

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 6G ΚΑΙ ΟΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ
ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΓΕΝΙΕΣ»



Του φοιτητή

Βαγιανού Χαράλαμπου
Αρ. Μητρώου: 113706

Επιβλέπων

Αμανατιάδης Δημήτριος
Μέλος ΕΔΙΠ

Σεπτέμβριος 2026

Τίτλος Π. Ε: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 6G ΚΑΙ ΟΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ
ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΓΕΝΙΕΣ

Κωδικός Π. Ε. : 25241

Ονοματεπώνυμο φοιτητή : Βαγιανός Χαράλαμπος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή : Αμανατιάδης Δημήτριος

Ημερομηνία ανάληψης : 31/03/2025

Ημερομηνία περάτωσης : 31/08/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ. ΠΑ. Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Βαγιανού Χαράλαμπου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Το θέμα αυτής της εργασίας επιλέχθηκε λόγω του ενδιαφέροντος του φοιτητή-συγγραφέα για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ο τρόπος λειτουργίας, η εξέλιξη τους καθώς και το πόσο αξιοποιούνται στο έπακρο από την κοινωνία μας σήμερα, σε σύγκριση με προηγούμενα χρόνια. Την ώρα που γίνεται η συγγραφή αυτής της εργασίας, είμαστε στο μεταίχμιο μιας νέας γενιάς (6th Generation) που όπως παρουσιάζεται, θα φέρει νέες δυνατότητες και καινούρια εργαλεία σε σχέση πάντα με την τωρινή εποχή (5G). Το ερώτημα είναι αν αξιοποιήσαμε στο 100% όλες τις δυνατότητες που δημιούργησε η εποχή 5G ούτως ώστε να δημιουργήθηκε η ανάγκη για μετάβαση στην επόμενη εποχή.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση των νέων δυνατοτήτων που θα προσφέρουν οι επόμενες τεχνολογίες 6G (6ης γενιάς) και το πώς θα αξιοποιηθούν από τους τελικούς χρήστες (ανθρώπους , έξυπνες συσκευές(smart devices), AI technologies(τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης). Γίνεται σύγκριση των τεχνολογιών και των δυνατοτήτων σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες (5G, 4G) και έρευνα στο κατά πόσο αξιοποιήθηκαν στο έπακρο οι δυνατότητες τους .Θα γίνει σύγκριση με αυτά που θα φέρουν οι νέες τεχνολογίες 6ης γενιάς, και στο τι θα πρέπει να γίνει από τους παρόχους αλλά και τους χρήστες ούτως ώστε αυτή η μετάβαση να αξιοποιηθεί πλήρως.

Η εργασία ακολουθεί μια δομημένη προσέγγιση που ξεκινά από τις θεμελιώδεις έννοιες των επικοινωνιών και σταδιακά οδηγεί στις πιο σύγχρονες τεχνολογίες. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της επικοινωνίας και των δικτύων, μαζί με τις αρχές και τα μοντέλα που διέπουν τη λειτουργία τους, όπως το μοντέλο OSI και η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, αλλά και οι πρώτες τεχνολογίες ασύρματων και κινητών δικτύων. Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στην ιστορική εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας, από τα πρώτα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς έως τα δίκτυα πέμπτης γενιάς και το 5G-Advanced, αναδεικνύοντας τα τεχνολογικά άλματα και τις διαδοχικές μεταβάσεις κάθε γενιάς. Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στις τεχνολογίες και την αρχιτεκτονική των δικτύων 6G, εξετάζοντας το όραμα, τους στόχους, τη χρήση συχνοτήτων Terahertz, τον ρόλο της τεχνητής νοημοσύνης (AI) ως εγγενούς στοιχείου του δικτύου, καθώς και τις προκλήσεις ασφάλειας, ενέργειας και υλοποίησης. Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιεί συστηματική σύγκριση των δικτύων 5G και 6G ως προς τις ταχύτητες, την καθυστέρηση, τη χωρητικότητα, το φάσμα και τις εφαρμογές τους, ενώ το πέμπτο κεφάλαιο εξετάζει ειδικότερα την αξιοποίηση του 5G στην Ελλάδα, τους παρόχους, το ρυθμιστικό πλαίσιο και τις προοπτικές μετάβασης της χώρας στο 6G. Το έκτο κεφάλαιο διατυπώνει τις προτάσεις και τις απόψεις του συγγραφέα. Το έβδομο κεφάλαιο συνθέτει τα συμπεράσματα της μελέτης και τα τελικά αποτελέσματα της εργασίας. Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιτυχής μετάβαση στην έκτη γενιά απαιτεί συντονισμένο σχεδιασμό, ενίσχυση της έρευνας και της συνεργασίας, καθώς και ισόρροπη αντιμετώπιση των τεχνικών, ενεργειακών και κοινωνικών διαστάσεων, ώστε οι υποσχέσεις των νέων τεχνολογιών να μετουσιωθούν σε πραγματικά οφέλη για τους χρήστες και την κοινωνία.

«6G TECHNOLOGIES AND THEIR CAPABILITIES IN COMPARISON WITH PREVIOUS GENERATIONS»

«Charalampos Vagianos»

Abstract

This thesis focuses on the presentation of the new capabilities that the next 6G technologies (6th generation) will offer and how they will be utilized by end users (people, smart devices, AI technologies). A comparison of the technologies and capabilities is made in relation to previous technologies (5G, 4G) and research is conducted on whether their capabilities have been fully utilized. A comparison will be made with what the new 6th generation technologies will bring, and what should be done by providers and users so that this transition is fully utilized.

The work follows a structured approach that starts from the fundamental concepts of communications and gradually leads to the most modern technologies. The first chapter presents the basic concepts of communication and networks, along with the principles and models that govern their operation, such as the OSI model and the TCP/IP protocol stack, as well as the first wireless and mobile network technologies. The second chapter focuses on the historical evolution of mobile telephony, from the first analog first-generation systems to fifth-generation networks and 5G-Advanced, highlighting the technological leaps and successive transitions of each generation. The third chapter is dedicated to the technologies and architecture of 6G networks, examining the vision, goals, the use of Terahertz frequencies, the role of artificial intelligence (AI) as an inherent element of the network, as well as the challenges of security, energy and implementation. The fourth chapter systematically compares 5G and 6G networks in terms of their speeds, latency, capacity, spectrum and applications, while the fifth chapter examines in particular the use of 5G in Greece, the providers, the regulatory framework and the prospects for the country's transition to 6G. The sixth chapter formulates the proposals and author's views. The seventh chapter summarizes the conclusions of the study and the final results of the work. The work concludes that the successful transition to the sixth generation requires coordinated planning, enhanced research and cooperation, as well as a balanced approach to the technical, energy and social dimensions, so that the promises of new technologies can be transformed into real benefits for users and society.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά όλους όσους συνέβαλαν για την ολοκλήρωση αυτής της Πτυχιακής Εργασίας. Αρχικά την οικογένεια μου και τους συναδέλφους μου για την υπομονή τους κατά τη διάρκεια συγγραφής αυτής της εργασίας ,κυρίως όμως τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Αμανατιάδη Δημήτριο για την υπομονή του και τη βοήθεια του σε όλα τα στάδια της Πτυχιακής και για όλο αυτόν τον χρόνο που χρειάστηκε να αφιερώσει.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	III
Περίληψη	IV
Abstract	V
Ευχαριστίες	VI
Περιεχόμενα	VII
Κατάλογος Σχημάτων	XI
Κατάλογος Πινάκων.....	XII
Συντομογραφίες.....	XIII
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγικές έννοιες.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Η έννοια της Επικοινωνίας και της Τηλεπικοινωνίας	1
1.3 Δίκτυα υπολογιστών.....	1
1.4 Βασικές Αρχές Δικτύων & Μοντέλα Επικοινωνιών	2
1.4.1 Το μοντέλο OSI	3
1.4.2 Η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP	3
1.4.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και αξιόπιστη μετάδοση.....	4
1.5 Ιστορική ανάπτυξη Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνιών	5
1.6 Τεχνολογίες Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας.....	6
1.6.1 Τεχνολογίες πρόσβασης/μετάδοσης	6
1.6.2 Φάσμα συχνοτήτων	7
1.6.3 Τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών	7
1.6.4 Αρχιτεκτονικές Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνιών	7
1.6.5 Διαχείριση δικτύων με εικονικοποίηση.....	8
1.7 Το 6G και η μετάβαση από 5G σε 6G	8
1.8 Επίλογος	9
Κεφάλαιο 2ο: Ιστορική Εξέλιξη Κινητής Τηλεφωνίας.....	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Πρώτες γενιές κινητής τηλεφωνίας (1G – 2G).....	10
2.3 Δίκτυα 1 ^{ης} Γενιάς (1G)	10
2.4 Δίκτυα 2 ^{ης} Γενιάς (2G).....	11
2.5 Μετάβαση σε προηγμένα δίκτυα (3G, 4G)	11

2.6	Δίκτυα 3 ^{ης} Γενιάς (3G)	12
2.6.1	Βασικές τεχνολογίες του 3G.....	12
2.6.2	Ταχύτητες και εμπειρία χρήσης.....	12
2.6.3	Σημαντικότητα του 3G	13
2.7	Δίκτυα 4 ^{ης} Γενιάς (4G)	13
2.7.1	Η τεχνολογία του 4G	14
2.7.2	Η εμπειρία των χρηστών σε συνδυασμό με την εξάπλωση των Smartphone.....	14
2.7.3	Η σημασία του 4G για τις επόμενες γενιές.....	14
2.7.4	Μετάβαση από 3G σε 4G	14
2.8	Δίκτυα 5 ^{ης} Γενιάς (5G).....	15
2.8.1	Οι διαφορές της 5 ^{ης} Γενιάς σε σχέση με την προηγούμενη	16
2.8.2	Τεχνολογίες της 5 ^{ης} Γενιάς	16
2.8.3	Το 5G ως βάση για τον ερχομό του 6G.....	17
2.8.4	5G - Advanced.....	17
2.9	Επίλογος.....	18
Κεφάλαιο 3ο: Τεχνολογίες και Αρχιτεκτονική Δικτύων 6G.....		19
3.1	Εισαγωγή.....	19
3.2	Το όραμα και οι στόχοι της γενιάς 6G	19
3.3	Σύγκριση φιλοσοφίας 5G και 6G	21
3.4	Φάσμα συχνοτήτων και τεχνολογίες μετάδοσης.....	21
3.4.1	Χρήση συχνοτήτων Terahertz (THz)	22
3.4.2	millimeter waves - mmWaves	23
3.4.3	6G Ultra Massive MIMO	24
3.4.4	6G Cell Free Massive MIMO	25
3.4.5	Beamforming σε δίκτυα 6G.....	28
3.4.6	Ανακλαστικές Έξυπνες Επιφάνειες (RIS) στα δίκτυα 6G.....	29
3.4.7	Κβαντικό Διαδίκτυο και Κβαντική Επικοινωνία.....	30
3.4.8	Επικοινωνία Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV) και Δορυφόρων	30
3.5	AI και AI-Native Δίκτυα	32
3.5.1	Αυτοματοποιημένη διαχείριση δικτύου.....	32
3.5.2	Μηχανική μάθηση στις τηλεπικοινωνίες.....	32
3.6	Αρχιτεκτονική δικτύων 6G	33
3.6.1	Ενοποίηση επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δικτύων	33
3.6.2	Δίκτυα επόμενης γενιάς - virtualization και network slicing	33

3.7	Νέες εφαρμογές και υπηρεσίες του 6G	34
3.7.1	Ολογραφική επικοινωνία και immersive communication	34
3.7.2	Επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα	35
3.7.3	Έξυπνες πόλεις και αυτόνομα συστήματα.....	35
3.7.4	Ρομποτική Του Μέλλοντος.....	37
3.8	Προκλήσεις και περιορισμοί υλοποίησης των τεχνολογιών	38
3.8.1	Τεχνολογικές προκλήσεις.....	39
3.8.2	Περιορισμοί στην αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων	39
3.8.3	Πολυπλοκότητα τηλεπικοινωνιακών υποδομών	39
3.8.4	Ενεργειακή κατανάλωση και βιωσιμότητα	39
3.8.5	Πράσινες τεχνολογίες επικοινωνιών	39
3.8.6	Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα στα Δίκτυα 6G	39
3.9	Επίλογος.....	41
Κεφάλαιο 4ο:	Σύγκριση Δικτύων 5G και 6G	42
4.1	Εισαγωγή.....	42
4.2	Ταχύτητες μετάδοσης και Latency	42
4.3	Χωρητικότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα	43
4.4	Φάσμα συχνοτήτων και αρχιτεκτονική δικτύου.....	44
4.5	Τεχνητή Νοημοσύνη και αυτοματοποίηση	44
4.6	Εφαρμογές και σενάρια χρήσης	45
4.7	Πλεονεκτήματα και περιορισμοί κάθε τεχνολογίας	45
4.8	Επίλογος.....	47
Κεφάλαιο 5ο:	Αξιοποίηση 5G και προοπτικές 6G στην Ελλάδα	48
5.1	Εισαγωγή.....	48
5.2	Η ανάπτυξη του 5G στην Ελλάδα	48
5.3	Οι πάροχοι και η κάλυψη του δικτύου στην Ελλάδα	49
5.4	Φάσμα συχνοτήτων και ρυθμιστικό πλαίσιο.....	50
5.5	Εφαρμογές και τομείς αξιοποίησης του 5G	51
5.6	Έξυπνες πόλεις και ψηφιακός μετασχηματισμός.....	52
5.7	Προκλήσεις και εμπόδια στην ελληνική αγορά	53
5.8	Προοπτικές μετάβασης στο 6G στην Ελλάδα	53
5.9	Στρατηγική και χρηματοδότηση.....	54
5.10	Επίλογος.....	55
Κεφάλαιο 6ο:	Προτάσεις και απόψεις του συγγραφέα	57

6.1	Εισαγωγή.....	57
6.2	Εξέλιξη δικτύων επίγειων και ασυρμάτων.....	57
6.3	Τεχνολογικά πλεονεκτήματα 6G σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές.....	58
6.4	Δίκτυα του Μέλλοντος και AI.....	59
6.5	Προκλήσεις ως προς την υλοποίηση του 6G.....	61
6.6	Η θέση της Ελλάδας στη μετάβαση από το 5G στο 6G	63
6.7	Μελλοντικές εφαρμογές και προοπτικές ανάπτυξης.....	64
6.8	Εμπορικές πολιτικές εταιριών τηλεπικοινωνιών	65
6.9	Επίλογος	67
Κεφάλαιο 7ο:	Συμπεράσματα	68
7.1	Σύνοψη	68
7.2	Τελικά συμπεράσματα εργασίας και προτάσεις βελτίωσης	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		70

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1. Εξέλιξη δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας	6
Εικόνα 2. Σύγκριση 3G-4G	15
Εικόνα 3. Σύγκριση 4G-5G	16
Εικόνα 4. 6G parameters	19
Εικόνα 5. 6G Applications	20
Εικόνα 6. Key enabling Technologies for 6G Networks	22
Εικόνα 7. UM-MIMO working flowchart	25
Εικόνα 8. Conventional cell-free mMIMO architecture.....	26
Εικόνα 9. Cell-free mMIMO transceiver system model.....	27
Εικόνα 10. Scalable user-centric cell-free mMIMO system	27
Εικόνα 11. Τυπικές εφαρμογές των RIS σε συστήματα κάτω των 6 GHz.....	29
Εικόνα 12. Παράγοντες-κλειδιά για διασύνδεση UAV και δορυφόρων.....	31
Εικόνα 13. Ολογραφική Επικοινωνία	35
Εικόνα 14. Εικονική/Επαυξημένη/Μικτή Πραγματικότητα	35
Εικόνα 15. Smart City.....	50
Εικόνα 16. Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου	38
Εικόνα 17. Μέτρα αντιμετώπισης απειλών στα Δίκτυα 6G	40
Εικόνα 18. Ο δρόμος προς το 6G	46
Εικόνα 19. Κάλυψη % δικτύου 5G ανά κράτος Ε.Ε.....	49
Εικόνα 20. Η εξέλιξη των γενεών μέσα από τα κινητά τηλέφωνα	58
Εικόνα 21. AI enabled 6G networks	61

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση 4G-5G	21
Πίνακας 2. Σύγκριση 5G-6G	46

Συντομογραφίες

AI	Artificial Intelligence
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AP	Access Point
CF-mMIMO	Cell-Free massive MIMO
CPU	Central Processing Unit
DNS	Domain Name System
eMBB	enhanced Mobile Broadband
FTP	File Transfer Protocol
GHz	Gigahertz
GSM	Global System for Mobile Communications
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISAC	Integrated Sensing and Communication
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector
LAN	Local Area Network
LLM	Large Language Model
LTE	Long Term Evolution
MAN	Metropolitan Area Network
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMIMO	massive MIMO
mMTC	massive Machine Type Communications
ML	Machine Learning
ms	Millisecond
MWC	Mobile World Congress
NMT	Nordic Mobile Telephone

NTN	Non-Terrestrial Networks
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
SMS	Short Message Service
Tbps	Terabit per second
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
THz	Terahertz
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UM-MIMO	Ultra Massive MIMO
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
XAI	Explainable Artificial Intelligence

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγικές έννοιες

1.1 Εισαγωγή

Η επικοινωνία και οι τηλεπικοινωνίες αποτελούν τον θεμέλιο λίθο της σύγχρονης, διασυνδεδεμένης κοινωνίας. Οι βασικές αρχές των δικτύων υπολογιστών και των καθιερωμένων μοντέλων επικοινωνίας αποτελούν τη βάση όλων των ειδών επικοινωνίας δημιουργήθηκαν και μετέπειτα εξελίχθηκαν στην σημερινή τους μορφή. Ενδιαφέρον παρουσιάζει εξίσου, η ιστορική εξέλιξη των ασύρματων δικτύων, καταλήγοντας στις τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας αλλά και στην επερχόμενη μετάβαση στο 6G.

1.2 Η έννοια της Επικοινωνίας και της Τηλεπικοινωνίας

Η έννοια της επικοινωνίας αποτελεί μία από τις πιο θεμελιώδεις ανθρώπινες δραστηριότητες και αναφέρεται στη διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών, ιδεών, συναισθημάτων ή μηνυμάτων μεταξύ δύο ή περισσότερων οντοτήτων. Για να είναι αποτελεσματική, απαιτείται ο πομπός (που παράγει το μήνυμα), ένα μέσο ή ένα κανάλι (που το μεταφέρει) και ένας δέκτης (που λαμβάνει το μήνυμα και το αποκωδικοποιεί-ερμηνεύει)[1]. Η επικοινωνία έχει πολλές μορφές (προφορική, γραπτή, οπτική ή μη λεκτική) και αποτελεί βασικό στοιχείο της αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπων και συστημάτων. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, η επικοινωνία επεκτάθηκε πέρα από τα φυσικά όρια του χώρου και του χρόνου, οδηγώντας στη δημιουργία του πεδίου των τηλεπικοινωνιών. Ο όρος προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις ΤΗΛΕ (μακριά) και ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΩ (μεταδίδω πληροφορίες). Οι τηλεπικοινωνίες περιγράφουν κάθε μορφή μετάδοσης πληροφοριών σε απόσταση, μέσω τεχνητών τεχνολογικών μέσων, όπως ηλεκτρομαγνητικά κύματα, καλώδια, οπτικές ίνες ή δορυφορικά συστήματα. Οι σύγχρονες τηλεπικοινωνίες βασίζονται σε μία συγκεκριμένη αρχιτεκτονική: α)πομπό, β)κωδικοποίηση, γ)κανάλι μετάδοσης, δ)αποκωδικοποίηση και ε)δέκτη. Αποτελούν τον πυρήνα των σημερινών κοινωνιών, καθώς υποστηρίζουν δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ασύρματο διαδίκτυο, δορυφορικές υπηρεσίες, συστήματα αισθητήρων, Internet Of Things(IoT) και πλήθος εφαρμογών που συνδέουν ανθρώπους και συσκευές παγκοσμίως. Η εξέλιξή τους οδήγησε στην ανάπτυξη πολλαπλών γενεών κινητής τηλεφωνίας, δημιουργώντας το υπόβαθρο για τα σημερινά δίκτυα 5G και την επερχόμενη τεχνολογία 6G[2][3].

Καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη μορφή των τηλεπικοινωνιών διαδραμάτισε η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή αναπαράσταση της πληροφορίας. Στα αναλογικά συστήματα το σήμα μεταδίδεται ως συνεχώς μεταβαλλόμενο φυσικό μέγεθος, γεγονός που το καθιστά ευάλωτο στον θόρυβο και στην εξασθένηση κατά τη διάδοση. Αντίθετα, στην ψηφιακή μετάδοση η πληροφορία κωδικοποιείται σε διακριτές ακολουθίες δυαδικών ψηφίων, οι οποίες μπορούν να αναγεννηθούν και να διορθωθούν με μηχανισμούς ανίχνευσης σφαλμάτων, εξασφαλίζοντας υψηλότερη ποιότητα και αξιοπιστία. Η ψηφιοποίηση αυτή, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ, οδήγησε στη σταδιακή σύγκλιση των τηλεπικοινωνιών με την πληροφορική, ώστε φωνή, δεδομένα και εικόνα να μεταφέρονται πλέον ενιαία πάνω από κοινές δικτυακές υποδομές[1].

1.3 Δίκτυα υπολογιστών

Τα δίκτυα υπολογιστών είναι το θεμέλιο της σύγχρονης ψηφιακής επικοινωνίας. Επιτρέπουν τη διασύνδεση δύο ή περισσότερων υπολογιστικών συσκευών με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων και τον κοινοχρησιμοποίηση πόρων. Με τον όρο δίκτυο υπολογιστών εννοούμε ένα σύνολο αυτόνομων υπολογιστικών συστημάτων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός κοινού μέσου μετάδοσης -ενσύρματου ή ασύρματου- και επικοινωνούν ακολουθώντας κοινά αποδεκτούς κανόνες, τα λεγόμενα πρωτόκολλα

επικοινωνίας. Η ύπαρξη των δικτύων κατέστησε δυνατή τη μετάβαση από τη μεμονωμένη χρήση των υπολογιστών στη συνεργατική και κατακεντρωμένη επεξεργασία της πληροφορίας [1].

Ο βασικός σκοπός ενός δικτύου υπολογιστών είναι ο διαμοιρασμός πόρων, υλικών και λογισμικών, καθώς και η αποδοτική και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των χρηστών. Μέσω ενός δικτύου, πολλοί χρήστες μπορούν να αξιοποιούν από κοινού περιφερειακές συσκευές, όπως εκτυπωτές και αποθηκευτικά μέσα, να έχουν πρόσβαση σε κοινές βάσεις δεδομένων και εφαρμογές, καθώς και να επικοινωνούν σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, τα δίκτυα προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία, αφού η αποτυχία ενός κόμβου δεν συνεπάγεται απαραίτητα τη διακοπή της συνολικής λειτουργίας, μειώνοντας το συνολικό κόστος υποδομών.

Τα δίκτυα υπολογιστών ταξινομούνται βάση διάφορων κριτηρίων, με κυριότερο τη γεωγραφική τους έκταση. Έτσι έχουμε :

- Τα προσωπικά δίκτυα (PAN-Personal Area Network) καλύπτουν πολύ μικρές αποστάσεις, της τάξης λίγων μέτρων και χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση προσωπικών συσκευών.
- Τα τοπικά δίκτυα (LAN – Local Area Network) εκτείνονται σε περιορισμένο γεωγραφικό χώρο, όπως ένα κτίριο ή μια εγκατάσταση, χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.
- Τα μητροπολιτικά δίκτυα (MAN – Metropolitan Area Network) καλύπτουν την έκταση μιας πόλης.
- Τα δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN – Wide Area Network) εκτείνονται σε μεγάλες γεωγραφικές αποστάσεις, διασυνδέοντας δίκτυα μεταξύ πόλεων ή και χωρών, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα το Διαδίκτυο.

Ένα ακόμη σημαντικό κριτήριο διάκρισης αφορά τον τρόπο οργάνωσης των κόμβων, δηλαδή την τοπολογία του δικτύου. Στις βασικότερες τοπολογίες περιλαμβάνονται η τοπολογία αστέρα (star), όπου όλοι οι κόμβοι συνδέονται σε ένα κεντρικό σημείο, η τοπολογία διαύλου (bus), η δακτυλίου (ring) και η πλεγματική (mesh) τοπολογία, στην οποία οι κόμβοι διασυνδέονται μεταξύ τους με πολλαπλές διαδρομές, αυξάνοντας την αξιοπιστία. Η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας εξαρτάται από παράγοντες όπως το κόστος, η επεκτασιμότητα, η ανοχή σε σφάλματα και οι απαιτήσεις απόδοσης.

Επιπλέον, τα δίκτυα διακρίνονται ανάλογα με το μέσο μετάδοσης σε ενσύρματα και ασύρματα. Τα ενσύρματα δίκτυα αξιοποιούν φυσικά μέσα, όπως το χάλκινο καλώδιο συνεστραμμένων ζευγών και οι οπτικές ίνες, προσφέροντας υψηλή σταθερότητα και ταχύτητα, ενώ τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται στη μετάδοση μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, παρέχοντας ευελιξία και κινητικότητα. Η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων τεχνολογιών και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, που αναλύονται εκτενώς στη συνέχεια της εργασίας, ανέδειξε τα δίκτυα υπολογιστών σε κρίσιμη υποδομή για την παγκόσμια διασύνδεση και αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία οικοδομούνται οι σύγχρονες γενιές τηλεπικοινωνιών [4].

Πέρα από τη γεωγραφική έκταση και την τοπολογία, τα δίκτυα υπολογιστών διακρίνονται και ως προς το μοντέλο οργάνωσης της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Στο μοντέλο πελάτη-εξυπηρετητή (client-server) ένας ή περισσότεροι κεντρικοί εξυπηρετητές παρέχουν υπηρεσίες και πόρους σε πλήθος υπολογιστών-πελατών, προσφέροντας κεντρική διαχείριση, ασφάλεια και ευκολία συντήρησης, με αντίτιμο όμως τη συγκέντρωση του φόρτου σε συγκεκριμένα σημεία. Αντίθετα, στο μοντέλο ομότιμων κόμβων (peer-to-peer) κάθε συσκευή μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως πάροχος και ως αποδέκτης υπηρεσιών, χωρίς κεντρικό σημείο ελέγχου, γεγονός που αυξάνει την ευελιξία αλλά δυσχεραίνει τη διαχείριση και την ασφάλεια. Η επιλογή μεταξύ των δύο προσεγγίσεων εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου, τις απαιτήσεις ασφάλειας και τον τρόπο με τον οποίο πρόκειται να αξιοποιηθούν οι κοινόχρηστοι πόροι.

1.4 Βασικές Αρχές Δικτύων & Μοντέλα Επικοινωνιών

Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων προϋποθέτει την εξοικείωση με ορισμένες θεμελιώδεις αρχές και με τα εννοιολογικά μοντέλα που περιγράφουν τη δικτυακή λειτουργία. Τα μοντέλα αυτά λειτουργούν ως πλαίσια αναφοράς, οργανώνοντας τις πολύπλοκες διαδικασίες της μετάδοσης δεδομένων σε διακριτά επίπεδα με σαφώς

καθορισμένους ρόλους. Με τον τρόπο αυτό, διευκολύνεται τόσο ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη δικτυακών τεχνολογιών όσο και η μεταξύ τους διαλειτουργικότητα. Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται τα δύο επικρατέστερα μοντέλα επικοινωνίας, το μοντέλο OSI και η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, καθώς και ο ρόλος των πρωτοκόλλων στη διασφάλιση αξιόπιστης επικοινωνίας.

1.4.1 Το μοντέλο OSI

Το μοντέλο OSI ή αλλιώς Open Systems Interconnection αποτελεί ένα θεμελιώδες εννοιολογικό πλαίσιο για την περιγραφή και την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επικοινωνούν τα συστήματα σε ένα δίκτυο υπολογιστών. Αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO - International Organization for Standardization) με στόχο την τυποποίηση των λειτουργιών της δικτυακής επικοινωνίας, ώστε προϊόντα και τεχνολογίες διαφορετικών κατασκευαστών να μπορούν να συνεργάζονται με ενιαίο και συμβατό τρόπο [1].

Η βασική ιδέα του μοντέλου OSI είναι ο διαχωρισμός της επικοινωνίας σε επτά διακριτά επίπεδα (layers), καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για μια συγκεκριμένη ομάδα λειτουργιών. Τα επίπεδα αυτά, από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο, είναι το Φυσικό επίπεδο (Physical), το επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων (Data Link), το επίπεδο Δικτύου (Network), το επίπεδο Μεταφοράς (Transport), το επίπεδο Συνόδου (Session), το επίπεδο Παρουσίασης (Presentation) και το επίπεδο Εφαρμογής (Application). Κάθε επίπεδο εξυπηρετεί το αμέσως ανώτερο και αξιοποιεί τις υπηρεσίες του αμέσως κατώτερου, δημιουργώντας μια ιεραρχική και αρθρωτή δομή.

Η σημασία του μοντέλου OSI έγκειται στο ότι προσφέρει ένα κοινό σημείο αναφοράς για τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων στα δίκτυα, ανεξάρτητα από την εκάστοτε τεχνολογία. Αν και στην πράξη η πλειονότητα των σύγχρονων δικτύων, συμπεριλαμβανομένων των τοπικών (LAN) αλλά και των ευρείας περιοχής (WAN), υλοποιείται με βάση τη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, το μοντέλο OSI παραμένει εκπαιδευτικά και μεθοδολογικά πολύτιμο, καθώς αποσαφηνίζει τον ρόλο κάθε επιπέδου και διευκολύνει την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη μετάδοση της πληροφορίας στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες [4].

Από ιστορική σκοπιά, το OSI τυποποιήθηκε επίσημα το 1984 και αποτυπώθηκε στο πρότυπο ISO/IEC 7498, το οποίο δημοσιεύθηκε και ως Σύσταση ITU-T X.200. Η θεμελιώδης ιδέα της διάρθρωσης της επικοινωνίας σε επτά επίπεδα αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στις εργασίες του Charles Bachman, ενώ ο σχεδιασμός του βασίστηκε στην εμπειρία από προγενέστερα δίκτυα όπως το ARPANET. Καθένα από τα επτά επίπεδα επικοινωνεί αποκλειστικά με το αμέσως ανώτερο και το αμέσως κατώτερο, ανταλλάσσοντας με το αντίστοιχο επίπεδο του απομακρυσμένου συστήματος δομημένες μονάδες δεδομένων. Παρότι η αρχική σουίτα πρωτοκόλλων του OSI θεωρήθηκε υπερβολικά σύνθετη και τελικά δεν επικράτησε εμπορικά, το εννοιολογικό μοντέλο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ως κοινή γλώσσα αναφοράς για τη διδασκαλία και την αντιμετώπιση προβλημάτων δικτύου[1].

1.4.2 Η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP

Παράλληλα με το θεωρητικό μοντέλο OSI, στην πράξη η συντριπτική πλειονότητα των σύγχρονων δικτύων και του Διαδικτύου βασίζεται στη στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Πρόκειται για ένα σύνολο πρωτοκόλλων που αναπτύχθηκε αρχικά στο πλαίσιο του δικτύου ARPANET και καθιερώθηκε ως το θεμελιώδες πρότυπο διασύνδεσης, χάρη στην απλότητα, την αποδοτικότητα και την ικανότητά του να λειτουργεί ανεξάρτητα από το υποκείμενο υλικό.

Σε αντίθεση με τα επτά επίπεδα του OSI, το μοντέλο TCP/IP οργανώνεται σε τέσσερα επίπεδα: το επίπεδο Πρόσβασης Δικτύου (Network Access), το επίπεδο Διαδικτύου (Internet), το επίπεδο Μεταφοράς (Transport) και το επίπεδο Εφαρμογής (Application). Το TCP αναλαμβάνει την αξιόπιστη μετάδοση των δεδομένων, εξασφαλίζοντας ότι τα πακέτα φτάνουν στον προορισμό τους χωρίς σφάλματα και με τη σωστή σειρά, ενώ το IP είναι υπεύθυνο για τη διευθυνσιοδότηση και τη δρομολόγηση των πακέτων μέσα στο δίκτυο.

Η αντιστοίχιση των επιπέδων του TCP/IP με εκείνα του OSI επιτρέπει τη συνδυαστική αξιοποίηση και των δύο προσεγγίσεων: το μοντέλο OSI προσφέρει ένα αναλυτικό εκπαιδευτικό πλαίσιο, ενώ το TCP/IP αποτελεί την πρακτική υλοποίηση πάνω στην οποία στηρίζεται η σύγχρονη δικτυακή επικοινωνία [4].

Η επικράτηση του TCP/IP οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην απλότητα και την ευελιξία της αρχιτεκτονικής του, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία πάνω σε ετερογενές υλικό και διαφορετικές τεχνολογίες μετάδοσης. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει το σύστημα διευθυνσιοδότησης IP, το οποίο αναθέτει μοναδικές διευθύνσεις σε κάθε συσκευή και καθιστά δυνατή τη δρομολόγηση των πακέτων ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα. Η σταδιακή μετάβαση από την έκδοση IPv4 στην IPv6, με σημαντικά μεγαλύτερο χώρο διευθύνσεων, κρίνεται αναγκαία ώστε να υποστηριχθεί ο διαρκώς αυξανόμενος αριθμός συνδεδεμένων συσκευών, ιδιαίτερα στο πλαίσιο του Internet Of Things (IoT)[4].

1.4.3 Πρωτόκολλα επικοινωνίας και αξιόπιστη μετάδοση

Η ομαλή λειτουργία ενός δικτύου, ανεξάρτητα από το μοντέλο αναφοράς που χρησιμοποιείται, στηρίζεται στα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Ως πρωτόκολλο ορίζεται ένα σύνολο κανόνων και συμβάσεων που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα ανταλλάσσουν δεδομένα, ώστε η μεταξύ τους επικοινωνία να είναι σαφής, συντονισμένη και κατανοητή και από τα δύο μέρη. Τα πρωτόκολλα ορίζουν τη μορφή των μηνυμάτων, τη σειρά αποστολής τους, καθώς και τις διαδικασίες ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το πρωτόκολλο μεταφοράς υπερκειμένου Hypertext Transfer Protocol (HTTP) για την περιήγηση στον Παγκόσμιο Ιστό, το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων File Transfer Protocol (FTP) για τη μεταφορά αρχείων και το σύστημα ονοματοδοσίας τομέων Domain Name System (DNS) για την αντιστοίχιση ονομάτων ιστοτόπων σε διευθύνσεις δικτύου. Τα πρωτόκολλα αυτά λειτουργούν στα ανώτερα επίπεδα της επικοινωνίας και αξιοποιούν τις υπηρεσίες των κατώτερων επιπέδων, σύμφωνα με την ιεραρχική λογική που περιγράφουν τα μοντέλα OSI και TCP/IP.

Η αξιοπιστία της μετάδοσης εξασφαλίζεται μέσω μηχανισμών όπως η επιβεβαίωση λήψης, η επαναμετάδοση των πακέτων που χάθηκαν και ο έλεγχος ροής, οι οποίοι αποτρέπουν την υπερφόρτωση του δέκτη. Οι αρχές αυτές αποτελούν το θεμέλιο πάνω στο οποίο οικοδομούνται οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές υποδομές και τα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Κεντρική έννοια στη λειτουργία των πρωτοκόλλων αποτελεί η ενθυλάκωση (encapsulation), δηλαδή η προσθήκη επικεφαλίδων ελέγχου σε κάθε επίπεδο, ώστε τα δεδομένα να μεταφέρονται με τις κατάλληλες πληροφορίες δρομολόγησης και ελέγχου σφαλμάτων. Παράλληλα, τα πρωτόκολλα ασφαλούς επικοινωνίας, όπως το πρωτόκολλο ασφαλούς μεταφοράς υπερκειμένου Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS), προσθέτουν μηχανισμούς κρυπτογράφησης και ταυτοποίησης, διασφαλίζοντας την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων. Οι μηχανισμοί αυτοί αποκτούν αυξανόμενη σημασία στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, όπου η μετάδοση μέσω αέρα καθιστά την πληροφορία ευκολότερα προσβάσιμη σε κακόβουλες παρεμβάσεις[4].

1.5 Ιστορική ανάπτυξη Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνιών

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων ξεκίνησε στις αρχές του 20ού αιώνα με την εμφάνιση της ραδιοεπικοινωνίας από τον Guglielmo Marconi, ο οποίος κατόρθωσε το 1901 να πραγματοποιήσει την πρώτη ασύρματη μετάδοση σήματος πάνω από τον Ατλαντικό Ωκεανό[5]. Η ανακάλυψη αυτή αποτέλεσε τη βάση για την εξέλιξη όλων των μετέπειτα συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας.

Η ασύρματη μετάδοση βασίζεται στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο, χωρίς την ανάγκη φυσικού μέσου όπως το καλώδιο χαλκού ή οπτικής ίνας. Η συμπεριφορά της μετάδοσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα του σήματος: οι χαμηλότερες συχνότητες διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις και διαπερνούν ευκολότερα εμποδία, ενώ οι υψηλότερες προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης αλλά με μικρότερη εμβέλεια. Η ασύρματη μετάδοση επηρεάζεται επίσης από φαινόμενα όπως η εξασθένηση, οι ανακλάσεις και οι παρεμβολές, τα οποία καθιστούν αναγκαία τη χρήση προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης και διόρθωσης σφαλμάτων. Οι θεμελιώδεις αυτές αρχές διέπουν όλες τις γενιές κινητής τηλεφωνίας που ακολούθησαν.

