (γνωστή και ως 5G) βασίζεται σε ολοκληρωμένες έρευνες των τάσεων της αγοράς και των μελλοντικών απαιτήσεων των συστημάτων κινητής επικοινωνίας για τη δεκαετία του 2020. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια επισκόπηση των απαιτήσεων για το 5G και τις σχετικές τεχνολογίες που προέρχονται από διάφορες περιπτώσεις χρήσης [1], [3], [5].

- **Απαιτήσεις 5G: Υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, υψηλή χωρητικότητα, τεράστιος αριθμός συνδέσεων, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία.**

Οι περιπτώσεις χρήσης 5G και οι απαιτήσεις τους έχουν ήδη μελετηθεί από ερευνητικούς οργανισμούς, ακαδημαϊκά ινστιτούτα και εταιρείες τηλεπικοινωνιών και έχουν δημοσιευθεί σε αντίστοιχες εργασίες [6]. Όλες αυτές οι προσπάθειες συγκλίνουν σε ένα κοινό πλαίσιο περιπτώσεων χρήσης και απαιτήσεων δικτύου.

2.3.1 Υψηλή ταχύτητα, υψηλή χωρητικότητα.

Δεδομένου ότι η τεχνολογία LTE έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως παγκοσμίως και η αναβαθμισμένη έκδοση της (LTE-Advanced) αναπτύσσεται επίσης σε διάφορα έθνη ή περιοχές, τα επίπεδα ορισμένων απαιτήσεων όπως για υψηλές ταχύτητες και επικοινωνίες υψηλής χωρητικότητας, είναι προς το παρόν ικανοποιητικά. Ωστόσο, για τη δεκαετία του 2020, η περαιτέρω πρόοδος του συστήματος τηλεπικοινωνιών είναι αναπόφευκτη, λαμβάνοντας υπόψη την ουσιαστική διείσδυση των φορητών συσκευών, το εμπλουτισμένο περιεχόμενο βίντεο που παρέχεται από συστήματα βίντεο ανάλυσης 4K ή 8K κ.λπ. Η πρόοδος αυτή δεν θα είναι σημαντική μόνο για περιπτώσεις ψυχαγωγίας ή διαφήμισης, αλλά και για περιπτώσεις χρήσης όπως η ασφάλεια, η υγειονομική περίθαλψη και η εκπαίδευση.

Για αυτές τις περιπτώσεις χρήσης, προβλέπεται ότι η επικοινωνιακή κίνηση θα είναι πάνω από 1000 φορές μεγαλύτερη στη δεκαετία του 2020 από ό,τι ήταν στη δεκαετία του 2010 και τα συστήματα 5G θα πρέπει να διευρύνουν τη χωρητικότητά τους, προκειμένου να μπορέσουν να υποστηρίξουν επαρκώς την ανάλογη ζήτηση. Επιπλέον, θα χρειαστεί μετάδοση εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας έως 10Gbps (GigaBytes per Second) για να επιτρέψει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα εξαιρετικά υψηλού όγκου.

2.3.2 Μαζικές συνδέσεις συσκευών

Μέχρι τώρα, τα βασικά σενάρια που υποστηρίζονται από συστήματα επικοινωνίας ήταν, οι επικοινωνίες μεταξύ ανθρώπων ή οι επικοινωνίες μεταξύ ανθρώπων και αντικειμένων/μηχανών για τη χρήση ποικίλων υπηρεσιών. Ωστόσο, όπως έχει γίνει κατανοητό από τις αναδυόμενες επικοινωνίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) αργά ή γρήγορα ένας τεράστιος αριθμός αντικειμένων θα αρχίσει να επικοινωνεί μεταξύ τους.

Έτσι για παράδειγμα, αναπτύσσονται αισθητήρες που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στη γεωργία, τις κτηνοτροφικές βιομηχανίες ή την κατασκευαστική βιομηχανία. Την επόμενη δεκαετία, θα προχωρήσει η περαιτέρω διείσδυση αυτών των αισθητήρων με

στόχο να παρέχουν μεγαλύτερο όφελος για τον χρήστη και υψηλότερη ασφάλεια με μειωμένο κόστος. Για τις περιπτώσεις χρήσης σε συστήματα μεταφοράς, όπως αυτοκίνητα ή τρένα, η προσδοκία της επιτυχίας των συστημάτων κινητής επικοινωνίας αυξάνεται ολοένα και περισσότερο.

Μεταξύ αυτών των περιπτώσεων χρήσης, δίνεται έμφαση κυρίως στην υποστήριξη της οδήγησης αυτοκινήτου, συμπεριλαμβανομένης της αυτόνομης οδήγησης, της ψυχαγωγίας στο αυτοκίνητο ή της βελτίωσης της ασφάλειας. Αναμένεται επίσης ότι θα χρησιμοποιηθούν ευρέως οι εγκαταστάσεις τηλεχειρισμού για ηλεκτρικές συσκευές ή εξοπλισμό σε σπίτια ή γραφεία. Θα διατίθενται ποικίλες φορετές (wearable) συσκευές και θα παρέχεται βοήθεια σε διάφορα είδη ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Προς το παρόν, ένα από τα τυπικά παραδείγματα θα ήταν τα γυαλιά με αισθητήρες, εν αντιθέσει με τις απτικές υπηρεσίες επικοινωνίας, οι οποίες θα γίνουν πραγματικότητα στο εγγύς μέλλον. Ως άλλο παράδειγμα, μπορεί να είναι αισθητήρες ενσωματωμένοι στα ρούχα για λόγους υγειονομικής περίθαλψης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις διάφορες περιπτώσεις χρήσης, τα δικτυακά συστήματα τη δεκαετία του 2020 θα πρέπει να υποστηρίζουν τεράστιο αριθμό συσκευών, ο οποίος θα μπορούσε να υπερδιπλασιαστεί συγκριτικά με τον αριθμό των τωρινών συστημάτων.

2.3.3 Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία

Το LTE ή το LTE Advanced έχει επιτύχει μικρή καθυστέρηση μετάδοσης της τάξης των 10 χιλιοστών του δευτερολέπτου. Ωστόσο, θα απαιτηθεί πιο δραστική μείωση της καθυστέρησης για ορισμένες περιπτώσεις χρήσης, όπως για παράδειγμα στις απτικές επικοινωνίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρήσης, θα απαιτηθεί τόσο χαμηλή καθυστέρηση όσο και υψηλά αξιόπιστη επικοινωνία. Τέτοια παραδείγματα είναι η περίπτωση επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων για την αποφυγή ατυχημάτων ή τηλεχειρισμού ρομπότ. Κατά συνέπεια, για το τμήμα ασύρματης πρόσβασης θα χρειαστεί καθυστέρηση από άκρο σε άκρο λίγων χιλιοστών του δευτερολέπτου ή λιγότερο από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου. Για την αξιοπιστία της επικοινωνίας, ένας ιδανικός στόχος θα ήταν το ποσοστό επιτυχίας να φτάσει σχεδόν στο απόλυτο, δηλαδή σε 99,999 τοις εκατό. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η ανάπτυξη δικτύων επικοινωνίας που παρέχουν τόσο εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση σε κάθε περίπτωση χρήσης θα είναι

τεχνικά εφικτή, αλλά δεν θα μπορούσε να είναι ρεαλιστική λόγω του απαιτούμενου κόστους. Συνεπώς, συνιστάται ιδιαίτερα η προσεκτική εξέταση για την επιλογή κατάλληλων περιπτώσεων χρήσης για αυτές τις περίπλοκες απαιτήσεις.

2.3.4 Εξοικονόμηση ενέργειας, Εξοικονόμηση κόστους

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι η κορυφαία προτεραιότητα σε κάθε βιομηχανία ή κοινωνία τα τελευταία χρόνια και η βιομηχανία της Τεχνολογίας Πληροφοριών και Επικοινωνίας (Information and Communications Technology – ICT) δεν αποτελεί εξαίρεση. Το μερίδιο κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων ICT αυξάνεται σε ολόκληρη τη βιομηχανία και επομένως δε θα πρέπει να υποτιμηθεί. Η εξοικονόμηση ενέργειας θα έχει επίσης ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση κόστους. Η εξοικονόμηση κόστους ήταν θεμελιώδη απαίτηση και τέθηκε ως ποιοτικός στόχος σε κάθε προηγούμενη γενιά συστημάτων κινητής επικοινωνίας και θα είναι επίσης σημαντική για το 5G. Λαμβάνοντας υπόψη τον κορεσμό των επιχειρηματικών εσόδων των τηλεπικοινωνιακών εταιρειών, η επιπλέον εξοικονόμηση κόστους θεωρείται ο θεμελιώδης παράγοντας της ανάπτυξης 5G. Προς το παρόν, δεν έχουν ακόμη οριστικοποιηθεί οι ορισμοί, οι απαιτήσεις ή οι μετρήσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας και την εξοικονόμηση κόστους. Ακόμα κι έτσι όμως, θεωρούνται πολύ σημαντικές απαιτήσεις για το 5G.

2.3.5 Ασύρματη τεχνολογία 5G: Αξιοποίηση ζωνών υψηλότερης συχνότητας και τεχνολογιών MIMO με συστοιχίες μεγάλου αριθμού κεραιοστοιχείων

Παρακάτω, παρουσιάζονται μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης που αναπτύσσονται παγκοσμίως, δηλαδή η χρήση ζωνών υψηλότερων συχνοτήτων στις κινητές επικοινωνίες και οι τεχνολογίες MIMO με συστοιχίες μεγάλου αριθμού κεραιοστοιχείων.

- **Χρήση ζωνών υψηλής συχνότητας**

Θα είναι δύσκολο να επιτευχθούν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις 5G για υψηλή ταχύτητα μετάδοσης και υψηλή χωρητικότητα εάν δοθεί βάση μόνο στην βελτίωση της

υπάρχουσας τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί η ανάπτυξη μικρών κυψελών και να χρησιμοποιηθεί ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων. Από αυτή την άποψη, θα ήταν ζωτικής σημασίας το εύρος ζώνης συχνοτήτων αρκετών εκατοντάδων MHz ή περισσότερο, για επίτευξη ταχυτήτων μετάδοσης 10Gbps.

Ωστόσο, θα πρέπει επίσης να αναφερθεί το γεγονός ότι η εύρεση πρόσθετου νέου φάσματος μερικών εκατοντάδων MHz ή περισσότερων για τα συστήματα 5G από τις υπάρχουσες ζώνες συχνοτήτων είναι σχεδόν αδύνατη, καθώς χρησιμοποιούνται από υπάρχοντα ραδιοσυστήματα ή υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων κινητής επικοινωνίας, σε ολόκληρο τον πλανήτη. Ως αποτέλεσμα, η προσδοκία για τη χρήση υψηλότερων ζωνών του φάσματος συχνοτήτων στην περιοχή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων χιλιοστομετρικού μήκους κύματος, γίνεται πολύ υψηλότερη.

Συγκεκριμένα, γίνονται πολλές έρευνες με φάσμα συχνοτήτων έως 100GHz ως πιθανές υποψήφιες ζώνες για 5G. Μέχρι τώρα, είχε ειπωθεί ότι η χρήση των ζωνών υψηλότερης συχνότητας για κινητές επικοινωνίες, αποτελεί μεγάλη πρόκληση λόγω των ιδιοτήτων διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων. Δηλαδή υπάρχει σχετικά μεγάλη απώλεια διάδοσης στον αέρα και συνεπώς θα πρέπει να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες για να αντιμετωπιστούν αυτά τα μειονεκτήματα. Μια από τις αναμενόμενες τεχνολογίες στην οποία δίνεται η μεγαλύτερη προσοχή από την βιομηχανία, είναι η χρήση της τεχνολογίας MIMO με συστοιχίες μεγάλου αριθμού κεραιοστοιχείων. Προκειμένου να αναπτυχθούν τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τις ζώνες υψηλότερου φάσματος για το 5G, είναι απαραίτητη μια ολοκληρωμένη κατανόηση του περιβάλλοντος μετάδοσης σε υψηλότερες συχνότητες. Επιπλέον, ρόλο κλειδί έχουν τα μοντέλα διάδοσης που εφαρμόζονται σε εργαλεία προσομοίωσης για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.

- **Τεχνολογίες κεραίας τεραστίων στοιχείων**

Η τεχνολογία MIMO με συστοιχίες μεγάλου αριθμού κεραιοστοιχείων θα κάνει δυνατή την δυναμική διαμόρφωσης δέσμης προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η δέσμη αυτή είναι σε θέση να αντισταθμίσει την απώλεια διάδοσης σε υψηλότερες συχνότητες και να εξασφαλίσει μια περιοχή κάλυψης αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Δύο τύποι τεχνολογιών

πολλαπλών κεραιών έχουν εφαρμοστεί στο LTE και στο LTE-Advanced και θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση για την συστήματα MIMO μεγάλης κλίμακας στο 5G.