Η πραγματική ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών έγινε δεκαετίες αργότερα με την εισαγωγή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας [6]. Η εξέλιξη των γενεών έχει ως εξής:

- 1G-1980s: Αναλογικά δίκτυα, παροχή μόνο φωνητικών υπηρεσιών, περιορισμένη ποιότητα. Η πρώτη γενιά (1G) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980. Βασίστηκε σε αναλογικά συστήματα και παρείχε αποκλειστικά φωνητικές υπηρεσίες. Η ποιότητα της επικοινωνίας ήταν περιορισμένη, ενώ απουσίαζαν μηχανισμοί ασφάλειας και προστασίας των δεδομένων.
- 2G-1990s: Ψηφιακή μετάδοση, εισαγωγή Short Message Service(SMS), βελτίωση ποιότητας και ασφάλειας. Η δεύτερη γενιά (2G) εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1990. Σηματοδότησε τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή μετάδοση. Με την υιοθέτηση ψηφιακών τεχνολογιών, βελτιώθηκε αισθητά η ποιότητα της φωνής και η ασφάλεια των επικοινωνιών. Εισήχθησαν νέες υπηρεσίες, όπως η αποστολή γραπτών μηνυμάτων χρησιμοποιώντας τα SMS, που άλλαξαν τον τρόπο επικοινωνίας των χρηστών. [7]
- 3G-2000s: Υποστήριξη πραγματικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω κινητού, multimedia υπηρεσίες. Η τρίτη γενιά (3G) αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Επέτρεψε για πρώτη φορά την ουσιαστική πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω κινητών συσκευών. Παρείχε υποστήριξη για υπηρεσίες πολυμέσων, όπως η μετάδοση εικόνας και βίντεο ανοίγοντας τον δρόμο για την ανάπτυξη νέων διαδικτυακών εφαρμογών.[8]
- 4G-2010s: Υψηλές ταχύτητες broadband, streaming, κοινωνικά δίκτυα, cloud υπηρεσίες. Η τέταρτη γενιά (4G) εμφανίστηκε τη δεκαετία του 2010. Προσέφερε σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, καθιστώντας εφικτή τη χρήση ευρυζωνικών υπηρεσιών, τη ροή πολυμέσων (streaming), τη λειτουργία κοινωνικών δικτύων και τη μαζική αξιοποίηση υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους (cloud computing). [9]
- 5G-2020s: Υπερυψηλές ταχύτητες, χαμηλή καθυστέρηση(latency), υποστήριξη IoT, αυτόνομης οδήγησης και έξυπνων πόλεων. Η πέμπτη γενιά (5G) η οποία αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 2020, εισήγαγε υπερυψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και εξαιρετικά χαμηλό latency. Τα χαρακτηριστικά αυτά επιτρέπουν την υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών, όπως το IoT, η αυτόνομη οδήγηση και οι έξυπνες πόλεις, σηματοδοτώντας μια νέα εποχή στις ασύρματες επικοινωνίες. [10]
- 6G-2030s: Ακραία Υψηλές ταχύτητες, με προσθήκη Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) στο Διαδίκτυο. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης για ταχύτερη, αξιόπιστη και μαζική συνδεσιμότητα οδήγησε στην ανάγκη για την ανάπτυξη της επόμενης γενιάς, της έκτης (6G), που αναμένεται να κυριαρχήσει από το 2030 και μετά. [11]

Εξέλιξη Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας (1G–6G)			
Γενιά Δικτύου	Χρονική Περίοδος	Βασικά Χαρακτηριστικά	Ενδεικτικές / Θεωρητικές Ταχύτητες
1G 	1980s	Αναλογικά δίκτυα, μόνο φωνητικές υπηρεσίες, χαμηλή ποιότητα και ασφάλεια	έως 2.4 kbps
2G 	1990s	Ψηφιακή μετάδοση, SMS, βελτιωμένη ποιότητα και ασφάλεια	έως 64 kbps
3G 	2000s	Πρόσβαση στο Διαδίκτυο, multimedia υπηρεσίες	έως 2 Mbps
4G 	2010s	Υψηλές ταχύτητες broadband, streaming, cloud υπηρεσίες	έως 100 Mbps – 1 Gbps
5G 	2020s	Πολύ χαμηλό latency, IoT, έμμητες πόλεις, αυτόνομη οδήγηση	έως 10 – 20 Gbps
6G 	μετά το 2030	Τεχνητή νοημοσύνη στο δίκτυο, THz συχνότητες, ολογραφικές επικοινωνίες	έως 1 Tbps (1000 Gbps)

Εικόνα 1. Εξέλιξη δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας [12]

1.6 Τεχνολογίες Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεν βασίστηκε μόνο στη βελτίωση των ταχυτήτων, αλλά κυρίως στην ανάπτυξη και τον συνδυασμό διαφορετικών τεχνολογιών που αφορούν τη μετάδοση, τη διαχείριση του φάσματος και τη δομή των ίδιων των δικτύων. Κάθε γενιά αξιοποίησε τις τεχνολογίες της προηγούμενης και τις εξέλιξε, ώστε να μπορεί να καλύψει νέες ανάγκες και απαιτήσεις[4].

1.6.1 Τεχνολογίες πρόσβασης/μετάδοσης

Στα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιήθηκαν απλές τεχνικές κατανομής του διαθέσιμου φάσματος, όπως η διαίρεση σε συχνότητες ή σε χρονικά διαστήματα. Με την πάροδο των χρόνων, οι τεχνικές αυτές εξελίχθηκαν ώστε να επιτρέπουν την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών με καλύτερη ποιότητα.

Στα δίκτυα 3G εισήχθησαν τεχνικές που βασίζονται στον διαχωρισμό μέσω κωδικών, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο φάσμα με μεγαλύτερη ευελιξία. Αργότερα, στα δίκτυα 4G και 5G, επικράτησαν τεχνικές βασισμένες στη διαίρεση του φάσματος σε μικρά τμήματα, οι οποίες προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες και καλύτερη διαχείριση των πόρων[8].

Οι διαδοχικές αυτές προσεγγίσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικές μεθόδους πολλαπλής πρόσβασης στο κοινό φάσμα: από τη διαίρεση σε συχνότητες και σε χρονικά διαστήματα στις πρώτες γενιές, στον διαχωρισμό μέσω κωδικών στο 3G και στη διαίρεση μέσω ορθογώνιων υποφερόντων στα δίκτυα 4G και 5G. Η εξέλιξη αυτή επέτρεψε την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση όλο και περισσότερων χρηστών με αποδοτικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος[8].

1.6.2 Φάσμα συχνοτήτων

Το φάσμα συχνοτήτων αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους πόρους στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι πρώτες γενιές λειτουργούσαν κυρίως σε χαμηλές συχνότητες, οι οποίες παρείχαν καλή κάλυψη αλλά περιορισμένες ταχύτητες. Καθώς αυξάνονταν οι απαιτήσεις για δεδομένα, τα νεότερα δίκτυα άρχισαν να αξιοποιούν και υψηλότερες συχνότητες.

Στα δίκτυα 4G και ιδιαίτερα στο 5G, η χρήση ευρύτερου φάσματος και υψηλότερων ζωνών συχνοτήτων επέτρεψε σημαντική αύξηση των ρυθμών μετάδοσης. Το φάσμα συνήθως διακρίνεται σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες: τις χαμηλές ζώνες, που προσφέρουν εκτεταμένη κάλυψη, τις μεσαίες ζώνες, που αποτελούν το σημείο ισορροπίας μεταξύ κάλυψης και χωρητικότητας και τις υψηλές ζώνες χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter wave), που προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης αλλά πολύ περιορισμένη εμβέλεια. Για τα δίκτυα 6G εξετάζεται η αξιοποίηση ακόμη υψηλότερων συχνοτήτων στην περιοχή των Terahertz (THz), οι οποίες θα μπορούσαν να υποστηρίξουν ακραία υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αν και με ακόμη μεγαλύτερες προκλήσεις στη διάδοση. Ωστόσο, οι υψηλές συχνότητες έχουν μικρότερη εμβέλεια, γεγονός που απαιτεί πιο πυκνή ανάπτυξη σταθμών βάσης[8].

1.6.3 Τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών

Μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στα σύγχρονα δίκτυα είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών τόσο στον σταθμό βάσης όσο και στη συσκευή του χρήστη. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών ροών δεδομένων, βελτιώνοντας την ταχύτητα και την αξιοπιστία της σύνδεσης.

Στα νεότερα δίκτυα, η τεχνολογία αυτή εξελίχθηκε περαιτέρω, επιτρέποντας στο δίκτυο να κατευθύνει το σήμα πιο στοχευμένα προς τον χρήστη. Έτσι μειώνονται οι παρεμβολές και βελτιώνεται η συνολική απόδοση του συστήματος[8].

Η αρχή αυτή αποτυπώνεται στις τεχνολογίες μαζικών πολλαπλών εισόδων-εξόδων (massive Multiple Input Multiple Output, massive MIMO), όπου ο σταθμός βάσης φέρει δεκάδες έως εκατοντάδες κεραιών. Μέσω της διαμόρφωσης δέσμης (beamforming), το σύστημα εστιάζει χωρικά την ισχύ του σήματος προς την κατεύθυνση του εκάστοτε χρήστη, αυξάνοντας τον λόγο σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο και, κατά συνέπεια, την κάλυψη και τη χωρητικότητα. Σε συνδυασμό με τη χωρική πολυπλεξία, το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολλαπλούς χρήστες στους ίδιους πόρους συχνότητας και χρόνου[9].

1.6.4 Αρχιτεκτονικές Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνιών

Στις πρώτες γενιές κινητής τηλεφωνίας, η επικοινωνία βασιζόταν κυρίως στη μεταγωγή κυκλωμάτων, όπου δεσμευόταν ένας αποκλειστικός πόρος για κάθε κλήση. Με την ανάπτυξη των υπηρεσιών δεδομένων, η προσέγγιση αυτή άρχισε να αντικαθίσταται από τη μεταγωγή πακέτων, η οποία επιτρέπει πιο αποδοτική χρήση του δικτύου.

Στα δίκτυα 4G και 5G, όλες οι υπηρεσίες βασίζονται σε αρχιτεκτονική IP, παρόμοια με αυτή του Διαδικτύου. Αυτό έκανε τα δίκτυα πιο ευέλικτα, πιο εύκολα στη διαχείριση και καλύτερα προσαρμοσμένα στις σύγχρονες εφαρμογές[8].

Η θεμελιώδης αυτή μετατόπιση από τη μεταγωγή κυκλωμάτων στη μεταγωγή πακέτων έχει καθοριστικές συνέπειες στην αξιοποίηση των πόρων: αντί να δεσμεύεται ένα σταθερό κανάλι για κάθε σύνδεση, η πληροφορία τεμαχίζεται σε πακέτα που δρομολογούνται ανεξάρτητα και μοιράζονται το δίκτυο με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα. Η υιοθέτηση ενιαίας αρχιτεκτονικής βασισμένης στο

πρωτόκολλο IP έχει επιτρέψει την ένταξη φωνής, δεδομένων και πολυμέσων σε μία κοινή υποδομή, απλοποιώντας τη διαχείριση και μειώνοντας το κόστος λειτουργίας.

Σε δομικό επίπεδο, κάθε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας διακρίνεται σε δύο βασικά τμήματα: το Δίκτυο Πρόσβασης Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Access Network – RAN) και το δίκτυο κορμού (Core Network). Το RAN περιλαμβάνει τους σταθμούς βάσης και τις κεραίες που εξασφαλίζουν την ασύρματη σύνδεση των τερματικών συσκευών, ενώ το δίκτυο κορμού αναλαμβάνει τη δρομολόγηση της κίνησης, τη διαχείριση των συνδρομητών, την πιστοποίηση, τη χρέωση και τη διασύνδεση με άλλα δίκτυα, όπως το Διαδίκτυο. Ο σαφής αυτός διαχωρισμός επιτρέπει σε κάθε τμήμα να εξελίσσεται σχετικά ανεξάρτητα, γεγονός που διευκόλυνε τη σταδιακή μετάβαση από γενιά σε γενιά[8].

Θεμελιώδες χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής παραμένει η κυψελωτή δομή: η γεωγραφική περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε κυψέλες, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης, ενώ οι ίδιες συχνότητες επαναχρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες κυψέλες για αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος. Στις νεότερες γενιές, οι μεγάλες κυψέλες (macro cells) συμπληρώνονται από μικρές κυψέλες (small cells) χαμηλής ισχύος, ιδίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Η πύκνωση αυτή του δικτύου είναι απαραίτητη στις υψηλές συχνότητες, όπου η εμβέλεια κάθε σταθμού βάσης είναι περιορισμένη[4].

Παράλληλα, η ίδια η εσωτερική οργάνωση των δικτύων απλοποιήθηκε σημαντικά με την πάροδο των γενεών. Το 4G υιοθέτησε μια «επίπεδη» (flat) αρχιτεκτονική με λιγότερα ενδιάμεσα στοιχεία, μειώνοντας την καθυστέρηση μετάδοσης, ενώ ο διαχωρισμός επιπέδου ελέγχου και επιπέδου χρήστη (Control and User Plane Separation – CUPS) εισήχθη στον πυρήνα του 4G με το 3GPP Release 14 και γενικεύθηκε στο 5G, όπου αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει την ανεξάρτητη κλιμάκωση της σηματοδοσίας και της κίνησης δεδομένων. Επιπλέον, λειτουργίες του RAN που παραδοσιακά υλοποιούνταν σε εξειδικευμένο υλικό στον κάθε σταθμό βάσης μπορούν πλέον να συγκεντρώνονται και να εκτελούνται σε κεντρικές υποδομές υπολογιστικού νέφους (Cloud RAN – C-RAN)[9].

1.6.5 Διαχείριση δικτύων με εικονικοποίηση

Τα πιο σύγχρονα δίκτυα αξιοποιούν τεχνολογίες εικονικοποίησης, οι οποίες επιτρέπουν τη λειτουργία πολλών υπηρεσιών πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Με τον τρόπο αυτό, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις ανάγκες των χρηστών και των εφαρμογών.

Η προσέγγιση αυτή αποτελεί βασικό στοιχείο για τη μετάβαση προς τα δίκτυα επόμενης γενιάς, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη αυτοματοποίηση, ευελιξία και αποδοτικότητα στη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων[8].

Η εικονικοποίηση στηρίζεται σε τεχνολογίες όπως τα δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό (Software-Defined Networking, SDN) και η εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Functions Virtualization, NFV), οι οποίες αποσυνδέουν τις δικτυακές λειτουργίες από το εξειδικευμένο υλικό. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελεί η κατάτμηση δικτύου (network slicing), η οποία επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών λογικών δικτύων πάνω στην ίδια φυσική υποδομή, καθένα προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης κατηγορίας υπηρεσιών[9].

1.7 Το 6G και η μετάβαση από 5G σε 6G

Το 6G αποτελεί την έκτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας και αναμένεται να προσφέρει δραματικά βελτιωμένες επιδόσεις σε σύγκριση με το 5G. Το 6G δεν θεωρείται απλή αναβάθμιση, αλλά βαθιά

τεχνολογική μετάβαση προς δίκτυα που ενσωματώνουν τεχνητή νοημοσύνη, Terahertz συχνότητες, ολογραφικές επικοινωνίες και παγκόσμια κάλυψη μέσω επίγειων και δορυφορικών συστημάτων.

Βασικά χαρακτηριστικά 6G:[13]

- Ταχύτητες έως και 1 Terabit per second(Tbps).
- Latency κάτω του 1 Millisecond(ms).
- Ενσωμάτωση AI(Artificial Intelligence) στα ίδια τα δίκτυα (AI native networking).
- Ολογραφικές και 3D επικοινωνίες.
- Παγκόσμια κάλυψη με συνδυασμό επίγειων -εναέριων- δορυφορικών δικτύων.
- Μαζική διασύνδεση IoT με υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Η ανάπτυξη του 6G βρίσκεται σήμερα σε στάδιο έρευνας και προτυποποίησης από οργανισμούς όπως το 3GPP και η ITU. Οι πρώτες πιλοτικές εφαρμογές προβλέπεται να εμφανιστούν την περίοδο 2027–2029, ενώ η εμπορική διάθεση εκτιμάται για μετά το 2030. Η μετάβαση από το 5G στο 6G θα είναι σταδιακή, με συνύπαρξη των δύο τεχνολογιών, όπως και στις προηγούμενες γενιές. Η εξέλιξη του 5G θα συνεχιστεί(ADVANCED 5G), ενώ παράλληλα θα δημιουργούνται οι υποδομές που θα υποστηρίξουν τις δυνατότητες του 6G. [15]

Σε επίπεδο τυποποίησης, το 6G αναπτύσσεται υπό το πλαίσιο IMT-2030 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU), ονομασία που καθιερώθηκε επίσημα το 2023. Σε αντίθεση με το 5G, όπου η τεχνητή νοημοσύνη προστίθεται ως επιπλέον επίπεδο, το 6G σχεδιάζεται ώστε να είναι εγγενώς βασισμένο στην τεχνητή νοημοσύνη (AI-native), με την ευφυΐα ενσωματωμένη στον πυρήνα του δικτύου. Σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα τυποποίησης, οι πρώτες προδιαγραφές αναμένεται να ολοκληρωθούν γύρω στο 2028, με προ-εμπορικές δοκιμές περί το 2029 και εμπορική διάθεση από το 2030 και μετά[12].

1.8 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια εισαγωγική προσέγγιση στις θεμελιώδεις έννοιες της επικοινωνίας και των τηλεπικοινωνιών. Αρχικά, έγινε αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας των δικτύων υπολογιστών, με έμφαση στα εννοιολογικά μοντέλα επικοινωνίας (μοντέλο OSI, TCP/IP) και στον καθοριστικό ρόλο των πρωτοκόλλων για την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η ιστορική εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, από τα πρώτα αναλογικά συστήματα έως τα σύγχρονα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), αναδεικνύοντας τη διαρκή τεχνολογική τους πρόοδο. Επίσης, έγινε αναφορά στις μελλοντικές προοπτικές του κλάδου μέσω των τεχνολογιών και των καινοτομιών που αναμένεται να φέρει η γενιά 6G. Τέλος, το παρόν κεφάλαιο διαμορφώνει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ομαλή κατανόηση των τεχνολογιών που θα αναλυθούν στα επόμενα στάδια της εργασίας, επιβεβαιώνοντας τη σημασία των τηλεπικοινωνιών στη σύγχρονη κοινωνία.

Κεφάλαιο 2ο: Ιστορική Εξέλιξη Κινητής Τηλεφωνίας

2.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας αποτελεί μια από τις πιο δυναμικές πορείες της σύγχρονης τεχνολογίας. Ξεκινώντας από το 1G και το 2G, όπου ο κυρίαρχος στόχος ήταν η φωνητική επικοινωνία, φτάσαμε σταδιακά στο 3G, το 4G και το 5G, γενιές που έθεσαν τα δεδομένα στο επίκεντρο. Σήμερα, η έρευνα γύρω από το 6G υπόσχεται ακόμη ταχύτερη, εξυπνότερη και πιο διασυνδεδεμένη επικοινωνία.

2.2 Πρώτες γενιές κινητής τηλεφωνίας (1G – 2G)

Οι πρώτες γενιές κινητής τηλεφωνίας αποτέλεσαν το αρχικό στάδιο μιας τεχνολογικής εξέλιξης που άλλαξε ριζικά τον τρόπο επικοινωνίας των ανθρώπων. Σε μια περίοδο όπου η επικοινωνία σε κίνηση θεωρούνταν πολυτέλεια, τα δίκτυα 1G και 2G εισήγαγαν την ιδέα της κινητής πρόσβασης σε τηλεφωνικές υπηρεσίες και αποτέλεσαν την αφετηρία για όλα τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Παρότι οι δυνατότητές τους ήταν περιορισμένες σε σχέση με τα σημερινά πρότυπα, η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική[4]. Η εξέλιξη από την πρώτη στη δεύτερη γενιά αποτέλεσε ουσιαστική αλλαγή φιλοσοφίας και όχι μόνο τεχνική βελτίωση, καθώς πραγματοποιήθηκε η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή επικοινωνία. Η αλλαγή αυτή επέτρεψε μεγαλύτερη αξιοπιστία, καλύτερη ποιότητα και τη σταδιακή εισαγωγή νέων υπηρεσιών.

Η διάκριση της εξέλιξης σε διαδοχικές «γενιές» αντιστοιχεί κάθε φορά σε μια σημαντική τεχνολογική αλλαγή στον τρόπο μετάδοσης και στις υπηρεσίες που προσφέρονται. Κάθε νέα γενιά συνυπάρχει με την προηγούμενη για ένα μεταβατικό διάστημα, έτσι ώστε να συνεχίζεται η εξυπηρέτηση των χρηστών και να αντικαθίστανται σταδιακά οι υποδομές. Έτσι, η μετάβαση από την μία γενιά στην επόμενη είναι μια διαδικασία που διαρκεί αρκετά χρόνια και εξαρτάται τόσο από τεχνολογικούς όσο και από οικονομικούς και κανονιστικούς παράγοντες.

2.3 Δίκτυα 1^{ης} Γενιάς (1G)

Τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G) εμφανίστηκαν εμπορικά τη δεκαετία του 1980 και αποτέλεσαν τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας μεγάλης κλίμακας. Η τεχνολογία τους βασιζόταν αποκλειστικά στην αναλογική μετάδοση και είχε ως μοναδικό σκοπό την παροχή φωνητικών υπηρεσιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα δικτύων 1G ήταν τα AMPS (Advanced Mobile Phone System) στις Ηνωμένες Πολιτείες και τα NMT (Nordic Mobile Telephone) στην Ευρώπη.

Η αρχιτεκτονική των δικτύων 1G στηριζόταν στην έννοια των κυψελών, όπου κάθε γεωγραφική περιοχή εξυπηρετούνταν από έναν σταθμό βάσης. Καθώς ο χρήστης μετακινούνταν, το δίκτυο αναλάμβανε τη μεταγωγή της κλήσης από κυψέλη σε κυψέλη, εισάγοντας για πρώτη φορά την έννοια του handover. Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή παρουσίαζε σημαντικούς περιορισμούς. Η ποιότητα της φωνής ήταν χαμηλή και επηρεαζόταν έντονα από παρεμβολές και θόρυβο. Επιπλέον, τα δίκτυα 1G δεν παρείχαν μηχανισμούς ασφάλειας, με αποτέλεσμα οι κλήσεις να μπορούν να υποκλαπούν σχετικά εύκολα. Η χωρητικότητα των δικτύων ήταν περιορισμένη, ενώ δεν υπήρχε καμία δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων ή υποστήριξης πρόσθετων υπηρεσιών πέρα από την απλή τηλεφωνική κλήση[7].

Παρά τους περιορισμούς τους, τα δίκτυα 1G αποτέλεσαν σημαντικό ορόσημο, καθώς απέδειξαν στην πράξη τη δυνατότητα μαζικής κινητής επικοινωνίας και κατέστησαν εφικτή την εξέλιξη των επόμενων γενεών[5].

Οι περιορισμοί της πρώτης γενιάς οφείλονταν κυρίως στην αναλογική τεχνολογία της. Η μετάδοση του σήματος ήταν ευαίσθητη στις παρεμβολές και στην υποβάθμιση της ποιότητας, ενώ η χωρητικότητα του δικτύου ήταν ιδιαίτερα περιορισμένη, καθώς κάθε κλήση δέσμευε ένα αποκλειστικό κανάλι συχνότητας. Επιπλέον, η απουσία κρυπτογράφησης άφηνε τις συνομιλίες ευάλωτες σε υποκλοπές, ενώ οι συσκευές ήταν ογκώδεις και ενεργοβόρες. Παρά τις αδυναμίες αυτές, η πρώτη γενιά καθιέρωσε την έννοια της κινητής επικοινωνίας και απέδειξε την εμπορική βιωσιμότητα της, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις για τη ραγδαία ανάπτυξη που ακολούθησε.

2.4 Δίκτυα 2^{ης} Γενιάς (2G)

Η εμφάνιση των δικτύων δεύτερης γενιάς τη δεκαετία του 1990 αποτέλεσε σημείο καμπής για την ιστορία της κινητής τηλεφωνίας. Η μετάβαση στην ψηφιακή μετάδοση σήμαινε καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας αλλά και δυνατότητα πιο αποδοτικής διαχείρισης του διαθέσιμου φάσματος. Το Global System for Mobile Communications (GSM) καθιερώθηκε ως το κυρίαρχο πρότυπο, δημιουργώντας για πρώτη φορά ένα σχεδόν ενιαίο σύστημα κινητής τηλεφωνίας σε διεθνές επίπεδο.

Η ψηφιοποίηση της επικοινωνίας επέτρεψε την εισαγωγή μηχανισμών ασφάλειας, όπως η κρυπτογράφηση των κλήσεων, γεγονός που ενίσχυσε την εμπιστοσύνη των χρηστών. Παράλληλα, διευκόλυνε την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών με πιο χαρακτηριστική τα SMS, τα οποία σύντομα έγιναν αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής επικοινωνίας.

Αν και οι δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα 2G ήταν περιορισμένες, η γενιά αυτή δρομολόγησε τη μελλοντική σύγκλιση φωνής και δεδομένων. Η επιτυχία του GSM και η ευρεία υιοθέτησή του συνέβαλαν στην εξάπλωση της κινητής τηλεφωνίας στο ευρύ κοινό, μετατρέποντάς την από εξειδικευμένη υπηρεσία σε μαζικό αγαθό. Με τον τρόπο αυτό, τα δίκτυα 2G αποτέλεσαν το υπόβαθρο για την ανάπτυξη των πιο προηγμένων δικτύων τρίτης και τέταρτης γενιάς που ακολούθησαν.

Παρότι τα δίκτυα δεύτερης γενιάς συνέβαλαν καθοριστικά στη μαζική εξάπλωση της κινητής τηλεφωνίας, οι τεχνολογικές τους δυνατότητες δεν μπορούσαν πλέον να καλύψουν τις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών. Η συνεχής άνοδος της χρήσης του Διαδικτύου, η εμφάνιση νέων εφαρμογών πολυμέσων και η απαίτηση για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ανέδειξαν τα όρια των δικτύων 2G.

Η κινητή επικοινωνία έπαψε να περιορίζεται αποκλειστικά στη φωνή και στα SMS, δημιουργώντας την ανάγκη για ένα νέο τεχνολογικό πλαίσιο που θα υποστήριζε πιο απαιτητικές υπηρεσίες δεδομένων. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη των δικτύων τρίτης γενιάς, τα οποία σχεδιάστηκαν με στόχο τη σύγκλιση φωνής και δεδομένων και την παροχή ουσιαστικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο μέσω κινητών συσκευών. Η μετάβαση αυτή σηματοδότησε ένα νέο στάδιο στην εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας, οδηγώντας σταδιακά στη σύγχρονη ψηφιακή εμπειρία που γνωρίζουμε σήμερα. [7]

2.5 Μετάβαση σε προηγμένα δίκτυα (3G, 4G)

Η εισαγωγή των δικτύων τρίτης και τέταρτης γενιάς αποτέλεσε καθοριστικό σημείο στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, καθώς μετέτρεψε την κινητή τηλεφωνία σε βασικό μέσο πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, τα δίκτυα 3G και 4G σχεδιάστηκαν εξ αρχής με έμφαση στη μετάδοση δεδομένων, υποστηρίζοντας υπηρεσίες πολυμέσων, διαδικτυακές εφαρμογές και νέες μορφές ψηφιακής επικοινωνίας.

Η μετάβαση αυτή δεν αφορούσε μόνο την αύξηση των ταχυτήτων, αλλά και τη συνολική αναβάθμιση της αρχιτεκτονικής των δικτύων. Η υιοθέτηση τεχνολογιών που βασίζονται στη μεταγωγή πακέτων,

καθώς και η σταδιακή ενσωμάτωση του Διαδικτύου ως βασικής υποδομής επικοινωνίας, άλλαξαν ριζικά τον ρόλο των κινητών δικτύων. Οι κινητές συσκευές εξελίχθηκαν από απλά μέσα επικοινωνίας σε πολυλειτουργικές πλατφόρμες πρόσβασης σε πληροφορία, ψυχαγωγία και υπηρεσίες.[8]

2.6 Δίκτυα 3^{ης} Γενιάς (3G)

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς (3G) ήταν ουσιαστικά το πρώτο μεγάλο βήμα όπου το κινητό άρχισε να αποκτά χαρακτήρα συσκευής πρόσβασης στο διαδίκτυο, ξεπερνώντας τον ρόλο του τηλεφώνου για κλήσεις και SMS. Ο χρήστης μπορεί πλέον να κάνει πρακτική και ουσιαστική πλοήγηση στο διαδίκτυο με χρήση κινητού. Μέχρι το 2G, η βασική χρήση ήταν η τηλεφωνική κλήση, ενώ τα δεδομένα ήταν πολύ περιορισμένα. Με το 3G, η λογική αλλάζει. Το δίκτυο σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να υποστηρίξει πιο σοβαρή μετάδοση δεδομένων και υπηρεσίες πολυμέσων.

Στην πράξη, το 3G παρείχε στον χρήστη τις εξής δυνατότητες:

- να μπαίνει στο διαδίκτυο από το κινητό με φιλικό και εύχρηστο περιβάλλον χρήστη (εμφάνιση πληθώρας browser applications σε κινητά iOS, Android)
- να στείλει/λάβει e-mail πιο εύκολα (εμφάνιση email apps πχ. gmail)
- να χρησιμοποιήσει υπηρεσίες που είχαν σχέση με εικόνα/βίντεο (youtube, tv streaming)
- να κάνει βασικό streaming ή video-calling (Viber calls, FaceTime).

Συνολικά, το 3G ήταν η γενιά που έφερε το κινητό πιο κοντά σε αυτό που σήμερα θεωρείται δεδομένο: τη χρήση εφαρμογών και την πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες από οποιοδήποτε σημείο. [10]

Η τρίτη γενιά σηματοδότησε την ουσιαστική μετάβαση από την τηλεφωνία στο κινητό Διαδίκτυο, καθώς για πρώτη φορά οι ρυθμοί μετάδοσης επέτρεπαν την ομαλή περιήγηση στον Παγκόσμιο Ιστό και την ανταλλαγή πολυμεσικού περιεχομένου. Η δυνατότητα αυτή ευνόησε την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και υπηρεσιών, όπως η βιντεοκλήση, η πρόσβαση σε ηλεκτρονικό ταχυδρομείο εν κινήσει και οι πρώτες υπηρεσίες γεωεντοπισμού. Έτσι, το 3G οδήγησε στη ραγδαία αύξηση της χρήσης δεδομένων που χαρακτήρισε την εποχή των έξυπνων κινητών.

2.6.1 Βασικές τεχνολογίες του 3G

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν 3G, χρησιμοποιούν το Universal Mobile Telecommunications System(UMTS), που αναπτύχθηκε ως συνέχεια του GSM. Εκεί που το GSM χρησιμοποιούσε τεχνικές πρόσβασης πιο «κατακερματισμένες» στον χρόνο, το UMTS βασίστηκε πολύ στη λογική του Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA). Το WCDMA επέτρεψε καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος για δεδομένα, περισσότερους ταυτόχρονους χρήστες και μεγαλύτερη ευελιξία στο να συνυπάρχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων.

Παράλληλα, το 3G βοήθησε στην εξέλιξη του δικτύου προς πιο «internet-based» λειτουργία, δηλαδή προς τη φιλοσοφία όπου τα δεδομένα αρχίζουν να έχουν όλο και μεγαλύτερη σημασία σε σχέση με τη φωνή[8].

2.6.2 Ταχύτητες και εμπειρία χρήσης

Σε επίπεδο επιδόσεων, οι ταχύτητες του 3G ήταν σαφώς καλύτερες από το 2G και καινοτόμες για την εποχή αλλά σήμερα θα τις χαρακτηρίζαμε χαμηλές. Παρ' όλα αυτά, για την εποχή αποτελούσαν σημαντική αλλαγή: ο χρήστης μπορούσε να φορτώνει ιστοσελίδες, να κατεβάζει μικρά αρχεία και να χρησιμοποιεί διαδικτυακές υπηρεσίες χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι θεωρητικές ταχύτητες ήταν πάντα μεγαλύτερες από τις πραγματικές. Στην πράξη, η εμπειρία εξαρτιόταν από την κάλυψη της κυψέλης, τον αριθμό χρηστών που ήταν ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή αλλά και τις δυνατότητες της ίδιας της συσκευής[8].

2.6.3 Σημαντικότητα του 3G

Η πιο ουσιαστική συμβολή του 3G ήταν ότι έβαλε το κινητό σε πορεία να γίνει πλατφόρμα εφαρμογών και δεδομένων. Συνέβαλε καθοριστικά στη διαμόρφωση του οικοσυστήματος των smartphones (σε συνδυασμό με την νέα εποχή λειτουργικών συστημάτων φορητών συσκευών -Android, iOS). Λειτουργήσε ως προπομπός της επόμενης γενιάς (4G), όπου το internet έγινε πια ο πυρήνας του δικτύου κινητών επικοινωνιών .

Ουσιαστικά, το 3G αποτέλεσε τη μετάβαση από την «κινητή τηλεφωνία» στην «κινητή διαδικτυακή εμπειρία», έστω και σε πιο πρώιμη μορφή.

2.7 Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς (4G)

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G) αποτέλεσαν το σημείο όπου η κινητή τηλεφωνία μετατράπηκε οριστικά σε κινητή ευρυζωνική πρόσβαση. Αν το 3G ήταν το πρώτο βήμα για σοβαρό internet στο κινητό, το 4G ήταν αυτό που έκανε την εμπειρία πραγματικά γρήγορη, σταθερή και καθημερινή. Από εδώ και πέρα, το κινητό εξελίχθηκε από εναλλακτική λύση σε πλήρη υποκατάστατο του υπολογιστή σε αρκετές περιπτώσεις[8].

Με την έλευση του 4G, οι χρήστες μπορούσαν:

- να παρακολουθούν βίντεο υψηλής ανάλυσης χωρίς συνεχείς διακοπές, (Βίντεο 4K ανάλυσης εύκολα και γρήγορα)
- να χρησιμοποιούν εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης σε πραγματικό χρόνο (live μεταδόσεις χρηστών)
- να ανεβάζουν και να κατεβάζουν αρχεία πολύ πιο γρήγορα, (πολλά Gigabytes δεδομένων σε λίγα λεπτά)
- να βασίζονται στο κινητό για εργασία, πλοήγηση και ψυχαγωγία. (πλοήγηση στο διαδίκτυο, zoom video calls, online gaming)

Για πρώτη φορά, το mobile internet έγινε ισάξιο - και συχνά καλύτερο - από τις σταθερές συνδέσεις που υπήρχαν εκείνη την περίοδο. Είναι χαρακτηριστικό ότι με το 4G , οι φορητές συσκευές επιτυγχάνανε μεγαλύτερες ταχύτητες με ευκολία από τις σταθερές, σε περιοχές που το σταθερό ίντερνετ μέσω χάλκινου καλωδίου δεν είχε αντικατασταθεί ακόμα από οπτική ίνα.

Κεντρικό χαρακτηριστικό της τέταρτης γενιάς υπήρξε η μετάβαση σε αρχιτεκτονική βασισμένη αποκλειστικά στο πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP) για τη μεταφορά δεδομένων. Η φωνή, αντίθετα, εξυπηρετούνταν αρχικά με επιστροφή στα δίκτυα 2G/3G μέσω του μηχανισμού Circuit Switched Fallback (CSFB) και μεταφέρθηκε πλήρως σε IP μόνο αργότερα, με την εισαγωγή του VoLTE. Η ενοποίηση όλων των υπηρεσιών κάτω από ένα ενιαίο πρωτόκολλο απλοποίησε τη διαχείριση του δικτύου και επέτρεψε την εύκολη διασύνδεσή του με τις υποδομές του σταθερού Διαδικτύου. Σε συνδυασμό με τις υψηλές ταχύτητες, το γεγονός αυτό έκανε το 4G τη βάση για την επικράτηση του streaming και των υπηρεσιών cloud.

2.7.1 Η τεχνολογία του 4G

Η βασική τεχνολογία που συνδέεται με το 4G είναι το Long Term Evolution (LTE). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, το LTE σχεδιάστηκε εξ αρχής ως δίκτυο δεδομένων, με τη φωνή να αντιμετωπίζεται πλέον ως μία ακόμα υπηρεσία δεδομένων.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του 4G είναι ότι βασίζεται αποκλειστικά στη μεταγωγή πακέτων και στην αρχιτεκτονική IP. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα δεδομένα -φωνή, εικόνα, βίντεο- μεταφέρονται με τον ίδιο τρόπο, όπως συμβαίνει και στο Διαδίκτυο. Η προσέγγιση αυτή απλοποίησε το δίκτυο και βελτίωσε σημαντικά την αποδοτικότητά του.

Η αύξηση των ταχυτήτων στο 4G δεν προέκυψε τυχαία. Βασίστηκε σε συνδυασμό τεχνολογιών, όπως πιο αποδοτικές τεχνικές διαμόρφωσης, καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος, χρήση πολλαπλών κεραιών, πιο «έξυπνη» κατανομή πόρων μεταξύ χρηστών.

Στην πράξη, το 4G επέτρεψε ταχύτητες που ήταν πολλαπλάσιες του 3G, μειώνοντας ταυτόχρονα το latency. Αυτό επέτρεψε την υποστήριξη εφαρμογών που προηγουμένως δεν απέδιδαν ικανοποιητικά σε κινητό δίκτυο. [9]

2.7.2 Η εμπειρία των χρηστών σε συνδυασμό με την εξάπλωση των Smartphone

Η εποχή του 4G συνέπεσε χρονικά με τη μαζική εξάπλωση των smartphones και των εφαρμογών. Το αποτέλεσμα ήταν ένα «ταίριασμα» τεχνολογίας και συσκευών: οι εφαρμογές έγιναν πιο απαιτητικές και τα δίκτυα αρκετά ισχυρά για να τις υποστηρίξουν.

Υπηρεσίες όπως το streaming, τα cloud services, οι εφαρμογές πλοήγησης και τα κοινωνικά δίκτυα έγιναν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Το 4G έπαιξε καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση, καθώς παρείχε την αξιοπιστία και την ταχύτητα που απαιτούσαν αυτές οι υπηρεσίες. [9]

2.7.3 Η σημασία του 4G για τις επόμενες γενιές

Το 4G υπήρξε πολύ περισσότερο από μια αναβάθμιση ταχύτητας. Καθόρισε τον σχεδιασμό των δικτύων πέμπτης γενιάς, τόσο σε επίπεδο αρχιτεκτονικής όσο και φιλοσοφίας. Η πλήρης μετάβαση σε IP δίκτυα, η έμφαση στα δεδομένα και η ευελιξία στη διαχείριση πόρων αποτέλεσαν τη βάση πάνω στην οποία χτίστηκε το 5G.

Το 4G ήταν επομένως η γενιά που έδωσε στο κινητό τη μορφή που έχει σήμερα. Μια βασική επιλογή για τους χρήστες, για πρόσβαση στον ψηφιακό κόσμο.[9]

2.7.4 Μετάβαση από 3G σε 4G

Η μετάβαση από τα δίκτυα 3G στα δίκτυα 4G επέφερε, πέρα από τη βελτίωση των ταχυτήτων, μια ουσιαστική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε την κινητή επικοινωνία. Το 3G αποτέλεσε το πρώτο βήμα προς τη χρήση του κινητού ως μέσο πρόσβασης στο Διαδίκτυο, εισάγοντας υπηρεσίες δεδομένων και πολυμέσων που μέχρι τότε ήταν περιορισμένες ή δύσκολες στη χρήση. Αν και οι δυνατότητές του ήταν σημαντικές για την εποχή, η εμπειρία χρήσης παρέμενε συχνά ασταθής και εξαρτημένη από πολλούς παράγοντες.

Το 4G ήρθε να καλύψει αυτά τα κενά, μετατρέποντας την κινητή σύνδεση σε μια αξιόπιστη και γρήγορη μορφή ευρυζωνικής πρόσβασης. Η φιλοσοφία του δικτύου άλλαξε, καθώς το Διαδίκτυο και τα δεδομένα βρέθηκαν στο επίκεντρο, ενώ η φωνή αντιμετωπίστηκε πλέον ως μία ακόμη υπηρεσία

δεδομένων. Αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη εφαρμογών που απαιτούσαν υψηλές ταχύτητες και χαμηλό latency, όπως το streaming, οι υπηρεσίες cloud και οι εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο.

Σύγκριση Δικτύων 3G και 4G		
Χαρακτηριστικό	3G	4G
Περίοδος εμφάνισης	Αρχές δεκαετίας 2000	Αρχές δεκαετίας 2010
Βασική φιλοσοφία	Συνδυασμός φωνής και δεδομένων	Δίκτυο με επίκεντρο τα δεδομένα
Κύρια τεχνολογία	UMTS / WCDMA	LTE / LTE-Advanced
Μεταγωγή	Κυκλωματική & πακέτων	Αποκλειστικά πακέτων (IP)
Ενδεικτικές ταχύτητες	Έως 2–10 Mbps	Έως 100 Mbps – 1 Gbps
Καθυστέρηση (Latency)	Σχετικά υψηλή	Σημαντικά μειωμένη
Υπηρεσίες	Mobile internet, multimedia, video calls	Streaming HD, cloud, social media, gaming
Εμπειρία χρήστη	Λειτουργική αλλά συχνά ασταθής	Γρήγορη, σταθερή και ασίοπιστη
Ρόλος στην εξέλιξη	Άνοιξε τον δρόμο για mobile internet	Καθιέρωσε την κινητή ευρυζωνικότητα

Εικόνα 2. Σύγκριση 3G-4G [9]

2.8 Δίκτυα 5^{ης} Γενιάς (5G)

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) σηματοδοτούν μια νέα φάση στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών, καθώς δεν σχεδιάστηκαν μόνο για να προσφέρουν μεγαλύτερες ταχύτητες, αλλά για να υποστηρίξουν ένα εντελώς διαφορετικό σύνολο εφαρμογών και απαιτήσεων. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, το 5G δεν απευθύνεται αποκλειστικά στους ανθρώπους-χρήστες αλλά και σε συσκευές, αισθητήρες και αυτόνομα συστήματα.

Η ανάπτυξη του 5G ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 2010 και η εμπορική του διάθεση άρχισε γύρω στο 2020. Η ανάγκη για το 5G προέκυψε από τον τεράστιο όγκο δεδομένων που δημιουργείται πλέον καθημερινά, καθώς και από την απαίτηση για άμεση απόκριση και υψηλή αξιοπιστία σε κρίσιμες εφαρμογές[9].

Εκείνο που διαφοροποιεί ουσιαστικά την πέμπτη γενιά από τις προηγούμενες είναι ότι δεν σχεδιάστηκε αποκλειστικά για την αύξηση των ταχυτήτων, αλλά ως μια ευέλικτη πλατφόρμα ικανή να εξυπηρετεί ταυτόχρονα πολύ διαφορετικές μεταξύ τους ανάγκες. Έτσι, το ίδιο δίκτυο καλείται να υποστηρίξει ταυτόχρονα την ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα, τις κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστη καθυστέρηση και τη μαζική διασύνδεση συσκευών. Η προσέγγιση αυτή προαναγγέλλει τη λογική των δικτύων επόμενης γενιάς, όπου η προσαρμοστικότητα αποτελεί βασικό σχεδιαστικό χαρακτηριστικό.

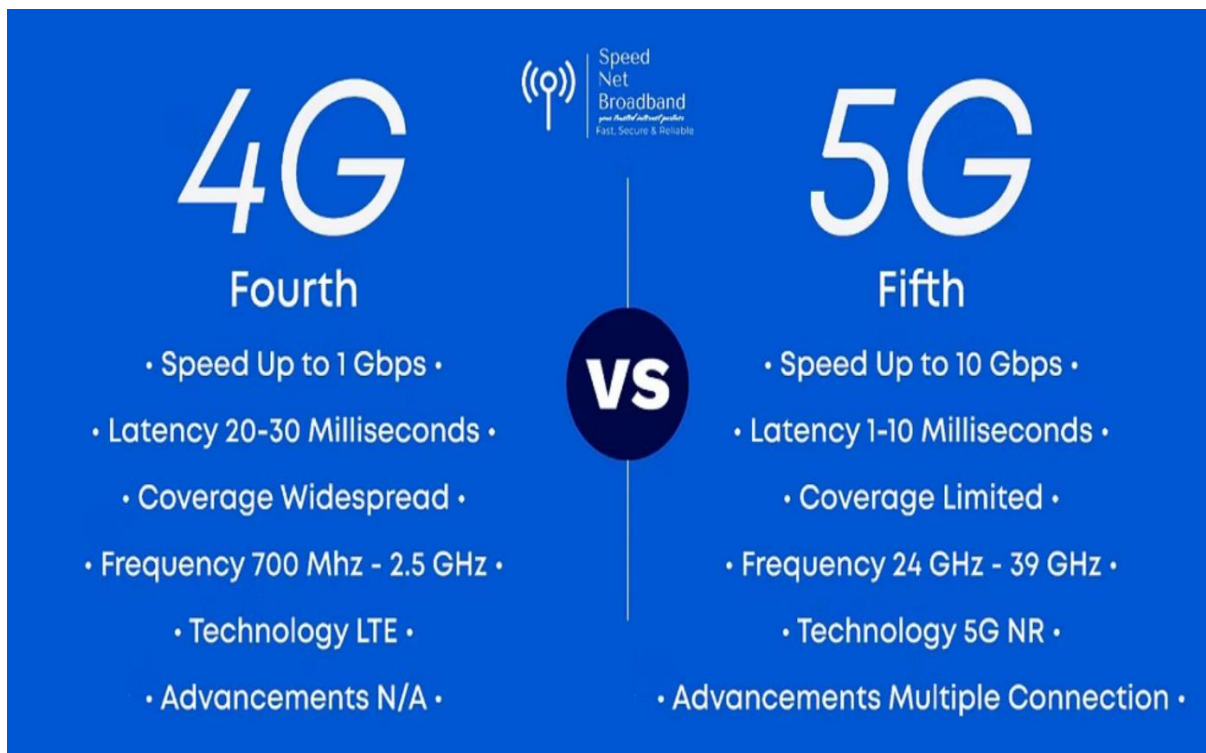
2.8.1 Οι διαφορές της 5^{ης} Γενιάς σε σχέση με την προηγούμενη

Το βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί το 5G από το 4G δεν είναι μόνο η ταχύτητα, αλλά η ευελιξία. Το 5G σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται σε διαφορετικά σενάρια χρήσης, ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Στην πράξη, το 5G προσφέρει[9]:

- πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων,
- αισθητά χαμηλότερο latency,
- δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης τεράστιου αριθμού συσκευών,
- μεγαλύτερη αξιοπιστία σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στο 5G να ξεφύγει από το μοντέλο «μόνο internet στο κινητό» και να υποστηρίξει πιο σύνθετα συστήματα.



Εικόνα 3. Σύγκριση 4G-5G [9]

2.8.2 Τεχνολογίες της 5^{ης} Γενιάς

Για να καλύψει τις διαφορετικές ανάγκες, το 5G χωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες υπηρεσιών[9]:

- enhanced Mobile Broadband(eMBB):

Αφορά την παροχή πολύ υψηλών ταχυτήτων για εφαρμογές όπως streaming υψηλής ανάλυσης, gaming και επανυξημένη πραγματικότητα.

- Ultra-Reliable Low Latency Communications(URLLC):

Σχεδιάστηκε για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση και υψηλή αξιοπιστία, όπως η αυτόνομη οδήγηση, ο απομακρυσμένος έλεγχος συστημάτων και η βιομηχανική αυτοματοποίηση.

- massive Machine Type Communications(mMTC):

Υποστηρίζει τη μαζική σύνδεση συσκευών, κυρίως στο πλαίσιο του IoT, όπου χιλιάδες ή και εκατομμύρια αισθητήρες μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα.

Αυτή η κατηγοριοποίηση δείχνει ξεκάθαρα ότι το 5G δεν είναι ένα ενιαίο δίκτυο για όλες τις χρήσεις, αλλά ένα ευέλικτο σύστημα που προσαρμόζεται ανά περίπτωση.

2.8.3 Το 5G ως βάση για τον ερχομό του 6G

Το 5G αποτελεί σε μεγάλο βαθμό τη «γέφυρα» προς την επόμενη γενιά δικτύων. Πολλές από τις τεχνολογικές ιδέες που εισήγαγε, όπως η εικονικοποίηση δικτύου, το network slicing και η έμφαση στο χαμηλό latency, αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία θα αναπτυχθεί το 6G.

Παράλληλα, η εμπειρία από την υλοποίηση και αξιοποίηση του 5G επιτρέπει στους παρόχους και στους ερευνητές να εντοπίσουν τα όρια και τις αδυναμίες των σημερινών δικτύων. Αυτά τα όρια είναι που οδηγούν φυσικά στην ανάγκη για ακόμα υψηλότερες ταχύτητες, μεγαλύτερη ευφυΐα και βαθύτερη ενσωμάτωση της τεχνολογίας στην καθημερινή ζωή, στοιχεία που αναμένεται να χαρακτηρίσουν τα δίκτυα έκτης γενιάς.

2.8.4 5G - Advanced

Το 5G-Advanced αποτελεί ενδιάμεσο βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων: λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος που καλύπτει τις ανάγκες της σημερινής εποχής και προετοιμάζει τη μετάβαση στο 6G. Κομβικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση διαδραματίζει η ζώνη συχνοτήτων U6GHz, η οποία προσφέρει μεγαλύτερη χωρητικότητα και υψηλές ταχύτητες, διατηρώντας παράλληλα καλή κάλυψη, χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδιαίτερα σημαντική για την περαιτέρω εξέλιξη των δικτύων.

Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί το Mobile World Congress (MWC) της Βαρκελώνης το 2026, όπου η Huawei παρουσίασε σειρά λύσεων για τη ζώνη U6GHz, με στόχο την ενίσχυση των δικτύων απέναντι στις αυξανόμενες απαιτήσεις που δημιουργεί η τεχνητή νοημοσύνη. Τέτοιες πρωτοβουλίες δείχνουν ότι το 5G-Advanced συμβάλλει στη δημιουργία ισχυρότερων τηλεπικοινωνιακών υποδομών, διευκολύνοντας την πορεία προς την επόμενη γενιά δικτύων [19].

Η ανάγκη για το 5G-Advanced προκύπτει σε μεγάλο βαθμό από τη ραγδαία εξάπλωση των εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίες μεταβάλλουν ριζικά τις απαιτήσεις από τα δίκτυα. Σε αντίθεση με το παρελθόν, όπου η έμφαση δινόταν κυρίως στην ταχύτητα λήψης δεδομένων, οι σύγχρονες εφαρμογές απαιτούν ισχυρότερη απόδοση και κατά την αποστολή δεδομένων από τη συσκευή του χρήστη προς το δίκτυο, καθώς και άμεση απόκριση σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, η ζήτηση για αξιοπιστία και σταθερή εμπειρία αυξάνεται, καθώς ολοένα και περισσότερες υπηρεσίες, από τη ροή βίντεο έως τα αυτόνομα και ρομποτικά συστήματα, βασίζονται σε συνεχή και χαμηλής καθυστέρησης συνδεσιμότητα.

Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις αυτές, το 5G-Advanced απαιτεί κάτι περισσότερο από την αναβάθμιση των κεραιών: μια συνολική ενίσχυση της τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Οι σχετικές τεχνολογίες αφορούν τόσο εξωτερικούς όσο και εσωτερικούς χώρους και περιλαμβάνουν νέες τεχνικές διασύνδεσης των σταθμών βάσης, ενισχύοντας τη χωρητικότητα των δικτύων μεταφοράς δεδομένων. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει επίσης η τεχνολογία network slicing, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία εξειδικευμένων εικονικών δικτύων με εγγυημένες επιδόσεις για κάθε κατηγορία υπηρεσιών. Με τον συνδυασμό αυτόν, το 5G-Advanced αποτελεί ουσιαστικό ενδιάμεσο στάδιο που ενισχύει τις σημερινές δυνατότητες και στηρίζει την ομαλή μετάβαση προς τα δίκτυα έκτης γενιάς.

2.9 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η ιστορική εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, από τις πρώτες γενιές έως τα σύγχρονα δίκτυα 5G. Έγινε φανερό ότι κάθε γενιά οικοδομείται πάνω στην προηγούμενη, ενώ η μετάβαση από τα δίκτυα φωνής στα δίκτυα δεδομένων ανέδειξε την κινητή τηλεφωνία ως βασική υποδομή της καθημερινής ζωής. Από την αναλογική μετάδοση του 1G έως τις υψηλές ταχύτητες του 4G, η τεχνολογία εξελίχθηκε σε καθολική πλατφόρμα πληροφορίας. Με το 5G και το 5G-Advanced, το ενδιαφέρον στράφηκε πλέον και στην αξιοπιστία και τη χαμηλή καθυστέρηση. Η πορεία προς την έκτη γενιά αποτελεί το επόμενο βήμα των Ασύρματων Δικτύων Επικοινωνιών , αλλά και της ανθρωπότητας γενικότερα.

Κεφάλαιο 3ο: Τεχνολογίες και Αρχιτεκτονική Δικτύων 6G

3.1 Εισαγωγή

Η συνεχής εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών οδήγησε από τις πρώτες γενιές κινητής τηλεφωνίας στα σύγχρονα δίκτυα 5G, με στόχο πάντα την αύξηση της ταχύτητας, τη βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών και τη σύνδεση περισσότερων χρηστών. Ωστόσο, εφαρμογές όπως η τεχνητή νοημοσύνη, τα αυτόνομα οχήματα και οι έξυπνες πόλεις ξεπερνούν πλέον τις δυνατότητες των σημερινών δικτύων, γι' αυτό η ερευνητική κοινότητα μελετά ήδη το 6G, το οποίο υπόσχεται εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, ελάχιστο latency και σύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών, αξιοποιώντας συχνότητες terahertz και ενσωματωμένη τεχνητή νοημοσύνη[13].



Εικόνα 4. 6G parameters [12]

3.2 Το όραμα και οι στόχοι της γενιάς 6G

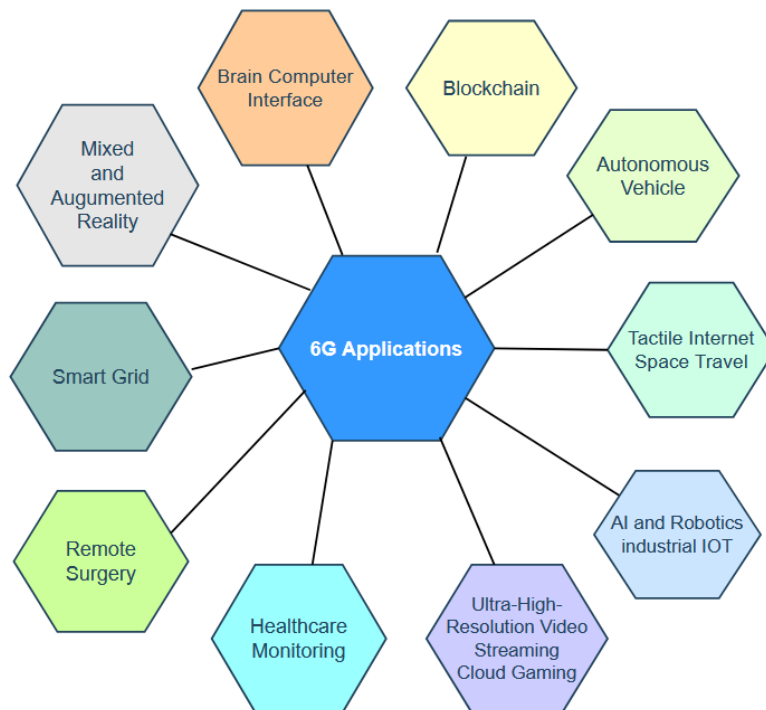
Η έκτη γενιά 6G αποτελεί την επόμενη φάση εξέλιξης των ασύρματων δικτύων και φιλοδοξεί να επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες των σημερινών τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, οι οποίες επικεντρώνονταν κυρίως στη βελτίωση της ταχύτητας και της χωρητικότητας, το 6G στοχεύει στη δημιουργία ενός πλήρως διασυνδεδεμένου ψηφιακού περιβάλλοντος, όπου άνθρωποι, συσκευές και υπολογιστικά συστήματα θα επικοινωνούν σε

πραγματικό χρόνο. Το όραμα αυτό περιλαμβάνει εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων (έως το επίπεδο των Tbps), σχεδόν μηδενικό latency και δυνατότητα ταυτόχρονης σύνδεσης τεράστιου αριθμού συσκευών (χαρακτηριστικά που θα υποστηρίξουν εφαρμογές όπως ολογραφική επικοινωνία, προηγμένη εικονική πραγματικότητα, έξυπνες πόλεις και αυτόνομα συστήματα μεταφορών). Παράλληλα, τα δίκτυα 6G αναμένεται να ενσωματώνουν τεχνητή νοημοσύνη στη λειτουργία τους, επιτρέποντας αυτοματοποιημένη διαχείριση πόρων και δυναμική προσαρμογή στις ανάγκες των χρηστών.

Κεντρικό ρόλο στην επίτευξη αυτών των επιδόσεων αναμένεται να διαδραματίσει η αξιοποίηση του φάσματος Terahertz (100 GHz έως 1 THz), το οποίο προσφέρει τεράστιο εύρος ζώνης και υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα. Η μετάδοση σε αυτές τις συχνότητες, ωστόσο, αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Προκλήσεις όπως η έντονη απόσβεση του σήματος με την απόσταση ή υψηλή ευαισθησία σε εμπόδια και ανάγκη για ακριβή ευθυγράμμιση των δεσμών. Αυτά στοιχεία καθιστούν απαραίτητη την πυκνή ανάπτυξη σταθμών και τη χρήση προηγμένων τεχνικών διαμόρφωσης δέσμης.

Πέρα από την ταχύτητα, το χαμηλό latency αναμένεται να ανοίξει τον δρόμο για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση, όπως η απομακρυσμένη χειρουργική. Η δυνατότητα σύνδεσης τεράστιου αριθμού συσκευών, αποκτά ιδιαίτερη σημασία καθώς το Διαδίκτυο των Πραγμάτων συνεχίζει να αυξάνει τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών παγκοσμίως.

Παρόλο που το 5G έχει αναπτυχθεί παγκοσμίως, η στροφή προς τον αυτοματισμό καθιστά σαφές ότι απαιτείται μια πιο προηγμένη τεχνολογία για τη διαχείριση της αυξανόμενης κίνησης. Εκεί υπεισέρχεται το δίκτυο 6G, το οποίο υπόσχεται εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και μαζική συνδεσιμότητα. Μέσω της ενσωμάτωσης AI και ML, το 6G θα συνδυάσει απρόσκοπτα τον φυσικό, τον ψηφιακό και τον βιολογικό κόσμο.[12][13]

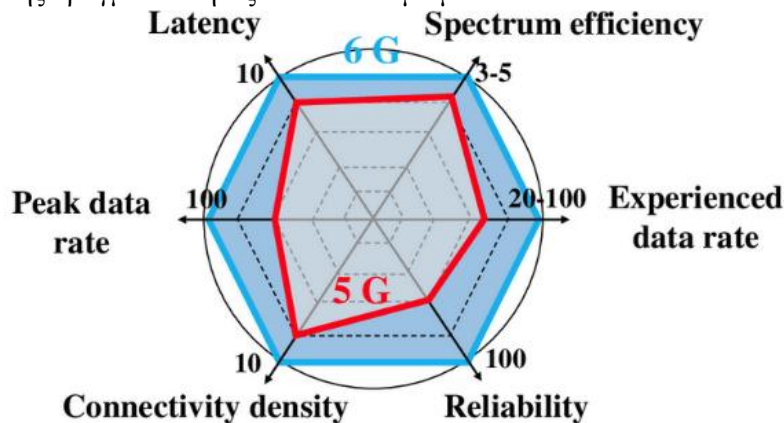


Εικόνα 5. 6G Applications [12]

3.3 Σύγκριση φιλοσοφίας 5G και 6G

Τα δίκτυα 5G και 6G διαφέρουν τόσο ως προς τις επιδόσεις όσο και ως προς τη φιλοσοφία σχεδιασμού τους. Τα δίκτυα 5G σχεδιάστηκαν κυρίως για να υποστηρίξουν υψηλές ταχύτητες δεδομένων και μεγάλο αριθμό συσκευών, ενώ το 6G στοχεύει στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού οικοσυστήματος στο οποίο τα δίκτυα θα λειτουργούν ως βασική υποδομή για την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών[9]. Επιπλέον, τα δίκτυα 6G θα ενσωματώνουν την τεχνητή νοημοσύνη σε μεγαλύτερο βαθμό, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων και τη δυναμική προσαρμογή στις ανάγκες των χρηστών[13]. Η φιλοσοφία αυτή θα οδηγήσει σε πιο αποδοτικά και ευέλικτα δίκτυα που θα μπορούν να υποστηρίξουν τις ανάγκες της ψηφιακής κοινωνίας του μέλλοντος[12].

- **Εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων:** Ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν έως και τα 10 Tbps (έναντι των 10 Gbps του 5G).
- **Εξαιρετικά χαμηλή υστέρηση (Low Latency):** Μείωση της καθυστέρησης έως και τα 0,1 ms (σε σύγκριση με το 1 ms του 5G).
- **Βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα:** Βελτιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας, έως και 100 φορές μεγαλύτερη αποδοτικότητα από το 5G, οδηγώντας σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών.
- **Βελτιωμένη εμπειρία χρήστη:** Αναβάθμιση εφαρμογών επαυξημένης, εικονικής και εκτεταμένης πραγματικότητας σε συνδυασμό με AI.



Performance requirements	Peak data rate	Experienced data rate	Latency	Reliability	Spectrum efficiency	Connectivity density
5G	0.01 Tbit/s	0.1-0.5 Gbit/s	1 ms	99.999%	30 bps/Hz	10 ² devices/100m ²
6G	1 Tbit/s	10 Gbit/s	0.1 ms	99.99999%	100 bps/Hz	10 ³ devices/100m ²

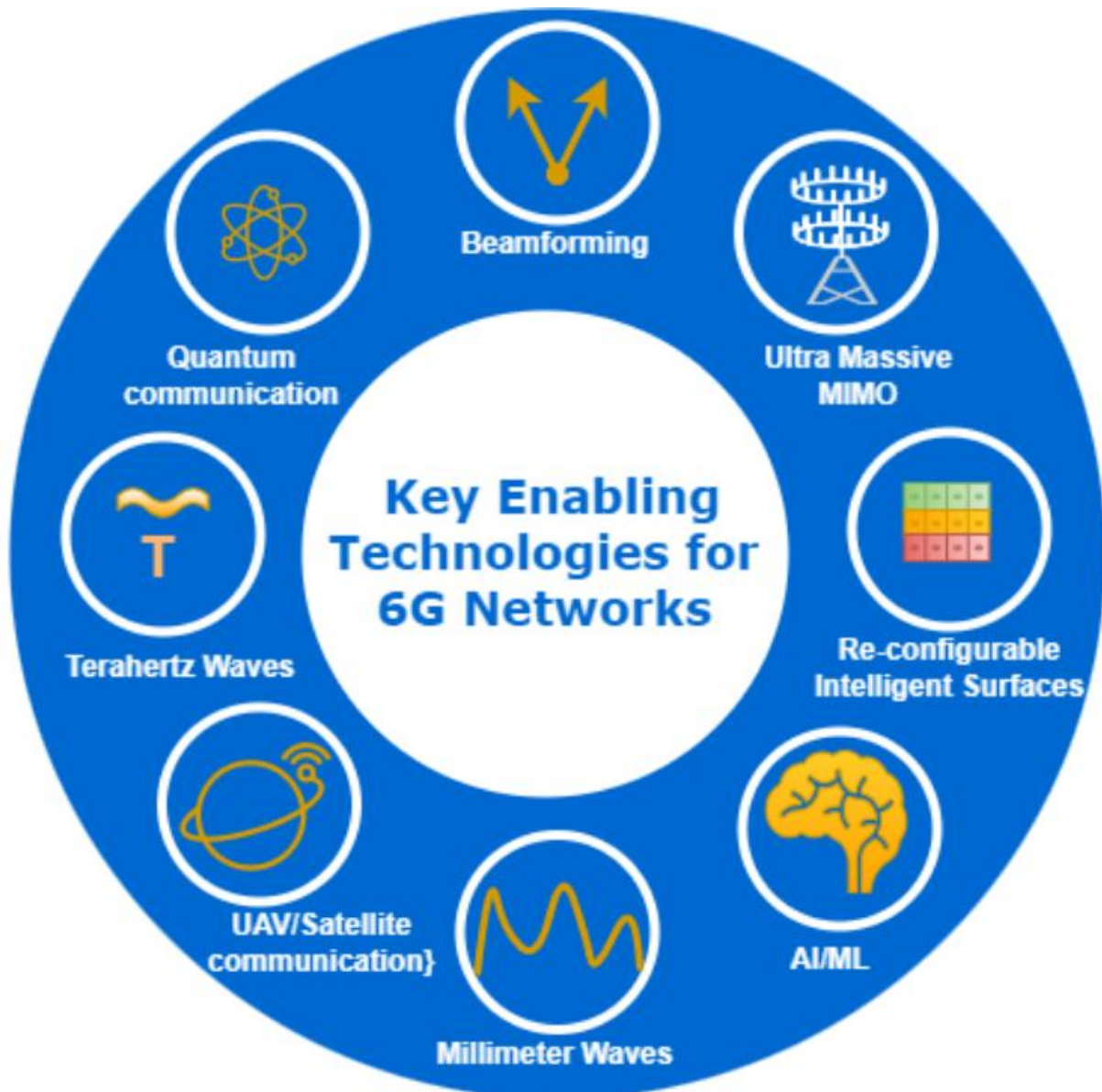
Πίνακας 1. Σύγκριση 5G-6G [12]

3.4 Φάσμα συχνοτήτων και τεχνολογίες μετάδοσης

Η ανάπτυξη των δικτύων 6G συνδέεται άμεσα με την αξιοποίηση νέων τεχνολογιών μετάδοσης δεδομένων και νέων περιοχών του φάσματος συχνοτήτων. Καθώς η ζήτηση για μεγαλύτερες ταχύτητες δεδομένων και υψηλότερη χωρητικότητα δικτύου αυξάνεται συνεχώς, οι παραδοσιακές ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στα σημερινά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν επαρκούν για να καλύψουν τις μελλοντικές ανάγκες των ασύρματων επικοινωνιών[4]. Για τον λόγο αυτό, η ερευνητική κοινότητα στρέφεται προς την αξιοποίηση πολύ υψηλότερων συχνοτήτων, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν σημαντικά μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η χρήση αυτών των συχνοτήτων αναμένεται να αποτελέσει βασικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής των

δικτύων 6G, καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη νέων μορφών επικοινωνίας και την υποστήριξη εφαρμογών που απαιτούν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων[11][13].

Πέρα από τη μετάδοση δεδομένων, χαρακτηριστικό γνώρισμα των δικτύων 6G αποτελεί η ενσωματωμένη αντίληψη και επικοινωνία (Integrated Sensing and Communication – ISAC), σύμφωνα με την οποία το ίδιο το δίκτυο αξιοποιεί τα ραδιοσήματα όχι μόνο για την ανταλλαγή πληροφορίας αλλά και για την ανίχνευση και χαρτογράφηση του περιβάλλοντος. Στο ίδιο πλαίσιο, οι ευφυείς ανακλαστικές επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces – RIS) επιτρέπουν την ελεγχόμενη ανακατεύθυνση του σήματος σε περιβάλλοντα όπου η απευθείας οπτική επαφή είναι δύσκολη, βελτιώνοντας την κάλυψη και την ενεργειακή αποδοτικότητα χωρίς την ανάγκη επιπλέον ενεργών σταθμών βάσης.



Εικόνα 6. Key enabling Technologies for 6G Networks [12]

3.4.1 Χρήση συχνοτήτων Terahertz (THz)

Η επικοινωνία στη ζώνη των Terahertz (THz) γεφυρώνει το τεχνολογικό χάσμα μεταξύ των κυμάτων χιλιοστού και του οπτικού φάσματος υπεράυθρου, ξεκλειδώνοντας τεράστιο αδιάσπαστο εύρος ζώνης δεκάδων gigahertz. Χάρη στο εξαιρετικά μικρό μήκος κύματος (υποχιλιοστομετρική κλίμακα), καθιστά

δυνατή την ενσωμάτωση χιλιάδων μικροσκοπικών κεραιών σε πολύ συμπαγείς διατάξεις, επιτρέποντας την πρακτική υλοποίηση συστοιχιών Ultra-Massive MIMO και αναδιαμορφώσιμων επιφανειών RIS. Παράλληλα, τα σήματα THz εξασφαλίζουν αυξημένη φυσική ασφάλεια στο επίπεδο μετάδοσης, καθώς οι έντονα εστιασμένες και στενές κατευθυντικές δέσμες δυσχεραίνουν δραστικά την υποκλοπή ή την παρεμβολή από κακόβουλους τρίτους.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης επικοινωνίας και τηλεπισκόπησης (ISAC), καθώς οι συχνότητες αυτές επιτρέπουν λειτουργίες ραντάρ χιλιοστομετρικής ακρίβειας, φασματοσκοπία υλικών και προηγμένη ιατρική απεικόνιση υψηλής ευκρίνειας. Πολύ απλά, η διάδοση σε αυτό το φάσμα συνοδεύεται από έντονες απώλειες διαδρομής, μοριακή απορρόφηση από την ατμόσφαιρα και μηδενική σχεδόν διαπερατότητα στερεών εμποδίων, απαιτώντας άμεση οπτική επαφή (Line-of-Sight). Για την υπέρβαση αυτών των περιορισμών, επιστρατεύονται αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης και ενισχυτικής μάθησης. Η ΑΙ προβλέπει έγκαιρα φαινόμενα αποκλεισμού του καναλιού, ρυθμίζει δυναμικά τις παραμέτρους εκπομπής και ευθυγραμμίζει αυτόνομα τις κεραίες, διασφαλίζοντας σταθερότητα και αδιάλειπτη ροή δεδομένων.[12]

Συχνότητες που θα χρησιμοποιεί η τεχνολογία 6G:

- Χαμηλές και Μεσαίες Ζώνες (Sub-6 GHz και cmWave): Διατηρούνται οι συχνότητες κάτω των 6 GHz καθώς και η ανώτερη μεσαία ζώνη (7–24 GHz) για να εξασφαλιστεί εκτεταμένη εμβέλεια, μακρο-κυψελωτή κάλυψη και ισχυρή διείσδυση των σημάτων σε εσωτερικούς χώρους.
- Κύματα Χιλιοστού (Millimeter Waves - mmWave): Καλύπτουν το εύρος από 30 GHz έως 300 GHz, προσφέροντας υψηλή χωρητικότητα και ρυθμούς δεδομένων πολλαπλών gigabits για πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές.
- Ζώνη Terahertz και Sub-THz (άνω των 100 GHz έως 3 THz): Αποτελεί τη βασική φασματική καινοτομία του 6G, υπερβαίνοντας το όριο των 100 GHz. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (FCC) έχει ήδη ανοίξει για πειραματισμούς και έρευνα 6G το εύρος από 95 GHz έως 3 THz.

3.4.2 millimeter waves - mmWaves

Τα κύματα χιλιοστού (millimeter waves - mmWaves) λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων από 30 GHz έως 300 GHz και χαρακτηρίζονται από σημαντικά μικρότερο μήκος κύματος σε σχέση με τις παραδοσιακές ζώνες μικροκυμάτων που αξιοποιήθηκαν στις προηγούμενες γενιές, όπως το 4G και οι πρώιμες εκδόσεις του 5G. Η ικανότητά τους να εξασφαλίζουν ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αυξημένη χωρητικότητα και βελτιωμένη δικτυακή απόδοση τα καθιστά θεμελιώδη τεχνολογικό παράγοντα για την ανάπτυξη και υλοποίηση των δικτύων 6G.

Η τεχνολογία mmWave προσφέρει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων που φτάνουν σε επίπεδα πολλαπλών gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbps), επιτρέποντας την υποστήριξη νέων και εξαιρετικά απαιτητικών σεναρίων χρήσης. Σε αυτά περιλαμβάνονται εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (Augmented Reality - AR) και η αδιάλειπτη ροή βίντεο υπερ-υψηλής ανάλυσης 8K, οι οποίες απαιτούν τεράστιο εύρος ζώνης και ελάχιστη καθυστέρηση. Επιπρόσθετα, η μετάβαση σε αυτές τις υψηλότερες συχνότητες επιτρέπει την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος, πολλαπλασιάζοντας τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ανάπτυξη των κυμάτων χιλιοστού συνοδεύεται από κρίσιμες τεχνικές προκλήσεις. Το βασικότερο μειονέκτημα είναι η περιορισμένη εμβέλεια διάδοσης των

σημάτων mmWave σε σύγκριση με τις χαμηλότερες συχνότητες μικροκυμάτων, γεγονός που τα καθιστά επιρρεπή σε αποκλεισμούς από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, όπως κτίρια και δέντρα, επηρεάζοντας αρνητικά την κάλυψη. Παράλληλα, η ανάγκη εγκατάστασης μεγάλου αριθμού κεραιών συνεπάγεται υψηλό κόστος υποδομής.

Για την αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων, καθοριστικός είναι ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης (AI). Οι αλγόριθμοι AI προσαρμόζουν δυναμικά τις παραμέτρους εκπομπής και προβλέπουν έγκαιρα συμβάντα παρεμπόδισης του καναλιού (channel blockage), διασφαλίζοντας αξιόπιστη, συνεχή συνδεσιμότητα και μεγιστοποίηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στα δίκτυα 6G. [12].