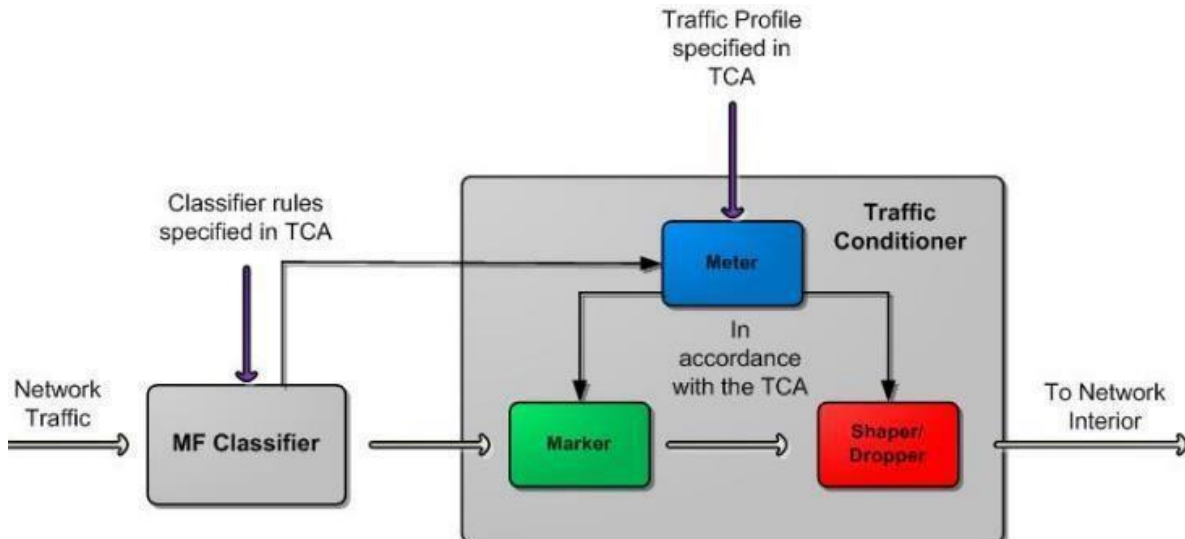
Αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν πολλαπλές διαδρομές διάδοσης / λήψης μεταξύ ενός κινητού και ενός σταθμού βάσης. Η μία είναι η μέθοδος πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου ενός χρήστη (Single-User multiple-input and multiple-output - MIMO - SU-MIMO) και η άλλη είναι η μέθοδος πολλαπλών χρηστών MIMO (Multi-user MIMO - MU-MIMO). Στο 5G προγραμματίζεται η χρήση μαζικού αριθμού κεραιών που επιτρέπει αυξημένη δυνατότητα πολυπλεξίας και στοχεύει σε υψηλότερο ρυθμό δεδομένων με βελτιωμένη χωρητικότητα συστήματος. Η ονομασία αυτής της τεχνολογίας είναι MIMO μεγάλης κλίμακας (Massive-MIMO). Προς το παρόν, στα υπάρχοντα συστήματα έχει εφαρμοστεί ο σχηματισμός οριζόντιας δέσμης, ωστόσο, οι τυποποιήσεις της 3GPP λειτουργούν τόσο για οριζόντια όσο και για κάθετα σχήματα δέσμης.

Όπως αναφέρθηκε, το 5G αναμένεται να χρησιμοποιήσει ηλεκτρομαγνητικά κύματα χιλιοστομετρικού μήκους κύματος κάτι το οποίο φέρει βελτιώσεις και στο σύστημα εκπομπής/λήψης. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φυσικά μεγέθη των στοιχείων της κεραίας καθώς και το εύρος των στοιχείων, είναι ανάλογα με το μήκος κύματος των ραδιοσημάτων, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα. Εν τέλει, αυτό θα αποφέρει ως αποτέλεσμα συμπαγείς κεραίες μικρού μεγέθους. Κατά συνέπεια, ακόμη και όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός κεραιοστοιχείων, το μέγεθος της συστοιχίας θα είναι μικρό. Εκτός από αυτές τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, πολλές σημαντικές και καινούργιες τεχνολογίες, όπως οι μέθοδοι επεξεργασίας του ραδιοσήματος, η βελτιστοποιημένη δομή δικτύου (η οποία παρέχει εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης) καθώς και άλλες οι οποίες βρίσκονται εν εξελίξει, προτείνονται στα τεχνικά πρότυπα για το 5G [1].

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Κλασικοί Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης

Στα δίκτυα μεταγωγής πακέτου σημαντικό ρόλο παίζει η ύπαρξη διαφόρων μηχανισμών διαχείρισης. Οι μηχανισμοί αυτοί εφαρμόζονται στα πακέτα δεδομένων προκειμένου να προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα εξυπηρέτησης (QoS) και διακρίνονται στους:

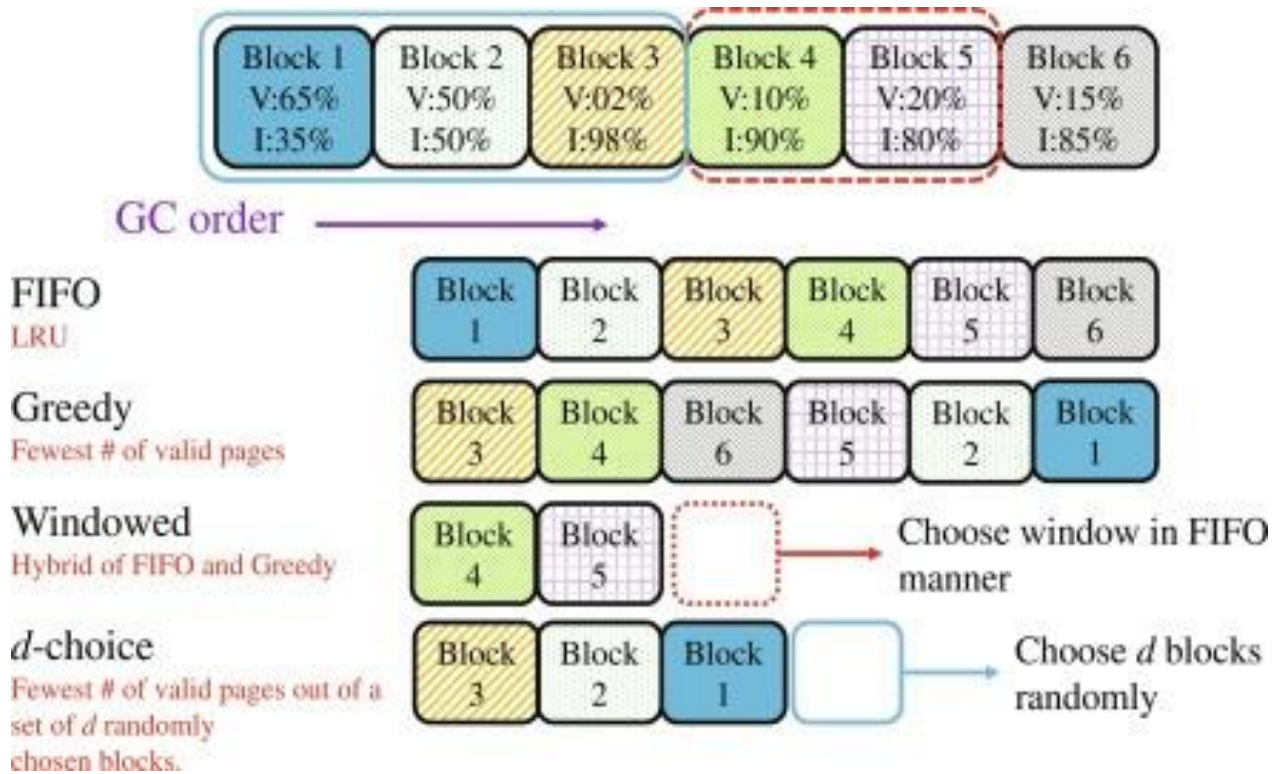
- **Ταξινόμηση (classification)** – είναι εκείνος ο μηχανισμός ο οποίος διαχωρίζει τα πακέτα εισόδου ενός δρομολογητή σε μεμονωμένες ροές, έτσι ώστε κάθε ροή να μπορεί να έχει και την εξυπηρέτηση που απαιτείται.
- **Μαρκάρισμα (marking)** – ο μηχανισμός ευθύνεται για το μαρκάρισμα των πακέτων σύμφωνα με κάποια κριτήρια τα οποία μπορεί να προκύπτουν είτε από την κατηγορία - κλάση στην οποία κατατάσσονται μετά την ταξινόμησή τους, είτε από την μέτρηση των χαρακτηριστικών κίνησης τα οποία παρουσιάζουν.
- **Μέτρηση (metering)** - ο μετρητής αρχικά εξετάζει το προφίλ της κίνησης για κάθε κατηγορία πακέτων και στη συνέχεια το συγκρίνει με κάποια συμφωνηθέντα χαρακτηριστικά.
- **Χρονοδρομολόγηση (Scheduling):** Στον μηχανισμό χρονοδρομολόγησης επιλέγονται τα πακέτα προς εξυπηρέτηση και πραγματοποιείται η τοποθέτηση τους στις κατάλληλες ουρές, χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες από τη διαδικασία της ταξινόμησης.



Εικόνα 17 Λειτουργική Δομή του Δρομολογητή Διαδικτύου [66]

3.1 Χρονοδρομολόγηση (Scheduling)

Οι μηχανισμοί χρονοδρομολόγησης πακέτων χρησιμοποιούνται προκειμένου τα πακέτα δεδομένων να έχουν συγκεκριμένη ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS). Βασικός σκοπός της χρονοδρομολόγησης είναι η επιλογή του επόμενου πακέτου που θα μεταδοθεί, και ο καθορισμός του χρόνου που θα μεταδοθεί. Με άλλα λόγια, η χρονοδρομολόγηση καθορίζει σε πόσο χρόνο θα προχωρήσουν τα πακέτα στην έξοδο μιας ουράς.



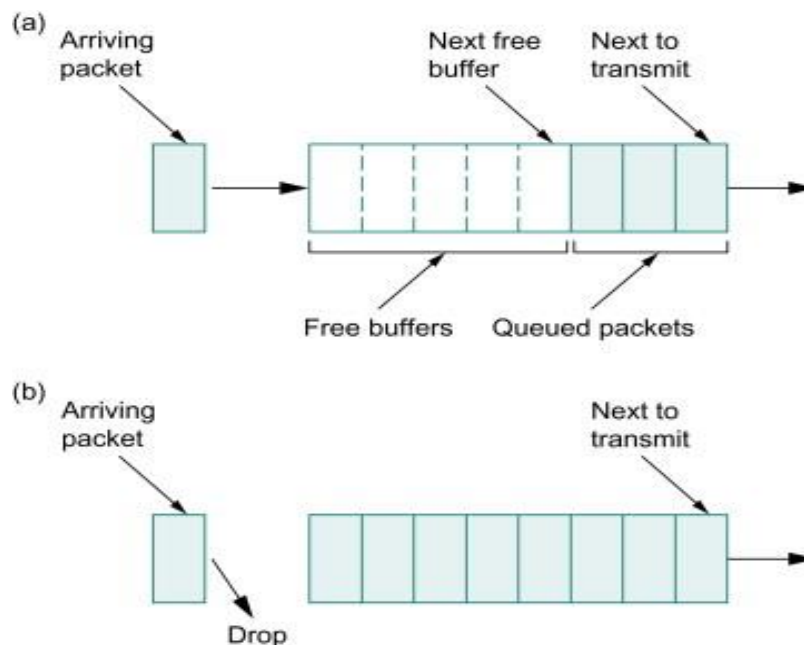
Εικόνα 18 Δρομολογητής για κάθε γραμμή εξόδου [82]

Στους πιο σύγχρονους δρομολογητές για κάθε γραμμή εξόδου ο χρονοδρομολογητής συσχετίζεται με περισσότερες από μία ουρές και διαμοιράζει τη χρήση της γραμμής ανάμεσα σε αυτές (Εικόνα 18). Ωστόσο, επειδή το κάθε πακέτο τοποθετείται σε κάποια συγκεκριμένη ουρά ανάλογα με την κλάση στην οποία ανήκει, ο χρονοδρομολογητής επιβάλλει τη σχετική προτεραιότητα, και την κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των διαφόρων κλάσεων κίνησης που ισχύουν στο δίκτυο.

Περαιτέρω, η λειτουργία του χρονοδρομολογητή εξασφαλίζει ότι σε κάθε ροή θα υπάρχει ένα επαρκές εύρος ζώνης, εγγυάται μία μέγιστη καθυστέρηση (delay) για κάθε πακέτο αλλά καθώς και στο ότι η απόκλιση στην καθυστέρηση εξυπηρέτησης δύο πακέτων (jitter) δεν θα ξεπερνά κάποιο όριο. Επιπλέον φροντίζει για τη δίκαιη κατανομή του πλεονάζοντος εύρους ζώνης μεταξύ των ενεργών ροών, όταν δεν υπάρχει συμφόρηση. Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένοι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους χρονοδρομολόγησης.

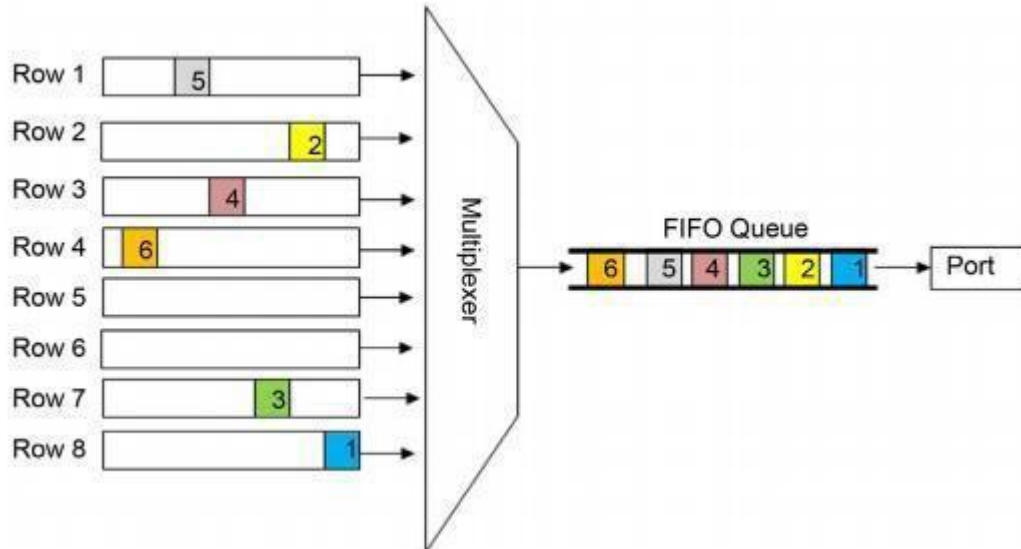
3.1.1 First-in, First-out (FIFO) Queueing

Ένας από τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς χρονοδρομολόγησης είναι η τεχνική FIFO. Η διαδικασία που ακολουθεί είναι η εξής: «Το πρώτο πακέτο που φτάνει στον δρομολογητή είναι το πρώτο πακέτο που θα μεταδοθεί» όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Δεδομένου ότι η ποσότητα του χώρου αποθήκευσης σε κάθε δρομολογητή είναι πεπερασμένη, εάν φτάσει ένα πακέτο και η ουρά (χώρος αποθήκευσης) είναι γεμάτη, τότε ο δρομολογητής απορρίπτει αυτό το πακέτο. Αυτό γίνεται ανεξάρτητα από το πόσο σημαντικό είναι το πακέτο ή ποια ροή ανήκει στο πακέτο [60].