3.4.3 6G Ultra Massive MIMO

Η τεχνολογία πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων υπερ-μεγάλης κλίμακας (Ultra-Massive MIMO - UM-MIMO) αποτελεί τον κεντρικό πυλώνα του φυσικού επιπέδου (PHY) για τα δίκτυα 6ης γενιάς (6G), εξελίσσοντας ριζικά το Massive MIMO του 5G. Ενσωματώνοντας εκατοντάδες έως και χιλιάδες στοιχεία κεραιών στους σταθμούς βάσης (BS), το σύστημα μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα δεκάδες ή εκατοντάδες χρήστες στους ίδιους χρονικούς και συχνотικούς πόρους. Η αξιοποίηση των άφθονων χωρικών βαθμών ελευθερίας εκτοξεύει τη χωρητικότητα του καναλιού, τη φασματική και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Παρ' όλα αυτά, η κλιμάκωση αυτή εισάγει πρωτόγνωρες προκλήσεις στο υλικό, στην απόκτηση πληροφορίας κατάστασης καναλιού (CSI) και στην υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Στα παραδοσιακά συστήματα MIMO, η μοντελοποίηση και η επεξεργασία σήματος πραγματοποιούνται στο χωρικό πεδίο (spatial domain) υπό την παραδοχή επίπεδου μετώπου κύματος και χωρικής στασιμότητας. Ωστόσο, στις διατάξεις UM-MIMO η απόσταση Rayleigh αυξάνεται δραματικά, τοποθετώντας τους χρήστες και τα ανακλαστικά αντικείμενα (clusters) στο εγγύς πεδίο (near-field). Ως εκ τούτου, το προσπίπτον κύμα εμφανίζει έντονο σφαιρικό μέτωπο (spherical wavefront), καταφθάνοντας στα επιμέρους στοιχεία με διαφορετικές γωνίες και καθυστερήσεις.

Επιπλέον, αναδύεται το φαινόμενο της χωρικής μη-στασιμότητας (spatial non-stationarity), καθώς διαφορετικά τμήματα της κεραίας παρατηρούν διαφορετικές ανακλάσεις. Ταυτόχρονα, η υλοποίηση απαιτεί εξαιρετικά μεγάλο αριθμό αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (RF chains), οδηγώντας σε απαγορευτική κατανάλωση ισχύος και υπέρμετρο φορτίο πιλοτικών σημάτων (pilot overhead) για την εκτίμηση καναλιού.

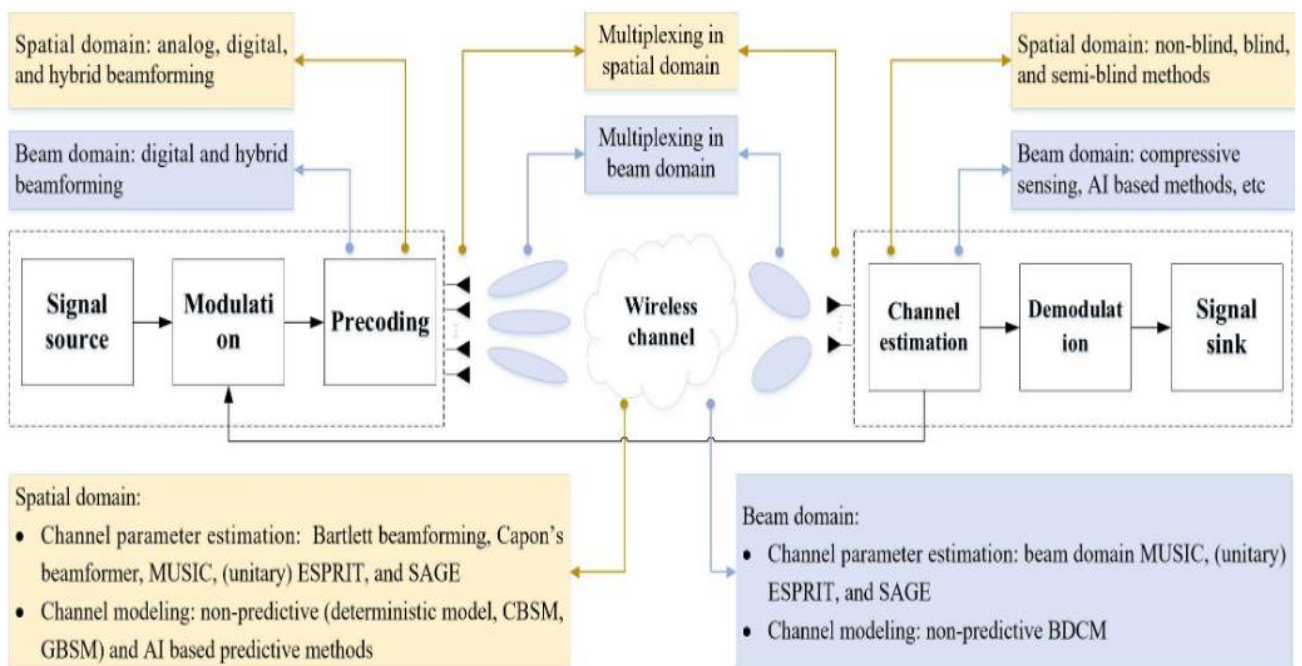
Για την αντιμετώπιση του υπολογιστικού φραγμού, η σύγχρονη έρευνα στρέφεται στη μεταφορά της επεξεργασίας από το χωρικό πεδίο στο πεδίο δέσμης (beam domain) μέσω μοναδιαίων πινάκων διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT). Στο πεδίο αυτό, ο χώρος διαιρείται σε εικονικές γωνιακές τομές (virtual beams). Επειδή οι συνιστώσες πολυδιαδρομής (MPCs) συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες γωνίες άφιξης και αναχώρησης (AoA/AoD), το κανάλι χαρακτηρίζεται από ισχυρή αραιότητα (channel sparsity), ιδιαίτερα στις ζώνες mmWave και Terahertz (THz). Η αξιοποίηση κεραιοσυστημάτων φακού (lens antenna arrays) στο πεδίο δέσμης επιτρέπει τη δραστική μείωση των απαιτούμενων RF chains, καθώς επιλέγονται μόνο οι ενεργές δέσμες. Παράλληλα, οι συντελεστές των εικονικών δεσμών καθίστανται ασυμπτωτικά ασυσχέτιστοι, ενώ το σφαιρικό μέτωπο κύματος παύει να επηρεάζει καθοριστικά τη μετάδοση, επιτρέποντας αποδοτικότερη ανάλυση. Το κύριο μέρος της ενέργειας, ενώ οι υπόλοιπες κυριαρχούνται από θόρυβο.

Βελτιστοποίηση Τεχνολογιών Φυσικού Επιπέδου και Μελλοντικές Προοπτικές

Η αρχιτεκτονική του πεδίου δέσμης αναδιαμορφώνει τις βασικές λειτουργίες του φυσικού επιπέδου:

- Εκτίμηση Καναλιού: Μέθοδοι συμπίεσμης ανίχνευσης (compressive sensing) και αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης (π.χ. denoising CNN, approximate message passing) εκμεταλλεύονται την αραιότητα για ακριβή ανάκτηση του καναλιού με ελάχιστα πιλοτικά δεδομένα.
- Χωρική Πολυπλεξία και Προκωδικοποίηση: Η πολυπλεξία στο πεδίο δέσμης αξιοποιεί κατευθυντικά σήματα αντί ανεξέλεγκτων πολυδιαδρομών, αυξάνοντας το κέρδος συστοιχίας. Η υβριδική προκωδικοποίηση (αναλογική-ψηφιακή) επιτυγχάνει σχεδόν βέλτιστη απόδοση με ελάχιστη πολυπλοκότητα.

Στις μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνεται η υιοθέτηση συμπαγών τρισδιάστατων διατάξεων (κυκλικών ή κυλινδρικών) για τη μείωση του φυσικού μεγέθους των κεραιών, καθώς και η ενοποίηση με αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (RIS) και ολογραφικό MIMO. Επιπρόσθετα, η εξέλιξη προς αρχιτεκτονικές χωρίς κυψέλες (cell-free ultra-massive MIMO) και η από κοινού διαίρεση δεσμών σε χωρικό, χρονικό και συχνοτικό πεδίο (space-time-frequency domain) διαμορφώνουν το πλαίσιο για αξιόπιστες επικοινωνίες ακραίας ταχύτητας σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας.



Εικόνα 7. UM-MIMO working flowchart [16]

3.4.4 6G Cell Free Massive MIMO

Τα δίκτυα 5G και οι μελλοντικές ασύρματες επικοινωνίες 6G οδηγούν στην εποχή του «Internet of Intelligence», όπου απαιτούνται εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα, χαμηλή καθυστέρηση (low-latency), υψηλή ενεργειακή απόδοση (Energy Efficiency - EE) και αξιοπιστία.



Εικόνα 8. Conventional cell-free mMIMO architecture [18]

Το Cell-Free Massive MIMO καταργεί τα παραδοσιακά κυψελωτά όρια, εγκαθιστώντας πολυάριθμες κατανεμημένες κεραίες σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση προσφέρει ομοιόμορφη και αναβαθμισμένη δικτυακή κάλυψη, εξαλείφοντας αποτελεσματικά τα κενά σήματος σε πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Υποστηρίζει τεράστιο αριθμό ταυτόχρονων χρηστών ανά μονάδα επιφάνειας, γεγονός εξαιρετικά χρήσιμο σε στάδια και αεροδρόμια. Επιπλέον, μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση επιτρέποντας παράλληλη πρόσβαση στο ίδιο κανάλι, ενώ παράλληλα περιορίζει τις ενεργειακές απαιτήσεις και επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών. Αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατανομή πόρων, τον συντονισμό των παρεμβολών και τον ευφυή προγραμματισμό χρηστών.

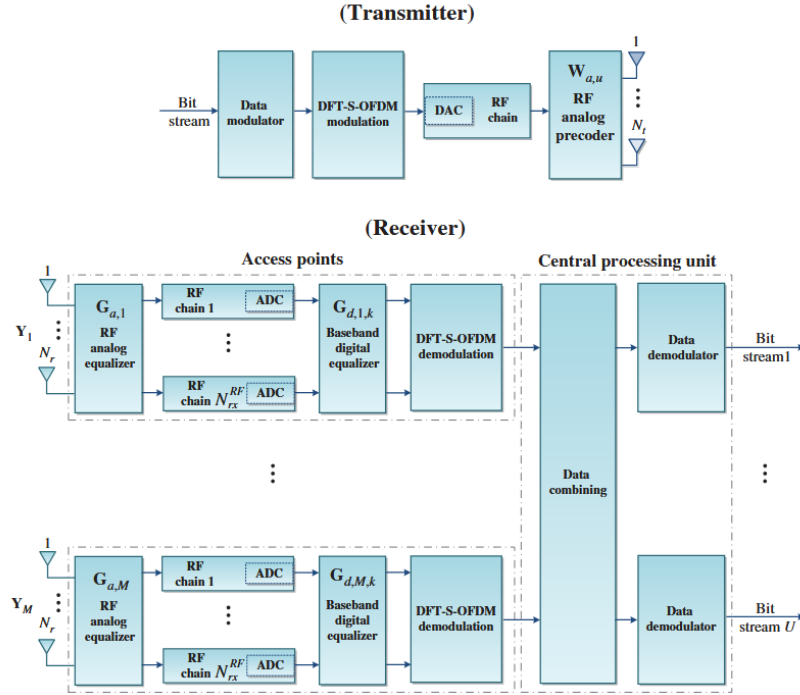
Το CF-mMIMO καταργεί πλήρως την έννοια των κυψελών και των ορίων τους. Ένας μεγάλος αριθμός γεωγραφικά κατανεμημένων σημείων πρόσβασης (Access Points - APs) συνδέεται μέσω ζευξεων fronthaul σε μία Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Central Processing Unit - CPU). Όλα τα APs συνεργάζονται για να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα όλους τους χρήστες στους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας, λειτουργώντας συνήθως σε καθεστώς Time-Division Duplex (TDD).

Εξαλείφονται οι παρεμβολές μεταξύ κυψελών, παρέχεται ομοιόμορφη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) σε όλη την περιοχή κάλυψης και διασφαλίζεται αδιάλειπτη κινητικότητα (seamless mobility) χωρίς την ανάγκη διαδικασιών παράδοσης (handovers).

Η εξέλιξη προς το 6G επιβάλλει τη χρήση ζωνών χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave, 30–300 GHz) για την εκμετάλλευση τεράστιου εύρους ζώνης. Ωστόσο, οι συχνότητες αυτές υποφέρουν από έντονες απώλειες διάδοσης και ευπάθεια σε εμπόδια (blockage).

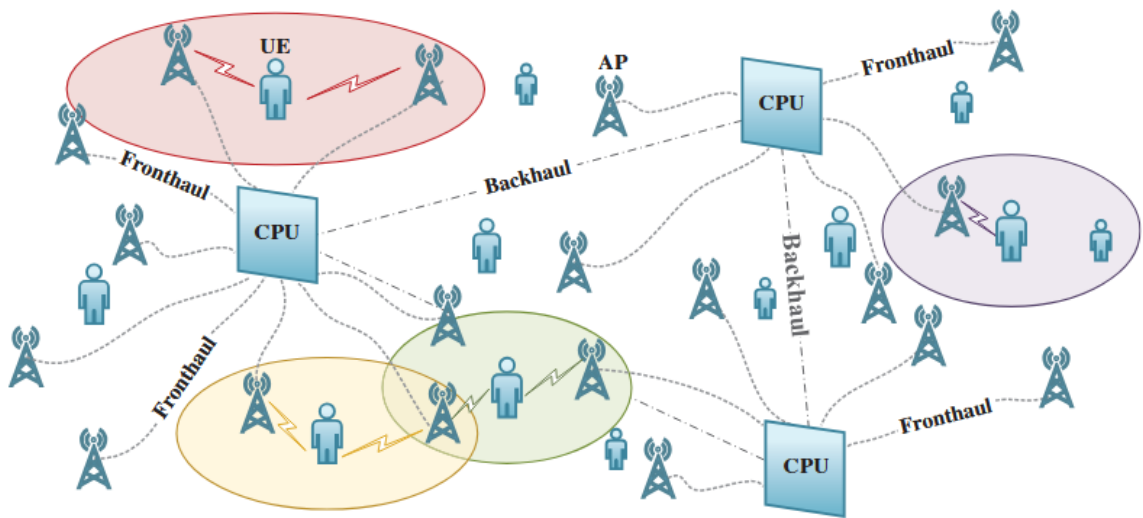
Ενώ στις συχνότητες sub-6 GHz χρησιμοποιείται συχνά πλήρως ψηφιακή διαμόρφωση δέσμης (full-digital beamforming) με αποκλειστική αλυσίδα RF σε κάθε κεραία, στα mmWave το υψηλό κόστος και η κατανάλωση ισχύος επιβάλλουν τη χρήση υβριδικής (hybrid analog-digital) αρχιτεκτονικής. Σε αυτή,

συνδυάζονται αναλογικοί μετατοπιστές φάσης (phase shifters) με μικρότερο αριθμό ψηφιακών αλυσίδων RF.



Εικόνα 9. Cell-free mMIMO transceiver system model [18]

Σε ένα σύστημα ανερχόμενης ζεύξης (uplink) με τεχνική DFT-S-OFDM, τα σήματα διαμορφώνονται και αποστέλλονται από τους χρήστες μέσω αναλογικών προκωδικοποιητών. Στην πλευρά λήψης, κάθε AP εφαρμόζει υβριδικό αναλογικό-ψηφιακό εξισωτή (hybrid equalizer), και οι εκτιμήσεις αποστέλλονται μέσω fronthaul στην CPU, η οποία πραγματοποιεί τον τελικό συνδυασμό δεδομένων (combining) ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Squared Error - MSE).



Εικόνα 10. Scalable user-centric cell-free mMIMO system [18]

Το συμβατικό μοντέλο CF-mMIMO, όπου **όλα** τα APs εξυπηρετούν **όλους** τους χρήστες, δεν είναι πρακτικά κλιμακώσιμο (unscalable). Καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνεται, οι απαιτήσεις σηματοδότησης και χωρητικότητας στο fronthaul εκτοξεύονται, ενώ η υπολογιστική πολυπλοκότητα στην CPU καθίσταται απαγορευτική.

Αρχή της User-Centric Προσέγγισης: Αντί για καθολική συνεργασία, κάθε χρήστης εξυπηρετείται δυναμικά μόνο από ένα μικρό υποσύνολο συνεργαζόμενων APs που επιλέγονται με βάση τις συνθήκες καναλιού (όπως το υψηλότερο SINR ή το Large-Scale Fading).

Συμβιβασμός Απόδοσης και Πόρων (Tradeoff): Προσομοιώσεις δείχνουν ότι η σύνδεση ενός χρήστη με ελάχιστα APs (π.χ. 4 APs ανά χρήστη) πετυχαίνει ρυθμό σφάλματος δυαδικών ψηφίων (BER) εξαιρετικά κοντά στην πλήρη σύνδεση με δεκάδες APs. Αυτό μειώνει δραστικά τον όγκο δεδομένων στο fronthaul χωρίς ουσιαστική απώλεια απόδοσης.

Περιορισμένη Χωρητικότητα Fronthaul: Σε πραγματικές συνθήκες, οι ζεύξεις AP-CPU έχουν πεπερασμένο εύρος ζώνης, απαιτώντας κβάντιση σημάτων (π.χ. με μετατροπείς ADC χαμηλής ανάλυσης) και αποδοτικούς αλγορίθμους κατανομής ισχύος.

Ένα από τα κύρια φυσικά εμπόδια του CF-mMIMO είναι η καλωδίωση. Η παραδοσιακή τοπολογία αστέρα (star topology), όπου κάθε AP συνδέεται απευθείας στην CPU με ανεξάρτητο καλώδιο, είναι εξαιρετικά δαπανηρή και δύσκαμπτη. Οπότε η πρακτική υλοποίηση γίνεται μέσω radio stripes. Πρόκειται για μία σειριακή διάταξη όπου τα στοιχεία κεραιών και οι μονάδες επεξεργασίας κεραιών (Antenna Processing Units - APUs) ενσωματώνονται διαδοχικά κατά μήκος ενός κοινού καλωδίου (shared bus). Το μοναδικό αυτό σειριακό καλώδιο εξασφαλίζει ταυτόχρονα τη μεταφορά δεδομένων, τον χρονισμό/συγχρονισμό (synchronization) και την τροφοδοσία ισχύος. Κάθε APU επεξεργάζεται τοπικά τα λαμβανόμενα σήματα, τα συνδυάζει με τα ενδιάμεσα αποτελέσματα της προηγούμενης APU και τα προωθεί στην επόμενη μέχρι να καταλήξουν στην CPU. Τα οφέλη είναι η εύκολη και διακριτική εγκατάσταση σε πυκνούς εσωτερικούς χώρους (όπως στάδια, εμπορικά κέντρα, εργοστάσια), χαμηλή εκπομπή ισχύος ανά στοιχείο (λιγότερη θερμότητα) και ανθεκτικότητα σε βλάβες (αν μία μονάδα αστοχήσει, το υπόλοιπο δίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί). [18]

3.4.5 Beamforming σε δίκτυα 6G

Στα δίκτυα έκτης γενιάς (6G), η διαμόρφωση δέσμης (beamforming) μετεξελισσεται από μια παραδοσιακή, στατική τεχνική επεξεργασίας σήματος σε ένα αυτοματοποιημένο, φυσικά ευέλικτο και κβαντικά υποβοηθούμενο σύστημα. Η ανάγκη λειτουργίας σε υπερ-υψηλές συχνότητες (χιλιοστομετρικά κύματα και THz) προσφέρει τεράστιο εύρος ζώνης, αλλά ταυτόχρονα συνοδεύεται από ακραίες απώλειες διάδοσης, ατμοσφαιρική εξασθένηση και ευαισθησία σε (blockage).

Λόγω της απαγορευτικής κατανάλωσης ισχύος των πλήρως ψηφιακών λύσεων σε μαζικά συστήματα MIMO, καθιερώνεται η υβριδική διαμόρφωση δέσμης (συνδυασμός ψηφιακής προκωδικοποίησης μειωμένων αλυσίδων RF και αναλογικών μετατοπιστών φάσης). Παράλληλα, η νέα τεχνολογία κινητών κεραιών σε επίπεδο υποσυστοιχιών (MAs) αντικαθιστά τις στατικές κεραιές, προσφέροντας φυσικούς βαθμούς ελευθερίας (DoFs) για δυναμική αναδιαμόρφωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και ελαχιστοποίηση των παρεμβολών (π.χ. μέσω Block Diagonalization και SIC).

Η διαχείριση εξαιρετικά στενών δεσμών σε δυναμικά κανάλια THz απαιτεί τεχνητή νοημοσύνη στο φυσικό στρώμα. Αλγόριθμοι Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης (DRL) σε συνδυασμό με νευρωνικά δίκτυα μηχανισμού προσοχής (CSI-attention) επιτρέπουν την πρόβλεψη βέλτιστων γωνιών εκπομπής, την

παρακολούθηση της κινητικότητας των χρηστών σε πραγματικό χρόνο και την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση ισχύος και φασματικής απόδοσης.

Καθώς οι χωρικές και φασματικές διαστάσεις του 6G κλιμακώνονται εκθετικά, η κλασική AI αντιμετωπίζει υπολογιστικά όρια. Η εισαγωγή κβαντικής ενισχυτικής μάθησης (QDRL) —μέσω κβαντικής υπέρθεσης, διεμπλοκής και αλγορίθμων όπως οι QAOA και Q-DQN— επιτρέπει την ταχύτατη παράλληλη αξιολόγηση δεσμών, επιταχύνοντας δραστικά τη σύγκλιση και μειώνοντας δραστικά την πολυπλοκότητα και την ενεργειακή κατανάλωση σε περιβάλλοντα Edge-AI.

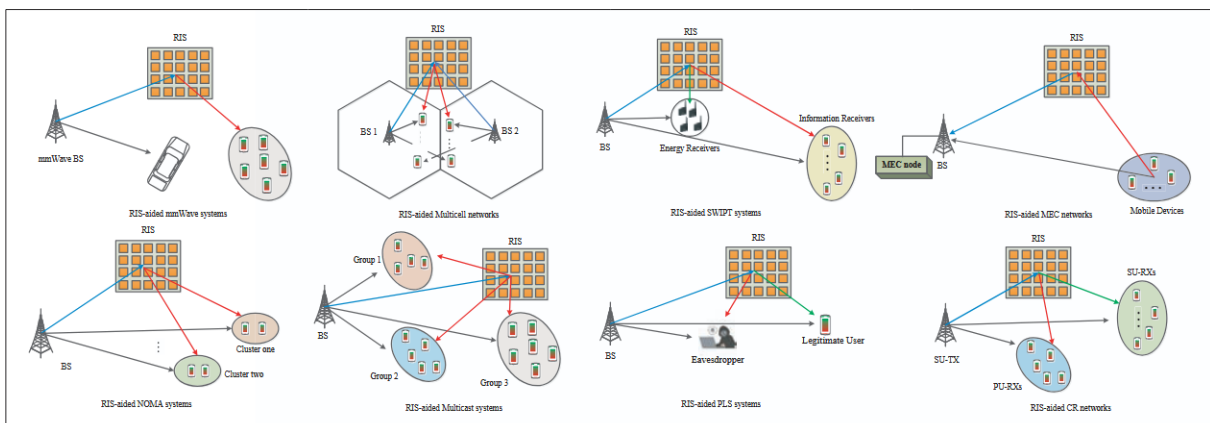
Συνοψίζοντας, το beamforming στο 6G συνιστά μια **ολιστική σύγκλιση ευέλικτου υλικού (κινητές συστοιχίες), τεχνητής νοημοσύνης και κβαντικής επεξεργασίας**, εξασφαλίζοντας ενεργειακά αποδοτική και αξιόπιστη συνδεσιμότητα Terabit ανά δευτερόλεπτο.[22][23]

3.4.6 Ανακλαστικές Έξυπνες Επιφάνειες (RIS) στα δίκτυα 6G

Οι ανακλαστικές έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS) θεωρούνται μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τη βελτίωση της φασματικής και ενεργειακής απόδοσης των ασύρματων συστημάτων. Πρόκειται για επίπεδες επιφάνειες με μεγάλο αριθμό παθητικών στοιχείων χαμηλού κόστους. Κάθε στοιχείο μπορεί να εισάγει ανεξάρτητα μια επιθυμητή μετατόπιση φάσης στο προσπίπτον σήμα, ώστε το ανακλώμενο σήμα να κατευθύνεται προς την επιθυμητή διεύθυνση και να διαμορφώνεται έτσι το περιβάλλον διάδοσης.

Η ανάγκη για RIS προκύπτει από τις απαιτήσεις του 6G για πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση, που οδηγούν στη χρήση των ζωνών mmWave και THz. Οι ζώνες αυτές χαρακτηρίζονται από έντονες απώλειες διάδοσης και ευαισθησία στα εμπόδια. Η πυκνωση των σταθμών βάσης λύνει το πρόβλημα αλλά είναι δαπανηρή, ενώ μια RIS μπορεί να δημιουργήσει εικονική οπτική επαφή (LoS) μεταξύ πομπού και δέκτη.

Αρχιτεκτονικά, μια RIS αποτελείται από την επίπεδη επιφάνεια, συχνά πολλαπλών στρωμάτων, και έναν ελεγκτή, όπως ένα FPGA. Κάθε στοιχείο περιλαμβάνει διόδους PIN, οι οποίες εναλλάσσονται μεταξύ των καταστάσεων «on» και «off». Σε σύγκριση με τους ενεργούς αναμεταδότες (AF, DF, FD), η RIS δεν απαιτεί αλυσίδες RF, δεν εισάγει θερμικό θόρυβο, λειτουργεί εγγενώς σε full-duplex και έχει χαμηλότερο κόστος υλικού και κατανάλωση ισχύος.[29]



Εικόνα 11. Τυπικές εφαρμογές των RIS σε συστήματα κάτω των 6 GHz [29]

3.4.7 Κβαντικό Διαδίκτυο και Κβαντική Επικοινωνία

Η κβαντική επικοινωνία εισάγει μια ριζοσπαστική προσέγγιση στο 6G, χρησιμοποιώντας φωτόνια αντί των συμβατικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τη μετάδοση πληροφοριών. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει ασφάλεια θεμελιωμένη στις αρχές της κβαντομηχανικής και όχι στην υπολογιστική δυσκολία, καθιστώντας την ιδανική για στρατιωτικές, κυβερνητικές και κρίσιμες τραπεζικές εφαρμογές. Επισημαίνεται ότι η κβαντική επικοινωνία δεν επιτρέπει μετάδοση πληροφορίας ταχύτερα από το φως ούτε μειώνει την καθυστέρηση του δικτύου: σύμφωνα με το θεώρημα μη-επικοινωνίας, η αξιοποίηση του κβαντικού εναγκαλισμού απαιτεί πάντοτε και ένα συμβατικό κλασικό κανάλι. Η συμβολή της εντοπίζεται στην ασφάλεια της ζεύξης και στην ανίχνευση υποκλοπής, όχι στην επίδοση της μετάδοσης. Παρά τις σημαντικές προκλήσεις του υψηλού κόστους και της ανάγκης για εξειδικευμένο υλικό, η τεχνητή νοημοσύνη ενισχύει την υλοποίησή της. Συγκεκριμένα, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης βελτιστοποιούν τα πρωτόκολλα κβαντικής διανομής κλειδιών, αυτοματοποιούν διαδικασίες κρυπτογράφησης και διασφαλίζουν αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μέσω κβαντικών καναλιών.

Σε αντίθεση με το κλασικό διαδίκτυο, που μεταδίδει πληροφορία, το κβαντικό δημιουργεί εναγκαλισμό (entanglement) μεταξύ απομακρυσμένων κόμβων. Οι κόμβοι διαθέτουν κβαντική μνήμη και συνδέονται με κβαντικά κανάλια. Βασίζεται σε πρωτόκολλα όπως τα BB84, E91, B92 και COW06. Οι συγγραφείς περιγράφουν έξι φάσεις ανάπτυξης, από δίκτυα αξιόπιστων αναμεταδοτών (repeaters) μέχρι δίκτυα κβαντικών υπολογιστών μεγάλης κλίμακας με ανοχή σε σφάλματα. Ως βασικές εφαρμογές αναφέρονται η ασφαλής επικοινωνία, ο καταναεμημένος κβαντικός υπολογισμός και η κβαντική ανίχνευση. [39]

Οι κβαντικές τεχνολογίες στο 6G είναι τρεις :

- **Κβαντικές επικοινωνίες:** Η κβαντική διανομή κλειδιών (QKD) μέσω οπτικών ινών, ελεύθερου χώρου (FSO), δορυφόρων και CubeSats, drones, THz και VLC/LiFi καλύπτει το δίκτυο κορμού και το δίκτυο πρόσβασης. Προβλέπεται υβριδικό σχήμα QKD και μετα-κβαντικής κρυπτογραφίας (PQC). Επιπλέον, οι κβαντικοί δέκτες μπορούν να μειώσουν το ρυθμό σφαλμάτων και την κατανάλωση ενέργειας.
- **Κβαντικός υπολογισμός:** Κβαντικοί αλγόριθμοι και κβαντική μηχανική μάθηση (QML) εφαρμόζονται στη βελτιστοποίηση δικτύου, όπως κατανομή πόρων, χρονοδρομολόγηση, ανίχνευση δεδομένων MIMO και αποκωδικοποίηση. Αναφέρονται επίσης η τυφλή κβαντική υπολογιστική (BQC) και το κβαντικό ασφαλές blockchain.
- **Κβαντική ανίχνευση:** Περιλαμβάνει συγχρονισμό χρόνου με κβαντικά ρολόγια (ακρίβεια της τάξης των picoseconds), βελτιωμένο εντοπισμό και πλοήγηση, καθώς και κβαντικό radar και lidar, π.χ. για αυτόνομη οδήγηση. Τα περισσότερα βρίσκονται ακόμη σε εργαστηριακό στάδιο.

3.4.8 Επικοινωνία Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (UAV) και Δορυφόρων

Η επικοινωνία μέσω μη επανδρωμένων αεροσκαφών και δορυφόρων επεκτείνει την ασύρματη συνδεσιμότητα πέρα από τα επίγεια δίκτυα, καλύπτοντας απομακρυσμένες, αγροτικές και δύσβατες γεωγραφικές περιοχές. Χρησιμοποιώντας εναέριες και δορυφορικές πλατφόρμες, παρέχει ευρυζωνική πρόσβαση υψηλής ταχύτητας σε πληθυσμούς που στερούνται συμβατικών τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Επιπλέον, υποστηρίζει κρίσιμες εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως αποστολές έρευνας και διάσωσης σε καταστροφές και επείγουσες απομακρυσμένες ιατρικές διαδικασίες. Αν και απαιτεί υψηλές επενδύσεις και συμμόρφωση με κανονισμούς εναέριου χώρου, η τεχνητή νοημοσύνη βελτιστοποιεί ουσιαστικά τη λειτουργία της. Μέσω έξυπνου σχεδιασμού τροχιών, πρόβλεψης ζήτησης

και δυναμικής κατανομής τηλεπικοινωνιακών πόρων, εξασφαλίζεται αδιάλειπτη, ανθεκτική και αξιόπιστη παγκόσμια δικτυακή κάλυψη.

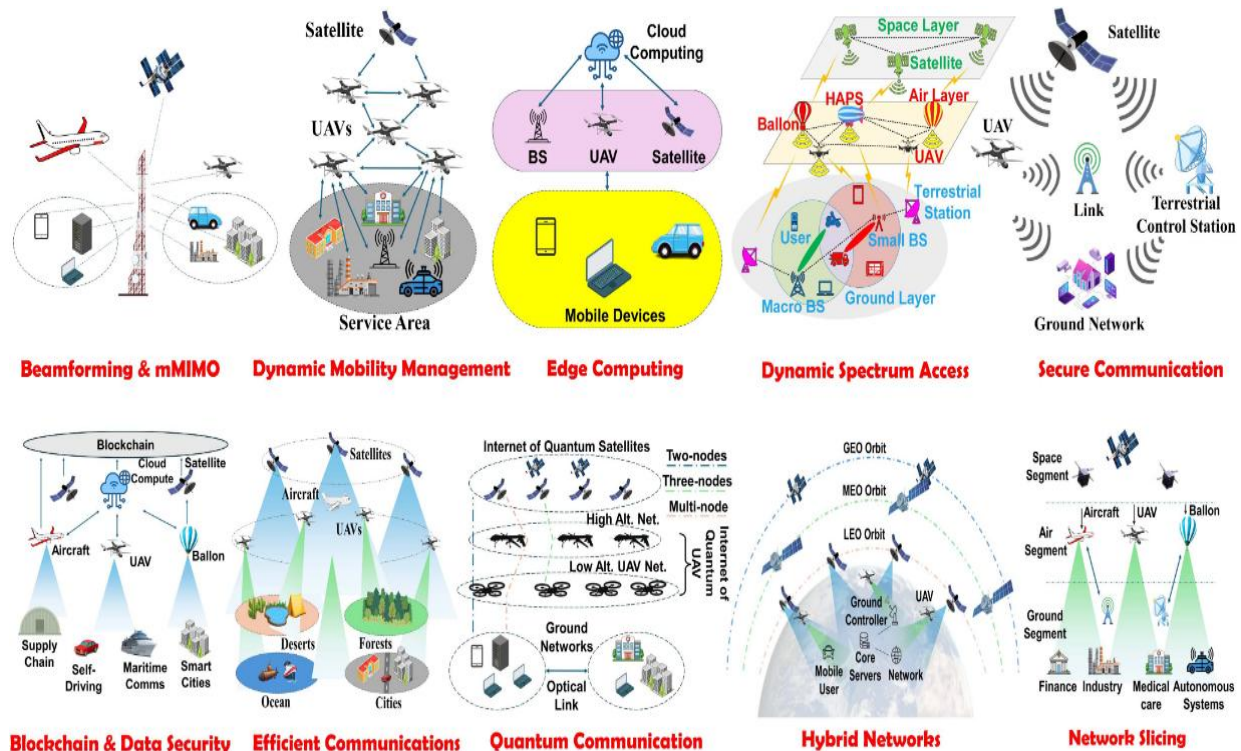
Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως, για παράδειγμα στη γεωργία, στον έλεγχο υποδομών, στη διαχείριση καταστροφών και στην περιβαλλοντική παρακολούθηση. Για να είναι χρήσιμα, πρέπει να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα γρήγορα, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές. Εκεί έρχονται να βοηθήσουν οι δορυφόροι, οι οποίοι προσφέρουν κάλυψη σχεδόν σε κάθε σημείο της Γης.

Το 6G αναμένεται να προσφέρει ταχύτητες πολλών terabit ανά δευτερόλεπτο και πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Έτσι, τα UAV θα μπορούν να μεταδίδουν σε πραγματικό χρόνο βίντεο υψηλής ανάλυσης και δεδομένα τηλεπισκόπησης. Αυτό είναι κρίσιμο, για παράδειγμα, σε επιχειρήσεις διάσωσης, όπου τα UAV μπορούν να δημιουργήσουν ασύρματη κάλυψη σε περιοχές με κατεστραμμένες υποδομές.

Ο συνδυασμός UAV, δορυφόρων και επίγειων δικτύων αποτελεί ένα ενιαίο δίκτυο διαστήματος-αέρα-εδάφους. Σε αυτό βοηθούν τεχνολογίες όπως το beamforming και το massive MIMO, η υπολογιστική στην άκρη του δικτύου (edge computing), η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα και το τεμαχισμό δικτύου (network slicing).

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει σημαντικό ρόλο σε αυτό το περιβάλλον. Μπορεί να προβλέπει παρεμβολές, να βελτιστοποιεί τη δρομολόγηση και να επιλέγει τον κατάλληλο δορυφόρο. Σε σχετική μελέτη, η μέθοδος πολλαπλών χεριών (multi-armed bandit) για την ανάπτυξη UAV με δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO) μετά από καταστροφή είχε καλύτερη ενεργειακή απόδοση και δικαιοσύνη κάλυψης από τις μεθόδους σύγκρισης.

Παραμένουν όμως προκλήσεις, όπως η κατανάλωση ενέργειας των UAV, η ασφάλεια των δεδομένων, οι παρεμβολές και οι κανονισμοί.[40]



Εικόνα 12. Παράγοντες-κλειδιά για διασύνδεση UAV και δορυφόρων [40]

3.5 AI και AI-Native Δίκτυα

Στις προηγούμενες γενιές κινητών δικτύων, οι λειτουργίες βασίζονταν σε αλγορίθμους και χειροκίνητη διαχείριση(εξαιρείται η γενιά 5G που χρησιμοποιήθηκε AI ως ένα μέσο βελτιστοποίησης).Το 6G εισάγει την έννοια του AI-Native networking. Η διαφορά αυτής της νέας αρχιτεκτονικής είναι ότι η AI παύει να λειτουργεί ως ένα εξωτερικό ή βοηθητικό εργαλείο και ενσωματώνεται ως βασικό συστατικό του ίδιου του δικτύου . Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναλύουν συνεχώς τεράστιες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και αναλαμβάνουν αυτόματα κρίσιμες λειτουργίες, όπως η διαχείριση του φάσματος, η εξισορρόπηση του φόρτου και η πρόβλεψη βλαβών.

Μέσω αυτής της εγγενούς ευφυΐας, το δίκτυο αποκτά την ικανότητα να αυτοβελτιώνεται. Πχ. η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να προβλέπει τη ζήτηση για δεδομένα σε διαφορετικές περιοχές και να κατανέμει δυναμικά τους διαθέσιμους πόρους, προσαρμόζοντας αυτόματα τις παραμέτρους λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται δραστικά η πιθανότητα συμφόρησης, το δίκτυο λειτουργεί πολύ πιο αποδοτικά και εξασφαλίζεται μεγαλύτερη αξιοπιστία και αναβαθμισμένη εμπειρία για τους χρήστες και τις εφαρμογές που εξυπηρετεί.[41]

3.5.1 Αυτοματοποιημένη διαχείριση δικτύου

Η χρήση AI στα δίκτυα 6G επιτρέπει επίσης την ανάπτυξη πιο προηγμένων συστημάτων διαχείρισης και λειτουργίας των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Στα παραδοσιακά δίκτυα, η διαχείριση πολλών λειτουργιών πραγματοποιείται με χειροκίνητο τρόπο ή μέσω προκαθορισμένων διαδικασιών. Αντίθετα, στα δίκτυα επόμενης γενιάς η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αναλαμβάνει μεγάλο μέρος αυτών των διαδικασιών, επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και βελτιστοποίηση του δικτύου[11]. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς τα μελλοντικά δίκτυα αναμένεται να υποστηρίζουν τεράστιο αριθμό συσκευών και εφαρμογών. Η αυτοματοποίηση των διαδικασιών διαχείρισης συμβάλλει στη μείωση του λειτουργικού κόστους και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των τηλεπικοινωνιακών υποδομών[20].

3.5.2 Μηχανική μάθηση στις τηλεπικοινωνίες

Η ταχεία επέκταση των δικτύων 5G και των ανερχόμενων 6G έχει αυξήσει σημαντικά την πολυπλοκότητα της διαχείρισης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Οι συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται σε στατικούς κανόνες και μοντέλα μηχανικής μάθησης αντιδραστικού τύπου δυσκολεύονται να αντιμετωπίσουν τα δυναμικά μοτίβα κίνησης, τις ετερογενείς αρχιτεκτονικές δικτύου και τις εξελισσόμενες απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS). Οι πρόσφατες εξελίξεις στην Αιτιακή Τεχνητή Νοημοσύνη (Causal AI), στα Μεγάλα Γλωσσικά Μοντέλα (LLMs) και στη Μηχανική Μάθηση (ML) παρέχουν την ευκαιρία να μετασχηματιστεί η βελτιστοποίηση των δικτύων από μια αντιδραστική λήψη αποφάσεων σε μια προληπτική, εξηγήσιμη και αυτόνομη νοημοσύνη. Η μηχανική μάθηση επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη της κίνησης, της συμφόρησης, των βλαβών εξοπλισμού και της χρήσης πόρων, ενώ η Causal AI εντοπίζει γνήσιες σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος πίσω από τα συμβάντα του δικτύου αντί να βασίζεται αποκλειστικά σε στατιστικές συσχετίσεις. Παράλληλα, τα LLMs διευκολύνουν την έξυπνη διαχείριση αυτοματοποιώντας επιχειρησιακά καθήκοντα, υποστηρίζοντας τους μηχανικούς μέσω διάδρασης σε φυσική γλώσσα, παράγοντας στρατηγικές βελτιστοποίησης και ενσωματώνοντας τομεακή γνώση στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Η εκρηκτική αύξηση των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας, των συσκευών IoT, του cloud/edge computing και των εφαρμογών υψηλού εύρους ζώνης (VR, αυτόνομη οδήγηση, video streaming)

δημιουργεί ένα εξαιρετικά σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης με εκατομμύρια διασυνδεδεμένες συσκευές.

Τα κλασικά μαθηματικά μοντέλα και οι ευρετικοί κανόνες είναι ανεπαρκείς σε ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες. Από την άλλη πλευρά, η κλασική μηχανική μάθηση βασίζεται σε στατιστικές συσχετίσεις και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες αποφάσεις όταν εισέρχονται συγχυτικοί παράγοντες (confounding variables) ή απρόβλεπτες αλλαγές. [21]

3.6 Αρχιτεκτονική δικτύων 6G

Η αρχιτεκτονική των δικτύων 6G θα διαφέρει σημαντικά από τις προηγούμενες γενιές ασύρματων δικτύων, καθώς θα πρέπει να υποστηρίζει ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό συσκευών, εφαρμογών και υπηρεσιών. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που βασίζονταν κυρίως σε επίγειες υποδομές, τα δίκτυα 6G αναμένεται να αξιοποιούν έναν συνδυασμό επίγειων, εναέριων και δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας. Η ενοποίηση αυτών των τεχνολογιών θα επιτρέψει την παροχή παγκόσμιας κάλυψης και τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ασύρματων επικοινωνιών. Παράλληλα, η αρχιτεκτονική των δικτύων επόμενης γενιάς θα βασίζεται σε πιο ευέλικτες και προσαρμόσιμες δομές, ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες των χρηστών και των εφαρμογών που χρησιμοποιούν το δίκτυο. Η χρήση virtualization και λογισμικού δικτύου θα έχει κεντρικό ρόλο στην υλοποίηση αυτών των υποδομών.

Βασικός στόχος της αρχιτεκτονικής του 6G είναι η επίτευξη παγκόσμιας και αδιάλειπτης κάλυψης μέσω της ενοποίησης επίγειων, εναέριων και δορυφορικών συστημάτων σε ένα ενιαίο δίκτυο, γνωστό ως μη-επίγεια δίκτυα (Non-Terrestrial Networks – NTN). Μέσω της αξιοποίησης δορυφόρων χαμηλής τροχιάς και πλατφόρμας υψηλής πτήσης, τα δίκτυα 6G αναμένεται να παρέχουν συνδεσιμότητα και σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, συμβάλλοντας στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών. [42]

3.6.1 Ενοποίηση επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δικτύων

Χαρακτηριστικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής των δικτύων 6G αποτελεί η ενοποίηση διαφορετικών τύπων τηλεπικοινωνιακών υποδομών σε ένα ενιαίο σύστημα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, τα μελλοντικά δίκτυα αναμένεται να συνδυάζουν επίγειους σταθμούς βάσης, δορυφορικά συστήματα και εναέρια δίκτυα που βασίζονται σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την επέκταση της κάλυψης του δικτύου σε περιοχές όπου η ανάπτυξη παραδοσιακών τηλεπικοινωνιακών υποδομών είναι δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη [11]. Επιπλέον, η χρήση δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας μπορεί να συμβάλει στην παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου η πρόσβαση σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι περιορισμένη. Η ενοποίηση αυτών των τεχνολογιών δημιουργεί ένα πιο ολοκληρωμένο και αξιόπιστο σύστημα επικοινωνίας που μπορεί να υποστηρίξει τις ανάγκες της παγκόσμιας ψηφιακής κοινωνίας [13].

3.6.2 Δίκτυα επόμενης γενιάς - virtualization και network slicing

Μία ακόμη σημαντική τεχνολογία που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα 6G είναι η virtualization των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Η virtualization επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων πάνω στην ίδια φυσική υποδομή, δίνοντας τη δυνατότητα στους παρόχους υπηρεσιών να προσαρμόζουν το δίκτυο στις ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών και χρηστών. Η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή ως network slicing και επιτρέπει τη δημιουργία ξεχωριστών «τμημάτων»

δικτύου που λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, ένα τμήμα του δικτύου μπορεί να είναι βελτιστοποιημένο για εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας που απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων, ενώ ένα άλλο μπορεί να είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές IoT που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεγάλη διάρκεια λειτουργίας των συσκευών. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου και τη βελτίωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Σε στενή σύνδεση με τα παραπάνω, η αρχιτεκτονική των δικτύων 6G θα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε λογισμικό και αυτοματοποιημένες διαδικασίες διαχείρισης. Η χρήση τεχνολογιών όπως το Software Defined Networking και το Network Function Virtualization επιτρέπει τη δυναμική διαμόρφωση των τηλεπικοινωνιακών υποδομών, καθώς πολλές λειτουργίες του δικτύου μπορούν να υλοποιηθούν μέσω λογισμικού αντί για εξειδικευμένο υλικό. Η λογική αυτή προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό των δικτύων και διευκολύνει την προσαρμογή τους σε νέες τεχνολογίες και εφαρμογές, ενώ το edge computing μεταφέρει την επεξεργασία κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνοντας την καθυστέρηση. Παράλληλα, η ενσωμάτωση AI στις διαδικασίες διαχείρισης του δικτύου επιτρέπει την αυτοματοποιημένη ανάλυση δεδομένων και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Τα δίκτυα επόμενης γενιάς μπορούν έτσι να λειτουργούν πιο αποδοτικά και να προσφέρουν υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. [43]

3.7 Νέες εφαρμογές και υπηρεσίες του 6G

Η ανάπτυξη των δικτύων 6G, εκτός από τη βελτίωση των τεχνικών επιδόσεων των ασύρματων επικοινωνιών, θα επιτρέψει και την εμφάνιση νέων εφαρμογών που μέχρι σήμερα θεωρούνται δύσκολες ή περιορισμένες από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Οι πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και το εξαιρετικά χαμηλό latency των δικτύων επόμενης γενιάς δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη νέων μορφών ψηφιακής επικοινωνίας και υπηρεσιών. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά πολλούς τομείς της οικονομίας και της καθημερινής ζωής, όπως η εκπαίδευση, η υγεία, οι μεταφορές και η βιομηχανία. Παράλληλα, η ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών συνδέεται στενά με την εξάπλωση της τεχνητής νοημοσύνης και του Διαδικτύου των Πραγμάτων, καθώς τα συστήματα αυτά απαιτούν συνεχώς μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ και πιο γρήγορη μεταφορά δεδομένων.[44]

3.7.1 Ολογραφική επικοινωνία και immersive communication

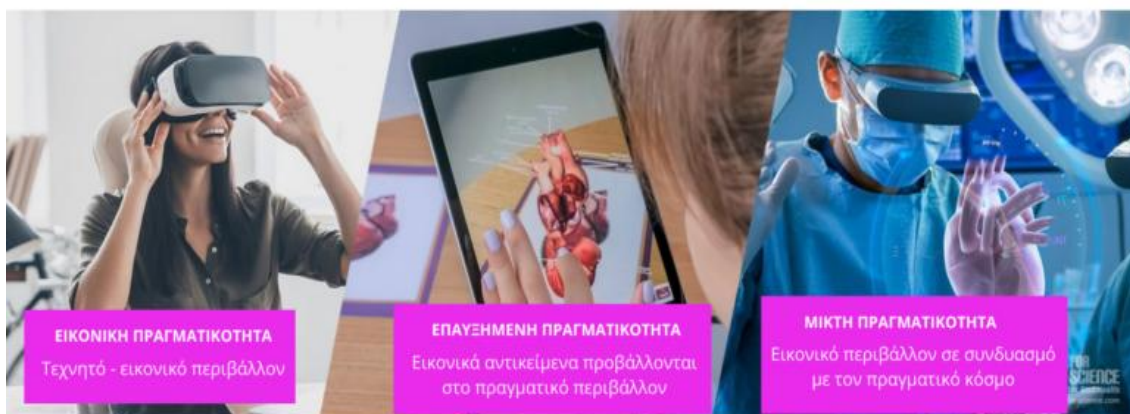
Μία από τις πιο εντυπωσιακές εφαρμογές που αναμένεται να υποστηρίξουν τα δίκτυα 6G είναι η ολογραφική επικοινωνία. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη μετάδοση τρισδιάστατων εικόνων σε πραγματικό χρόνο, δημιουργώντας μια εμπειρία επικοινωνίας που προσεγγίζει περισσότερο την φυσική παρουσία των συνομιλητών. Για την υλοποίηση μιας τέτοιας εφαρμογής απαιτείται η μετάδοση τεράστιου όγκου δεδομένων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, κάτι που μπορεί να υποστηριχθεί μόνο από δίκτυα με πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων[24]. Η ολογραφική επικοινωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς, όπως η εξ αποστάσεως εκπαίδευση, οι τηλεδιασκέψεις υψηλής ποιότητας και οι εφαρμογές τηλεϊατρικής. [44]



Εικόνα 13. Ολογραφική Επικοινωνία [23]

3.7.2 Επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα

Τα δίκτυα 6G αναμένεται επίσης να ενισχύσουν σημαντικά την ανάπτυξη εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας και επαυξημένης πραγματικότητας. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται ήδη σε διάφορους τομείς, όπως η εκπαίδευση, η ψυχαγωγία και η βιομηχανία, ωστόσο η λειτουργία τους απαιτεί πολύ γρήγορη μετάδοση δεδομένων και χαμηλό latency στο δίκτυο. Με την ανάπτυξη των δικτύων 6G θα είναι δυνατή η δημιουργία πιο ρεαλιστικών και διαδραστικών ψηφιακών περιβαλλόντων, τα οποία θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως η εξ αποστάσεως εκπαίδευση, η εκπαίδευση προσωπικού σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και η ανάπτυξη νέων μορφών ψυχαγωγίας[44].

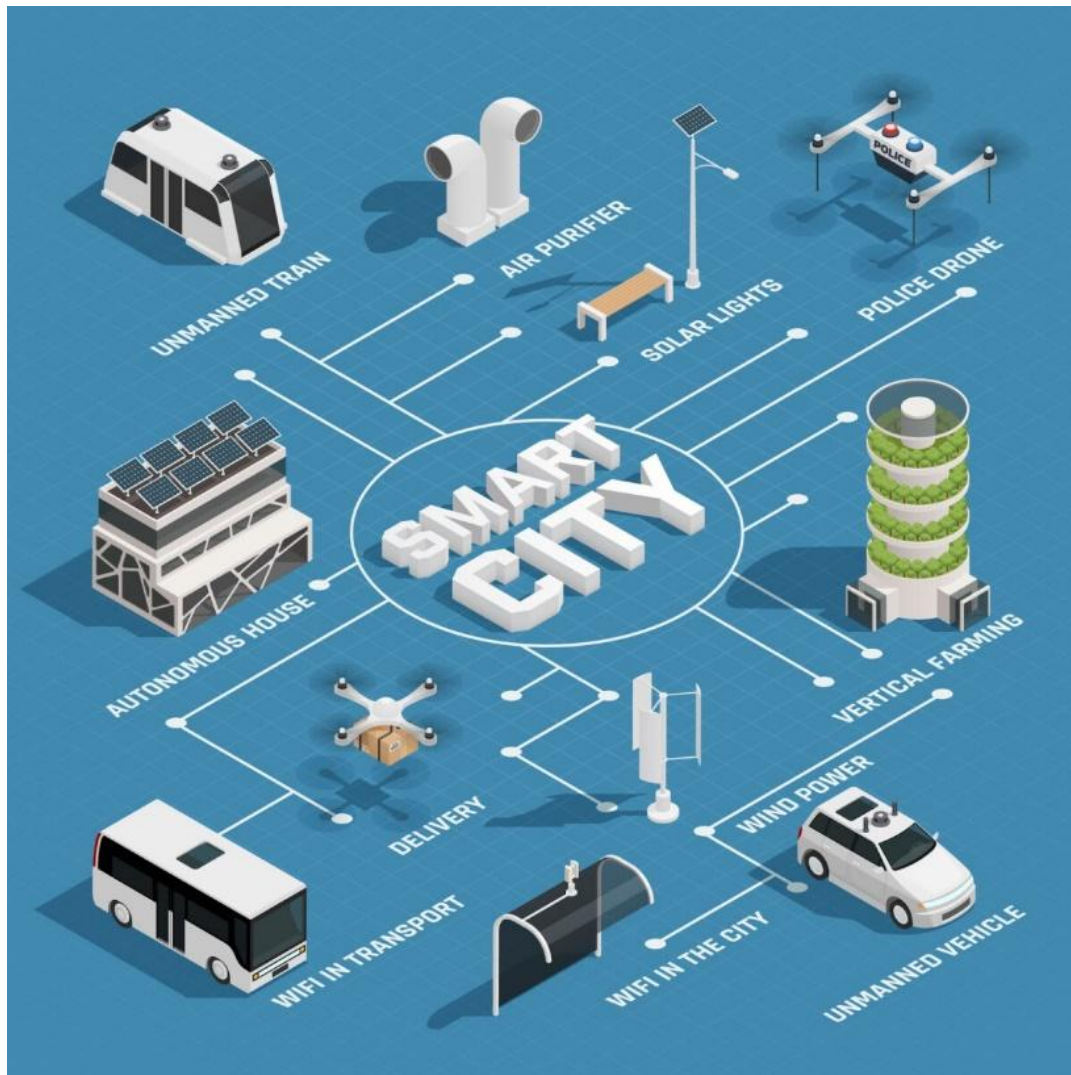


Εικόνα 14. Εικονική/Επαυξημένη/Μικτή Πραγματικότητα [24]

3.7.3 Έξυπνες πόλεις και αυτόνομα συστήματα

Ακόμη ένας σημαντικός τομέας στον οποίο αναμένεται να αξιοποιηθούν τα δίκτυα 6G είναι η ανάπτυξη έξυπνων πόλεων. Οι έξυπνες πόλεις βασίζονται στη χρήση αισθητήρων, συνδεδεμένων συσκευών και

προηγμένων συστημάτων διαχείρισης δεδομένων για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών και την καλύτερη διαχείριση των αστικών υποδομών. Με τη χρήση των δικτύων 6G θα είναι δυνατή η σύνδεση πολύ μεγάλου αριθμού συσκευών σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την καλύτερη διαχείριση της κυκλοφορίας, της ενέργειας και των δημόσιων υπηρεσιών. Επιπλέον, τα δίκτυα αυτά θα μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη αυτόνομων οχημάτων και άλλων έξυπνων συστημάτων μεταφορών, τα οποία απαιτούν πολύ γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και των υποδομών του δικτύου.



Εικόνα 15. Smart City [45]

Όπως επισημαίνεται σε σχετική ανάλυση του IEEE [25], μια έξυπνη πόλη ορίζεται λιγότερο από την τεχνολογία που διαθέτει και περισσότερο από το πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιεί τα δεδομένα για να βελτιώσει την ποιότητα ζωής των κατοίκων της. Η βάση μιας έξυπνης πόλης είναι το IoT, όπου αισθητήρες και έξυπνες συσκευές συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται από συστήματα AI για τη λήψη καλύτερων αποφάσεων.

Οι βασικοί τομείς στους οποίους επικεντρώνονται οι έξυπνες πόλεις περιλαμβάνουν:

- Διαχείριση Κυκλοφορίας: Χρήση έξυπνων συστημάτων για τη μείωση του μπουτιλιαρίσματος και των ρύπων.

- Περιβάλλον: Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και βελτιστοποίηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Υγεία και Ασφάλεια: Συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης ασθενών και χρήση τεχνολογίας για την πρόληψη του εγκλήματος.
- Διαχείριση Απορριμμάτων: Έξυπνοι κάδοι που ειδοποιούν τότε πρέπει να αδειάσουν, κάνοντας την αποκομιδή πιο οικονομική και οικολογική.

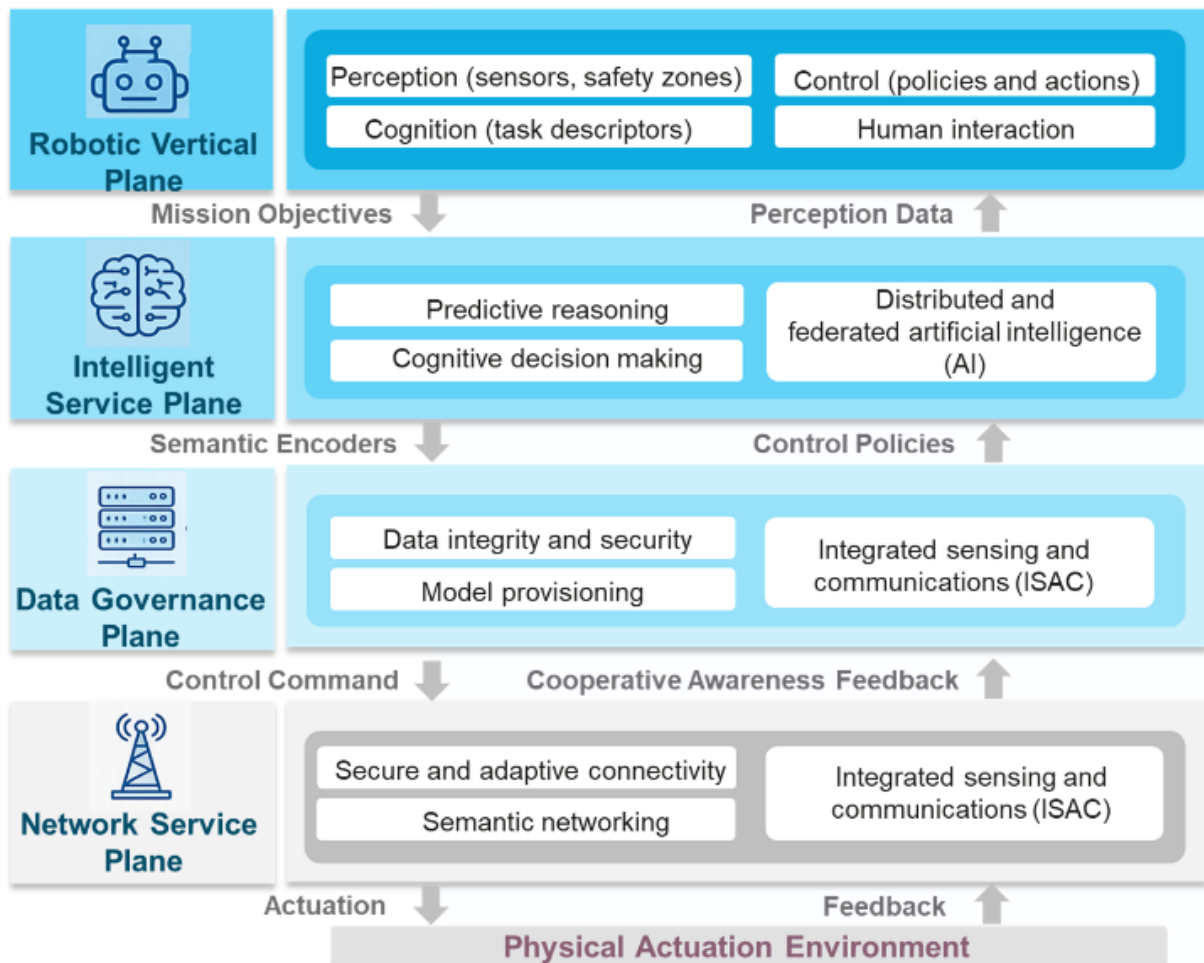
Η εξέλιξη των έξυπνων πόλεων μετατοπίζεται έτσι από την απλή εγκατάσταση τεχνολογικών υποδομών στην κατανόηση των αναγκών των πολιτών. Στόχος είναι η δημιουργία βιώσιμων πόλεων που προσφέρουν ασφάλεια, ευκολία στις μετακινήσεις και οικονομική ανάπτυξη. [45]

3.7.4 Ρομποτική Του Μέλλοντος

Η μετάβαση προς τα δίκτυα έκτης γενιάς (6G/IMT-2030) μετασχηματίζει ριζικά τη ρομποτική, σηματοδοτώντας το πέρασμα από μεμονωμένες μονάδες σε ευφυή, πλήρως διασυνδεδεμένα αυτόνομα συστήματα συνεργασίας. Σε αντίθεση με το 5G, όπου η ασύρματη συνδεσιμότητα κάλυπτε κυρίως την απλή εκτέλεση εντολών και περιορισμένη εποπτεία μέσω καμερών, το 6G ενσωματώνει εγγενώς την τεχνητή νοημοσύνη (AI-native) και την ολοκληρωμένη αντίληψη και επικοινωνία (ISAC). Αυτή η εξέλιξη αναβαθμίζει τα τέσσερα θεμελιώδη δομικά στοιχεία της ρομποτικής: την αντίληψη (sensing & perception), τη νόηση (cognition & planning), την ενεργοποίηση (actuation & execution) και την αυτομάθηση (self-learning). Μέσω εξαιρετικά χαμηλού latency (0,1–1 ms), αξιοπιστίας επιπέδου 10^{-5} \$ έως 10^{-7} \$, ακρίβειας εντοπισμού 1–10 cm και σημασιολογικής επικοινωνίας (semantic communication), τα δίκτυα μεταδίδουν ουσιαστική, προσανατολισμένη στην εργασία πληροφορία αντί για απλούς ακατέργαστους όγκους δεδομένων.

Για την αποτελεσματική διαχείριση αυτής της πολυπλοκότητας, εισάγεται μια ολιστική αρχιτεκτονική τεσσάρων επιπέδων. Το Κάθετο Ρομποτικό Επίπεδο (Robotic Vertical Plane) φιλοξενεί τις εξειδικευμένες εφαρμογές, ενώ το Επίπεδο Ευφυών Υπηρεσιών (Intelligent Service Plane) λειτουργεί ως ο εγκέφαλος του συστήματος, υποστηρίζοντας καταναμετημένη λήψη αποφάσεων, πρόγνωση και ομόσπονδη μάθηση στην παρυφή. Παράλληλα, το Επίπεδο Διακυβέρνησης Δεδομένων (Data Governance Plane) κατοχυρώνει την ακεραιότητα των δεδομένων και την ηθική συμμόρφωση με ρυθμιστικά πλαίσια, όπως το EU AI Act και τα διεθνή πρότυπα ISO. Τέλος, το Επίπεδο Υπηρεσιών Δικτύου (Network Service Plane) παρέχει ασφαλή συνδεσιμότητα, εκφόρτωση υπολογισμών και λειτουργίες ISAC.

Κομβικό παράδειγμα επικύρωσης του πλαισίου αποτελούν οι Δυναμικές Ζώνες Ασφαλείας (Dynamic Safety Zones - DSZs) στη συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ. Αντικαθιστώντας τα άκαμπτα φυσικά κιγκλιδώματα και τα στατικά όρια ταχύτητας που περιορίζουν την αποδοτικότητα, οι DSZs προσαρμόζονται δυναμικά σε πραγματικό χρόνο με βάση την ταχύτητα του ρομπότ, τη διαδρομή και την εγγύτητα ανθρώπινων χειριστών. Αξιοποιώντας την επίγνωση περιβάλλοντος του 6G ISAC και τη ντετερμινιστική απόκριση του HRLLC, διασφαλίζεται η ασφαλής και ευέλικτη συνύπαρξη ρομπότ (cobots) και ανθρώπων σε απαιτητικά περιβάλλοντα σύγχρονων εργοστασίων, αποθηκών logistics και τηλεχειρουργικής.[46]



Εικόνα 16. Αρχιτεκτονική Υψηλού Επιπέδου [46]

3.8 Προκλήσεις και περιορισμοί υλοποίησης των τεχνολογιών

Παρόλο που τα δίκτυα 6G αναμένεται να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές ασύρματων επικοινωνιών, η ανάπτυξή τους συνοδεύεται και από αρκετές τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις. Η υλοποίηση των τεχνολογιών που απαιτούνται για τα δίκτυα επόμενης γενιάς συνιστά σύνθετο εγχείρημα, καθώς απαιτείται σημαντική πρόοδος σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Επιπλέον, η ανάπτυξη των υποδομών αυτών προϋποθέτει υψηλό κόστος επενδύσεων, καθώς και την ανάπτυξη νέων προτύπων επικοινωνίας που θα διασφαλίζουν τη συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και συσκευών[13]. Για τον λόγο αυτό, η έρευνα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών συνεχίζεται με στόχο την αντιμετώπιση των τεχνολογικών και οικονομικών προκλήσεων που σχετίζονται με την ανάπτυξη των δικτύων 6G.

Καθώς η πυκνότητα των σταθμών και ο όγκος της διακινούμενης πληροφορίας αυξάνονται δραματικά, η ενεργειακή αποδοτικότητα αναδεικνύεται σε κεντρική παράμετρο σχεδιασμού των δικτύων 6G. Οι σχετικές ερευνητικές κατευθύνσεις εστιάζουν στη μείωση της κατανάλωσης ανά μεταδιδόμενο bit, στην αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών για την τροφοδοσία των σταθμών και στην αυτόματη απενεργοποίηση τμημάτων του δικτύου σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, με στόχο τη βιώσιμη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών υποδομών.

3.8.1 Τεχνολογικές προκλήσεις

Η ανάπτυξη των δικτύων 6G απαιτεί την αξιοποίηση τεχνολογιών που βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο. Η χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων, όπως οι συχνότητες terahertz, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, ωστόσο δημιουργεί και νέες τεχνικές δυσκολίες. Τα σήματα σε αυτές τις συχνότητες παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση εμβέλειας κατά τη μετάδοση και επηρεάζονται περισσότερο από εμπόδια όπως κτίρια, δέντρα ή ακόμη και οι καιρικές συνθήκες[24]. Αυτό σημαίνει ότι για να εξασφαλιστεί επαρκής κάλυψη του δικτύου θα απαιτηθεί η εγκατάσταση μεγαλύτερου αριθμού σταθμών βάσης και πιο εξελιγμένων συστημάτων διαχείρισης του σήματος.

3.8.2 Περιορισμοί στην αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων

Η διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία των ασύρματων δικτύων. Καθώς όλο και περισσότερες συσκευές συνδέονται στο διαδίκτυο, η ανάγκη για διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων αυξάνεται σημαντικά. Η αξιοποίηση των συχνοτήτων terahertz μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, ωστόσο απαιτεί την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μετάδοσης και νέων προτύπων επικοινωνίας που θα επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος[26].

3.8.3 Πολυπλοκότητα τηλεπικοινωνιακών υποδομών

Η αρχιτεκτονική των δικτύων 6G αναμένεται να είναι πολύ πιο πολύπλοκη σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η ενοποίηση επίγειων, δορυφορικών και εναέριων συστημάτων επικοινωνίας δημιουργεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον, το οποίο απαιτεί προηγμένα συστήματα διαχείρισης και ελέγχου[21]. Η πολυπλοκότητα αυτή αυξάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και δημιουργεί την ανάγκη για πιο αποτελεσματικούς μηχανισμούς διαχείρισης του δικτύου.

3.8.4 Ενεργειακή κατανάλωση και βιωσιμότητα

Η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ανάπτυξη των δικτύων 6G. Καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών αυξάνεται συνεχώς, η συνολική κατανάλωση ενέργειας των τηλεπικοινωνιακών υποδομών αυξάνεται σημαντικά. Η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιώσιμη λειτουργία των δικτύων επόμενης γενιάς[20]. Η χρήση AI για τη διαχείριση των πόρων του δικτύου μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

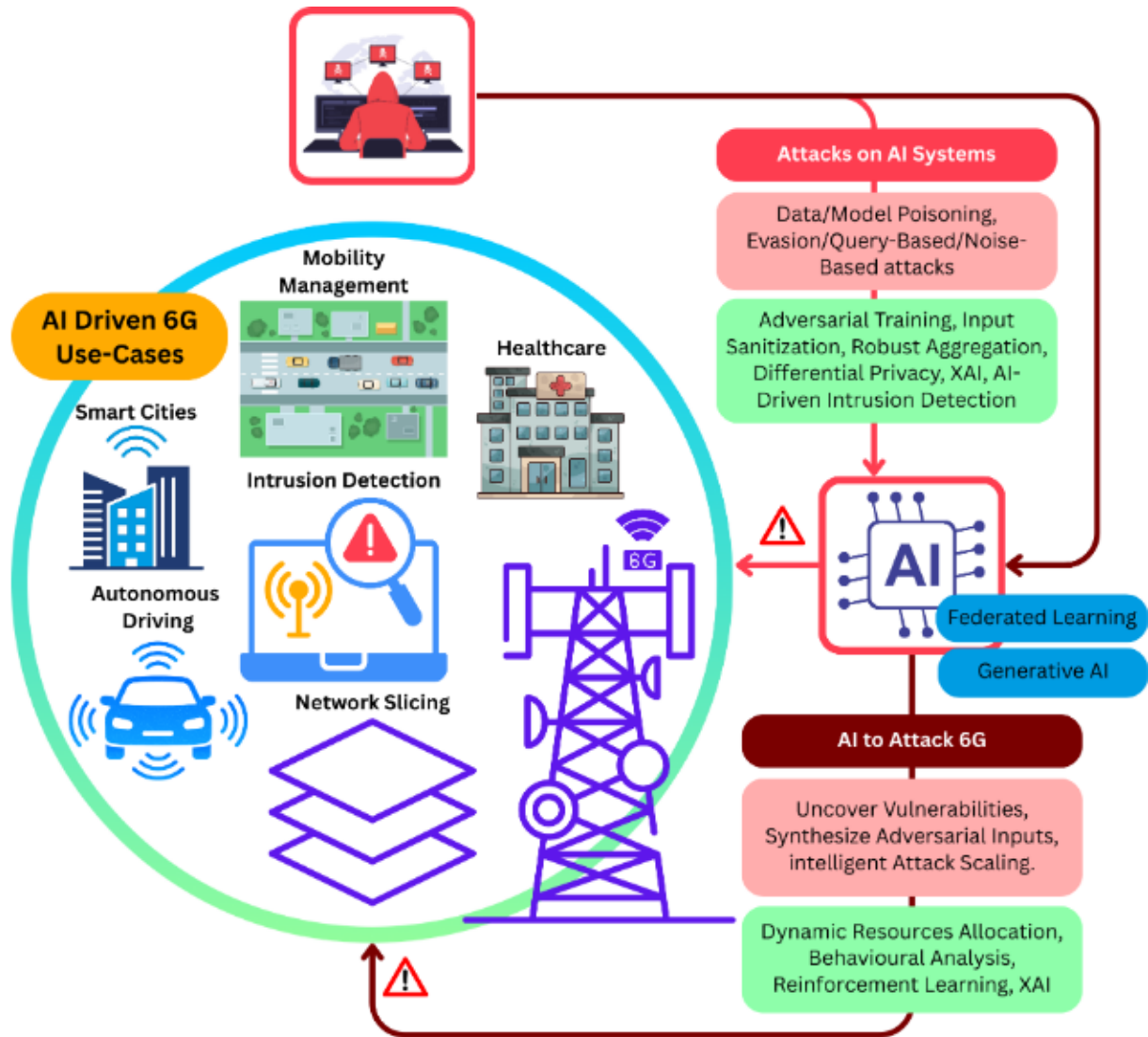
3.8.5 Πράσινες τεχνολογίες επικοινωνιών

Η έννοια των πράσινων τηλεπικοινωνιών αναφέρεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Στα δίκτυα 6G αναμένεται να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων επικοινωνίας και στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη λειτουργία των σταθμών βάσης[27].

3.8.6 Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα στα Δίκτυα 6G

Η εγγενής ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI-native) στα δίκτυα έκτης γενιάς (6G) μετασχηματίζει ριζικά το τοπίο της κυβερνοασφάλειας και της προστασίας της ιδιωτικότητας. Ενώ η

τεχνητή νοημοσύνη λειτουργεί ως καταλύτης για την αυτοματοποιημένη διαχείριση, τη βελτιστοποίηση και την άμυνα του δικτύου, ταυτόχρονα διευρύνει την επιφάνεια επίθεσης, λειτουργώντας ως δόκοπο μαχαίρι. Για την αποτελεσματική θωράκιση των δικτύων 6G και των κρίσιμων εφαρμογών τους (όπως οι έξυπνες πόλεις, η ευφυής υγεία και το Industry 5.0), αναδεικνύονται τρεις θεμελιώδεις τεχνολογικοί πυλώνες: τα συστήματα ανίχνευσης εισβολών (IDS) ενισχυμένα με συνεχή μάθηση (continual learning) και παραγωγική AI, η ομόσπονδη μάθηση (Federated Learning - FL/DFL) για αποκεντρωμένη εκπαίδευση μοντέλων με διατήρηση των ιδιωτικών δεδομένων τοπικά στις συσκευές, και η εξηγήσιμη τεχνητή νοημοσύνη (Explainable AI - XAI). Μέσω μεθόδων όπως οι LIME, SHAP και LRP, η XAI εξαλείφει την αδιαφάνεια των μοντέλων (black-boxes) και ενισχύει την εμπιστοσύνη στη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 17. Μέτρα αντιμετώπισης απειλών στα Δίκτυα 6G [47]

Παράλληλα, αναδύονται νέες εξελιγμένες απειλές που στοχεύουν απευθείας τα συστήματα AI, όπως επιθέσεις δηλητηρίασης δεδομένων και μοντέλων (data/model poisoning), καθώς και επιθέσεις διαφυγής (evasion) ή παραγωγής αντιπαραδειγμάτων. Ταυτόχρονα, κακόβουλοι δρώντες αξιοποιούν την AI για αυτόματη ανίχνευση ευπαθειών και ευφυή κλιμάκωση επιθέσεων. Η αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων απαιτεί ολιστικά αντίμετρα σε όλο τον κύκλο ζωής των μοντέλων, συμπεριλαμβανομένης

της αντιπαραδειγματικής εκπαίδευσης (adversarial training), της διαφορικής ιδιωτικότητας (differential privacy), των μηχανισμών ισχυρής συνάθροισης (robust aggregation) και της επιβολής XAI στο edge network.