Εικόνα 19 Χρονοδρομολόγηση FIFO [60]

Στον αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης First-in, First-out (FIFO) όλα τα πακέτα υπόκεινται στην ίδια μεταχείριση αφού τοποθετούνται σε μια απλή ουρά και στη συνέχεια εξυπηρετούνται με την ίδια σειρά με την οποία τοποθετήθηκαν στην ουρά όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 20 Τεχνική FIFO [57]

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης FIFO έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Η συμπεριφορά του είναι προβλέψιμη, δηλαδή τα πακέτα δεν αναδιατάσσονται και η μέγιστη καθυστέρηση καθορίζεται από το μέγιστο μήκος της ουράς. Έτσι τα πακέτα εξυπηρετούνται με βάση την ώρα της άφιξής τους.
- Όσο το μήκος της ουράς παραμένει μικρό, ο αλγόριθμος FIFO παρέχει ορθή χρήση των πόρων του δικτύου χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την καθυστέρηση που εισάγεται από κάθε κόμβο.

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης FIFO παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Μεταχειρίζεται όλες τις ροές ισοδύναμα, με αποτέλεσμα η μέση καθυστέρηση στην ουρά για όλες τις ροές να αυξάνεται όσο αυξάνεται η συμφόρηση. Είναι πιθανό ο αλγόριθμος FIFO να οδηγήσει σε αυξημένη καθυστέρηση και jitter κάτι που δημιουργεί σημαντικά προβλήματα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.
- Μεταβαλλόμενες ροές που έχουν εκρηκτική (bursty) κίνηση θα μονοπωλήσουν τη χωρητικότητα μιας ουράς FIFO, ενώ οι υπόλοιπες ροές δεν μπορούν να

εξυπηρετηθούν μέχρι η ροή αυτή να εξυπηρετηθεί πλήρως. Αυτό θα οδηγήσει σε αυξημένες καθυστερήσεις, jitter και απώλειες πακέτων.

Ο μηχανισμός χρονοδρομολόγησης FIFO χρησιμοποιείται πάρα πολύ και ως επι το πλείστον, λόγω του γεγονότος ότι είναι πολύ απλός, αλλά και επειδή η επίδοσή του είναι ανεκτή για ροές βέλτιστης προσπάθειας (best effort). Ωστόσο, για να παρέχεται ποιότητα εξυπηρέτησης απαιτείται η εισαγωγή πιο εξελιγμένων αλγόριθμων.

3.1.2 Priority Queueing (PQ)

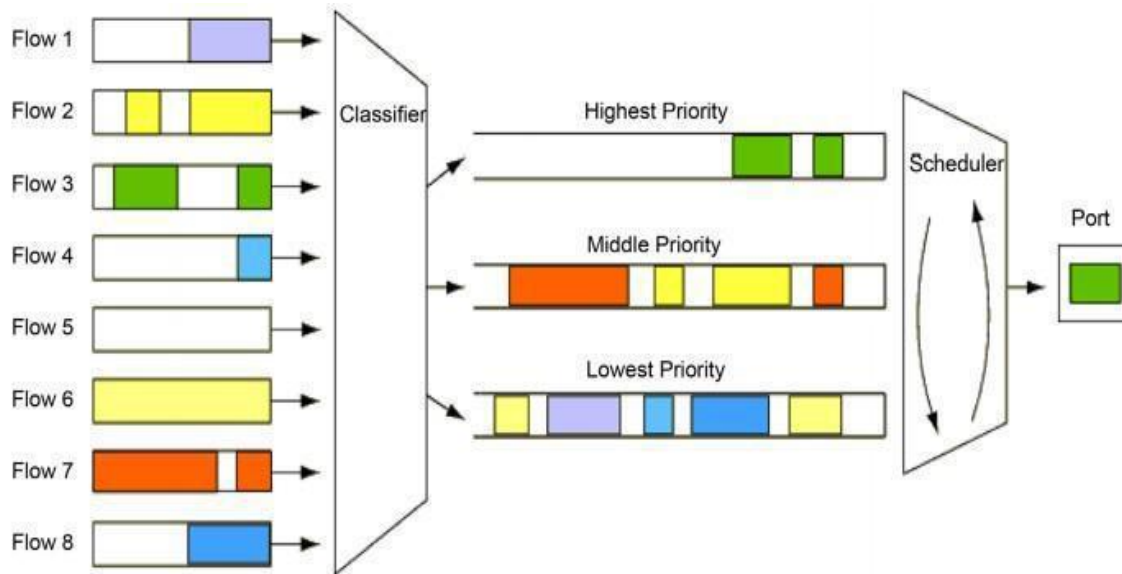
Ο μηχανισμός χρονοδρομολόγησης Priority Queueing - PQ (διαχείριση ουρών με προτεραιότητες) [60] αποτελεί μια εξίσου απλή τεχνική χρονοδρομολόγησης, όπως και αυτή της FIFO, και δημιουργήθηκε προκειμένου να δοθούν εγγυήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης σε κάποιες κατηγορίες ροών. Ο αλγόριθμος αυτός έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα που παρουσίαζε ο μηχανισμός χρονοδρομολόγησης FIFO, ο οποίος δεν προσφέρει καμία προτεραιότητα σε οποιαδήποτε ροή δεδομένων ή οποιαδήποτε κατηγορία. Αντίθετα στον PQ η κίνηση ταξινομείται σε διακριτές ουρές (με βάση διάφορα χαρακτηριστικά των ροών) με ανάθεση σε κάθε μια, μιας διαφορετικής τιμής προτεραιότητας.

Οι θέσεις που μπορούν να λάβουν τα πακέτα στις τέσσερις ουρές είναι οι εξής τέσσερις:

- υψηλή,
- μεσαία,
- κανονική ή
- χαμηλή

και επιτυγχάνεται ανάλογα με την προτεραιότητα που έχει εκχωρηθεί σε κάθε πακέτο.

Ο χρονοδρομολογητής ελέγχει αν υπάρχουν πακέτα στην ουρά υψηλής προτεραιότητας και για όσο διαρκεί αυτό, ο χρονοδρομολογητής εξυπηρετεί πακέτα μόνο από αυτή την ουρά. Όταν αυτή αδειάσει, τότε ελέγχει αν υπάρχουν πακέτα στις ουρές χαμηλότερης προτεραιότητας κ.ο.κ. και εξυπηρετεί πακέτα από αυτές τις ουρές. Η εξυπηρέτηση των πακέτων σε κάθε μια ουρά γίνεται με αλγόριθμο FIFO.



Εικόνα 21 Μηχανισμός Χρονοδρομολόγησης Priority Queueing (PQ) [60]

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης PQ έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Επιτυγχάνει εξαιρετική ποιότητα εξυπηρέτησης καθώς το δίκτυο επιβαρύνεται με πολύ μικρό υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με άλλους αλγορίθμους [60].
- Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος θέτει προτεραιότητες, έτσι ώστε οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου να έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες υπηρεσίες, ιδιαίτερα σε περιόδους συμφόρησης.

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης Priority Queueing - PQ παρουσιάζει τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Αν οι ροές υψηλής προτεραιότητας δεν ελέγχονται, τότε οι ροές χαμηλότερης προτεραιότητας πιθανόν να υποστούν υψηλές καθυστερήσεις. Η καθυστέρηση μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα με ποσοστό απόρριψης 100%.
- Μία ροή υψηλής προτεραιότητας η οποία συμπεριφέρεται εκτός των συμφωνηθέντων ορίων πιθανόν να αυξήσει σημαντικά την καθυστέρηση για τις υπόλοιπες ροές της ίδιας κατηγορίας.

3.1.3 Fair Queueing (FQ)

Ο μηχανισμός χρονοδρομολόγησης Fair Queueing (FQ) αποσκοπεί στον έλεγχο της συμφόρησης στα δίκτυα δεδομένων [38]. Ο αλγόριθμος αυτός σχεδιάστηκε για να εξασφαλίσει ότι κάθε ροή έχει δίκαιη πρόσβαση στους πόρους του δικτύου, και να εμποδίσει μια εκρηκτική (bursty) ροή από το να καταναλώνει περισσότερο εύρος ζώνης από αυτό που της αναλογεί. Σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους αλγορίθμων (FIFO, PQ) ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα.

Τα πακέτα κατηγοριοποιούνται σε ροές και οι δρομολογητές διατηρούν ξεχωριστές ουρές για τα πακέτα από κάθε μεμονωμένη πηγή [38]. Το σημαντικότερο όφελος του αλγορίθμου FQ είναι ότι μια εκρηκτική ή κακώς συμπεριφερόμενη ροή που χρησιμοποιεί περισσότερο από το συμφωνημένο εύρος ζώνης, δεν υποβαθμίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης που λαμβάνουν οι υπόλοιπες ροές, αφού κάθε ροή είναι απομονωμένη στην δική της ουρά. Αν μια ροή προσπαθεί να καταναλώσει παραπάνω εύρος ζώνης από αυτό που της αναλογεί, τότε επηρεάζεται μόνο η αντίστοιχη ουρά, έτσι ώστε να μην υπάρχει καμία επίδραση στην επίδοση των υπόλοιπων ροών [38].

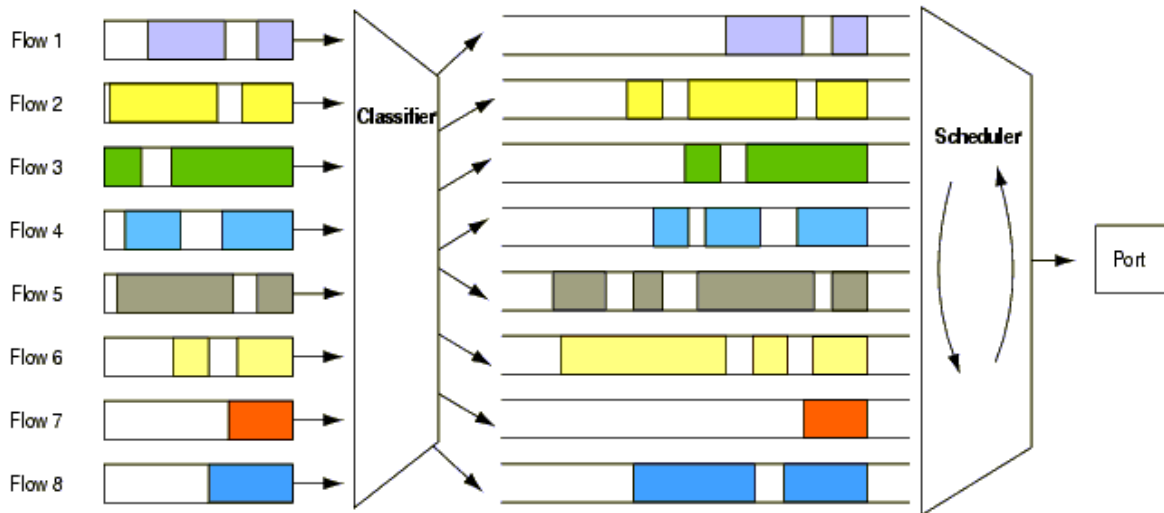
Με βάση τον αλγόριθμο Fair Queueing, η κατανομή είναι δίκαιη εφόσον:

- Κανένας από τους χρήστες δεν εισπράττει περισσότερα από όσα έχει προσυμφωνήσει.

Ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης FQ έχει όμως και κάποια μειονεκτήματα:

- Ο αλγόριθμος FQ υλοποιείται μόνο σε λογισμικό και όχι σε υλικό, κάτι το οποίο περιορίζει την εφαρμογή του σε διεπαφές χαμηλών ταχυτήτων στα άκρα του δικτύου.
- Το αντικείμενο του συγκεκριμένου αλγορίθμου αφορά την απόδοση του ίδιου εύρους ζώνης σε όλες τις ροές και δεν μπορεί να υποστηρίξει ροές που ζητούν διαφορετικό εύρος ζώνης.

- Ο αλγόριθμος είναι ευαίσθητος στην σειρά αφίξεων των πακέτων. Αν το πακέτο φθάσει στην ουρά αμέσως μετά από το πέρασμα του αλγορίθμου από τη συγκεκριμένη ουρά, τότε το πακέτο πρέπει να περιμένει στην ουρά έως ότου όλες οι άλλες ουρές να έχουν εξυπηρετηθεί.



Εικόνα 22 Μηχανισμός Χρονοδρομολόγησης Fair Queueing (FQ) [60]

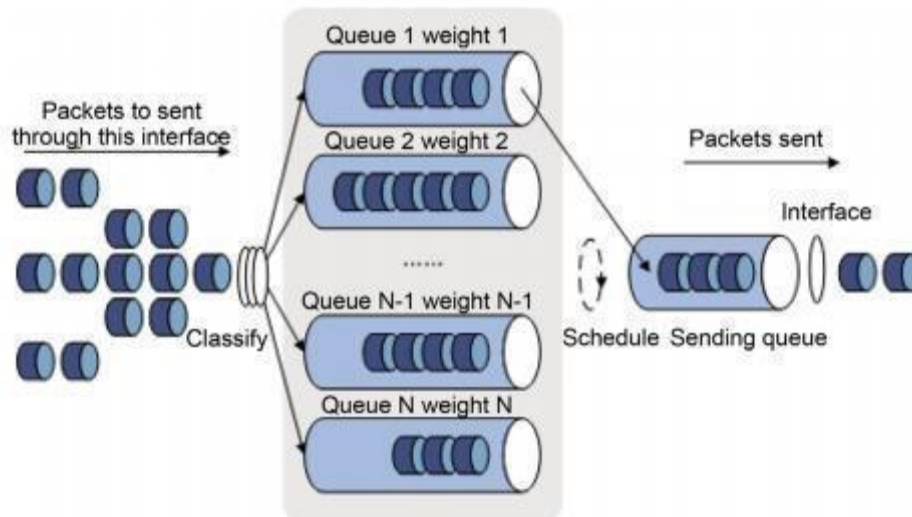
3.1.4 Σταθμισμένη Δίκαιη Ουρά (Weighted Fair Queueing – WFQ)

Ο αλγόριθμος WFQ είναι ένας μηχανισμός χρονοδρομολόγησης ο οποίος βασίζεται στον κλασικό αλγόριθμο GPS (Generalized Processor Sharing) [74]. Ο αλγόριθμος Weighted Fair Queueing μοιράζει δίκαια τη χωρητικότητα ανάμεσα στις ροές όπως άλλωστε συμβαίνει και στον GPS (κάθε ουρά δεσμεύει ένα μέρος της χωρητικότητας). Η μέθοδος WFQ αποδίδει βάρη σε κάθε ουρά και με αυτόν τον τρόπο διαφοροποιείται το εύρος ζώνης που αντιλαμβάνεται κάθε ουρά. Επομένως όταν υπάρχουν πολλές ουρές με πακέτα προς μετάδοση, κάθε ουρά εξυπηρετείται έτσι ώστε να λαμβάνει ένα ποσοστό από το συνολικό ρυθμό μετάδοσης της γραμμής. Έτσι, όταν κάποιες ουρές είναι άδειες, τότε το εύρος ζώνης που θα έπαιρναν οι ουρές αυτές το μοιράζονται οι υπόλοιπες ουρές με βάση το βάρος που έχει η κάθε μια. Ένα άλλο

χαρακτηριστικό του αλγορίθμου WFQ, είναι ότι το μέσο μέγεθος των πακέτων δεν απαιτείται να είναι γνωστό εκ των προτέρων.

Ο αλγόριθμος WFQ λειτουργεί ως εξής:

- Τα πακέτα αρχικά χωρίζονται σε διακριτές ουρές με βάση κάποιο χαρακτηριστικό τους. Όταν φτάνει ένα πακέτο σε μια ουρά, υπολογίζεται ο αναμενόμενος χρόνος που θα απαιτούνταν από τον χρονοδρομολογητή GPS για να το μεταδώσει. Οπότε ο χρονοδρομολογητής WFQ θα επιλέξει προς μετάδοση εκείνο το πακέτο που θα χρειαστεί το μικρότερο χρόνο από αυτά που βρίσκονται στην κεφαλή των ουρών.



Εικόνα 23 Η Χρονοδρομολόγηση Weighted Fair Queueing [39]

- Έτσι ο χρονοδρομολογητής WFQ χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του GPS προκειμένου να καθορίσει τη σειρά με την οποία θα εξυπηρετηθούν τα πακέτα. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι η εξυπηρέτηση των πακέτων θα ολοκληρωθεί όπως ακριβώς θα γινόταν με βάση τον αλγόριθμο GPS. Αυτό συμβαίνει διότι η εξυπηρέτηση των πακέτων θα γίνει με βάση το χρόνο ολοκλήρωσης της εξυπηρέτησης των πακέτων και όχι με βάση το χρόνο που αυτά αφίχθησαν. Για το λόγο αυτό, δεν γνωρίζουμε αν τα όρια καθυστέρησης του αλγορίθμου WFQ θα είναι απρόβλεπτα ή όχι [28].

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε πως τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο αλγόριθμος WFQ είναι [41]:

- Εγγυάται ένα επίπεδο εύρους ζώνης για κάθε κλάση εξυπηρέτησης, ανεξάρτητα από το πώς θα συμπεριφερθούν οι υπόλοιπες κλάσεις.
- Ο αλγόριθμος εγγυάται τη δίκαιη κατανομή της χωρητικότητας με βάρη σε κάθε ουρά καθώς επίσης και τη μέγιστη καθυστέρηση που μπορούν να υποστούν τα πακέτα.

Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα του αλγορίθμου WFQ είναι:

- Το γεγονός ότι πραγματοποιείται συνεχώς υπολογισμός ενός εικονικού χρόνου δημιουργεί μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα και καθυστέρηση, τόσο ώστε ο WFQ να μην μπορεί να υποστηρίξει πολλές κλάσεις εξυπηρέτησης σε δίκτυα υψηλών ταχυτήτων.
- Οι πληροφορίες που κρατούνται για κάθε πακέτο κάθε ουράς δημιουργεί προβλήματα κλιμάκωσης.
- Δεν υπάρχει εγγυημένη καθυστέρηση.

Διπλωματική εργασία:

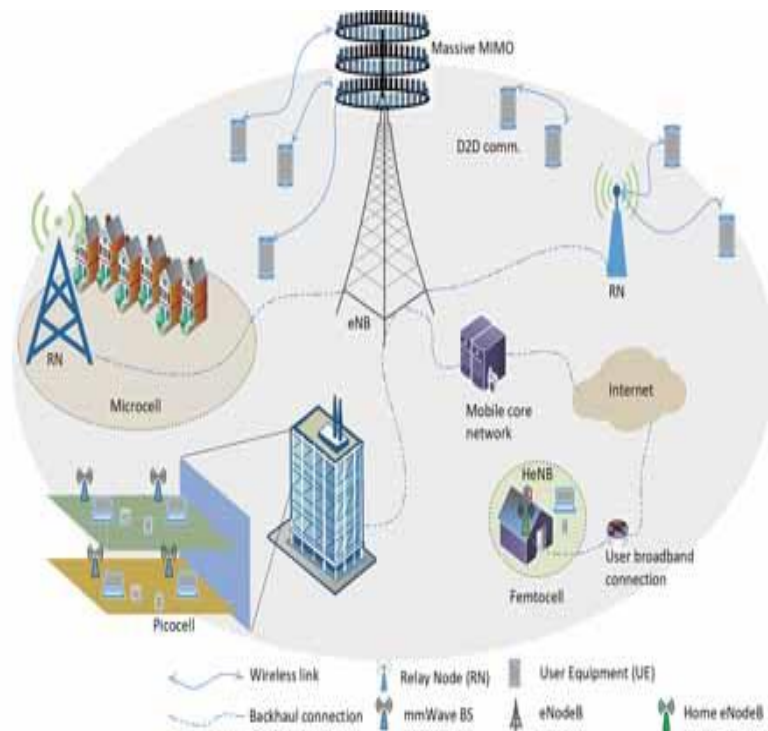
Μελέτη Μηχανισμών Χρονοδρομολόγησης Πακέτων Δεδομένων σε Κυψελωτά Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ Προχωρημένοι Αλγόριθμοι Χρονοδρομολόγησης 5G

4.1 Διαχείριση Ασύρματων Πόρων

Η διαχείριση ασύρματων πόρων ή αλλιώς Radio Resource Management (RRM) είναι ένα σύνολο αλγορίθμων (Power Control, Handover Control, Admission Control, Load Control, Packet Scheduling) οι οποίοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτυγχάνεται η καλύτερη χρήση των ασύρματων πόρων και να παρέχεται η βέλτιστη ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS). Οι τεχνικές και διαδικασίες διαχείρισης ασύρματων πόρων (RRM techniques & procedures) έχουν ως στόχο να εξελίξουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα, απόδοση, επεκτασιμότητα και την ευελιξία των παρόντων δικτύων κινητής τηλεφωνίας, αλλά και να αξιοποιήσουν στο έπακρο το διαθέσιμο φάσμα σε ένα μεγάλο εύρος ζωνών συχνοτήτων [30].

Η διαχείριση ασύρματων πόρων πρέπει να μπορεί να παρέχει διαφοροποίηση εξυπηρέτησης σε διαφορετικές ομάδες συσκευών με διαφορετικές απαιτήσεις απόδοσης και καθυστέρησης. Πρέπει επίσης να μπορεί να υποστηρίξει ένα μεγάλο εύρος μοντέλων ανάπτυξης από μακροκυψελές έως σημεία ασύρματης πρόσβασης (hotspot), που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις διασύνδεσης των συσκευών. Όλα τα παραπάνω πρέπει να γίνουν με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και την μεγαλύτερη δυνατή αποτελεσματικότητα [30].

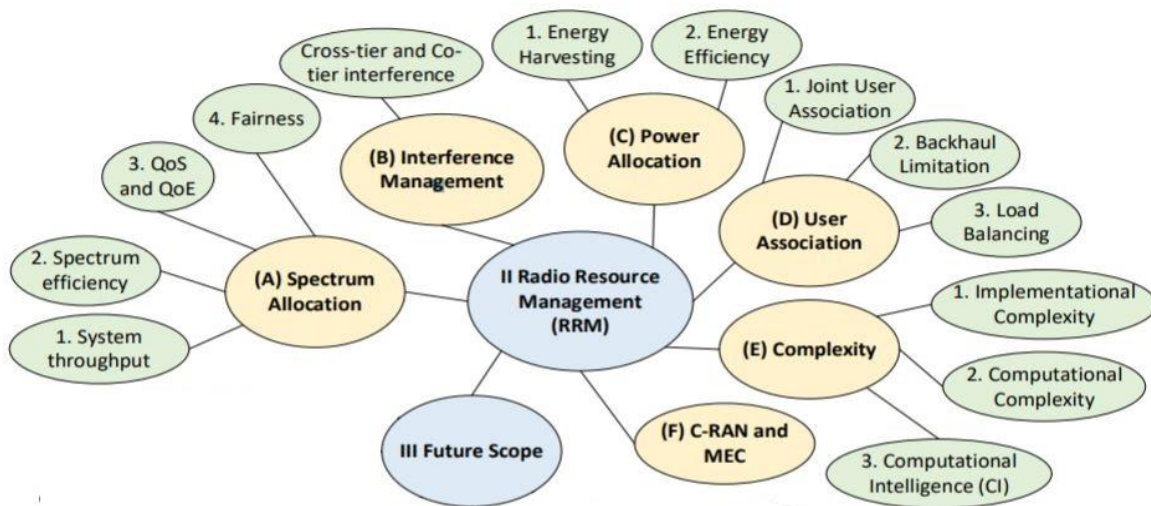


Εικόνα 24 Διαχείριση ασύρματων πόρων σε 5G Ετερογενή Δίκτυα [54]

Για την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης και την παροχή ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) στους χρήστες των εφαρμογών, ο προγραμματισμός των κυψελών στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς (5G) είναι εξαιρετικά σημαντικός. Επιπρόσθετα ο στόχος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας έχει επίπτωση στο παρεχόμενο QoS. Αυτό το πρόβλημα έχει γίνει ακόμη πιο σύνθετο λόγω της εκθετικής αύξησης των χρηστών και των εφαρμογών που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων.

Επίσης, εξαιτίας της χρήσης διαφορετικών τεχνολογιών στα μελλοντικά ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous Networks - HetNets), αναμένεται οι κινητές συσκευές να είναι εξοπλισμένες με πολλαπλές διεπαφές ασύρματης πρόσβασης για να μπορούν να επωφελούνται από αυτά και να τα χρησιμοποιούν με διαφανή για τον χρήστη τρόπο. Ωστόσο, υπάρχουν επιφυλάξεις σχετικά με τον τρόπο υλοποίησής τους. Το RRM του 5G HetNet θα είναι πιο περίπλοκο από το αντίστοιχο του LTE-A ενώ είναι κρίσιμος ο αποτελεσματικός χειρισμός των πόρων. Επιπλέον, με την ανάπτυξη κατακεντρωμένων δικτύων femtocell σε ιδιόκτητα κτίρια ή κατοικίες, θα γίνει πιο περίπλοκη η διαχείριση παρεμβολών σε ένα HetNet.

Για παράδειγμα, ένας χρήστης (User Equipment – UE) σε ένα HetNet μπορεί να λαμβάνει παρεμβολές από σταθμούς βάσης μακροκυψελών (MBS), από άλλες συσκευές (UEs) αλλά και από σταθμούς βάσης μικρών κυψελών (SBS) σε διαφορετικό επίπεδο. Αυτό το φαινόμενο θα επιδεινωθεί εάν τα αναπτυγμένα femtocell χρησιμοποιηθούν την ίδια περιοχή φάσματος με τις μακροκυψέλες. Εκτός από τα προβλήματα διαχείρισης RRM και παρεμβολών, υπάρχουν πολλά άλλα εξίσου σημαντικά ζητήματα όπως η κατανομή ισχύος και φάσματος, η αλληλεπίδραση χρηστών, η δικαιοσύνη στην κατανομή πόρων, η χωρητικότητα αλλά και η πολυπλοκότητα του δικτύου. Στην Εικ. 25 απεικονίζονται οι προβλεπόμενες λειτουργίες της διαχείρισης ασύρματων πόρων ενός δικτύου 5G.



Εικόνα 25 Επισκόπηση λειτουργιών διαχείρισης ασύρματων πόρων 5G [53].

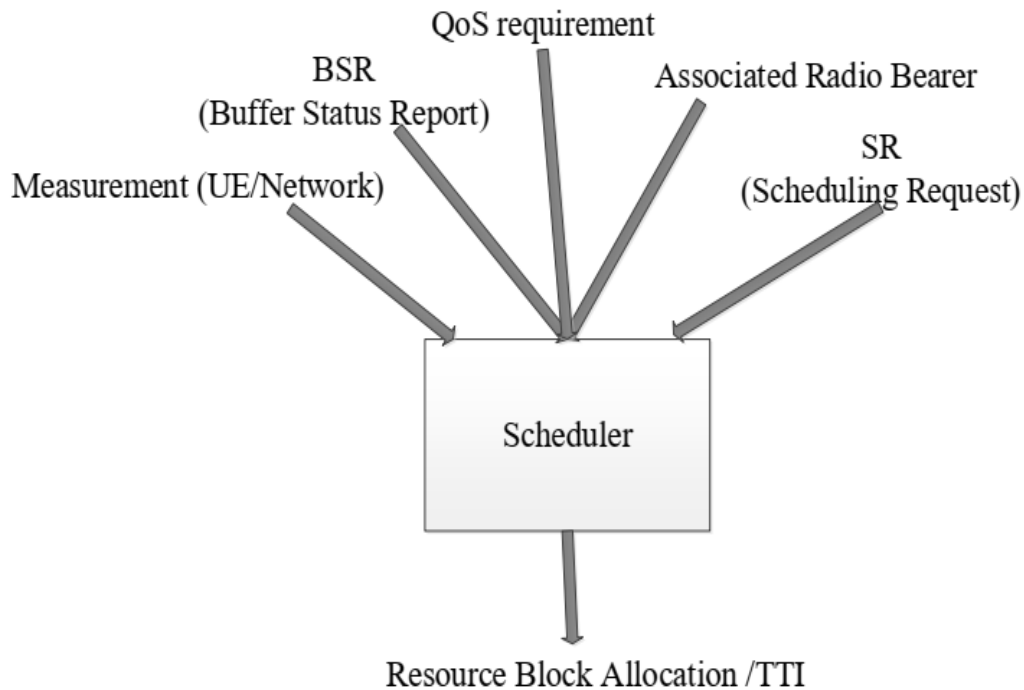
Η κατανομή πόρων στοχεύει στην μεγιστοποίησή του όγκου των πληροφοριών που μεταδίδονται επιτυχώς από τους χρήστες σε ένα δίκτυο. Ωστόσο, η παραδοσιακή κατανομή πόρων δεν είναι σε θέση να καλύψει τις απαιτήσεις για την τεράστια ποσότητα δεδομένων που απαιτείται για διάφορες εφαρμογές στις μελλοντικές ασύρματες επικοινωνίες. Επιπλέον, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του φάσματος απαιτεί αποτελεσματική διαχείριση των ασύρματων πόρων. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές έχουν επινοήσει τεχνικές κατανομής πόρων για τη βελτιστοποίηση των δεικτών απόδοσης του συνολικού συστήματος, όπως η ρυθμαπόδοση του συνολικού συστήματος (system throughput), η φασματική απόδοση (Spectral Efficiency), η δικαιοσύνη κατανομής

πόρων, η ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality of Service) και η ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience).