Επιπλέον, η ασφάλεια στο 6G οφείλει να είναι βιώσιμη («Green Security»), υιοθετώντας ενεργειακά ενήμερους αλγορίθμους (energy-aware AI) και δυναμική εκτίμηση κινδύνου που κλιμακώνει την ένταση των μηχανισμών προστασίας βάσει των πραγματικών επιπέδων απειλής, εξοικονομώντας πόρους. Σε κανονιστικό επίπεδο, η εφαρμογή της AI πρέπει να συμμορφώνεται απαρέγκλιτα με αυστηρά ευρωπαϊκά πλαίσια, όπως το EU AI Act (όπου τα συστήματα 6G λογίζονται ως κρίσιμη ψηφιακή υποδομή υψηλού κινδύνου), τον GDPR και την οδηγία NIS2. Τέλος, η αξιοποίηση Μεγάλων Γλωσσικών Μοντέλων (LLMs) σε συστήματα IDS προσφέρει σημαντική προστιθέμενη αξία: παρότι οι κλασικοί αλγόριθμοι ML υπερέχουν σε απόλυτη ακρίβεια, τα LLMs επιτυγχάνουν υψηλή ανάκληση (recall) και προσφέρουν εξηγήσεις φυσικής γλώσσας σε πραγματικό χρόνο, διαμορφώνοντας ένα διαφανές και ανθεκτικό οικοσύστημα ασφάλειας.[47]

3.9 Επίλογος

Από την ανάλυση που προηγήθηκε γίνεται φανερό ότι η τεχνολογία 6G υπερβαίνει τη λογική μιας ακόμη βελτίωσης των ασύρματων επικοινωνιών και συνιστά σημαντικό βήμα προς ένα πιο διασυνδεδεμένο και ψηφιακά εξελιγμένο περιβάλλον. Οι τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο δείχνουν ότι τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν εφαρμογές που μέχρι πρόσφατα θεωρούνταν δύσκολες ή ακόμη και αδύνατες να υλοποιηθούν.

Η αξιοποίηση νέων περιοχών του φάσματος συχνοτήτων, δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την εμφάνιση νέων μορφών επικοινωνίας και υπηρεσιών. Παράλληλα, οι εφαρμογές που αναμένεται να υποστηριχθούν από τα δίκτυα 6G, δείχνουν πόσο σημαντικός θα είναι ο ρόλος αυτών των τεχνολογιών στη μελλοντική ψηφιακή κοινωνία. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη των δικτύων 6G συνοδεύεται και από αρκετές προκλήσεις.

Η αξιοποίηση πολύ υψηλών συχνοτήτων, η ανάγκη για νέες τηλεπικοινωνιακές υποδομές και τα ζητήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια και την ενεργειακή κατανάλωση αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάπτυξη των δικτύων αυτών

Η συνεχής πρόοδος της τεχνολογίας και η αυξανόμενη ανάγκη για ταχύτερη και πιο αξιόπιστη επικοινωνία δείχνουν ότι η μετάβαση προς τα δίκτυα επόμενης γενιάς είναι αναπόφευκτη. Στα επόμενα χρόνια αναμένεται να δούμε σημαντικές εξελίξεις στον τομέα αυτό, οι οποίες θα επηρεάσουν καθοριστικά τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε, εργαζόμαστε και αλληλοεπιδρούμε με την ψηφιακή τεχνολογία.

Κεφάλαιο 4ο: Σύγκριση Δικτύων 5G και 6G

4.1 Εισαγωγή

Η σύγκριση μεταξύ των δικτύων πέμπτης (5G) και έκτης (6G) γενιάς αποτελεί κεντρικό ζήτημα για την κατανόηση της πορείας που ακολουθούν οι σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες. Παρότι το 6G βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, οι στόχοι και οι προδιαγραφές που έχουν ήδη τεθεί επιτρέπουν μια ουσιαστική αντιπαραβολή με τις δυνατότητες του 5G, το οποίο αποτελεί σήμερα την πλέον προηγμένη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία.

Η σύγκριση αυτή επιχειρεί να αναδείξει, πέρα από τα αριθμητικά μεγέθη, τις ποιοτικές διαφορές φιλοσοφίας και σχεδιασμού ανάμεσα στις δύο γενιές. Ενώ το 5G σχεδιάστηκε ως μια τεχνολογία που ενοποιεί διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών κάτω από ένα κοινό δίκτυο, το 6G θα ενσωματώσει εγγενώς την τεχνητή νοημοσύνη, θα αξιοποιήσει νέες ζώνες συχνοτήτων και θα συγκλίνει τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο.

4.2 Ταχύτητες μετάδοσης και Latency

Η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων αποτελεί ένα από τα πιο εμφανή κριτήρια σύγκρισης μεταξύ των δύο γενιών. Τα δίκτυα 5G προσφέρουν θεωρητικές ταχύτητες που φτάνουν έως και τα 20 Gbps υπό ιδανικές συνθήκες, παρέχοντας στην πράξη ρυθμούς μετάδοσης σημαντικά υψηλότερους από εκείνους του 4G. Αντίθετα, τα δίκτυα 6G φιλοδοξούν να αγγίζουν ταχύτητες της τάξης του 1 Tbps, δηλαδή έως και 50 φορές μεγαλύτερες, αξιοποιώντας ευρύτερες ζώνες φάσματος και νέες τεχνικές μετάδοσης.

Το latency αποτελεί εξίσου κρίσιμη παράμετρο, ιδιαίτερα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Το 5G μείωσε την καθυστέρηση σε επίπεδα της τάξης του ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου (1 ms) σε ιδανικές συνθήκες, καθιστώντας εφικτές υπηρεσίες όπως η απομακρυσμένη χειρουργική και η αυτόνομη οδήγηση. Το 6G στοχεύει σε ακόμη χαμηλότερες τιμές, της τάξης των μικροδευτερολέπτων, επιτρέποντας την υποστήριξη εφαρμογών με εξαιρετικά αυστηρές απαιτήσεις απόκρισης.

Σε ποσοτικούς όρους, η διαφορά γίνεται ακόμη πιο εμφανής. Το 5G παρέχει θεωρητικές κορυφαίες ταχύτητες της τάξης των 20 Gbps, με τις πραγματικές ταχύτητες των χρηστών να κυμαίνονται συνήθως από 100 Mbps έως 1 Gbps, ανάλογα με τις συνθήκες ανάπτυξης και κάλυψης. Το 6G, αξιοποιώντας τις ζώνες terahertz (THz) στο εύρος 0,1–10 THz, στοχεύει σε ρυθμούς που μπορεί να φτάσουν τα 50 έως 100 φορές υψηλότερα επίπεδα, καθιστώντας εφικτή τη μεταφορά τεράστιων όγκων δεδομένων σε ελάχιστο χρόνο.

Αντίστοιχη είναι και η διαφορά στην καθυστέρηση. Ενώ το 5G ορίζει ως στόχο καθυστέρηση περίπου 1 ms για τις υπηρεσίες υπερυψηλής αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης (Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC), με τις τυπικές τιμές στην πράξη να κυμαίνονται μεταξύ 1 και 10 ms, το 6G στοχεύει σε τιμές κάτω από 0,1 ms, δηλαδή σε επίπεδα της τάξης των 100 μικροδευτερολέπτων. Η διαφορά αυτή είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπως οι διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή και η απτική επικοινωνία, όπου ακόμη και καθυστέρηση ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου γίνεται αντιληπτή.

Η σύγκλιση υψηλών ταχυτήτων και εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης διαφοροποιεί ουσιαστικά τις δύο γενιές. Το 5G πέτυχε να καλύψει τις απαιτήσεις των σημερινών εφαρμογών. Το 6G, αντίθετα, σχεδιάζεται ώστε να υποστηρίξει υπηρεσίες που σήμερα θεωρούνται πειραματικές, όπως η ολογραφική

επικοινωνία και η αλληλεπίδραση σε περιβάλλοντα μικτής πραγματικότητας, οι οποίες προϋποθέτουν ταυτόχρονα τεράστιο εύρος ζώνης και άμεση απόκριση.

Η διαφορά κλίμακας είναι ενδεικτική της μετάβασης: από 20 Gbps/1 ms στο 5G σε έως 1 Tbps/κάτω από 0,1 ms στο 6G. Η μείωση αυτή δεν είναι απλώς ποσοτική: αποτελεί προϋπόθεση για εφαρμογές πραγματικού χρόνου με κρίσιμες απαιτήσεις αξιοπιστίας, όπως η απομακρυσμένη χειρουργική και ο έλεγχος αυτόνομων οχημάτων.

4.3 Χωρητικότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα

Πέρα από την ταχύτητα, καθοριστικό ρόλο στη σύγκριση των δύο γενιών διαδραματίζει η χωρητικότητα του δικτύου, δηλαδή η ικανότητά του να εξυπηρετεί ταυτόχρονα μεγάλο αριθμό συσκευών. Το 5G σχεδιάστηκε ώστε να υποστηρίζει έως και ένα εκατομμύριο συνδεδεμένες συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, καλύπτοντας τις ανάγκες του IoT. Το 6G αναμένεται να πολλαπλασιάσει τη δυνατότητα αυτή, υποστηρίζοντας πυκνότητες έως και δέκα εκατομμυρίων συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για περιβάλλοντα μαζικής διασύνδεσης, όπως οι έξυπνες πόλεις και οι αυτοματοποιημένες βιομηχανίες.

Η κλίμακα της διαφοράς στη χωρητικότητα αποτυπώνεται και στα επίσημα μεγέθη που έχουν τεθεί. Πέρα από την πυκνότητα συσκευών, ένα κρίσιμο μέγεθος είναι η χωρητικότητα κίνησης ανά περιοχή (area traffic capacity): ενώ το 5G υποστηρίζει τιμές της τάξης των 10 Mbps ανά τετραγωνικό μέτρο, η Σύσταση ITU-R M.2160 θέτει για το 6G ερευνητικό στόχο 30 έως 50 Mbps ανά τετραγωνικό μέτρο, δηλαδή τρι- έως πενταπλάσια αύξηση, ενώ στην ερευνητική βιβλιογραφία συζητούνται ακόμη υψηλότερες τιμές, της τάξης του 1 Gbps ανά τετραγωνικό μέτρο. Η αύξηση αυτή είναι απαραίτητη για πυκνά περιβάλλοντα όπως οι έξυπνες βιομηχανίες, τα στάδια και τα αστικά κέντρα

.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο άξονα διαφοροποίησης. Καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών και ο όγκος των δεδομένων αυξάνονται εκθετικά, η κατανάλωση ενέργειας των δικτύων αναδεικνύεται σε σημαντικό περιβαλλοντικό και οικονομικό ζήτημα. Το 5G βελτίωσε αισθητά την ενεργειακή απόδοση ανά μεταδιδόμενο bit σε σχέση με το 4G, ωστόσο το 6G θέτει ως κεντρικό στόχο τη βιωσιμότητα, επιδιώκοντας δραστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω έξυπνης διαχείρισης πόρων και αξιοποίησης της τεχνητής νοημοσύνης.

Η σύγκριση στους άξονες αυτούς αναδεικνύει μια ουσιαστική μεταβολή προτεραιοτήτων. Το 5G εστίασε κυρίως στην αύξηση της απόδοσης και της χωρητικότητας σε σχέση με το 4G που καλείται να συνδυάσει την περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, καθιστώντας την ενεργειακή αποδοτικότητα βασικό κριτήριο σχεδιασμού.

Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU) την ορίζει ως τον αριθμό των bit που μεταδίδονται ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας (bit ανά Joule). Σύμφωνα με το πλαίσιο IMT-2030, η αποδοτικότητα αυτή πρέπει να βελτιώνεται ανάλογα με την αύξηση της χωρητικότητας, ώστε η συνολική κατανάλωση ενέργειας να παραμένει ελεγχόμενη. Η ουσιαστική διαφορά έγκειται στη φιλοσοφία: ενώ στο 5G η εξοικονόμηση ενέργειας αντιμετωπίστηκε ως μεταγενέστερη βελτιστοποίηση, το 6G σχεδιάζεται με την ενεργειακή αποδοτικότητα ως θεμελιώδη αρχή ήδη από το πρώτο στάδιο του σχεδιασμού του [30].

Η πρόκληση γίνεται εντονότερη αν συνυπολογιστεί ο όγκος της κίνησης: καθώς η εκτιμώμενη κατανάλωση δεδομένων αυξάνεται εκθετικά (από περίπου 90 exabyte τον μήνα το 2022 σε προβλεπόμενα περίπου 600 exabyte τον μήνα προς το 2030) η διατήρηση χαμηλής συνολικής

κατανάλωσης αποτελεί κεντρικό στόχο του σχεδιασμού του 6G. Ζητούμενο είναι η εξυπηρέτηση πολλαπλάσιας κίνησης χωρίς ανάλογη αύξηση του ενεργειακού αποτυπώματος των δικτύων.

4.4 Φάσμα συχνοτήτων και αρχιτεκτονική δικτύου

Μια από τις πιο θεμελιώδεις τεχνικές διαφορές ανάμεσα στις δύο γενιές εντοπίζεται στο φάσμα συχνοτήτων που αξιοποιούν. Το 5G λειτουργεί κυρίως σε ζώνες κάτω των 6 GHz (sub-6GHz), αλλά και σε υψηλότερες συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter wave, mmWave), οι οποίες προσφέρουν μεγάλο εύρος ζώνης με αντάλλαγμα περιορισμένη εμβέλεια. Το 6G, αντίθετα, αναμένεται να επεκταθεί σε πολύ υψηλότερες συχνότητες, αξιοποιώντας τη ζώνη των terahertz (THz), η οποία υπόσχεται τεράστια διαθέσιμη χωρητικότητα, αλλά συνεπάγεται σημαντικές προκλήσεις ως προς την κάλυψη και τη διάδοση του σήματος.

Η διαφορά αυτή στο φάσμα συνδέεται άμεσα με αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Το 5G βασίζεται σε μια κυρίως επίγεια αρχιτεκτονική, με πυκνά δίκτυα σταθμών βάσης και τεχνικές όπως η διαμόρφωση δέσμης (beamforming) για την υποστήριξη των υψηλών συχνοτήτων. Το 6G προχωρά ένα βήμα παραπέρα, εισάγοντας μια ενοποιημένη αρχιτεκτονική που συνδυάζει επίγεια, εναέρια και δορυφορικά δίκτυα σε ένα ενιαίο σύστημα, με στόχο την παροχή καθολικής κάλυψης ακόμη και σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.

Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του 6G σχεδιάζεται ώστε να είναι εγγενώς ευέλικτη και προγραμματιζόμενη, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως ο τεμαχισμός δικτύου (network slicing) και η virtualization των λειτουργιών. Αν και το 5G εισήγαγε τις τεχνολογίες αυτές, το 6G στοχεύει να τις εντάξει ως κεντρικό δομικό στοιχείο, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή του δικτύου στις εκάστοτε ανάγκες των υπηρεσιών και των χρηστών.

Καθοριστικό στοιχείο της νέας αρχιτεκτονικής αποτελεί η ενοποίηση των επίγειων δικτύων με τα μη επίγεια δίκτυα (Non-Terrestrial Networks, NTN), όπως οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς. Ενώ το 5G αντιμετώπισε τη δορυφορική συνδεσιμότητα ως συμπληρωματική λύση, το 6G την εντάσσει οργανικά στον σχεδιασμό του, με στόχο μια τρισδιάστατη κάλυψη που εκτείνεται σε στεριά, θάλασσα και αέρα και φτάνει ακόμη και σε περιοχές που σήμερα παραμένουν χωρίς πρόσβαση [30].

Μια ακόμη ριζική καινοτομία του 6G είναι η ενσωματωμένη αίσθηση και επικοινωνία (Integrated Sensing and Communication, ISAC), όπου το δίκτυο συνδυάζει τη μετάδοση δεδομένων με την ικανότητα να αντιλαμβάνεται το φυσικό περιβάλλον, λειτουργώντας ταυτόχρονα ως αισθητήρας. Παράλληλα, εξετάζεται η υποστήριξη συσκευών μηδενικής ενέργειας (zero-energy devices), οι οποίες τροφοδοτούνται αξιοποιώντας την ενέργεια των ίδιων των ραδιοκυμάτων. Τα στοιχεία αυτά αναδεικνύουν ότι η αρχιτεκτονική του 6G συνιστά ουσιαστική επανασχεδίαση του δικτύου ως ενιαίου ευφυούς συστήματος και όχι απλή εξέλιξη του υπάρχοντος [31]. Παράλληλα, η αξιοποίηση υψηλότερων ζωνών συχνοτήτων απαιτεί πιο πυκνή δικτυακή υποδομή και πιο ευέλικτη διαχείριση του φάσματος σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές.

4.5 Τεχνητή Νοημοσύνη και αυτοματοποίηση

Ένας από τους σημαντικότερους άξονες διαφοροποίησης μεταξύ των δύο γενιών αφορά τον ρόλο της τεχνητής νοημοσύνης. Στα δίκτυα 5G η ΑΙ αξιοποιείται κυρίως ως ένα συμπληρωματικό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων λειτουργιών, όπως η διαχείριση της κίνησης δεδομένων ή η πρόβλεψη βλαβών. Η ενσωμάτωσή της, ωστόσο, γίνεται εκ των υστέρων, πάνω σε μια υποδομή που δεν σχεδιάστηκε εξ αρχής γύρω από αυτή.

Αντίθετα, το 6G υιοθετεί τη φιλοσοφία του εγγενώς νοήμονος δικτύου (AI-native networking), στην οποία η τεχνητή νοημοσύνη αποτελεί θεμελιώδες δομικό στοιχείο του δικτύου από το στάδιο του σχεδιασμού. Στο πλαίσιο αυτό, το δίκτυο αποκτά την ικανότητα να αυτο-οργανώνεται, να βελτιστοποιεί δυναμικά την κάλυψη και τη χωρητικότητά του και να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης.

Η αυτοματοποίηση αυτή μεταβάλλει ριζικά τον τρόπο διαχείρισης των τηλεπικοινωνιακών υποδομών. Στο 5G η διαχείριση παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανθρωποκεντρική ενώ το 6G στοχεύει σε δίκτυα που λειτουργούν με ελάχιστη εποπτεία, αξιοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης για τη συνεχή προσαρμογή και βελτίωσή τους.

Το όραμα για το 6G προβλέπει μάλιστα δίκτυα μηδενικής επαφής (zero-touch), στα οποία οι λειτουργίες παρακολούθησης, βελτιστοποίησης και αποκατάστασης βλαβών εκτελούνται αυτόνομα από τους αλγορίθμους του δικτύου. Η δυνατότητα αυτή αναμένεται να μειώσει το λειτουργικό κόστος, να επιταχύνει την ανταπόκριση σε σφάλματα και να επιτρέψει την αξιόπιστη λειτουργία σε περιβάλλοντα με εκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές.[31]

4.6 Εφαρμογές και σενάρια χρήσης

Η σύγκριση των δύο γενιών αποκτά πρακτικό νόημα όταν εξετάζονται οι εφαρμογές και τα σενάρια χρήσης που υποστηρίζει η καθεμία. Το 5G δομήθηκε γύρω από τρεις βασικές κατηγορίες υπηρεσιών: τις βελτιωμένες ευρυζωνικές επικοινωνίες (enhanced Mobile Broadband, eMBB), τις επικοινωνίες υπερυψηλής αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης (Ultra-Reliable Low Latency Communications, URLLC) και τις μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (massive Machine Type Communications, mMTC). Οι κατηγορίες αυτές κάλυψαν ένα ευρύ φάσμα αναγκών, από το κινητό βίντεο υψηλής ευκρίνειας έως τη βιομηχανική αυτοματοποίηση και το IoT.

Το 6G διευρύνει σημαντικά αυτό το πλαίσιο, εισάγοντας σενάρια χρήσης που σήμερα βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Σε αυτά περιλαμβάνονται η ολογραφική επικοινωνία, η εμβυθιστική (immersive) αλληλεπίδραση μέσω επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, καθώς και οι ψηφιακοί δίδυμοι (digital twins), δηλαδή πιστά ψηφιακά αντίγραφα φυσικών συστημάτων που ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν τον ταυτόχρονο συνδυασμό υπερυψηλών ταχυτήτων, ελάχιστης καθυστέρησης και μαζικής συνδεσιμότητας.

Η διαφορά στα σενάρια χρήσης αντικατοπτρίζει και τη διαφορετική στόχευση των δύο γενιών. Το 5G επικεντρώθηκε στη βελτίωση και τη σύγκλιση υφιστάμενων υπηρεσιών ενώ το 6G επιδιώκει να κάνει εφικτές εντελώς νέες μορφές αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπων, μηχανών και του ψηφιακού περιβάλλοντος, συγκλίνοντας τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο σε βαθμό που δεν ήταν δυνατός με τις προηγούμενες τεχνολογίες.

Με αυτά τα χαρακτηριστικά, οι προαναφερθείσες πειραματικές εφαρμογές γίνονται τεχνικά υλοποιήσιμες, μετατρέποντας το δίκτυο σε υποδομή που ενεργά διαμεσολαβεί στην αλληλεπίδραση ανθρώπων και μηχανών.[32]

4.7 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί κάθε τεχνολογίας

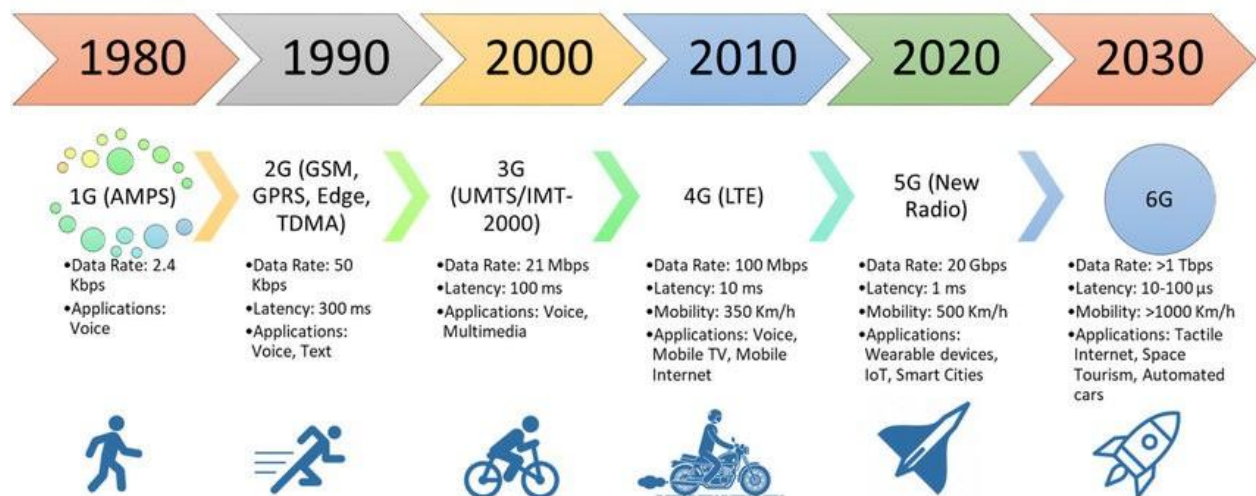
Η συγκριτική αποτίμηση των δύο γενιών απαιτεί τη συνεκτίμηση τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των περιορισμών τους. Το βασικότερο πλεονέκτημα του 5G είναι η εμπορική του ωριμότητα: αποτελεί μια δοκιμασμένη και ευρέως διαθέσιμη τεχνολογία, με σταθερή υποστήριξη από τους κατασκευαστές

και τους παρόχους και με συνεχώς διευρυνόμενη κάλυψη. Παράλληλα, η ύπαρξη ενός ώριμου οικοσυστήματος συσκευών και εφαρμογών διασφαλίζει τη γρήγορη υιοθέτηση νέων υπηρεσιών.

Ωστόσο, το 5G παρουσιάζει και περιορισμούς. Οι υψηλές συχνότητες που απαιτούνται για τις μέγιστες επιδόσεις έχουν περιορισμένη εμβέλεια και απαιτούν πυκνή εγκατάσταση σταθμών βάσης, αυξάνοντας το κόστος υποδομής. Επιπλέον, η ενεργειακή κατανάλωση παραμένει σημαντική, ενώ ορισμένες από τις πιο φιλόδοξες υπηρεσίες που αρχικά είχαν εξαγγελθεί δεν αξιοποιήθηκαν πλήρως, λόγω έλλειψης υποδομών ή ώριμων εφαρμογών.

Από την πλευρά του, το 6G προσφέρει το πλεονέκτημα ενός ριζικά πιο ισχυρού και ευέλικτου οράματος, με εγγενή ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης, καθολική κάλυψη και υποστήριξη πρωτοποριακών εφαρμογών. Οι περιορισμοί του, ωστόσο, είναι επί του παρόντος εξίσου σημαντικοί: η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, οι συχνότητες terahertz θέτουν δύσκολες τεχνικές προκλήσεις, ενώ το κόστος ανάπτυξης και η ανάγκη για εντελώς νέες υποδομές καθιστούν τη μετάβαση μια μακροπρόθεσμη και απαιτητική διαδικασία.

Παρά τα σαφή πλεονεκτήματα, η μετάβαση στο 6G συνοδεύεται από ουσιαστικές προκλήσεις. Η αξιοποίηση των υψηλών συχνοτήτων απαιτεί πολύ πυκνότερη ανάπτυξη σταθμών και σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, ενώ παραμένουν ανοικτά ζητήματα τυποποίησης, διαχείρισης του φάσματος, ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικότητας. Για τον λόγο αυτό, κατ' αναλογία με τις προηγούμενες γενιές, η μετάβαση δεν θα είναι ακαριαία αλλά σταδιακή, με τα δίκτυα 5G και 6G να συνυπάρχουν για σημαντικό χρονικό διάστημα.[32][33]



Εικόνα 18. Ο δρόμος προς το 6G [32]

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο γενιών, ώστε να καθίσταται άμεσα αντιληπτή η κλίμακα της τεχνολογικής εξέλιξης που εισάγει το 6G σε σχέση με το 5G.

Κριτήριο	5G	6G
Μέγιστη ταχύτητα	έως ~20 Gbps	έως ~1 Tbps
Καθυστέρηση (latency)	~1 ms	~1-100 μs
Πυκνότητα συσκευών	~1 εκατ./km ²	~10 εκατ./km ²
Φάσμα συχνοτήτων	sub-6GHz & mmWave	έως ζώνες THz

Αρχιτεκτονική	κυρίως επίγεια	επίγεια, εναέρια & δορυφορική
Τεχνητή Νοημοσύνη	συμπληρωματικός ρόλος	εγγενώς ενσωματωμένη (AI-native)
Ωριμότητα	εμπορικά διαθέσιμο	ερευνητικό στάδιο

Πίνακας 2. Πίνακας Σύγκρισης 5G-6G [33]

4.8 Επίλογος

Από την ανάλυση που προηγήθηκε καθίσταται σαφές ότι η μετάβαση από το 5G στο 6G συνεπάγεται, πέρα από την ποσοτική βελτίωση των επιδόσεων, μια ποιοτική αλλαγή στη φιλοσοφία σχεδιασμού των ασύρματων δικτύων. Το 5G εδραίωσε τις σύγχρονες ευρυζωνικές υπηρεσίες και έθεσε τα θεμέλια για τη μαζική διασύνδεση, ενώ το 6G στοχεύει στον επανακαθορισμό της σχέσης ανθρώπου, μηχανής και ψηφιακού περιβάλλοντος.

Συνολικά, η σύγκριση των δύο γενιών δεν οδηγεί σε μια σχέση αντικατάστασης, αλλά συνέχειας: το 6G οικοδομείται πάνω στις εμπειρίες και τις υποδομές του 5G, αξιοποιώντας τα διδάγματα της προηγούμενης γενιάς. Η κατανόηση των διαφορών αυτών αποτελεί απαραίτητη βάση για την αποτίμηση των προοπτικών και των προκλήσεων που συνοδεύουν τη μετάβαση στην επόμενη εποχή των τηλεπικοινωνιών.

Κεφάλαιο 5ο: Αξιοποίηση 5G και προοπτικές 6G στην Ελλάδα

5.1 Εισαγωγή

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πώς έχει αξιοποιηθεί μέχρι σήμερα η τεχνολογία 5G στην Ελλάδα και το τι μπορούμε ρεαλιστικά να περιμένουμε από τη μετάβαση προς το 6G τα επόμενα χρόνια.

Η Ελλάδα ξεκίνησε την πορεία της προς το 5G με κάποια καθυστέρηση σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, κάτι που οφειλόταν τόσο σε οικονομικούς όσο και σε γραφειοκρατικούς λόγους. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έγιναν σημαντικά βήματα. Έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί κατά πόσο αυτή η ανάπτυξη μεταφράζεται σε ουσιαστικά οφέλη για τους πολίτες και τις επιχειρήσεις.

5.2 Η ανάπτυξη του 5G στην Ελλάδα

Η ιστορία του 5G στην Ελλάδα ξεκινά ουσιαστικά γύρω στο 2020, όταν άρχισαν οι πρώτες σοβαρές συζητήσεις για τη διάθεση του απαραίτητου φάσματος συχνοτήτων στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Μέχρι τότε, η χώρα είχε ολοκληρώσει την ανάπτυξη των δικτύων 4G, τα οποία κάλυπταν ικανοποιητικά το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού, όμως η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση είχε ήδη γίνει εμφανής, ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα.

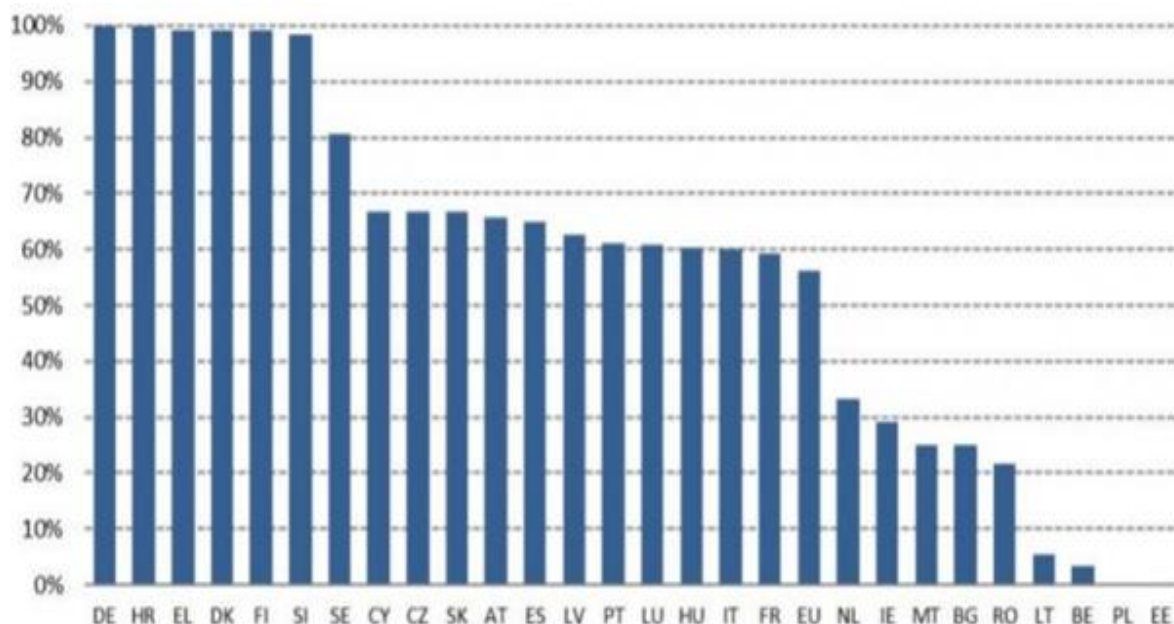
Καθοριστικό σταθμό αποτέλεσε η δημοπρασία φάσματος που πραγματοποιήθηκε στα τέλη του 2020 υπό την εποπτεία της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ). Μέσα από τη διαδικασία αυτή, οι τρεις βασικοί πάροχοι απέκτησαν δικαιώματα χρήσης σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων, εξασφαλίζοντας τους πόρους που χρειαζόνταν για να ξεκινήσουν την υλοποίηση των δικτύων τους. Το ελληνικό δημόσιο, από την πλευρά του, εισέπραξε σημαντικά έσοδα, ενώ ταυτόχρονα τέθηκαν και υποχρεώσεις κάλυψης που οι εταιρείες όφειλαν να τηρήσουν εντός συγκεκριμένων χρονικών ορίων [34].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη του 5G στη χώρα συνδέθηκε εξ αρχής με την ευρύτερη προσπάθεια ψηφιακού μετασχηματισμού. Το κράτος, αναγνωρίζοντας ότι η συνδεσιμότητα νέας γενιάς αποτελεί προϋπόθεση για την ανταγωνιστικότητα της οικονομίας, εντάχθηκε σε ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες και αξιοποίησε χρηματοδοτικά εργαλεία προκειμένου να επιταχύνει τη διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό, το 5G δεν αντιμετωπίστηκε απλώς ως μια εμπορική υπηρεσία των παρόχων, αλλά ως στρατηγική υποδομή με εθνική σημασία.

Στην πράξη, οι πρώτες εμπορικές υπηρεσίες 5G έγιναν διαθέσιμες στους καταναλωτές τον Δεκέμβριο του 2020, μόλις δύο ημέρες μετά την ολοκλήρωση της δημοπρασίας, αρχικά σε επιλεγμένες περιοχές μεγάλων πόλεων όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη. Η ανάπτυξη ακολούθησε σταδιακό ρυθμό, με τους παρόχους να επεκτείνουν συνεχώς την κάλυψη και να αναβαθμίζουν τις υποδομές τους. Από προσωπική εμπειρία, η διαφορά στην ταχύτητα ήταν αισθητή σε σημεία με καλή κάλυψη, αν και η ποιότητα παρέμενε άνιση ανάλογα με την περιοχή και την πυκνότητα των κεραιών.

Ένα στοιχείο που χαρακτηρίζει την ελληνική περίπτωση είναι η σταδιακή και όχι απότομη μετάβαση. Αντί να υπάρξει μια ραγδαία αντικατάσταση των παλαιότερων δικτύων, το 5G αναπτύχθηκε παράλληλα με το 4G, αξιοποιώντας σε αρκετές περιπτώσεις την υπάρχουσα υποδομή. Αυτή η προσέγγιση, γνωστή και ως μη αυτόνομη (Non-Standalone, NSA) αρχιτεκτονική, επέτρεψε στους παρόχους να προσφέρουν υπηρεσίες 5G με μικρότερο αρχικό κόστος, χρησιμοποιώντας το δίκτυο 4G ως βάση για τη σηματοδότηση.

Συνολικά, η περίοδος από το 2020 έως σήμερα μπορεί να χαρακτηριστεί ως η φάση εδραίωσης του 5G στην Ελλάδα. Παρά τις αρχικές καθυστερήσεις, η χώρα κατάφερε να καλύψει μεγάλο μέρος της απόστασης που τη χώριζε από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, θέτοντας τις βάσεις για την επόμενη φάση, η οποία αφορά την πληρέστερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας και την προετοιμασία για τη μετάβαση στην έκτη γενιά [34].



Εικόνα 19. Κάλυψη % δικτύου 5G ανά κράτος Ε.Ε. [35]

5.3 Οι πάροχοι και η κάλυψη του δικτύου στην Ελλάδα

Η αγορά κινητής τηλεφωνίας στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριών βασικών παρόχων, οι οποίοι ανέλαβαν και την ανάπτυξη των δικτύων 5G. Πρόκειται για την Cosmote, τη Vodafone και τη Nona, καθεμία από τις οποίες ακολούθησε τη δική της στρατηγική ως προς τον ρυθμό και τη γεωγραφική προτεραιότητα της ανάπτυξης. Παρά τις επιμέρους διαφορές, οι τρεις εταιρείες κινήθηκαν προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή την όσο το δυνατόν ταχύτερη επέκταση της κάλυψης στα μεγάλα αστικά κέντρα και σταδιακά στην υπόλοιπη επικράτεια.

Η Cosmote, ως ο μεγαλύτερος πάροχος της αγοράς, προχώρησε επιθετικά στην ανάπτυξη του δικτύου της, ανακοινώνοντας υψηλά ποσοστά πληθυσμιακής κάλυψης μέσα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Η Vodafone και η Nona ακολούθησαν με τις δικές τους επενδύσεις, εστιάζοντας επίσης στην ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη και στην επέκταση προς περιφερειακές πόλεις. Ο ανταγωνισμός αυτός λειτούργησε, κατά την άποψη του συγγραφέα, θετικά για τον καταναλωτή, καθώς οδήγησε σε ταχύτερη ανάπτυξη και σε βελτίωση των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Όσον αφορά την κάλυψη, η εικόνα διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στα αστικά και στα αγροτικά ή απομακρυσμένα τμήματα της χώρας. Στις μεγάλες πόλεις, η κάλυψη 5G έχει φτάσει σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα, με τους χρήστες να απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες στα περισσότερα σημεία. Αντίθετα, σε μικρότερους οικισμούς, σε ορεινές περιοχές και σε αρκετά νησιά, η ανάπτυξη προχωρά πιο αργά, κάτι που είναι αναμενόμενο δεδομένης της γεωμορφολογίας της χώρας και του υψηλότερου κόστους εγκατάστασης υποδομών σε αραιοκατοικημένες περιοχές.