- Η ρυθμαπόδοση του συστήματος υπολογίζεται ως το άθροισμα του ρυθμού δεδομένων που αποστέλλεται με επιτυχία σε όλες τις συσκευές ή τερματικά ενός δικτύου και μετράται σε bit ανά δευτερόλεπτο (bps).
- Για να θεωρηθεί ότι ένα ασύρματο δίκτυο ικανοποιεί τις απαιτήσεις των χρηστών, η ποιότητά του μετριέται ως συλλογική επίδραση των παραμέτρων απόδοσης που σχετίζονται με το δίκτυο, όπως η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, το jitter και η απώλεια πακέτων, η οποία συνολικά είναι γνωστή ως QoS.
- Η δικαιοσύνη στα ασύρματα δίκτυα μπορεί να διασφαλιστεί διανέμοντας ένα δίκαιο ποσό πόρων (εύρος ζώνης) σε κάθε χρήστη σύμφωνα με την αναμενόμενη QoS από το δίκτυο. Είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η δικαιοσύνη στα συστήματα κατανομής πόρων των δικτύων 5G, τα οποία εξορισμού υποστηρίζουν περισσότερη συνδεσιμότητα και υπηρεσίες.

4.2 Μηχανισμοί Χρονοδρομολόγησης σε 5G και Προχωρημένες Τεχνικές Χρονοδρομολόγησης

Η διαδικασία του χρονοδρομολόγησης της εκχώρησης ασύρματων πόρων για τη μετάδοση δεδομένων ορίζεται ως χρονοδρομολόγηση. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που καθορίζουν πότε και ποιοι πόροι διατίθενται για έναν συγκεκριμένο χρήστη. Ένα σχήμα χρονοδρομολογητή που απεικονίζει μερικούς από τους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη απεικονίζεται στην Εικ. 26.



Εικόνα 26 Δεδομένα εισόδου σε έναν χρονοδρομολογητή πακέτων δικτύου 5G [53].

Για τη λειτουργία του χρονοδρομολογητή, λαμβάνονται υπόψη η κατάσταση του UE buffer status (ενταμιευτής της κινητής συσκευής) σχετικά με τον όγκο πληροφοριών που επιθυμεί να μεταδώσει η συσκευή καθώς και οι απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS) των εφαρμογών που εκτελούνται σε αυτή. Ο χρονοδρομολογητής μπορεί επίσης να εκχωρήσει πόρους βάσει των συνθηκών του ασύρματου καναλιού που είναι γνωστοί μέσω μετρήσεων που γίνονται από το σταθμό βάσης 5G (gNB) και / ή επικοινωνούνται από το ίδιο το UE. Οι ασύρματοι πόροι εκχωρούνται σε μονάδες χρονοθυρίδας / σχισμής (για παράδειγμα μία μίνι χρονοθυρίδα, μία ολόκληρη χρονοθυρίδα ή πολλές χρονοθυρίδες) με την μορφή block πόρων (Resource Blocks – RBs). Μετά από ένα αίτημα χρονοδρομολόγησης, το UE θα ενημερωθεί για τους πόρους που του εκχωρούνται μέσα από ένα κανάλι χρονοδρομολόγησης. Ορισμένοι αλγόριθμοι χρονοδρομολογητών πακέτων τροποποιημένοι για ασύρματα κυψελωτά δίκτυα είναι οι παρακάτω [53]:

- Ο αλγόριθμος Μέγιστου Ρυθμού (**Maximum Rate - MR**) στοχεύει σε υψηλή χωρητικότητα και τη μέγιστη δυνατή απόδοση αξιολογώντας κατάλληλα τις διακυμάνσεις των συνθηκών του καναλιού. Έτσι δίνει προτεραιότητα στους

χρήστες με ευνοϊκότερη κατάσταση καναλιού ενώ οι UEs με σοβαρή υποβάθμιση του ασύρματου καναλιού δεν χρονοδρομολογούνται. Έτσι, δεν υπάρχει δίκαιη εκχώρηση πόρων μεταξύ των χρηστών.

- Ο αλγόριθμος Εκ Περιτροπής (**Round Robin - RR**) αναπτύχθηκε με σκοπό να κατανέμει τους ασύρματους πόρους εξίσου μεταξύ των χρηστών σε κυψελωτά δίκτυα LTE-A. Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο MR, ο αλγόριθμος RR επιτρέπει στους χρήστες τη δυνατότητα να εξυπηρετούνται περιοδικά. Έτσι, ο αλγόριθμος RR βελτιώνει σημαντικά τη δικαιοσύνη, αλλά επίσης προκαλεί υποβάθμιση της απόδοσης λόγω του γεγονότος ότι η ποιότητα του καναλιού δεν λαμβάνεται υπόψη.
- Ο αλγόριθμος Δίκαιης Αναλογίας (**Proportional Fair - PF**) αναπτύχθηκε για δίκτυα που καλύπτουν υπηρεσίες μη εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης (Non-Guaranteed Bit Rate). Σκοπός του ήταν να επιτύχει μια αξιοπρεπή ανταλλαγή μεταξύ δικαιοσύνης και απόδοσης αυξάνοντας την απόδοση των UEs που έχουν καλύτερη στιγμιαία επιτεύξιμη ταχύτητα δεδομένων. Ωστόσο, ο αλγόριθμος PF δεν έχει σχεδιαστεί για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση buffer του UE.
- Ο αλγόριθμος Τυφλής Ίσης Ρυθμαπόδοσης (**Blind Equal Throughput - BET**) έχει εφαρμοστεί σε συστήματα LTE και όπως υποδηλώνει το όνομα, δεν λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες του καναλιού για την ανάθεση πόρων. Καταγράφει για κάθε UE τη μέση απόδοση σε ένα χρονικό διάστημα προκειμένου να επιτύχει μια δίκαιη κατανομή των ασύρματων πόρων μεταξύ των UEs.
- Ο Τροποποιημένος Αλγόριθμος Προτεραιοποίησης της Μέγιστης Σταθμισμένης Καθυστέρησης (**Modified-Largest Weighted Delay First - MLWDF**) έχει ως στόχο να αυξήσει το QoS των εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Για τον αλγόριθμο M-LWDF λαμβάνονται υπόψη η καθυστέρηση του πακέτου, η μέση απόδοση, η στιγμιαία ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων αλλά και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αυτός ο αλγόριθμος έχει εφαρμοστεί σε

κυψελωτά συστήματα υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (High Data Rate - HDR).

- Η Εξαρτώμενη από το Κανάλι Συντομότερη Προθεσμία (**Channel-Dependent Earliest Due Deadline – CD-EDD**) αναπτύχθηκε για συστήματα που υποστηρίζουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Τα πακέτα με σύντομη προθεσμία παράδοσης χρονοδρομολογούνται πρώτα προκειμένου να αποσυμφορείται το δίκτυο και να μειώνεται το φορτίο προς μετάδοση. Παρόμοια με τους αλγόριθμους M-LWDF και EXP, ο αλγόριθμος CD-EDD λαμβάνει υπόψη κατά την εκχώρηση πόρων τη μέση απόδοση, τη στιγμιαία ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και την καθυστέρηση των πακέτων. Σε περίπτωση που η μέση απόδοση και ο στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων ενός συγκεκριμένου χρήστη είναι παρόμοιοι, το CD-EDD θα δώσει στον χρήστη με την μεγαλύτερη καθυστέρηση προτεραιότητα για μετάδοση.

Στα επόμενα δίνεται μια ανασκόπηση πρόσφατων ερευνητικών εργασιών σχετικά με σχήματα χρονοδρομολόγησης για 5G [53].

4.2.1 Προγραμματισμός κατερχόμενης ζεύξης και κατανομή πόρων για πολυκαναλικά συστήματα 5G MIMO

Οι Femenias, G. et al. [76] έχουν αναπτύξει έναν αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης και κατανομής πόρων κατερχόμενης ζεύξης. Ο αλγόριθμος αυτός αφορά συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με ορθογώνια διαίρεση συχνοτήτων (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), όπου για κάθε χρονικό διάστημα μετάδοσης (Time Transmission Interval - TTI) η απόφαση χρονοδρομολόγησης λαμβάνεται με την επίλυση ενός προβλήματος κυρτής βελτιστοποίησης των μπλοκ πόρων (RBs) που πρέπει να κατανέμονται σε κάθε κινητό προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η σταθμισμένη φασματική απόδοση του συστήματος. Κυρτή βελτιστοποίηση είναι η ελαχιστοποίηση μιας κυρτής (convex) συνάρτησης υπό περιορισμούς όπως ο αριθμός των RBs, η οικονομία στην κατανομή των πόρων και η εγγυημένη ελάχιστη ποιότητα μετάδοσης.

4.2.2 Αποτελεσματικός προγραμματισμός ασύρματου καναλιού κατερχόμενης ζεύξης και κατανομή πόρων σε 5G Cyber-Physical συστήματα

Για τον αποτελεσματικό διαστρωματικό χρονοπρογραμματισμό και κατανομή πόρων (SRA) στην κατερχόμενη ζεύξης, οι Vora & Kang [69] επινοήσαν έναν δυναμικό αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης. Ο αλγόριθμος αυτός παίρνει ως είσοδο τις καταστάσεις καναλιού, οι οποίες αποτελούνται από την τριάδα χρόνος (σύμβολα), συχνότητα (αριθμός υπο-ζωνών) και χώρος (αριθμός κεραιών). Σε κάθε ΤΤΙ, το πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης σακιδίου (knapsack) λύνεται ως εξής: Με δεδομένο ένα σύνολο αντικειμένων, όπου το καθένα διαθέτει μια τιμή και ένα βάρος ο τελικός στόχος είναι να καθοριστεί ο αριθμός των αντικειμένων που θα συμπεριληφθούν σε μια συλλογή, έτσι ώστε το συνολικό βάρος να μην ξεπερνά ένα δεδομένο όριο και η συνολική τιμή είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλη.

4.2.3 Χρονοδρομολόγηση βασισμένη στην ενισχυτική μάθηση

Οι Comsa I. et al. [36] έχουν παρουσιάσει ένα δυναμικό χρονοδρομολογητή ο οποίος επιλέγει, σε κάθε ΤΤΙ, τους κατάλληλους κανόνες χρονοδρομολόγησης σύμφωνα με τις στιγμιαίες συνθήκες δικτύου και τις απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS). Ένας χρονοδρομολογητής πακέτων είναι μια πολυδιάστατη συνάρτηση που λαμβάνει τις πληροφορίες κατάστασης ουράς (QSI) και τις πληροφορίες κατάστασης καναλιού (CSI) ως είσοδο και εξάγει την κατανομή των πόρων που διατίθενται στους χρήστες. Ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου μιας Μαρκοβιανής διαδικασίας (Markov Decision Process - MDP), το οποίο μπορεί να λυθεί με Ενισχυτική Μάθηση.

4.2.4 Βελτιωμένη απόδοση E2E και ευελιξία για διαφορετικές υλοποιήσεις δικτύου

Ένα από άκρο-σε-άκρο (End-to-End - E2E) σχήμα χρονοδρομολόγησης πολλαπλών χρηστών έχει παρουσιαστεί από τους Pedersen K., et al. [77]. Ο χρονοδρομολογητής επιπέδου MAC είναι η οντότητα η οποία ελέγχει τις εκχωρήσεις πόρων σε πολλούς χρήστες και οι οποίοι υπόκεινται σε διάφορους περιορισμούς. Μέσω αντιστοίχισης μιας ζεύξης E2E σε ροές QoS, ο χρονοδρομολογητής MAC στοχεύει στην εκπλήρωση των απαιτήσεων των χρηστών, αλλά και στο να δώσει προτεραιότητα εξυπηρέτησης όταν το σύστημα έχει φτάσει σε συμφόρηση, δηλαδή όταν οι απαιτήσεις των χρηστών δεν μπορούν να εκπληρωθούν όλες ταυτόχρονα.

4.2.5 Χρονοδρομολόγηση μεγέθους ωφέλιμου φορτίου και προθεσμίας για τα δίκτυα 5G

Οι Monhof S. et al. [78] έχουν προτείνει έναν αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης «Μεγέθους Ωφέλιμου Φορτίου και Γνώσης Προθεσμίας» (Payload-size Deadline-aware - PayDA). Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μια στρατηγική χρονοδρομολόγησης πακέτων σε πραγματικό χρόνο (Real Time), που παρουσιάζει υψηλή αποδοτικότητα στην διαχείριση των ασύρματων πόρων και χαμηλή πολυπλοκότητα και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στα τρέχοντα όσο και σε μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η βάση του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι η λογική του EDF (Earliest Deadline First) και επομένως δίνει προτεραιότητα στο πακέτο με την πλησιέστερη προθεσμία αλλά επιπλέον λαμβάνει υπόψη το υπολειπόμενο μέγεθος κάθε ροής.

4.2.6 Διακυψελικός χρονοδρομολογητής για ασύρματα δίκτυα 5G

Οι Gueguen C., et al. [79] προτείνουν έναν «Διακυψελικό Χρονοδρομολογητή Δίκαιου Διαμοιρασμού Εύρους Ζώνης» ο οποίος κατανέμει δυναμικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ των κυψελών έτσι ώστε να εξασφαλιστεί υψηλή ποιότητα εξυπηρέτησης. Ο

στόχος του αλγορίθμου αυτού είναι να βοηθήσει όποιο κελί βρίσκεται σε συμφόρηση μέσω του δανεισμού/διαμοιρασμού εύρους ζώνης από γειτονικά κελιά προς αυτό, με αποτέλεσμα όλο και περισσότερα κανάλια να μεταφέρονται στο υπερφορτωμένο κελί. Έτσι του δίνεται η δυνατότητα να ικανοποιήσει τους δυσαρεστημένους χρήστες και να αντιμετωπίσει τη συσσωρευμένη κίνηση που υπάρχει σε αυτό, χωρίς να επιβαρύνει σημαντικά τα γειτονικά του κελιά.

4.2.7 Σύγκριση τεχνικών χρονοδρομολόγησης δεδομένων για κατηγοριοποίηση με βάση το QoS σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G

Οι Dighriri M., et al. [53],[80] έχουν μελετήσει τρεις αλγόριθμους χρονοδρομολόγησης, οι οποίοι είναι οι προτεραιότητα ουράς (PQ), Πρώτο-Μέσα-Πρώτο-Έξω (FIFO) και Δίκαιη Σταθμισμένη Αναμονή (WFQ). Επειδή η FIFO δεν παρέχει καμία προτεραιότητα σε οποιαδήποτε ροή δεδομένων ή σε οποιαδήποτε κλάση υπηρεσιών, σχεδιάστηκε ο αλγόριθμος PQ. Ο PQ μπορεί να παρέχει σταθερή προτεραιότητα στην κίνηση δεδομένων με αποτέλεσμα την ταχύτερη μετάδοση, κάτι που είναι πολύ σημαντικό. Η θέση κάθε πακέτου σε καθεμιά από τις δημιουργούμενες ουρές (υψηλή, μεσαία, κανονική ή χαμηλή), καθορίζεται ανάλογα με την προτεραιότητα που του έχει εκχωρηθεί.

4.2.8 Προγραμματισμός QoS-Driven για δίκτυα 5G

Οι Comsa I., et al. [81] προτείνουν έναν χρονοδρομολογητή ο οποίος εφαρμόζει ένα (Actor-Critic - AC) σχήμα ενισχυτικής μάθησης για την εύρεση του κατάλληλου μηχανισμού χρονοδρομολόγησης, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ικανοποίηση του χρήστη όσον αφορά την ποιότητα εξυπηρέτησης.

Βασίζεται στην ιδέα να διαχωριστεί το μοντέλο λήψης απόφασης στα δύο (Actor-Critic): Ένα για τον υπολογισμό μιας ενέργειας που βασίζεται σε μια κατάσταση του συστήματος και ένα άλλο για την παραγωγή των τιμών Q της ενέργειας. Το πρώτο μέρος (Actor) παίρνει ως είσοδο την κατάσταση και ως έξοδο παράγει την καλύτερη ενέργεια. Το

δεύτερο μέρος (Critic), από την άλλη πλευρά, αξιολογεί την ενέργεια υπολογίζοντας τη συνάρτηση χρησιμότητας. Αυτά τα δύο μέρη του μοντέλου λήψης απόφασης συμμετέχουν σε ένα παίγνιο όπου και τα δύο βελτιώνονται σταδιακά στον δικό τους ρόλο. Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνει καλύτερη ποιότητα εξυπηρέτησης από άλλους χρονοδρομολογητές επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση στις απώλειες πακέτων.

4.2.9 Χρονοδρομολογητής βασισμένος σε Νευρωνικά Δίκτυα

Οι (Comsa et al., 2019) [81] προτείνουν ένα χρονοδρομολογητή ο οποίος επιλέγει διαφορετικούς κανόνες χρονοδρομολόγησης σύμφωνα με τις στιγμιαία κατάσταση του συστήματος. Ο στόχος του χρονοδρομολογητή είναι να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις καθώς και τα ποσοστά απωλειών πακέτων για εφαρμογές που απαιτούν συγκεκριμένο επίπεδο QoS. Χρησιμοποιούνται συνδυαστικά οι αρχές της ενισχυτικής μάθησης (RL) μαζί με νευρωνικά δίκτυα (NNs) προκειμένου να αντιστοιχίσουν τους κανόνες χρονοδρομολόγησης σε κάθε κατάσταση. Τα Νευρωνικά Δίκτυα είναι μη γραμμικές συναρτήσεις που λαμβάνουν ως είσοδο την στιγμιαία κατάσταση του χρονοδρομολογητή και εξάγουν τις τιμές προτίμησης (preference values) για κάθε πολιτική χρονοδρομολόγησης. Στο στάδιο της μάθησης, τα νευρωνικά δίκτυα προσαρμόζονται έτσι ώστε να παίρνουν καλύτερες αποφάσεις σχετικά με την χρονοδρομολόγηση των πακέτων δεδομένων έχοντας ως τελικό στόχο την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας εξυπηρέτησης.

4.2.10 Σχήμα εκθετικής / αναλογικής δικαιοσύνης (EXP/PF) και λογαριθμικός κανόνας (LOG)

Το προτεινόμενο σχήμα [75] προγραμματίζει πολλαπλές ροές σε κάθε διάστημα μετάδοσης οι οποίες λαμβάνουν υψηλότερες προτεραιότητες όταν οι καθυστερήσεις πακέτων HOL (Head of Line) πλησιάζουν την προθεσμία καθυστέρησης. Ο EXP/PF λαμβάνει υπόψη μια εκθετική συνάρτηση και μια συνάρτηση αναλογικής δικαιοσύνης για την εκτίμηση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης του προς μετάδοση πακέτου. Ο

λογαριθμικός κανόνας (LOG) εξισορροπεί τους δείκτες ποιότητας εξυπηρέτησης, όπως η μέση καθυστέρηση (mean delay). Ο κανόνας LOG συμβάλλει στην παροχή πιο αποτελεσματικής υποστήριξης QoS στο δίκτυο. Λειτουργεί αποδοτικά όταν είναι γνωστή η πληροφορία άφιξης της κίνησης δεδομένων, καθώς και η κατάσταση των καναλιών.

4.2.11 Συνοπτικός Πίνακας 5G Χρονοδρομολογητών

Πίνακας 2 Συνοπτικός Πίνακας 5G Χρονοδρομολογητών

Κατηγορία	Αρχιτεκτονική	Όνομα Αλγορίθμου	Τρόπος Ανάθεσης Πόρων
Ανεξαρτησία από το κανάλι	Κλασικοί Αλγόριθμοι	Δίκαιης Αναλογίας (PF)	Κατανομή πόρων σε χρήστες ανάλογα με τα βάρη τους
		Πρώτο-Μέσα-Πρώτο-Έξω (FIFO)	Κατανομή πόρων σε χρήστες με βάση τη σειρά άφιξης
		Περιτροπής (RR)	Κατανομή πόρων σε χρήστες για μια συγκεκριμένη χρονοθυρίδα
		Σταθμισμένης Δίκαιης Αναμονής	Δυναμική διαδικασία που διαιρεί το εύρος ζώνης μεταξύ των ουρών με βάση τα βάρη.
		Τυφλής Ίσης Ρυθμαπόδοσης	Ίδια ρυθμαπόδοση για όλους τους χρήστες, ανεξάρτητα από την ποιότητα του καναλιού. Η προτεραιότητα είναι συνάρτηση της προηγούμενης μέσης απόδοσης.
		Μέγιστη Σταθμισμένη Καθυστέρηση Πρώτα	Κατανομή πόρων με βάση τα βάρη των χρηστών και τις ευαισθησίες καθυστέρησης
Εξάρτηση από το κανάλι	Διαστρωματικοί αλγόριθμοι	Κατανομή πόρων κατερχόμενης ζεύξης βάση της κατάστασης φόρτου	Εκχώρηση πόρων με βάση πληροφορίες κατάστασης ουράς
		Απληστη Κατανομή Μπλοκ Πόρων	Εκχώρηση πόρων με βάση πληροφορίες κατάστασης

		ουράς
Εγγυημένου Bit-Rate (GBR)	Χρονοδρομολογητής επίγνωσης ποιότητας εξυπηρέτησης (QoS)	Όταν χρησιμοποιείται προγραμματισμός εγγυημένου ρυθμού bit (GBR), τότε παρέχεται ένας σταθερός ρυθμός δεδομένων στα τερματικά των χρηστών.
	Υβριδικοί Χρονοδρομολογητές	Ο Round-Robin (RR) εγγυάται τη δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών, ο Best-CQI εγγυάται την αυξημένη απόδοση χρήστη/ συστήματος. Ένας υβριδικός χρονοδρομολογητής εναλλάσσεται μεταξύ του RR και του Best-CQI με στόχο την εξισορρόπηση της απόδοσης και της δικαιοσύνης.
Ευαίσθησία Καθυστερήσης	Χρονοδρομολογητής με υβριδική αυτόματη αίτηση επανάληψης (HARQ)	Προτεραιότητα των χρηστών με βάση τη μέση απόδοση και καθυστέρηση
	Δύο – Επιπέδων	Χρησιμοποιεί δύο χρονοδρομολογητές για την εκτέλεση της διαδικασίας χρονοδρομολόγησης. Ένας χρονοδρομολογητής χαμηλότερου επιπέδου διαχειρίζεται τους ασύρματους πόρους και ένας χρονοδρομολογητής υψηλότερου επιπέδου δρομολογεί ομάδες δεδομένων.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ Συζήτηση – Αποτελέσματα

Η κινητή τηλεφωνία αναπτύσσεται ραγδαία στην προσπάθειά της να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της κοινωνίας για περισσότερες υπηρεσίες στον τομέα της επικοινωνίας. Είναι γεγονός ότι αυτή η διαδικασία διαρκούς εξέλιξης χαρακτηρίζεται από τεχνολογικές προόδους και νέα πρότυπα ραδιοεπικοινωνιών τα οποία παρέχουν διαλειτουργικότητα και συνύπαρξη με προγενέστερα συστήματα ραδιοεπικοινωνίας [48]. Οι τεράστιες αλλαγές που προέκυψαν από την εξέλιξη ενός ή μιας ομάδας προτύπων καθορίζουν τα επόμενα βήματα στην ιστορία της κινητής τηλεφωνίας, τα οποία ταξινομούνται ως γενιές [64]. Σήμερα, γίνεται η μετάβαση από την τέταρτη στην πέμπτη γενιά (5G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Η μετάβαση αυτή υπόσχεται να ενεργοποιήσει υπηρεσίες που θα έχουν ως στόχο να βελτιώσουν τις εμπειρίες των χρηστών. Η λειτουργία αυτών των υπηρεσιών θα πραγματοποιείται στο υπολογιστικό νέφος (cloud) όπου θα αναπτύσσονται οι τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές που στηρίζονται σε επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα. Τα 5G, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G), πρόκειται να προσφέρουν υποστήριξη για εφαρμογές που στοχεύουν στην επικοινωνία ανάμεσα σε μηχανές / συσκευές (Machine-to-Machine). Αυτό το νέο παράδειγμα θα είναι ζωτικής σημασίας στην παροχή όλων των πτυχών συνδεσιμότητας που απαντώνται στις έξυπνες πόλεις, όπως αυτές που χρειάζονται στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση (Βιομηχανία 4.0 - Industry 4.0), την ηλεκτρονική υγεία, τα έξυπνα συστήματα μεταφοράς και άλλες τεχνολογίες. Αυτή η επαναστατική καινοτομία βασίζεται στο όραμα της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - ITU) που αναφέρεται στο μέλλον των παγκοσμίων κινητών τηλεπικοινωνιών (International Mobile Telecommunications - IMT) για το έτος 2020 και μετέπειτα.

Οι απαιτήσεις που σχετίζονται με την τεχνική απόδοση 5G προσδιορίστηκαν από τον τομέα των ραδιοεπικοινωνιών της ITU σε μία έκθεση δημοσιευμένη το 2017. Σύμφωνα με

αυτήν την έκθεση, τα δίκτυα 5G θα έχουν δέκα φορές πιο μεγάλη πυκνότητα συνδεσιμότητας από αυτή των 4G, η χωρητικότητα (traffic capacity) θα είναι εκατό φορές μεγαλύτερη και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης είκοσι φορές μεγαλύτερος. Πέραν αυτού, οι χρόνοι καθυστέρησης στα δίκτυα 5G θα είναι έως και δέκα φορές πιο μικροί από τα προηγούμενα δίκτυα 4G. Ακολουθώντας το παράδειγμα της πορείας της ITU, το Πρόγραμμα Συνεργασίας 3ης Γενιάς (3rd Generation Partnership Project - 3GPP) έχει δημιουργήσει πρότυπα για τεχνολογίες των δικτύων 5G. Η δημοσίευση του πρώτου προτύπου πραγματοποιήθηκε το 2017 και η νέα τεχνολογία που εισάγει ονομάζεται 5G-New Radio (5G-NR). Ωστόσο, το όραμα της ITU για τα δίκτυα 5G χρειάζεται ακόμα μεγάλη προσπάθεια για να ολοκληρωθεί. Εκτός από τις τεχνολογικές παρεμβάσεις χρειάζονται θεμελιώδεις και εφαρμοσμένες ερευνητικές δραστηριότητες για τη διαμόρφωση αυτών των νέων τεχνολογιών επικοινωνίας που αποσκοπούν στην επίλυση των οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών προβλημάτων που αποτελούν μάλιστα για την ανθρωπότητα.

Η εμπορική ανάπτυξη τεχνολογίας 5G ξεκίνησε στα τέλη του 2018 στην Ασία. Η Νότια Κορέα κατάφερε να πετύχει την πρώτη ανάπτυξη δοκιμαστικού δικτύου 5G στους Χειμερινούς Ολυμπιακούς Αγώνες στο Pyeong Chang τον Φεβρουάριο του 2018. Ύστερα από αυτήν την πρώτη δοκιμή, στα τέλη του ίδιου έτους, ακολούθησε η ραγδαία εμπορική άνοδος του 5G στη χώρα αυτή στις εταιρείες LG Uplus SK Telecom και Korea Telecom. Στην πραγματικότητα, η Νότια Κορέα αποτελεί μέχρι σήμερα τη χώρα με τη μεγαλύτερη κάλυψη 5G. Το 5G ξεκίνησε να αναπτύσσεται στην Κίνα τον Οκτώβριο του 2019 μέσω των China Telecom, China Mobile και Unicom και πλέον η Κίνα αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά στον κόσμο για τεχνολογία 5G. Η Huawei είναι μία από τις εταιρίες που υποστηρίζει σε μεγάλο ποσοστό τις τεχνολογίες 5G στη χώρα αυτή. Τον Μάιο του 2019 στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού, η Αυστραλία μέσω της Telstra ξεκίνησε το πρώτο της εμπορικό δίκτυο 5G, ενώ οι Φιλιππίνες τον Ιούνιο με την Globe Telecom και η Νέα Ζηλανδία τον Δεκέμβριο του ίδιου χρόνου μέσω της Spark και της Vodafone. Η γεωγραφική περιοχή Ασίας-Ειρηνικού παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και ανάπτυξη στις τεχνολογίες 5G και αναμένεται έως το 2024 να έχει τα δύο τρίτα των συνδρομητών παγκοσμίως.