Η γεωγραφική ιδιαιτερότητα της Ελλάδας, με τα εκατοντάδες κατοικημένα νησιά και τον έντονα ορεινό χαρακτήρα της ηπειρωτικής χώρας, αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζει καθοριστικά την κατανομή

της κάλυψης. Η εγκατάσταση κεραιών και η διασύνδεσή τους με το κεντρικό δίκτυο είναι σαφώς πιο σύνθετη και δαπανηρή σε τέτοιες περιοχές, με αποτέλεσμα οι πάροχοι να δίνουν προτεραιότητα εκεί όπου η ζήτηση και η πληθυσμιακή πυκνότητα δικαιολογούν την επένδυση. Αυτό δημιουργεί έναν κίνδυνο ψηφιακού χάσματος ανάμεσα στο κέντρο και στην περιφέρεια.

Σημαντικό ρόλο στην επέκταση της κάλυψης παίζει και η συνεργασία των παρόχων με την πολιτεία. Μέσα από προγράμματα που στοχεύουν στην κάλυψη των λεγόμενων λευκών περιοχών, δηλαδή των περιοχών χωρίς επαρκή ευρυζωνική πρόσβαση, επιχειρείται να μειωθούν οι ανισότητες και να εξασφαλιστεί ότι η συνδεσιμότητα νέας γενιάς δεν θα παραμείνει προνόμιο μόνο των μεγάλων πόλεων. Η επιτυχία τέτοιων πρωτοβουλιών θα κρίνει σε μεγάλο βαθμό κατά πόσο το 5G θα αξιοποιηθεί με δίκαιο και ισόρροπο τρόπο σε όλη τη χώρα.[36]

5.4 Φάσμα συχνοτήτων και ρυθμιστικό πλαίσιο

Η αξιοποίηση του 5G βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις συχνότητες που έχουν διατεθεί στους παρόχους, καθώς από αυτές εξαρτώνται τόσο η ταχύτητα όσο και η εμβέλεια του δικτύου. Στην Ελλάδα, όπως και στην υπόλοιπη Ευρώπη, χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις ομάδες ζωνών συχνοτήτων, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες. Η κατανόηση αυτής της κατανομής βοηθά, να εξηγηθεί γιατί η εμπειρία του χρήστη διαφέρει τόσο από περιοχή σε περιοχή.

Η πρώτη ομάδα αφορά τις χαμηλές συχνότητες, με χαρακτηριστικότερη τη ζώνη των 700 MHz. Οι συχνότητες αυτές προσφέρουν εξαιρετική εμβέλεια και καλή διείσδυση μέσα σε κτίρια, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για την κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων και αγροτικών περιοχών. Το μειονέκτημά τους είναι ότι παρέχουν χαμηλότερες ταχύτητες σε σχέση με τις υψηλότερες ζώνες, ωστόσο αποτελούν τη ραχοκοκαλιά για την επίτευξη ευρείας πληθυσμιακής κάλυψης [34].

Η δεύτερη και πιο κρίσιμη ομάδα είναι η μεσαία ζώνη, με κεντρικό σημείο τη ζώνη των 3,5 GHz. Αυτή θεωρείται η καρδιά του 5G, καθώς προσφέρει μια ισορροπημένη σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα και την εμβέλεια. Οι περισσότερες εμπορικές υπηρεσίες 5G στις ελληνικές πόλεις στηρίζονται ακριβώς σε αυτή τη ζώνη, η οποία επιτρέπει υψηλές ταχύτητες με λογική κάλυψη και αποτελεί τον βασικό κορμό για την παροχή ενισχυμένης κινητής ευρυζωνικότητας (enhanced Mobile Broadband, eMBB).

Η τρίτη ομάδα αφορά τις πολύ υψηλές συχνότητες των χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter wave, mmWave), με χαρακτηριστική τη ζώνη των 26 GHz. Οι συχνότητες αυτές προσφέρουν εντυπωσιακές ταχύτητες και τεράστια χωρητικότητα, όμως η εμβέλειά τους είναι πολύ περιορισμένη και το σήμα δυσκολεύεται να διαπεράσει εμπόδια. Για τον λόγο αυτό, στην πράξη προορίζονται για συγκεκριμένα σενάρια υψηλής πυκνότητας, όπως στάδια, αεροδρόμια ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η ανάπτυξή τους στην Ελλάδα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο.

Το ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείριση του φάσματος καθορίζεται σε εθνικό επίπεδο από την ΕΕΤΤ, η οποία λειτουργεί ως η ανεξάρτητη αρχή υπεύθυνη για την εποπτεία της αγοράς τηλεπικοινωνιών. Η ΕΕΤΤ είναι αυτή που διενεργεί τις δημοπρασίες, κατανέμει τα δικαιώματα χρήσης, θέτει τους όρους κάλυψης και ελέγχει τη συμμόρφωση των παρόχων. Παράλληλα, το πλαίσιο αυτό εναρμονίζεται με τις κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε να διασφαλίζεται η συνοχή της εσωτερικής αγοράς και η αποφυγή παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κρατών.

Πέρα από την κατανομή των συχνοτήτων, το ρυθμιστικό πλαίσιο περιλαμβάνει και θέματα που αφορούν την προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος, ιδίως σε σχέση με τα όρια εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τις κεραιές. Το ζήτημα αυτό προκάλεσε κατά καιρούς ανησυχίες στην κοινή γνώμη, γι' αυτό και η ύπαρξη ενός σαφούς και αυστηρού πλαισίου ελέγχου είναι

απαραίτητη για τη διασφάλιση τόσο της ασφάλειας όσο και της εμπιστοσύνης των πολιτών απέναντι στη νέα τεχνολογία.

Συνοψίζοντας, η ορθή διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την επιτυχημένη αξιοποίηση του 5G. Ο συνδυασμός χαμηλών, μεσαίων και υψηλών ζωνών επιτρέπει στους παρόχους να καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες, ενώ το σταθερό ρυθμιστικό περιβάλλον δίνει τη βεβαιότητα που χρειάζονται για να προχωρήσουν σε μακροπρόθεσμες επενδύσεις. Η ίδια λογική διαχείρισης φάσματος αναμένεται να αποτελέσει κρίσιμο ζήτημα και για το μελλοντικό 6G, το οποίο θα κινηθεί σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες.

5.5 Εφαρμογές και τομείς αξιοποίησης του 5G

Η πραγματική αξία μιας τεχνολογίας φαίνεται όχι τόσο από τα τεχνικά της χαρακτηριστικά όσο από τους τρόπους με τους οποίους αξιοποιείται στην καθημερινότητα και στην οικονομία. Στην περίπτωση του 5G, η Ελλάδα διαθέτει αρκετούς τομείς όπου η νέα τεχνολογία μπορεί να προσφέρει ουσιαστικά οφέλη, είτε βελτιώνοντας υπάρχουσες υπηρεσίες είτε δημιουργώντας εντελώς νέες δυνατότητες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τομείς που θεωρούνται από τους πιο ενδιαφέροντες για την ελληνική πραγματικότητα, σύμφωνα με τον συγγραφέα.

Ο τουρισμός αποτελεί ίσως τον πιο προφανή τομέα, δεδομένου του ρόλου του στην ελληνική οικονομία. Η ύπαρξη γρήγορης και αξιόπιστης συνδεσιμότητας σε τουριστικούς προορισμούς, ξενοδοχεία και χώρους εστίασης βελτιώνει την εμπειρία των επισκεπτών και ταυτόχρονα ανοίγει τον δρόμο για νέες υπηρεσίες, όπως οι ψηφιακές ξεναγήσεις με χρήση επαυξημένης πραγματικότητας. Σε μια χώρα που στηρίζεται τόσο πολύ στον τουρισμό, η αξιοποίηση του 5G σε αυτόν τον τομέα μπορεί να αποφέρει σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

Ένας ακόμη τομέας με μεγάλες προοπτικές είναι η ναυτιλία, η οποία παραδοσιακά κατέχει εξέχουσα θέση στην ελληνική οικονομία. Η συνδεσιμότητα 5G στα λιμάνια μπορεί να υποστηρίξει την αυτοματοποίηση των εμπορευματικών μεταφορών, την παρακολούθηση των φορτίων σε πραγματικό χρόνο και τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών στους τερματικούς σταθμούς. Έξυπνα λιμάνια που αξιοποιούν αισθητήρες και δίκτυα νέας γενιάς μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την παραγωγικότητα και την ασφάλεια [36].

Ο αγροτικός τομέας, αν και συχνά παραβλέπεται, προσφέρει επίσης ενδιαφέρουσες δυνατότητες. Μέσω της λεγόμενης έξυπνης γεωργίας, αισθητήρες συνδεδεμένοι στο δίκτυο μπορούν να παρακολουθούν την υγρασία του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες και την κατάσταση των καλλιεργειών, επιτρέποντας στους αγρότες να λαμβάνουν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις. Σε συνδυασμό με μη επανδρωμένα αεροσκάφη και αυτοματοποιημένα μηχανήματα, το 5G μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση πόρων και στην αύξηση της παραγωγής.

Ιδιαίτερη σημασία έχει και ο τομέας της υγείας. Η χαμηλή καθυστέρηση και η αξιοπιστία του 5G καθιστούν εφικτές εφαρμογές όπως η τηλεϊατρική και η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις νησιωτικές και απομακρυσμένες περιοχές της χώρας όπου η πρόσβαση σε εξειδικευμένο ιατρικό προσωπικό είναι περιορισμένη. Σε αυτόν τον τομέα το 5G μπορεί να έχει άμεσο και από αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής των πολιτών.

Τέλος, ο τομέας της βιομηχανίας μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά μέσα από το πλαίσιο της λεγόμενης Βιομηχανίας 4.0. Η αξιοποίηση ιδιωτικών δικτύων 5G μέσα σε εργοστάσια επιτρέπει την αυτοματοποίηση των γραμμών παραγωγής, τη διασύνδεση μηχανημάτων και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών. Παρότι η εφαρμογή αυτή βρίσκεται ακόμη

σε αρχικό στάδιο στην Ελλάδα, οι δυνατότητες για αύξηση της παραγωγικότητας και της ανταγωνιστικότητας είναι σημαντικές.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το 5G δεν αποτελεί απλώς μια ταχύτερη σύνδεση στο διαδίκτυο, αλλά μια οριζόντια τεχνολογία που μπορεί να διαπεράσει σχεδόν κάθε κλάδο της οικονομίας. Το ζητούμενο, είναι να μην περιοριστεί η αξιοποίησή του στην απλή βελτίωση των υπηρεσιών προς τους καταναλωτές, αλλά να επεκταθεί σε παραγωγικές εφαρμογές που δημιουργούν προστιθέμενη αξία για ολόκληρη τη χώρα.

5.6 Έξυπνες πόλεις και ψηφιακός μετασχηματισμός

Μία από τις πιο ελκυστικές προοπτικές που ανοίγει το 5G αφορά τη δημιουργία έξυπνων πόλεων, δηλαδή αστικών περιβαλλόντων όπου η τεχνολογία αξιοποιείται για τη βελτίωση της καθημερινής ζωής των πολιτών. Η ιδέα αυτή στηρίζεται στη μαζική διασύνδεση συσκευών και αισθητήρων μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT), κάτι που το 5G υποστηρίζει ιδανικά χάρη στη δυνατότητά του να εξυπηρετεί τεράστιο αριθμό συνδέσεων ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Στην Ελλάδα, αρκετοί δήμοι έχουν ήδη ξεκινήσει πιλοτικά προγράμματα προς αυτή την κατεύθυνση. Εφαρμογές όπως η έξυπνη διαχείριση της στάθμευσης, ο φωτισμός που προσαρμόζεται αυτόματα ανάλογα με τις συνθήκες και η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα. Αν και πολλές από αυτές τις εφαρμογές μπορούν να λειτουργήσουν και με προηγούμενες τεχνολογίες, το 5G προσφέρει την κλιμάκωση και την αξιοπιστία που απαιτείται ώστε να αναπτυχθούν σε επίπεδο ολόκληρης πόλης.

Ένας τομέας όπου οι έξυπνες πόλεις μπορούν να προσφέρουν άμεσα οφέλη είναι η διαχείριση της κυκλοφορίας. Μέσω αισθητήρων και καμερών συνδεδεμένων στο δίκτυο, οι αρχές μπορούν να παρακολουθούν τη ροή των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο και να ρυθμίζουν δυναμικά τη σηματοδότηση, μειώνοντας την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τους χρόνους μετακίνησης. Σε μεγάλες πόλεις όπως η Αθήνα, όπου το κυκλοφοριακό αποτελεί χρόνιο πρόβλημα, τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να έχουν αισθητό αντίκτυπο.

Πέρα από τις επιμέρους εφαρμογές, οι έξυπνες πόλεις εντάσσονται σε μια ευρύτερη προσπάθεια ψηφιακού μετασχηματισμού του δημόσιου τομέα. Η ψηφιοποίηση των δημόσιων υπηρεσιών, η ανάπτυξη ηλεκτρονικών πλατφορμών εξυπηρέτησης των πολιτών και η αξιοποίηση δεδομένων για τη λήψη αποφάσεων αποτελούν στοιχεία που συνδέονται στενά με τη διαθεσιμότητα γρήγορης και αξιόπιστης συνδεσιμότητας. Με αυτή την έννοια, το 5G λειτουργεί ως ένας από τους θεμέλιους λίθους πάνω στους οποίους χτίζεται ο ψηφιακός μετασχηματισμός της χώρας.

Φυσικά, η ανάπτυξη έξυπνων πόλεων δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Ζητήματα όπως η προστασία των προσωπικών δεδομένων, η ασφάλεια των συστημάτων και το κόστος της απαιτούμενης υποδομής πρέπει να αντιμετωπιστούν με προσοχή. Η μαζική συλλογή δεδομένων από αισθητήρες και κάμερες εγείρει εύλογες ανησυχίες σχετικά με την ιδιωτικότητα, η εμπιστοσύνη των πολιτών μπορεί να διασφαλιστεί μόνο μέσα από διαφανείς πολιτικές και αυστηρή τήρηση του νομικού πλαισίου.

Συνολικά, οι έξυπνες πόλεις αποτελούν, κατά την άποψή του συγγραφέα, έναν από τους πιο ορατούς τρόπους με τους οποίους το 5G μπορεί να βελτιώσει την καθημερινότητα. Παρότι στην Ελλάδα οι σχετικές πρωτοβουλίες βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο, η σταδιακή ωρίμανση της τεχνολογίας και η αυξανόμενη εξοικείωση των τοπικών αρχών με αυτή δημιουργούν βάσιμες προσδοκίες για ευρύτερη υιοθέτηση τα επόμενα χρόνια.[25]

5.7 Προκλήσεις και εμπόδια στην ελληνική αγορά

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί, η αξιοποίηση του 5G στην Ελλάδα συνοδεύεται από μια σειρά προκλήσεων που δεν πρέπει να υποτιμηθούν. Η ανάδειξη αυτών των εμποδίων είναι εξίσου σημαντική με την παρουσίαση των δυνατοτήτων, καθώς μόνο μέσα από μια ρεαλιστική ματιά μπορεί κανείς να εκτιμήσει σωστά την πραγματική κατάσταση και να σχεδιάσει τα επόμενα βήματα.

Το πρώτο και ίσως πιο προφανές εμπόδιο είναι το υψηλό κόστος της απαιτούμενης υποδομής. Η εγκατάσταση πυκνού δικτύου κεραιών, η αναβάθμιση των υφιστάμενων υποδομών και η μετάβαση στην αυτόνομη αρχιτεκτονική απαιτούν σημαντικές επενδύσεις από τους παρόχους. Σε μια αγορά σχετικά μικρού μεγέθους όπως η ελληνική, η απόσβεση αυτών των επενδύσεων είναι πιο δύσκολη, κάτι που επιβραδύνει τον ρυθμό ανάπτυξης ιδιαίτερα σε περιοχές με χαμηλή ζήτηση.

Η γεωγραφία της χώρας αποτελεί έναν ακόμη παράγοντα που δυσχεραίνει την ομοιόμορφη ανάπτυξη.

Ο νησιωτικός και ορεινός χαρακτήρας της Ελλάδας καθιστά την επέκταση της κάλυψης σε ορισμένες περιοχές ιδιαίτερα δαπανηρή και τεχνικά απαιτητική. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται ένα ψηφιακό χάσμα ανάμεσα στα μεγάλα αστικά κέντρα και στην περιφέρεια, το οποίο, αν δεν αντιμετωπιστεί, ενδέχεται να διευρύνει τις ήδη υπάρχουσες ανισότητες.

Ένα λιγότερο τεχνικό αλλά εξίσου σημαντικό εμπόδιο είναι ο ψηφιακός αναλφαριθμητισμός σε τμήματα του πληθυσμού. Η ύπαρξη προηγμένων δικτύων δεν αρκεί από μόνη της εάν οι πολίτες και οι επιχειρήσεις δεν διαθέτουν τις γνώσεις και τις δεξιότητες για να τα αξιοποιήσουν. Η εκπαίδευση και η ευαισθητοποίηση γύρω από τις νέες τεχνολογίες αποτελούν, προϋπόθεση ώστε τα οφέλη του 5G να φτάσουν πραγματικά σε όλους και όχι μόνο σε μια εξοικειωμένη μερίδα χρηστών.

Σε αυτά προστίθενται και ορισμένα γραφειοκρατικά εμπόδια που σχετίζονται με τις αδειοδοτήσεις για την εγκατάσταση κεραιών. Οι χρονοβόρες διαδικασίες και οι κατά τόπους αντιδράσεις των κατοίκων, συχνά λόγω ανησυχιών για την ακτινοβολία, μπορούν να καθυστερήσουν σημαντικά την ανάπτυξη του δικτύου. Η απλοποίηση των διαδικασιών και η σωστή ενημέρωση του κοινού θα μπορούσαν να συμβάλουν στην άρση αυτών των εμποδίων χωρίς να θυσιάζεται η προστασία της δημόσιας υγείας [37].

Τέλος, υπάρχει και το ζήτημα της ασφάλειας. Καθώς όλο και περισσότερες κρίσιμες υπηρεσίες εξαρτώνται από τα δίκτυα νέας γενιάς, η προστασία τους από κυβερνοεπιθέσεις γίνεται ζωτικής σημασίας. Η εξάρτηση από συγκεκριμένους προμηθευτές εξοπλισμού εγείρει επίσης ζητήματα γεωπολιτικής και τεχνολογικής αυτονομίας, τα οποία απασχολούν τόσο την Ελλάδα όσο και την Ευρωπαϊκή Ένωση στο σύνολό της.

Συγκεντρωτικά, οι προκλήσεις αυτές δεν αναιρούν τη δυναμική του 5G, αλλά υπενθυμίζουν ότι η επιτυχημένη αξιοποίησή του απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια από πολλούς παράγοντες. Η αντιμετώπιση των οικονομικών, γεωγραφικών, κοινωνικών και θεσμικών εμποδίων θα κρίνει σε μεγάλο βαθμό κατά πόσο η χώρα θα καταφέρει να εκμεταλλευτεί πλήρως τις δυνατότητες της τεχνολογίας και να προετοιμαστεί ομαλά για τη μετάβαση στο 6G.[48]

5.8 Προοπτικές μετάβασης στο 6G στην Ελλάδα

Έχοντας εξετάσει την παρούσα κατάσταση του 5G, αξίζει να στραφούμε προς το μέλλον και να αναλογιστούμε τι μπορεί να σημαίνει για την Ελλάδα η μετάβαση στην έκτη γενιά δικτύων. Παρότι το 6G βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο διεθνώς, με την εμπορική του διάθεση να τοποθετείται χρονικά γύρω στο 2030, είναι σημαντικό η χώρα να αρχίσει να προετοιμάζεται από τώρα ώστε να μην επαναληφθεί η καθυστέρηση που παρατηρήθηκε κατά την εισαγωγή του 5G.

Η μετάβαση στο 6G δεν θα είναι απλώς μια ποσοτική αναβάθμιση, αλλά μια ποιοτική αλλαγή στη φιλοσοφία των δικτύων. Το 6G φιλοδοξεί να ενσωματώσει εγγενώς την τεχνητή νοημοσύνη, να αξιοποιήσει τις συχνότητες terahertz (THz) και να συγκλίνει τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο. Για να μπορέσει η Ελλάδα να αξιοποιήσει αυτές τις δυνατότητες, χρειάζεται έγκαιρη προετοιμασία τόσο σε επίπεδο υποδομών όσο και σε επίπεδο ανθρώπινου δυναμικού.

Καθοριστικό ρόλο σε αυτή την προετοιμασία καλούνται να παίξουν τα ελληνικά πανεπιστήμια και τα ερευνητικά κέντρα. Η συμμετοχή τους σε ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα που μελετούν τις τεχνολογίες 6G μπορεί να εξασφαλίσει τη μεταφορά τεχνογνωσίας και την ανάπτυξη εξειδικευμένου προσωπικού. Από προσωπική εμπειρία του συγγραφέα, ως φοιτητής σε σχετικό αντικείμενο, η ενεργός εμπλοκή της ακαδημαϊκής κοινότητας αποτελεί ίσως τον πιο ουσιαστικό τρόπο ώστε η χώρα να μην παραμείνει απλώς καταναλωτής τεχνολογίας, αλλά να συμμετάσχει και στην παραγωγή της.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η μετάβαση στο 6G υποστηρίζεται από συντονισμένες πρωτοβουλίες, όπως το πρόγραμμα Hexa-X, το οποίο θεωρείται η εμβληματική ευρωπαϊκή προσπάθεια για τον καθορισμό του οράματος και της αρχιτεκτονικής της επόμενης γενιάς[49]. Η συμμετοχή της Ελλάδας σε τέτοιες πρωτοβουλίες, μέσω εταιρειών, πανεπιστημίων και ερευνητικών φορέων, μπορεί να εξασφαλίσει ότι η χώρα θα ευθυγραμμιστεί εξαρχής με τις διεθνείς εξελίξεις και τα πρότυπα που διαμορφώνονται [38].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι η υποδομή του 5G, ιδιαίτερα η πλήρως αυτόνομη αρχιτεκτονική του, αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία θα οικοδομηθεί το 6G. Οι επενδύσεις που γίνονται σήμερα σε δίκτυα, σε κέντρα δεδομένων και σε τεχνολογίες virtualization δεν θα είναι ανώφελες, αλλά θα διευκολύνουν τη μελλοντική μετάβαση. Με αυτή την έννοια, η σωστή και πλήρης αξιοποίηση του 5G αποτελεί την καλύτερη δυνατή προετοιμασία για το 6G.[50]

Βεβαίως, οι προκλήσεις που αναφέρθηκαν για το 5G θα ισχύουν, πιθανότατα εντονότερα, εξίσου για το 6G. Οι ακόμη υψηλότερες συχνότητες θα απαιτήσουν πυκνότερα δίκτυα, το κόστος των επενδύσεων θα είναι μεγαλύτερο και οι απαιτήσεις σε εξειδικευμένο προσωπικό θα αυξηθούν. Ωστόσο, εάν η χώρα αξιοποιήσει την εμπειρία που αποκτά σήμερα και σχεδιάσει έγκαιρα τη στρατηγική της, μπορεί να αντιμετωπίσει τη μετάβαση με μεγαλύτερη ωριμότητα από ό,τι στο παρελθόν.

Συμπερασματικά, οι προοπτικές μετάβασης στο 6G είναι αισιόδοξες, υπό την προϋπόθεση ότι θα υπάρξει συστηματική προετοιμασία. Η Ελλάδα έχει την ευκαιρία να μάθει από τα λάθη και τις καθυστερήσεις του παρελθόντος και να τοποθετηθεί πιο δυναμικά στον διεθνή χάρτη της επόμενης γενιάς δικτύων, αξιοποιώντας τόσο το ανθρώπινο δυναμικό της όσο και τη συμμετοχή της στις ευρωπαϊκές εξελίξεις.

Η πορεία προς το 6G δεν αφορά μεμονωμένες χώρες, αλλά εντάσσεται σε ένα ευρύτερο ευρωπαϊκό πλαίσιο έρευνας και τυποποίησης. Πρωτοβουλίες όπως η κοινή επιχείρηση για τα «Εξυπνα Δίκτυα και Υπηρεσίες» (Smart Networks and Services Joint Undertaking – SNS JU) και τα συναφή ερευνητικά έργα θέτουν τις κοινές προδιαγραφές και τους στόχους της επόμενης γενιάς. Κατά την άποψη του συγγραφέα, η έγκαιρη συμμετοχή ελληνικών πανεπιστημίων, ερευνητικών κέντρων και παρόχων σε αυτές τις συνεργασίες αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ώστε η χώρα να μην ακολουθεί απλώς τις εξελίξεις, αλλά να συμβάλλει ενεργά σε αυτές.

5.9 Στρατηγική και χρηματοδότηση

Η ανάπτυξη και η αξιοποίηση των δικτύων νέας γενιάς δεν είναι μόνο τεχνικό ζήτημα, αλλά εξαρτάται καθοριστικά από τη στρατηγική και τη χρηματοδότηση που τη στηρίζουν. Στην Ελλάδα, η κατεύθυνση αυτή έχει αποτυπωθεί σε επίσημα κείμενα στρατηγικής και έχει συνδεθεί με σημαντικά χρηματοδοτικά

εργαλεία, τόσο εθνικά όσο και ευρωπαϊκά, γεγονός που αναβαθμίζει τη σοβαρότητα με την οποία αντιμετωπίζεται το ζήτημα.

Κεντρικό ρόλο στον σχεδιασμό αυτό κατέχει η Βίβλος Ψηφιακού Μετασχηματισμού, ένα κείμενο που χαράσσει τη συνολική στρατηγική της χώρας για την ψηφιακή της πορεία. Μέσα σε αυτό περιγράφονται οι στόχοι για τη συνδεσιμότητα, την ανάπτυξη δικτύων υψηλών ταχυτήτων και την αξιοποίηση τεχνολογιών όπως το 5G σε διάφορους τομείς. Η ύπαρξη ενός τέτοιου συνεκτικού πλαισίου είναι σημαντική, καθώς δίνει κατεύθυνση και συντονίζει τις επιμέρους δράσεις των φορέων.

Σημαντικότατο εργαλείο χρηματοδότησης αποτελεί το Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας, μέσω του οποίου διοχετεύονται ευρωπαϊκοί πόροι για την υλοποίηση έργων ψηφιακού μετασχηματισμού. Μέρος αυτών των κονδυλίων κατευθύνεται στην ανάπτυξη υποδομών συνδεσιμότητας, στην κάλυψη περιοχών με ανεπαρκή πρόσβαση και στην προώθηση εφαρμογών που αξιοποιούν τα δίκτυα νέας γενιάς. Η αξιοποίηση αυτών των πόρων με αποδοτικό τρόπο είναι κρίσιμη για την επιτάχυνση της ανάπτυξης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα δράσης αποτελούν τα προγράμματα που στοχεύουν στην ανάπτυξη υποδομών σε διαδρόμους μεταφορών, όπως αυτοκινητόδρομους και σιδηροδρομικές γραμμές, ώστε να εξασφαλιστεί αδιάλειπτη κάλυψη 5G για εφαρμογές όπως η συνδεδεμένη και αυτόνομη οδήγηση. Παράλληλα, υπάρχουν δράσεις που αφορούν την ενίσχυση της συνδεσιμότητας σε νησιωτικές και απομακρυσμένες περιοχές, με στόχο τη μείωση του ψηφιακού χάσματος [37].

Πέρα από τη χρηματοδότηση των υποδομών, η στρατηγική περιλαμβάνει και την ανάπτυξη δεξιοτήτων. Η επένδυση στην εκπαίδευση και την κατάρτιση, ώστε να υπάρξει επαρκές εξειδικευμένο προσωπικό για τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συντήρηση των δικτύων, είναι εξίσου σημαντική με την επένδυση στον εξοπλισμό. Χωρίς το κατάλληλο ανθρώπινο δυναμικό, ακόμη και η πιο προηγμένη υποδομή κινδυνεύει να μείνει αναξιοποίητη.[51]

Ένα ζήτημα που αξίζει προσοχής είναι η ανάγκη για συνέχεια και σταθερότητα στη στρατηγική. Οι επενδύσεις σε δίκτυα είναι μακροπρόθεσμες και απαιτούν ένα προβλέψιμο περιβάλλον. Οι συχνές αλλαγές κατεύθυνσης ή οι καθυστερήσεις στην υλοποίηση των προγραμμάτων μπορούν να υπονομεύσουν την εμπιστοσύνη των επενδυτών και να επιβραδύνουν την πρόοδο. Γι' αυτό, η τήρηση των χρονοδιαγραμμάτων και η συνεπής εφαρμογή του σχεδιασμού είναι, εξίσου σημαντικές με το ύψος της χρηματοδότησης.

Συνολικά, η σύνδεση της ανάπτυξης του 5G με μια σαφή εθνική στρατηγική και με ισχυρά χρηματοδοτικά εργαλεία αποτελεί θετική εξέλιξη. Εάν οι πόροι αυτοί αξιοποιηθούν αποτελεσματικά και με διαφάνεια, μπορούν να αποτελέσουν τον μοχλό που θα επιτρέψει στην Ελλάδα όχι μόνο να ολοκληρώσει την ανάπτυξη του 5G, αλλά και να προετοιμαστεί στέρεα για τη μετάβαση στην επόμενη γενιά δικτύων.[52]

5.10 Επίλογος

Στο κεφάλαιο αυτό δόθηκε μια συνολική εικόνα της αξιοποίησης του 5G στην Ελλάδα και των προοπτικών που διαγράφονται για τη μετάβαση στο 6G.

Αυτό που προκύπτει ως βασικό συμπέρασμα είναι ότι η Ελλάδα, παρά τις αρχικές καθυστερήσεις, έχει καταφέρει να εδραιώσει το 5G και να θέσει τις βάσεις για την ευρύτερη αξιοποίησή του.

Ταυτόχρονα όμως, οι προκλήσεις παραμένουν υπαρκτές. Το κόστος των υποδομών, η γεωγραφική ιδιαιτερότητα της χώρας, ο ψηφιακός αναλφαριθμητισμός και τα ζητήματα ασφάλειας απαιτούν συντονισμένα και επίμονα προσπάθεια.

Όσον αφορά το μέλλον, η σωστή αξιοποίηση του 5G αποτελεί την καλύτερη προετοιμασία για το 6G. Η έγκαιρη συμμετοχή στις ευρωπαϊκές ερευνητικές πρωτοβουλίες, η αξιοποίηση των διαθέσιμων χρηματοδοτικών εργαλείων και η επένδυση στο ανθρώπινο δυναμικό μπορούν να εξασφαλίσουν ότι η χώρα θα προσεγγίσει τη νέα γενιά δικτύων με μεγαλύτερη ωριμότητα και αυτοπεποίθηση. Αυτή είναι η πιο αισιόδοξη αλλά και ρεαλιστική συνάμα ματιά .

Κεφάλαιο 6ο: Προτάσεις και απόψεις του συγγραφέα

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προσωπικές απόψεις και προτάσεις του συγγραφέα, όπως αυτές διαμορφώθηκαν μέσα από τη μελέτη και ανάλυση που προηγήθηκε στην παρούσα εργασία. Αντικείμενο του κεφαλαίου είναι η κριτική αποτίμηση των ευρημάτων, η ανάδειξη σημείων που χρήζουν περαιτέρω προσοχής, καθώς και η διατύπωση συγκεκριμένων προτάσεων που θα μπορούσαν να συμβάλουν στην αξιοποίηση των τεχνολογικών εξελίξεων που εξετάστηκαν. Στόχος είναι η σύνδεση της θεωρητικής και ερευνητικής προσέγγισης με πρακτικές κατευθύνσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε επιχειρηματικό ή θεσμικό επίπεδο.

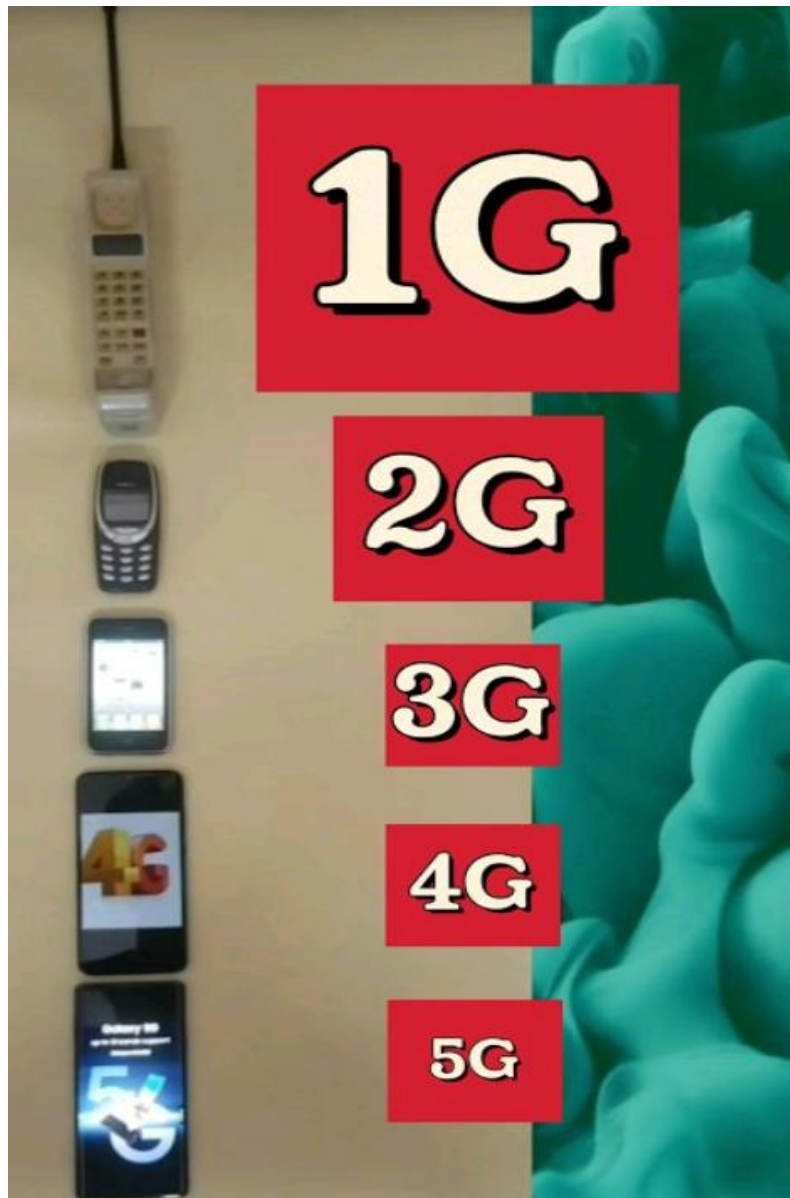
6.2 Εξέλιξη δικτύων επίγειων και ασυρμάτων

Η συνολική εξέλιξη των δικτύων αποτελεί μια συνεχή και σωρευτική διαδικασία, στην οποία κάθε νέο στάδιο δεν ακυρώνει το προηγούμενο αλλά οικοδομείται πάνω σε αυτό. Από τις θεμελιώδεις έννοιες της επικοινωνίας και της τηλεπικοινωνίας μέχρι τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, διαπιστώνεται ότι η μετάδοση της πληροφορίας στηρίζεται σε σταθερές αρχές -πομπό, κανάλι και δέκτη- οι οποίες παρέμειναν αμετάβλητες στον πυρήνα τους, ενώ μεταβλήθηκαν ριζικά τα τεχνολογικά μέσα υλοποίησής τους. Καθοριστικό ορόσημο υπήρξε η μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή αναπαράσταση, η οποία προσέφερε υψηλότερη ποιότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια και οδήγησε στη σταδιακή σύγκλιση τηλεπικοινωνιών και πληροφορικής.

Η μελέτη των δικτύων υπολογιστών και των μοντέλων αναφοράς κατέδειξε τη σημασία της δομημένης οργάνωσης της επικοινωνίας. Το μοντέλο OSI προσέφερε ένα κοινό εννοιολογικό πλαίσιο επτά επιπέδων, ενώ η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP αποτέλεσε την πρακτική υλοποίηση πάνω στην οποία στηρίχθηκε το Διαδίκτυο. Η σύνδεση των παραπάνω δύο γεγονότων, σε συνδυασμό με τους μηχανισμούς αξιόπιστης μετάδοσης -επιβεβαίωση λήψης, επαναμετάδοση και έλεγχο ροής-συγκροτεί το θεμέλιο πάνω στο οποίο οικοδομούνται όλες οι σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων δικτύων που εξετάστηκαν στη συνέχεια.