Στην Ευρώπη, η εμπορική ανάπτυξη τεχνολογίας 5G ξεκίνησε στο Ηνωμένο Βασίλειο τον Μάιο του 2019, από τις τηλεπικοινωνιακές εταιρείες EE, Vodafone, O2 και Three. Η εμπορική ανάπτυξη τεχνολογίας 5G στην Ιταλία, οδηγήθηκε από τη Vodafone και την Telecom Italia τον Ιούνιο του 2019, της Ελβετίας, από την Swisscom και την Sunrise τον Μάιο του ίδιου έτους. Η Γερμανία τον Ιούλιο του 2019, ήταν πρωτοπόρος στη λειτουργία εμπορικών δικτύων 5G μέσω της Deutsche Telekom και της Vodafone. Το ίδιο έτος ξεκίνησαν εμπορική ανάπτυξη δικτύων 5G και οι Ρουμανία, Αυστρία, Ιρλανδία, Φινλανδία και Ουγγαρία. Το 2020 άρχισαν να αναπτύσσονται τα εμπορικά τους δίκτυα ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Ισπανία, η Ολλανδία, η Σουηδία, η Δανία και το Βέλγιο.

Η Βόρεια Αμερική αποτελεί άλλη μια τεράστια αγορά τεχνολογίας 5G, όπου πραγματοποιήθηκε η πρώτη εμπορική κυκλοφορία 5G τον Μάιο του 2019 από τη Verizon, ενώ η AT&T και η T-Mobile ακολούθησαν το δεύτερο εξάμηνο του ίδιου έτους. Οι Rogers Communications και Bell Mobility ηγούνται στον Καναδά, των οποίων τα εμπορικά δίκτυα άρχισαν να εξελίσσονται το 2020. Μια άλλη αξιοσημείωτη αγορά είναι η Μέση Ανατολή, με το Κατάρ, τη Σαουδική Αραβία και το Κουβέιτ, που ξεκίνησαν τη λειτουργία των πρώτων τους εμπορικών δικτύων 5G την περίοδο από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο του 2019. Στην Αφρική, πρωταγωνιστικό ρόλο σε αυτήν την τεχνολογία έχει η Νότια Αφρική, με τις Rain και η Vodacom που ξεκίνησαν το Σεπτέμβριο του 2019.

Στη Λατινική Αμερική η τεχνολογία 5G βρίσκεται στα αρχικά της στάδια. Τον Απρίλιο του 2019 στην Ουρουγουάη ξεκίνησε το πρώτο εμπορικό δίκτυο και λειτουργεί από την Antel. Είναι γνωστό ότι εκτός από την Ουρουγουάη και η Βραζιλία διαθέτει εμπορικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G (Global mobile Suppliers Association, 2020), τα οποία έχει αναλάβει η Claro. Στην Κολομβία, υπάρχουν σταθερά δίκτυα τεχνολογίας 5G μέσω Directv, ενώ χώρες όπως το Μεξικό, η Χιλή, η Αργεντινή και το Περού διανύουν τα πρώτα βήματα ανάπτυξης. Σε περιοχές όπως οι Παρθένοι Νήσοι, το Πουέρτο Ρίκο και η Καραϊβική υπάρχουν δίκτυα 5G από τον Δεκέμβριο του 2019, τα οποία έχει αναλάβει η T-Mobile. Η βελτίωση της υποδομής κινητής τηλεφωνίας στη Λατινική Αμερική αποτελεί μία από τις μεγάλες προκλήσεις για την εξασφάλιση ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality of Service – QoS) και τα επίπεδα κάλυψης προσεγγίζουν αυτά των κορυφαίων χωρών, όπως των Ηνωμένων Πολιτειών, της Ιαπωνίας και του Ηνωμένου Βασιλείου (GSMA Latin America, 2015). Στην τρέχουσα δεκαετία η ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας στη

Λατινική Αμερική θα εξακολουθήσει να επικεντρώνεται στην τεχνολογία 4G. Έως το 2025 αναμένεται να καλύψει το 67% του πληθυσμού της περιοχής και θα οδηγήσει στην άμεση ενσωμάτωση του 5G (GSM Association, 2019).

Η παγκόσμια κατάσταση της ανάπτυξης 5G μπορεί να απεικονιστεί με βάση την έκθεση της Global mobile Suppliers Association όπου μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2020, υπήρχαν 397 πάροχοι από 129 χώρες ή περιοχές, οι οποίοι έχουν επενδύσει σε δοκιμές, έχουν αποκτήσει άδειες, και έχουν προγραμματισμένη ανάπτυξη δικτύου ή έχουν ήδη υλοποιήσει δίκτυα 5G. Επιπρόσθετα, 101 αρμόδιες ομάδες που συναντώνται σε 44 χώρες ή περιοχές έχουν δημιουργήσει μία ή περισσότερες υπηρεσίες που είναι συμβατές με πρότυπα 3GPP για 5G.

Στην επέκταση των τεχνολογιών 5G είναι απαραίτητο να συζητηθούν οι πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού. Αυτές οι επιπτώσεις οι οποίες σχετίζονται μεταξύ άλλων, με βασικές τεχνολογίες των 5G (LS-AA, mmW, και σταθμοί μικρών κυψελών), οι οποίες μπορεί να μειώνουν την επίδραση στους βιολογικούς ιστούς των ανθρώπων όμως λόγω των πολύ υψηλότερων συχνοτήτων μετάδοσης, ενδεχομένως να προκαλούν βλάβες σε όργανα όπως τα μάτια. Επίσης, αύξηση του αποτυπώματος άνθρακα μπορεί να προκληθεί από την ένταξη μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών στα δίκτυα, τη ανάπτυξη του βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) και από την αύξηση των κέντρων δεδομένων για την υποστήριξη της τεχνολογίας εικονικοποίησης, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην Υπολογιστική Ομίχλη (Fog Computing – FC) ή την κινητή υπολογιστική άκρων (Mobile edge computing -MEC), προκειμένου να επιτρέψουν την εικονικοποίηση του RAN.

Για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών συνεπειών, θεωρείται επιβεβλημένο, οι κυβερνήσεις να χρηματοδοτήσουν μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που στόχο θα έχουν τον εντοπισμό των πιθανών κινδύνων για την υγεία που σχετίζονται με το 5G και στη συνέχεια να υλοποιήσουν ρυθμιστικές στρατηγικές, οι οποίες θα προστατεύουν την υγεία του πληθυσμού. Επιπροσθέτως, είναι απαραίτητη η συνεχής έρευνα και εξέλιξη προς οικονομικότερα και συνάμα αποδοτικότερα δίκτυα 5G όσον αφορά τις εκπομπές άνθρακα (carbon footprint) και την ενεργειακή απόδοση.

Ο Πίνακας 2 στην ενότητα 4.2.11 παρουσιάζει συνοπτικά τους διαθέσιμους αλγόριθμους χρονοδρομολόγησης πακέτων 5G και τον τρόπο που αναθέτουν ραδιοπόρους για τους οποίους υπάρχουν εφαρμογές και ερευνητικά αποτελέσματα. Μπορούν να διακριθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες: Τους ανεξάρτητους από το κανάλι αλγόριθμους (κλασικοί) και τους εξαρτημένους από το κανάλι (προχωρημένοι). Οι κλασικοί όπως ο αναλογικά δίκαιος αλγόριθμος, ο FIFO και ο Round-Robin εκχωρούν πόρους με βάση τα βάρη, τη σειρά άφιξης, και εκ περιτροπής. Ενώ ο αλγόριθμος σταθμισμένης δίκαιης αναμονής και ο τυφλής/ίσης ρυθμαπόδοσης εκχωρούν πόρους ισόποσα με σταθμισμένη (ως προς την κίνηση) ανάθεση πόρων και ίδια ρυθμαπόδοση για όλους τους χρήστες αντίστοιχα.

Όλοι οι αλγόριθμοι στον Πίνακα 2 χρησιμοποιούνται για τον χρονοπρογραμματισμό είτε ενός τύπου κίνησης είτε πολλαπλών κλάσεων QoS. Στην περίπτωση του 5G, οι αποφάσεις χρονοδρομολόγησης λαμβάνουν χώρα με βάση την ουρά και τις πληροφορίες κατάστασης του καναλιού (CSI). Συνεπώς, οι αλγόριθμοι ανεξάρτητοι από το κανάλι δεν είναι σχετικοί με το 5G. Στην περίπτωση των προχωρημένων αλγορίθμων που εξαρτώνται από το κανάλι, το περισσότερο έργο έχει επικεντρωθεί στην υποστήριξη δρομολογητών GBR. Παρέχεται ένας σταθερός ρυθμός στα τερματικά χρηστών με σκοπό να υπάρχει ένας εγγυημένος ρυθμός bit. Επίσης, αντιμετωπίζεται η ευαίσθητη κίνηση ως προς την καθυστέρηση όπου χρησιμοποιούνται υβριδικό χρονοδρομολογητές με πρωτόκολλα αυτόματης αίτησης επαναμετάδοσης (HARQ) δύο-επιπέδων. Ωστόσο, στην περίπτωση του 5G, ο σταθμός βάσης χρειάζεται έναν διαστρωματικό αλγόριθμο ο οποίος θα αποφασίζει για την κατανομή πόρων και τον χρονοπρογραμματισμό πολλαπλών επιπέδων λαμβάνοντας υπόψη την ουρά και το CSI. Ο Πίνακας 2 περιέχει τους υπερσύγχρονους διαστρωματικούς αλγόριθμους χρονοδρομολόγησης πακέτων (π.χ. όπως ο αλγόριθμος κατανομής πόρων κατερχόμενη ζεύξης) οι οποίοι αποφασίζουν με βάση την κατάσταση φόρτου και την άπληστη κατανομή μπλοκ πόρων. Οι αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν υπόψη τις αφίξεις πακέτων στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer) και τη συμπεριφορά προώθησης και αναμονής. Επίσης, αξιολογούν τις συνθήκες του φυσικού επιπέδου (Physical Layer) κατά τον σχεδιασμό του αλγόριθμου χρονοδρομολόγησης και κατανομής πόρων.

Στην παρούσα Εργασία, έχει διεξαχθεί μια εκτεταμένη έρευνα για τα κυψελωτά 5G δίκτυα και τους προχωρημένους αλγορίθμους χρονοδρομολόγησης πακέτων. Αρχικά, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός δικτύου 5G, τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 5G και κλασικοί μηχανισμοί χρονοδρομολόγησης στα LTE/LTE-Advanced δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τον χρονοπρογραμματισμό στα Κεφάλαια 2 και 3 αντίστοιχα. Αρκετές ερευνητικές εργασίες έχουν αναλυθεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας και προχωρημένες τεχνικές χρονοδρομολόγησης παρουσιάστηκαν και εξηγήθηκαν αρκετά λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4. Σε όλους τους αλγορίθμους χρονοδρομολόγησης υπάρχει πάντα trade-off μεταξύ πολυπλοκότητας, καθυστέρησης, δικαιοσύνης, εξυπηρέτησης χρηστών, κτλ. συνεπώς δεν μπορούν να καταταχθούν. Η επιλογή εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας και συνεπώς απαιτείται μια πολυκριτηριακή μέθοδος απόφασης (decision making) για την εξεύρεση του βέλτιστου αλγορίθμου.

Όσο πλησιάζει η μετάβαση στο 6G, η χρήση της ενισχυτικής μάθησης και η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) σε χρονοδρομολογητές 5G φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη προοπτική. Ως εκ τούτου, ως μελλοντικές εργασίες για 6G κυψελωτά δίκτυα, οι προτεινόμενες λύσεις θα εφαρμοστούν και οι επιδόσεις των συστημάτων θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα των ερευνητικών εργασιών που αναφέρθηκαν, προκειμένου να παρέχουν ένα βέλτιστο πλαίσιο χρονοδρομολόγησης 6G. Θα διερευνηθούν άλλες κυματομορφές 5G New Radio (NR) και θα αξιοποιηθούν στο πλαίσιο ενοποιημένης χρονοδρομολόγησης και ανάθεσης πόρων (SRA). Θα διερευνηθεί επίσης εάν οι αλγόριθμοι δυναμικής χρονοδρομολόγησης μπορούν να επεκταθούν περαιτέρω για να υποστηρίξουν την επικοινωνία οχημάτων (Vehicle to Everything - V2X), η οποία είναι σημαντικά πιο απαιτητική λόγω των κινητών τερματικών υψηλής ταχύτητας.

Βιβλιογραφία (Διαδικτυακές πηγές)

- [1] Β. Αντωνιάδης et al., "ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ Στρατηγική - Προκλήσεις - Όραμα", Eett.gr, 2018 [Online]
https://www.eett.gr/opencms/export/sites/default/admin/downloads/Informative_Documentation/EETT_book.pdf. [Accessed: 25- Aug- 2020].
- [2] "Τηλεπικοινωνίες", El.wikipedia.org, 2018 [Online]. Available: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%89%CE%BD%CE%AF%CE%B5%CF%82>. [Accessed: 26- Aug- 2020].
- [3] "Ασύρματο δίκτυο", El.wikipedia.org, 2020 [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%83%CF%8D%CF%81%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF. [Accessed: 26- Aug- 2020].
- [4] "1G", En.wikipedia.org, 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>. [Accessed: 27- Aug- 2020].
- [5] "2G", En.wikipedia.org, 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/2G>. [Accessed: 27- Aug- 2020].
- [6] B. Charny, "World's first 3G phone network goes live | ZDNet", ZDNet, 2020. [Online]. Available: <https://www.zdnet.com/article/worlds-first-3g-phone-network-goes-live/>. [Accessed: 27- Aug- 2020].
- [7] Ijmtter.com, 2020. [Online]. Available: <https://ijmtter.com/papers/volume-2/issue-10/evolution-of-mobile-generation-technology-1g-to-5g-and-review-of-5g.pdf>. [Accessed: 27- Aug- 2020].
- [8] "4G", En.wikipedia.org, 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/4G>. [Accessed: 27- Aug- 2020].
- [9] "5G", En.wikipedia.org, 2020. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>. [Accessed: 07- Sep- 2020].
- [10] "The history of mobile phones | M-STAT S.A.", M-stat.gr, 2015. [Online]. Available: <https://www.m-stat.gr/the-history-of-mobile-phones/>. [Accessed: 10- Sep- 2020].

- [11] "LTE 3GPP releases Overview - Cable Free", Cable Free, 2008. [Online]. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/overview-of-lte-3gpp-releases/>. [Accessed: 02- Sep- 2020].
- [12] "3G CELLULAR STANDARDS Projects", 3G CELLULAR STANDARDS Projects, 2020. [Online]. Available: <http://www.projectsatbangalore.com/3G-network/>. [Accessed: 02- Sep- 2020].
- [13] "HSPA - About Us", About Us, 2017. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20170709180358/https://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/hspa>. [Accessed: 02- Sep- 2020].
- [14] Blog.iasscore.in, 2020. [Online]. Available: <https://blog.iasscore.in/wp-content/uploads/2017/03/318.png>. [Accessed: 02- Sep- 2020].
- [15] "Κείμενο Παρουσίασης της Γνωμοδότησης περί της Αρχιτεκτονικής των Δικτύων Ασύρματης Πρόσβασης Κινητής Τηλεφωνίας στον ΓΤΤΤ", Eekt.gr, 2020. [Online]. Available: <http://www.eekt.gr/LinkClick.aspx?fileticket=HWdtGaEGyP0=&tabid=36>. [Accessed: 02- Oct- 2020].
- [16] mansi07. "1G,2G,3G,4G And 5G." Mansipruthi, 2 Sept. 2015, mansipruthi.wordpress.com/2015/09/02/1g2g3g4g-and-5g/.
- [17] https://el.wikipedia.org/wiki/Κυψελωτό_δίκτυο
- [18] "Cellular Communication Network Technologies", Tnuda, 2020. [Online]. Available: <https://www.tnuda.org.il/en/physics-radiation/radio-frequency-rf-radiation/cellular-communication-network-technologies>. [Accessed: 10- Oct- 2020].
- [19] "Small Cell Networks and the Evolution of 5G - Qorvo", Qorvo.com, 2017. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>. [Accessed: 17- Dec- 2020].
- [20] "Small cell", En.wikipedia.org. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell [Accessed:17-Dec- 2020].
- [21] " Femtocell ", En.wikipedia.org. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell> [Accessed:17-Dec- 2020].
- [22] "Wireless Picocell Coverage | Quartier de l'innovation", Quartierinnovationmontreal.com, 2021. [Online]. Available: <http://quartierinnovationmontreal.com/en/open-air-smart-living-laboratory/wireless-picocell-coverage>. [Accessed: 17- Dec- 2020].

- [23] "Defining 5G Architecture", sdxcentral, 2017. [Online]. Available: [https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-architecture/.](https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-architecture/) [Τελευταία πρόσβαση: 29/10/2020].
- [24] "5G-PPP", 5g-ppp.eu, 2020. [Online]. Available: [https://5g-ppp.eu/.](https://5g-ppp.eu/) [Τελευταία πρόσβαση: 30/10/2020].
- [25] The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services.. EU, 2020.
- [26] T. Norp, "5G Requirements and Key Performance Indicators", Journal of ICT Standardization, vol. 6, no. 1, pp. 15-30, 2018. Available: 10.13052/jicts2245-800x.612.
- [27] "5G - Architecture - Tutorialspoint", Tutorialspoint.com, 2020. [Online]. Available: https://www.tutorialspoint.com/5g/5g_architecture.htm. [Accessed: 07- Dec- 2020].
- [28] "Comparison Data Traffic Scheduling Techniques for Classifying QoS over 5G Mobile Networks - IEEE Conference Publication", Ieeexplore.ieee.org, 2017. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7929728>. [Accessed: 16- Dec- 2020].
- [29] "Class-Based Weighted Fair Queueing", CISCO Documentation.
- [30] "Resource Management in 5G Mobile Networks: Survey and Challenges", Journal of Information Processing Systems, vol. 16, no. 4, pp. 896 - 914, 2020. Available: 10.3745/JIPS.03.0143 [Accessed 12 February 2021].
- [31] Global mobile Suppliers Association. 5G market: Snapshot september 2020.
- [32] "5G - The Quantum Leap in Mobile Communications: ThinkPalm", Thinkpalm.com, 2021. [Online]. Available: [https://thinkpalm.com/blogs/5g-much-anticipated-quantum-leap-mobile-communications/.](https://thinkpalm.com/blogs/5g-much-anticipated-quantum-leap-mobile-communications/) [Accessed: 16- Nov- 2020].
- [33] Smart Antenna Systems Model Simulation Design for 5G Wireless Network Systems - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Massive-MIMO-operation-principle_fig1_330952838 [accessed 16 Nov, 2020]

Βιβλιογραφία (Ερευνητικές εργασίες)

- [34] Bogale, X. Wang and Le, L. "mmWave communication enabling techniques for 5G wireless systems", <https://www.sciencedirect.com>, 2017 [Accessed 11 November 2020].
- [35] Capozzi, F., Piro, G., Grieco, L. A., Boggia, G., & Camarda, P. (2012). Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: Key design issues and a survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, 15(2), 678-700.
- [36] Comşa, I. S., Zhang, S., Aydin, M. E., Kuonen, P., Lu, Y., Trestian, R., & Ghinea, G. (2019). Towards 5G: A reinforcement learning-based scheduling solution for data traffic management. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 15(4), 1661-1675.
- [37] Delgado, D. U. C., Gutierrez, C. A., & Caicedo, O. (2021). 5G and Beyond: Past, Present and Future of the Mobile Communications. *IEEE Latin America Transactions*, 19(10), 1702-1736.
- [38] Demers, A., Keshav, S. and Shenker, S. "Analysis and simulation of a fair queueing algorithm", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 19, no. 4, pp. 1-12, 1989. Available: 10.1145/75247.75248 [Accessed 14 December 2020].
- [39] Dighriri, M., Lee, G. and Baker, T. "Measurement and Classification of Smart Systems Data Traffic Over 5G Mobile Networks", *Technology for Smart Futures*, pp. 195-217, 2017. Available: 10.1007/978-3-319-60137-3_9 [Accessed 14 December 2020].
- [40] Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M., & Chandramouli, D. (2019). 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE Access*, 7, 127639-127651.
- [41] Gozalvez, J. (2015). Tentative 3GPP timeline for 5G [mobile radio]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 10(3), 12-18.
- [42] GSM Association, "The mobile economy latin america 2019," *GSMA Documents*, pp. 1–52, 2019.
- [43] GSMA Latin America, "Infrastructure deployment in latin america," *GSMA Documents*, 2015.
- [44] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.
- [45] Guo, P., Liu, M., Wu, J., Xue, Z., & He, X. (2018). Energy-efficient fault-tolerant scheduling algorithm for real-time tasks in cloud-based 5G networks. *IEEE Access*, 6, 53671-53683.

- [46] Husain, M. I., Haque, M. E., & Tariq, F. (2020, August). An Efficient Packet Scheduling Algorithm for URLLC Systems. In 2020 International Conference on UK-China Emerging Technologies (UCET) (pp. 1-4). IEEE.
- [47] Jaber, M., Imran, M. A., Tafazolli, R., & Tukmanov, A. (2016). 5G backhaul challenges and emerging research directions: A survey. *IEEE access*, 4, 1743-1766.
- [48] Jones, R. W. (2006). The global framework for radiocommunications. *ITU News*, (3), 29-31.
- [49] Karimi, A., Pedersen, K. I., Mahmood, N. H., Pocovi, G., & Mogensen, P. (2019, April). Efficient low complexity packet scheduling algorithm for mixed URLLC and eMBB traffic in 5G. In 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring) (pp. 1-6). IEEE.
- [50] Kim, D., & Zarri, M. (2018). Road to 5G: Introduction and migration. White Paper.
- [51] Kumar, N., Misra, S., Rodrigues, J. J., & Obaidat, M. S. (2015). Coalition games for spatio-temporal big data in Internet of Vehicles environment: A comparative analysis. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(4), 310-320.
- [52] Lee, Y. L., Loo, J., Chuah, T. C., & Wang, L. C. (2018). Dynamic network slicing for multitenant heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(4), 2146-2161.
- [53] Mamode, M. I. S., & Fowdur, T. P. (2020). Survey of scheduling schemes in 5G mobile communication systems. *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*, 6(2), 21-30.
- [54] Manap, S. Dimiyati, K. Hindia, M. Abu Talip, M. and Tafazolli, R. "Survey of Radio Resource Management in 5G Heterogeneous Networks", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131202-131223, 2020. Available: 10.1109/access.2020.3002252 [Accessed 10 February 2021].
- [55] Marcus, M. J. (2015). 5G and "IMT for 2020 and beyond"[Spectrum Policy and Regulatory Issues]. *IEEE Wireless Communications*, 22(4), 2-3.
- [56] Monserrat, J. F., Mange, G., Braun, V., Tullberg, H., Zimmermann, G., & Bulakci, Ö. (2015). METIS research advances towards the 5G mobile and wireless system definition. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1-16.
- [57] Miaji, Y and Hassan, S. "Comparative simulation of scheduling mechanism in packet switching network," in *Proceedings - 2nd International Conference on Network Applications, Protocols and Services, NETAPPS 2010*, 2010, pp. 141–147
- [58] Nawaz, S. J., Sharma, S. K., Wyne, S., Patwary, M. N., & Asaduzzaman, M. (2019). Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future. *IEEE Access*, 7, 46317-46350.

- [59] Nwawelu, U. N., Ani, C. I., & Ahaneku, M. A. (2018). Comparative analysis of the performance of resource allocation algorithms in long term evolution networks. *Nigerian Journal of Technology*, 36(1), 163-171.
- [60] Peterson, L. and Davie, B. *Computer networks*, 5th ed. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2012.
- [61] Queseth, O., Bulakci, Ö., Spapis, P., Bisson, P., Marsch, P., Arnold, P., ... & Yousaf, Z. (2017). 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture (Version 2.0, December 2017).
- [62] Rezende, P. H., & Madeira, E. R. (2018, April). An adaptive network slicing for LTE radio access networks. In *2018 Wireless Days (WD)* (pp. 68-73). IEEE.
- [63] Ring, D. H. (1947). Mobile telephony-wide area coverage. Bell Technical Laboratories technical memoranda.
- [64] Roberts, M. L., Temple, M. A., Mills, R. F., & Raines, R. A. (2006). Evolution of the air interface of cellular communications systems toward 4G realization. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8(1), 2-23.
- [65] Säily, M., Estevan, C. B., Gimenez, J. J., Tesema, F., Guo, W., Gomez-Barquero, D., & Mi, D. (2020). 5G radio access network architecture for terrestrial broadcast services. *IEEE Transactions on broadcasting*, 66(2), 404-415.
- [66] Semeria, C. *Supporting Differentiated Service Classes: Queue Scheduling Disciplines*. USA: Juniper Networks, 2001, pp. 1–27.
- [67] Sigwele, T., Alam, A. S., Pillai, P., & Hu, Y. F. (2017). Energy-efficient cloud radio access networks by cloud based workload consolidation for 5G. *Journal of Network and Computer Applications*, 78, 1-8.
- [68] Tölli, A. et al., "Massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems", *5G Mobile and Wireless Communications Technology*, pp. 208-247. Available: 10.1017/cbo9781316417744.009 [Accessed 11 November 2020].
- [69] Vora, A., & Kang, K. D. (2018). Effective 5G wireless downlink scheduling and resource allocation in cyber-physical systems. *Technologies*, 6(4), 105.
- [70] Wang, S., Xi, B., Zhang, Z., & Deng, B. (2020, November). A Downlink Scheduling Algorithm Based on Network Slicing for 5G. In *International Conference on Communications and Networking in China* (pp. 212-225). Springer, Cham.
- [71] Xie, J., Song, Z., Li, Y., Zhang, Y., Yu, H., Zhan, J., ... & Guo, J. (2018). A survey on machine learning-based mobile big data analysis: Challenges and applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.
- [72] Yang, Y., Wu, L., Yin, G., Li, L. and Zhao, H. (2017). A Survey on Security and Privacy Issues in Internet-of-Things, *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 4, No. 5, pp. 1250-1258.

- [73] You, X., Zhang, C., Tan, X., Jin, S., & Wu, H. (2019). AI for 5G: research directions and paradigms. *Science China Information Sciences*, 62(2), 1-13.
- [74] Zirong, G. and Huaxin, Z. "Simulation and analysis of weighted fair queueing algorithms in OPNET", in *Proceedings – 2009 International Conference on Computer Modeling and Simulation, ICCMS 2009* ICCMS 2009, 2009, pp. 114-118.
- [75] Ang, E. M., Wee, K., Pang, Y. H., & Phang, K. K. (2015). A performance analysis on packet scheduling schemes based on an exponential rule for real-time traffic in LTE. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1), 1-12.
- [76] Femenias, G.; Riera-Palou, F.; Mestre, X.; Olmos, J.J. Downlink Scheduling and Resource Allocation for 5G MIMO-Multicarrier: OFDM vs FBMC/OQAM. *IEEE Access* 2017, 5, 13770–13786.
- [77] Pedersen, K. et al., Agile 5G Scheduler for Improved E2E Performance and Flexibility for Different Network Implementations. In *IEEE Communications Magazine*, 2018.
- [78] Monhof, S., et al, Payload-size and Deadline-aware Scheduling for Upcoming 5G Networks: Experimental Validation in High-load Scenarios. In *IEEE 88th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2018
- [79] Gueguen C., Ezzaouia M. and Yassin M., Inter-cellular scheduler for 5G wireless networks. In *Physical Communication*, 2016.
- [80] Dighriri M., et al., Comparison Data Traffic Scheduling Techniques for Classifying QoS over 5G Mobile Networks. In *31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, 2017.
- [81] Comsa I., De-Domenico A. and Ktenas D., QoS-Driven Scheduling in 5G Radio Access Networks - A Reinforcement Learning Approach. In *GLOBECOM IEEE Global Communications Conference*, 2017.
- [82] Y. Jin and B. Lee, "A comprehensive survey of issues in solid state drives", *Advances in Computers*, pp. 1-69, 2019. Available: 10.1016/bs.adcom.2019.02.001 [Accessed 16 November 2020].