Η ιστορική ανασκόπηση της κινητής τηλεφωνίας ανέδειξε μια πορεία διαδοχικών τεχνολογικών αλμάτων. Τα δίκτυα πρώτης γενιάς (1G), αμιγώς αναλογικά, καθιέρωσαν την έννοια της κινητής επικοινωνίας και των κυψελών, παρά τους περιορισμούς σε ποιότητα και ασφάλεια. Η δεύτερη γενιά (2G), με κυρίαρχο πρότυπο το GSM, εισήγαγε την ψηφιακή μετάδοση, την κρυπτογράφηση και τις SMS. Η τρίτη γενιά (3G) μετέτρεψε το κινητό σε ουσιαστικό μέσο πρόσβασης στο Διαδίκτυο, ενώ η τέταρτη γενιά (4G), με τεχνολογία LTE, εδραίωσε την κινητή ευρυζωνικότητα μέσω αρχιτεκτονικής βασισμένης αποκλειστικά στο πρωτόκολλο Διαδικτύου IP.

Η πέμπτη γενιά (5G) σηματοδότησε μια ποιοτική στροφή, καθώς δεν απευθύνεται μόνο σε ανθρώπους-χρήστες αλλά και σε συσκευές και αυτόνομα συστήματα, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα ενισχυμένη ευρυζωνικότητα, κρίσιμες εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης και μαζική διασύνδεση (IoT). Η εξέλιξη του προς το 5G-Advanced, σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως η virtualization δικτύου και το network slicing, λειτουργεί ως γέφυρα προς την έκτη γενιά.



Εικόνα 20. Η εξέλιξη των γενεών μέσα από τα κινητά τηλέφωνα

6.3 Τεχνολογικά πλεονεκτήματα 6G σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές

Έχοντας κάνει προηγουμένως μια ολοκληρωμένη τεχνική ανάλυση τεχνολογιών των δικτύων 5G και 6G, φαίνεται ότι η μετάβαση από τη μία γενιά στην άλλη δεν συνιστά απλή ποσοτική βελτίωση, αλλά ουσιαστική αλλαγή στη φιλοσοφία σχεδιασμού. Ενώ το 5G ενοποίησε διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών κάτω από ένα κοινό δίκτυο, το 6G φιλοδοξεί να ενσωματώσει εγγενώς την AI, να αξιοποιήσει νέες ζώνες φάσματος και να συγκλίνει τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο.

Στον άξονα των επιδόσεων, η διαφορά είναι εντυπωσιακή. Το 5G προσφέρει θεωρητικές ταχύτητες έως και 10–20 Gbps, με το 6G να στοχεύει σε ρυθμούς της τάξης του 1 Tbps, αξιοποιώντας τις ζώνες THz. Αντίστοιχα, το latency μειώνεται από το ~1 ms του 5G σε επίπεδα μικροδευτερολέπτων (~1–100 μs) στο 6G, καθιστώντας εφικτές εφαρμογές με εξαιρετικά αυστηρές απαιτήσεις απόκρισης, όπως η απτική επικοινωνία και οι διεπαφές εγκεφάλου-υπολογιστή.

Σημαντική διαφοροποίηση εντοπίζεται στη χωρητικότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Το 5G υποστηρίζει έως ένα εκατομμύριο συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, καλύπτοντας τις ανάγκες του IoT, ενώ το 6G στοχεύει σε δεκαπλάσια πυκνότητα. Παράλληλα, ενώ στο 5G η εξοικονόμηση ενέργειας αντιμετωπίστηκε ως μεταγενέστερη βελτιστοποίηση, το 6G σχεδιάζεται με την ενεργειακή αποδοτικότητα ως θεμελιώδη αρχή, αντιμετωπίζοντας τη βιωσιμότητα ως σχεδιαστική απαίτηση.

Σε επίπεδο φάσματος και αρχιτεκτονικής, το 5G βασίζεται κυρίως σε ζώνες sub-6GHz και mmWave με μια κατά κύριο λόγο επίγεια υποδομή, ενώ το 6G επεκτείνεται στις συχνότητες THz και υιοθετεί μια τρισδιάστατη αρχιτεκτονική που ενοποιεί επίγεια, εναέρια και δορυφορικά δίκτυα. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει επίσης η ΑΙ. Στο 5G λειτουργεί ως συμπληρωματικό εργαλείο, ενώ στο 6G αποτελεί θεμελιώδες δομικό στοιχείο, στο πλαίσιο της φιλοσοφίας του AI-native δικτύου που επιτρέπει αυτόνομη, μηδενικής επαφής διαχείριση.

Ως προς τις εφαρμογές, το 5G δομήθηκε γύρω από τις κατηγορίες eMBB, URLLC και mMTC, ενώ το 6G διευρύνει το πλαίσιο εισάγοντας σενάρια όπως η ολογραφική επικοινωνία, η εκτεταμένη πραγματικότητα, οι digital twins και η ενσωματωμένη αίσθηση και επικοινωνία. Το βασικό πλεονέκτημα του 5G παραμένει η εμπορική του ωριμότητα, ενώ το 6G προσφέρει ένα ριζικά ισχυρότερο όραμα, το οποίο όμως βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές, οικονομικές και ενεργειακές προκλήσεις.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι το 6G δεν αποτελεί τεχνολογία αντικατάστασης αλλά συνέχειας. Οικοδομείται πάνω στις ήδη υπάρχουσες υποδομές και στις γνώσεις του 5G. Τα τεχνολογικά του πλεονεκτήματα -υπερυψηλές ταχύτητες, ελάχιστο latency, μαζική πυκνότητα συσκευών, αξιοποίηση των ζωνών THz, ενοποιημένη αρχιτεκτονική NTN και εγγενής ενσωμάτωση της ΑΙ - το καθιστούν ικανό να υποστηρίξει εντελώς νέες μορφές αλληλεπίδρασης. Ταυτόχρονα, οι προκλήσεις στην τυποποίηση, τη διαχείριση του φάσματος, την ασφάλεια και την ενεργειακή βιωσιμότητα υπενθυμίζουν ότι η πλήρης αξιοποίηση του οράματος αυτού αποτελεί μια μακροπρόθεσμη και σταδιακή διαδικασία, κατά την οποία τα δίκτυα 5G και 6G θα συνυπάρχουν για σημαντικό χρονικό διάστημα.

6.4 Δίκτυα του Μέλλοντος και ΑΙ

Η ΑΙ αναδεικνύεται σε καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση των δικτύων του μέλλοντος. Η ουσιαστική διαφορά των δικτύων 6G έναντι των προηγούμενων γενεών έγκειται στο ότι η ΑΙ δεν αντιμετωπίζεται ως εξωτερικό εργαλείο υποστήριξης, αλλά ως εγγενές συστατικό της ίδιας της αρχιτεκτονικής του δικτύου AI-native. Ενώ στα δίκτυα 5G η ΑΙ εφαρμόστηκε κυρίως ως ένα επιπρόσθετο επίπεδο βελτιστοποίησης πάνω σε υπάρχουσες υποδομές, στα δίκτυα 6G ενσωματώνεται εξ αρχής στον σχεδιασμό, καθιστώντας το δίκτυο ικανό να αυτοβελτιστοποιείται και να προσαρμόζεται δυναμικά σε πραγματικό χρόνο.

Στο πλαίσιο αυτό, οι αλγόριθμοι ML αναλαμβάνουν αυτόματα κρίσιμες λειτουργίες, όπως τη διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων, την εξισορρόπηση του φόρτου και την πρόβλεψη πιθανών βλαβών πριν αυτές επηρεάσουν τη λειτουργία του δικτύου. Η δυνατότητα ανάλυσης τεράστιων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στο δίκτυο να λαμβάνει αποφάσεις για την κατανομή των πόρων με τρόπο πολύ πιο αποδοτικό από ό,τι οι παραδοσιακοί, προκαθορισμένοι αλγόριθμοι των προηγούμενων γενεών.

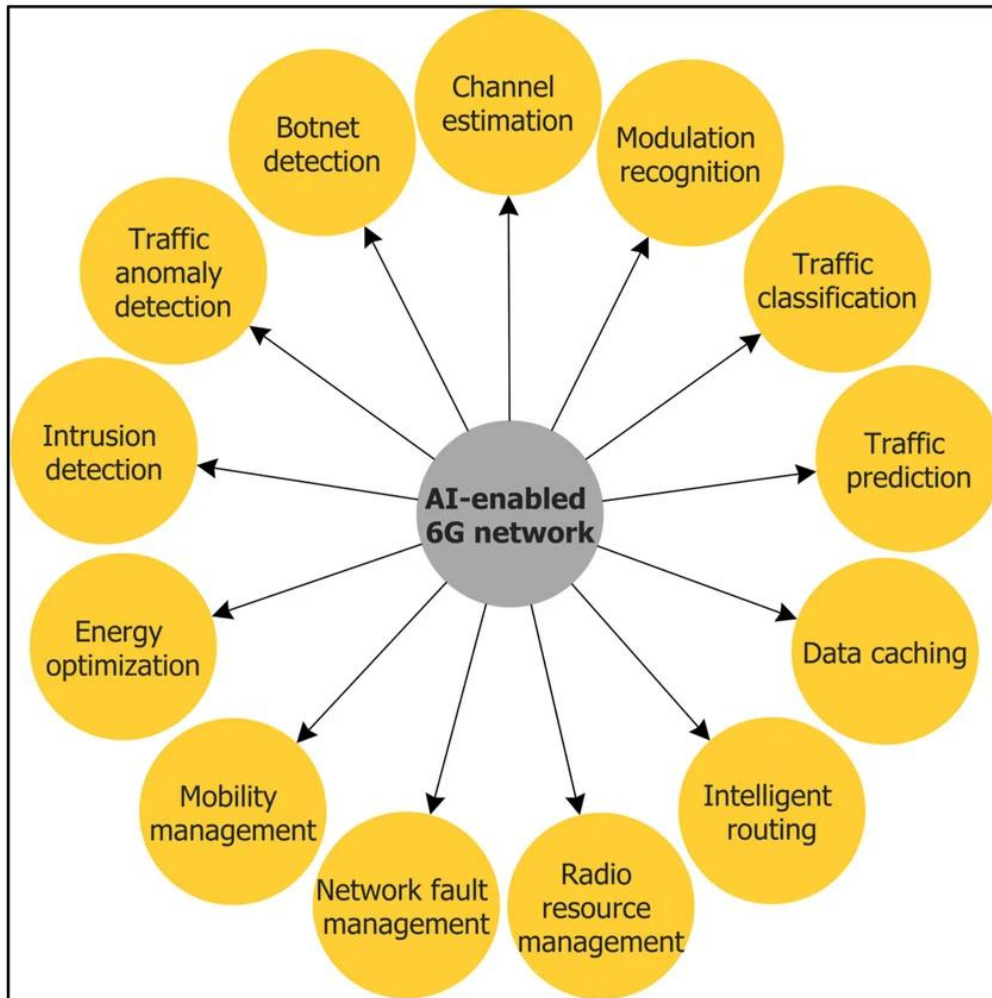
Καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα του μέλλοντος αναμένεται να διαδραματίσει η αυτοματοποιημένη, αυτόνομη διαχείριση του δικτύου, η οποία συχνά περιγράφεται με τον όρο «μηδενικής επαφής» (zero-touch). Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, όπου πολλές λειτουργίες διαχείρισης πραγματοποιούνται χειροκίνητα ή μέσω προκαθορισμένων διαδικασιών, στα δίκτυα 6G η ΑΙ

αναλαμβάνει μεγάλο μέρος αυτών των διαδικασιών, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση και βελτιστοποίηση χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Η εξέλιξη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα μελλοντικά δίκτυα θα κληθούν να υποστηρίξουν έναν τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών στο πλαίσιο του IoT. Η αυτοματοποίηση των διαδικασιών διαχείρισης, πέρα από τη βελτίωση της αποδοτικότητας, συμβάλλει και στη μείωση του λειτουργικού κόστους των τηλεπικοινωνιακών υποδομών, καθιστώντας βιώσιμη τη λειτουργία δικτύων ολοένα μεγαλύτερης κλίμακας και πολυπλοκότητας.

Η ολοένα βαθύτερη ενσωμάτωση της ΑΙ στις τηλεπικοινωνιακές υποδομές εγείρει ωστόσο σημαντικά ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας. Καθώς όλο και περισσότερες συσκευές και συστήματα συνδέονται στο διαδίκτυο και τεράστιοι όγκοι προσωπικών δεδομένων υφίστανται επεξεργασία από αυτοματοποιημένα συστήματα, οι κίνδυνοι που σχετίζονται με κυβερνοεπιθέσεις και παραβίαση δεδομένων αυξάνονται σημαντικά. Η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας αναδεικνύονται έτσι σε κρίσιμα ζητήματα για την υπεύθυνη ανάπτυξη των δικτύων επόμενης γενιάς.

Συνεπώς, η σύζευξη της τεχνητής νοημοσύνης με τα δίκτυα του μέλλοντος δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική εξέλιξη, αλλά μια μετάβαση που θα επηρεάσει βαθιά τόσο τις ηθικές παραδοχές όσο και το νομοθετικό πλαίσιο των επόμενων ετών. Η ανάθεση αυτόνομων αποφάσεων σε αλγόριθμους, η διαχείριση ευαίσθητων δεδομένων και η διαφάνεια στη λειτουργία των ευφών δικτύων καθιστούν αναγκαία τη διαμόρφωση κατάλληλων κανονιστικών πλαισίων, ώστε η αξιοποίηση των δυνατοτήτων της ΑΙ να συμβαδίζει με τον σεβασμό των δικαιωμάτων των χρηστών και τη διασφάλιση της κοινωνικής εμπιστοσύνης.



Εικόνα 21. AI enabled 6G networks [41]

6.5 Προκλήσεις ως προς την υλοποίηση του 6G

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που αναμένεται να προσφέρει η τεχνολογία 6G, η μετάβαση προς τη νέα αυτή γενιά δικτύων δεν αποτελεί μια απλή διαδικασία. Όπως συνέβη και στις προηγούμενες γενιές κινητών επικοινωνιών, η ανάπτυξη του 6G συνοδεύεται από μια σειρά τεχνολογικών, οικονομικών και κοινωνικών προκλήσεων, οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να καταστεί δυνατή η ευρεία υιοθέτησή του. Η επιτυχία του 6G δεν θα εξαρτηθεί μόνο από τις θεωρητικές επιδόσεις που παρουσιάζονται σε ερευνητικά άρθρα και τεχνικές μελέτες, αλλά κυρίως από το κατά πόσο οι δυνατότητες αυτές θα μπορέσουν να εφαρμοστούν στην πράξη και να αξιοποιηθούν από την κοινωνία και την αγορά.

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις αφορά το ίδιο το τεχνολογικό υπόβαθρο των δικτύων 6G. Οι περισσότερες προτάσεις για την επόμενη γενιά επικοινωνιών βασίζονται στη χρήση συχνοτήτων πολύ υψηλότερων από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι συχνότητες αυτές μπορούν να προσφέρουν εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, ωστόσο παρουσιάζουν και αρκετούς περιορισμούς. Η μετάδοση σήματος σε τόσο υψηλές συχνότητες επηρεάζεται περισσότερο από φυσικά εμπόδια, καιρικές συνθήκες και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αυτό σημαίνει ότι θα

απαιτηθούν νέες τεχνολογίες κεραιών, νέα συστήματα αναμετάδοσης και μεγαλύτερη πυκνότητα τηλεπικοινωνιακών υποδομών προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη κάλυψη.

Παράλληλα, ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα αποτελεί η ενεργειακή κατανάλωση των μελλοντικών δικτύων. Η συνεχής αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ και τηλεπικοινωνιακούς πόρους. Αν και οι τεχνολογίες 6G σχεδιάζονται με γνώμονα τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, η λειτουργία δισεκατομμυρίων συσκευών, αισθητήρων και έξυπνων συστημάτων δημιουργεί σημαντικές απαιτήσεις σε ενέργεια. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη πιο «πράσινων» τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών αναμένεται να αποτελέσει βασικό στόχο των ερευνητών και των κατασκευαστών τα επόμενα χρόνια.

Επιπλέον, η υλοποίηση των δικτύων 6G συνδέεται άμεσα με σημαντικές οικονομικές επενδύσεις. Η αναβάθμιση των υφιστάμενων υποδομών και η ανάπτυξη νέων δικτύων θα απαιτήσουν μεγάλα χρηματικά ποσά από τους παρόχους τηλεπικοινωνιών και τις κυβερνήσεις. Η εμπειρία από την ανάπτυξη των δικτύων 5G έδειξε ότι η πλήρης κάλυψη μιας χώρας δεν επιτυγχάνεται άμεσα, αλλά απαιτεί αρκετά χρόνια επενδύσεων και τεχνολογικής ωρίμανσης. Επομένως, είναι πιθανό και στην περίπτωση του 6G να υπάρξει μια μεταβατική περίοδος κατά την οποία οι δυνατότητες της νέας τεχνολογίας θα είναι διαθέσιμες μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές ή εφαρμογές.

Ένα ακόμη σημαντικό θέμα αφορά την ασφάλεια και την προστασία των προσωπικών δεδομένων. Καθώς τα δίκτυα γίνονται όλο και πιο σύνθετα και διασυνδεδεμένα, οι πιθανοί κίνδυνοι κυβερνοεπιθέσεων αυξάνονται. Στο περιβάλλον του 6G αναμένεται να λειτουργούν ταυτόχρονα τεράστιοι αριθμοί συσκευών, πολλές από τις οποίες θα ανταλλάσσουν ευαίσθητες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Η προστασία αυτών των δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία των μελλοντικών δικτύων. Η ανάπτυξη προηγμένων μηχανισμών κρυπτογράφησης και συστημάτων ανίχνευσης απειλών θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της αξιοπιστίας των τηλεπικοινωνιακών υποδομών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του 6G με την τεχνητή νοημοσύνη. Αν και η ενσωμάτωση τεχνολογιών ΑΙ αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργία των δικτύων, δημιουργεί παράλληλα νέα ερωτήματα σχετικά με τη διαφάνεια των αποφάσεων που λαμβάνονται αυτόματα από τα συστήματα. Καθώς όλο και περισσότερες λειτουργίες θα βασίζονται σε αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, θα είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι οι αποφάσεις αυτές είναι αξιόπιστες, δίκαιες και ασφαλείς για τους χρήστες.

Τέλος, δεν πρέπει να παραβλέπεται και ο ανθρώπινος παράγοντας. Η ιστορία των τηλεπικοινωνιών έχει δείξει ότι η επιτυχία μιας νέας τεχνολογίας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της. Πολλές φορές η πραγματική αξιοποίηση μιας τεχνολογίας καθορίζεται από τις ανάγκες της κοινωνίας, την αποδοχή της από τους χρήστες και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής της στην καθημερινή ζωή. Το 6G θα πρέπει να αποδείξει στην πράξη ότι μπορεί να προσφέρει ουσιαστικά οφέλη και όχι μόνο θεωρητικές βελτιώσεις σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές δικτύων.

Συνοψίζοντας, η μετάβαση προς το 6G αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές προκλήσεις των επόμενων δεκαετιών. Οι δυνατότητες που υπόσχεται είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακές, ωστόσο η πρακτική υλοποίησή τους προϋποθέτει την επίλυση σύνθετων τεχνολογικών, οικονομικών και κοινωνικών ζητημάτων. Η επιτυχία της νέας γενιάς δικτύων δεν θα κριθεί μόνο από τις επιδόσεις που θα επιτευχθούν στα εργαστήρια, αλλά κυρίως από την ικανότητά της να καλύψει πραγματικές ανάγκες και να προσφέρει ουσιαστική αξία στους πολίτες, στις επιχειρήσεις και στην κοινωνία συνολικά.

6.6 Η θέση της Ελλάδας στη μετάβαση από το 5G στο 6G

Η ανάπτυξη των δικτύων πέμπτης γενιάς τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ελληνικής οικονομίας και κοινωνίας. Η Ελλάδα ακολούθησε τη διεθνή τάση ανάπτυξης των δικτύων 5G και οι μεγάλοι πάροχοι κινητών επικοινωνιών προχώρησαν σε σημαντικές επενδύσεις για την επέκταση της κάλυψης και την παροχή νέων υπηρεσιών στους πολίτες και στις επιχειρήσεις. Παρότι η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη σε φάση περαιτέρω ανάπτυξης και αξιοποίησης, η συζήτηση γύρω από το 6G έχει ήδη ξεκινήσει σε παγκόσμιο επίπεδο, δημιουργώντας ερωτήματα σχετικά με τον ρόλο που θα μπορούσε να διαδραματίσει η Ελλάδα στη νέα αυτή τεχνολογική μετάβαση.

Η μέχρι σήμερα πορεία των δικτύων 5G στη χώρα δείχνει ότι έχουν γίνει σημαντικά βήματα προόδου. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι έχουν επεκτείνει την κάλυψη σε μεγάλο μέρος του πληθυσμού, ενώ παράλληλα έχουν αναπτυχθεί πιλοτικές εφαρμογές σε τομείς όπως η υγεία, οι μεταφορές, η βιομηχανία και οι έξυπνες πόλεις. Ωστόσο, η πραγματική αξιοποίηση των δυνατοτήτων του 5G παραμένει σε αρκετές περιπτώσεις περιορισμένη. Για τον μέσο χρήστη, η μεγαλύτερη διαφορά εντοπίζεται κυρίως στις υψηλότερες ταχύτητες πρόσβασης στο διαδίκτυο, ενώ πολλές από τις πιο προηγμένες εφαρμογές που είχαν αρχικά συνδεθεί με το 5G δεν έχουν ακόμη περάσει σε ευρεία κλίμακα χρήσης.

Η κατάσταση αυτή αποτελεί σημαντικό παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη συζήτηση για το 6G. Η Ελλάδα, όπως και πολλές άλλες ευρωπαϊκές χώρες, καλείται να ισορροπήσει ανάμεσα στην ανάγκη τεχνολογικής προόδου και στη βέλτιστη αξιοποίηση των επενδύσεων που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί για τα δίκτυα 5G. Η μετάβαση προς το 6G δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως μια διαδικασία άμεσης αντικατάστασης των υφιστάμενων δικτύων, αλλά ως μια σταδιακή εξέλιξη που θα πραγματοποιηθεί σε βάθος χρόνου.

Παράλληλα, η νέα γενιά δικτύων μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές ευκαιρίες για τη χώρα. Η ανάπτυξη εφαρμογών που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη, στα μεγάλα δεδομένα, στην αυτοματοποίηση και στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων αναμένεται να επηρεάσει πολλούς παραγωγικούς τομείς της οικονομίας. Η βιομηχανία, ο τουρισμός, η ναυτιλία, η αγροτική παραγωγή και οι υπηρεσίες υγείας αποτελούν τομείς στους οποίους η αξιοποίηση προηγμένων τηλεπικοινωνιακών υποδομών μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη. Ειδικά σε μια χώρα με έντονο γεωγραφικό κατακερματισμό, όπως η Ελλάδα, οι δυνατότητες που προσφέρουν τα μελλοντικά δίκτυα για αξιόπιστη και ταχεία επικοινωνία μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των αποστάσεων και στη βελτίωση της πρόσβασης σε υπηρεσίες.

Βέβαια, η επιτυχής μετάβαση προς το 6G προϋποθέτει και την αντιμετώπιση ορισμένων σημαντικών προκλήσεων. Απαιτούνται συνεχείς επενδύσεις σε τηλεπικοινωνιακές υποδομές, ενίσχυση της έρευνας και της καινοτομίας, καθώς και η ανάπτυξη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού που θα μπορεί να υποστηρίξει τις τεχνολογίες του μέλλοντος. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να υπάρξει συνεργασία μεταξύ πανεπιστημίων, ερευνητικών κέντρων, επιχειρήσεων και δημόσιων φορέων, ώστε η χώρα να συμμετάσχει ενεργά στις διεθνείς εξελίξεις και να μην περιοριστεί αποκλειστικά στον ρόλο του τελικού χρήστη νέων τεχνολογιών.

Συμπερασματικά, η Ελλάδα βρίσκεται σήμερα σε μια μεταβατική περίοδο κατά την οποία συνεχίζεται η ανάπτυξη και αξιοποίηση των δικτύων 5G, ενώ παράλληλα διαμορφώνονται οι συνθήκες για την επόμενη γενιά επικοινωνιών. Η πορεία προς το 6G δεν θα είναι άμεση ούτε εύκολη, ωστόσο μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές προοπτικές για την οικονομική ανάπτυξη, την τεχνολογική πρόοδο και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Η έγκαιρη προετοιμασία και ο σωστός σχεδιασμός θα

αποτελέσουν βασικούς παράγοντες ώστε η χώρα να αξιοποιήσει αποτελεσματικά τις δυνατότητες που θα προσφέρει το νέο ψηφιακό περιβάλλον.

6.7 Μελλοντικές εφαρμογές και προοπτικές ανάπτυξης

Η ανάπτυξη των δικτύων 6G αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι επικοινωνούν, εργάζονται και αλληλεπιδρούν με την τεχνολογία τις επόμενες δεκαετίες. Παρότι η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, οι δυνατότητες που παρουσιάζονται από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα και τη βιομηχανία δείχνουν ότι το 6G δεν θα περιοριστεί μόνο στη βελτίωση των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων. Αντίθετα, αναμένεται να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και εφαρμογών που μέχρι σήμερα θεωρούνται ιδιαίτερα δύσκολες ή ακόμη και αδύνατες να υλοποιηθούν σε μεγάλη κλίμακα. Ένας από τους σημαντικότερους τομείς που αναμένεται να επηρεαστούν είναι η υγεία. Η συνεχής πρόοδος των τηλεπικοινωνιών δημιουργεί νέες δυνατότητες στον τομέα της τηλεϊατρικής και της απομακρυσμένης παρακολούθησης ασθενών. Μελλοντικά, η χρήση δικτύων 6G θα μπορούσε να επιτρέψει την ανταλλαγή τεράστιου όγκου ιατρικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την υποστήριξη πιο σύνθετων ιατρικών εφαρμογών. Η δυνατότητα αξιόπιστης επικοινωνίας με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση θα μπορούσε να συμβάλει στη βελτίωση της πρόσβασης σε υπηρεσίες υγείας, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Παράλληλα, ιδιαίτερα σημαντικές αναμένονται οι επιπτώσεις στον τομέα της εκπαίδευσης. Η εμπειρία της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης τα τελευταία χρόνια ανέδειξε τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τους περιορισμούς των υφιστάμενων τεχνολογιών. Με τα δίκτυα επόμενης γενιάς θα είναι δυνατή η ανάπτυξη πιο διαδραστικών εκπαιδευτικών περιβαλλόντων, στα οποία οι μαθητές και οι φοιτητές θα μπορούν να συμμετέχουν σε εικονικές αίθουσες διδασκαλίας με αυξημένο βαθμό αλληλεπίδρασης. Η αξιοποίηση τεχνολογιών εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας αναμένεται να δημιουργήσει νέες μορφές μάθησης και εκπαίδευσης που θα προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια το φυσικό περιβάλλον.

Ένας ακόμη τομέας στον οποίο το 6G αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο είναι η βιομηχανία. Η συνεχής αυτοματοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών και η ανάπτυξη των λεγόμενων «έξυπνων εργοστασίων» απαιτούν γρήγορη και αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ μηχανών, αισθητήρων και πληροφοριακών συστημάτων. Τα μελλοντικά δίκτυα αναμένεται να υποστηρίξουν ακόμη μεγαλύτερο αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών, συμβάλλοντας στη βελτίωση της παραγωγικότητας και στη μείωση του λειτουργικού κόστους των επιχειρήσεων. Παράλληλα, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στις παραγωγικές διαδικασίες αναμένεται να οδηγήσει σε πιο ευέλικτα και αποδοτικά μοντέλα λειτουργίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων. Η αυξανόμενη χρήση αισθητήρων και συστημάτων συλλογής δεδομένων δημιουργεί την ανάγκη για υποδομές που μπορούν να διαχειρίζονται μεγάλους όγκους πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Μέσω των δυνατοτήτων του 6G, οι πόλεις του μέλλοντος θα μπορούν να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται πιο αποτελεσματικά το κυκλοφοριακό δίκτυο, την κατανάλωση ενέργειας, τις δημόσιες μεταφορές και διάφορες άλλες υπηρεσίες που επηρεάζουν την καθημερινότητα των πολιτών. Η καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και στη δημιουργία πιο βιώσιμων αστικών περιβαλλόντων.

Εξίσου σημαντικές αναμένονται και οι εξελίξεις στον τομέα των μεταφορών. Η ανάπτυξη αυτόνομων οχημάτων και έξυπνων συστημάτων διαχείρισης κυκλοφορίας απαιτεί δίκτυα που μπορούν να

ανταλλάσσουν πληροφορίες με πολύ υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία. Τα δίκτυα 6G εκτιμάται ότι θα υποστηρίξουν πιο προηγμένες μορφές επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων, υποδομών και συστημάτων ελέγχου, συμβάλλοντας στη βελτίωση της οδικής ασφάλειας και στη μείωση των καθυστερήσεων στις μετακινήσεις.

Τέλος, πολλοί ερευνητές θεωρούν ότι η πλήρης αξιοποίηση τεχνολογιών όπως η εικονική πραγματικότητα, η επαυξημένη πραγματικότητα και οι τρισδιάστατες ολογραφικές επικοινωνίες θα αποτελέσει ένα από τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία της εποχής του 6G. Αν και πολλές από αυτές τις εφαρμογές βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, οι συνεχείς εξελίξεις στις τηλεπικοινωνίες δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την ευρύτερη υιοθέτησή τους στο μέλλον. Η καθημερινή εργασία, η εκπαίδευση, η ψυχαγωγία και η κοινωνική αλληλεπίδραση ενδέχεται να μεταβληθούν σημαντικά μέσα στα επόμενα χρόνια, καθώς οι νέες αυτές τεχνολογίες θα γίνονται ολοένα και πιο προσιτές στους χρήστες.

Συνολικά, οι προοπτικές ανάπτυξης που συνδέονται με τα δίκτυα 6G είναι ιδιαίτερα σημαντικές και εκτείνονται σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της οικονομίας και της κοινωνίας. Παρότι η ακριβής μορφή που θα λάβουν οι μελλοντικές εφαρμογές δεν μπορεί ακόμη να προβλεφθεί με βεβαιότητα, είναι σαφές ότι η νέα γενιά ασύρματων επικοινωνιών έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει καθοριστικά τον ψηφιακό μετασχηματισμό των επόμενων δεκαετιών. Η επιτυχία αυτής της μετάβασης θα εξαρτηθεί τόσο από την τεχνολογική πρόοδο όσο και από την ικανότητα των κοινωνιών να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά τις νέες δυνατότητες που θα προσφέρει το 6G.

6.8 Εμπορικές πολιτικές εταιριών τηλεπικοινωνιών

Η συζήτηση γύρω από την ανάπτυξη των δικτύων 6G έχει ήδη ξεκινήσει αρκετά χρόνια πριν από την αναμενόμενη εμπορική τους διάθεση. Παρότι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς εξακολουθούν να αναπτύσσονται και να επεκτείνονται σε πολλές χώρες, ερευνητικοί οργανισμοί, κατασκευαστές εξοπλισμού και πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών επενδύουν ήδη σημαντικούς πόρους στην επόμενη γενιά ασύρματων επικοινωνιών. Η κατάσταση αυτή δημιουργεί ένα εύλογο ερώτημα για το εάν αποτελεί το 6G πραγματική τεχνολογική ανάγκη που προκύπτει από τις απαιτήσεις της κοινωνίας και της οικονομίας ή πρόκειται κυρίως για αποτέλεσμα της εμπορικής στρατηγικής των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στον χώρο των τηλεπικοινωνιών.

Η απάντηση είναι αρκετά σύνθετη. Μάλιστα βρίσκεται κάπου ανάμεσα στις δύο αυτές προσεγγίσεις. Από τη μία πλευρά, η ιστορία των τηλεπικοινωνιών δείχνει ότι κάθε νέα γενιά δικτύων εμφανίστηκε για να καλύψει πραγματικές ανάγκες οι οποίες δεν μπορούσαν να εξυπηρετηθούν αποτελεσματικά από τις προηγούμενες τεχνολογίες. Από την άλλη πλευρά, είναι γεγονός ότι η αγορά των τηλεπικοινωνιών χαρακτηρίζεται από έντονο ανταγωνισμό, όπου οι εταιρείες επιδιώκουν συνεχώς να προωθούν νέα προϊόντα και υπηρεσίες, δημιουργώντας πολλές φορές την αίσθηση ότι οι καταναλωτές χρειάζονται διαρκώς την επόμενη τεχνολογική αναβάθμιση. Αν εξετάσουμε την εξέλιξη των προηγούμενων γενεών κινητής τηλεφωνίας, παρατηρούμε ότι κάθε μετάβαση συνοδεύτηκε από σημαντικές αλλαγές στον τρόπο χρήσης των τεχνολογιών επικοινωνίας. Το 2G εισήγαγε την ψηφιακή μετάδοση και τα γραπτά μηνύματα. Το 3G επέτρεψε την ουσιαστική πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω κινητών συσκευών. Το 4G έφερε την εποχή των υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας, του streaming και των κοινωνικών δικτύων. Το 5G σχεδιάστηκε για να υποστηρίξει εφαρμογές όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, η βιομηχανική αυτοματοποίηση και οι έξυπνες πόλεις. Με βάση αυτή τη λογική, η ανάπτυξη του 6G μπορεί να θεωρηθεί ως το επόμενο φυσικό βήμα της τεχνολογικής εξέλιξης, καθώς οι απαιτήσεις των ψηφιακών υπηρεσιών συνεχίζουν να αυξάνονται. Παράλληλα, η τεχνητή νοημοσύνη, τα μεγάλα δεδομένα, οι

εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας και τα αυτόνομα συστήματα δημιουργούν νέες ανάγκες που πιθανόν να απαιτήσουν σημαντικά υψηλότερες επιδόσεις από αυτές που μπορούν να προσφέρουν τα σημερινά δίκτυα. Οι ερευνητές εκτιμούν ότι τα επόμενα χρόνια ο αριθμός των συνδεδεμένων συσκευών θα αυξηθεί σημαντικά, ενώ η ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θα αποτελεί βασική απαίτηση για πολλές εφαρμογές. Υπό αυτό το πρίσμα, η ανάπτυξη του 6G φαίνεται να ανταποκρίνεται σε πραγματικές τεχνολογικές ανάγκες που ενδέχεται να εμφανιστούν κατά την επόμενη δεκαετία. Ωστόσο, υπάρχει και μια διαφορετική οπτική. Πολλοί αναλυτές υποστηρίζουν ότι η προώθηση νέων γενεών δικτύων συχνά προηγείται της πλήρους αξιοποίησης των δυνατοτήτων των προηγούμενων τεχνολογιών. Η περίπτωση του 5G αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Όταν παρουσιάστηκαν οι πρώτες συσκευές συμβατές με δίκτυα 5G, η πραγματική κάλυψη ήταν περιορισμένη σε πολλές χώρες. Πολλοί καταναλωτές προχώρησαν στην αγορά νέων κινητών τηλεφώνων με δυνατότητες 5G, χωρίς στην πράξη να έχουν πρόσβαση σε πλήρως ανεπτυγμένα δίκτυα στην περιοχή τους. Σε αρκετές περιπτώσεις, η χρήση του 5G περιοριζόταν σε συγκεκριμένα αστικά κέντρα ή ακόμη και σε μικρές γεωγραφικές περιοχές. Αντίστοιχα, πολλές από τις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν ως βασικά πλεονεκτήματα του 5G δεν έχουν ακόμη υλοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα. Η μαζική χρήση αυτόνομων οχημάτων, η εκτεταμένη ανάπτυξη έξυπνων πόλεων και η πλήρης αξιοποίηση βιομηχανικών εφαρμογών βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο σε μεγάλο μέρος του κόσμου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί εύλογα ερωτήματα σχετικά με το κατά πόσο η κοινωνία έχει ήδη αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητες του 5G πριν ξεκινήσει η συζήτηση για το 6G.

Η πραγματικότητα είναι ότι η τεχνολογική πρόοδος και η εμπορική στρατηγική συνυπάρχουν και επηρεάζουν η μία την άλλη. Οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών, οι κατασκευαστές εξοπλισμού και οι εταιρείες παραγωγής κινητών συσκευών έχουν προφανές οικονομικό ενδιαφέρον να αναπτύσσουν και να προωθούν νέες τεχνολογίες. Η εμφάνιση μιας νέας γενιάς δικτύων δημιουργεί νέες αγορές, νέες επενδύσεις και νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες. Παράλληλα όμως, η έρευνα και η ανάπτυξη που χρηματοδοτούνται από αυτές τις επενδύσεις οδηγούν συχνά σε πραγματικές τεχνολογικές καινοτομίες που βελτιώνουν την καθημερινότητα των ανθρώπων.

Ένα ακόμη στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι οι τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες απαιτούν πολλά χρόνια για να ωριμάσουν. Οι πρώτες συζητήσεις για το 5G ξεκίνησαν αρκετά χρόνια πριν από την εμπορική του διάθεση, ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει σήμερα με το 6G. Επομένως, το γεγονός ότι η έρευνα για το 6G βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η αγορά πιέζεται άμεσα να εγκαταλείψει το 5G. Αντίθετα, η έγκαιρη έναρξη της έρευνας επιτρέπει την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα είναι διαθέσιμες όταν οι πραγματικές ανάγκες της αγοράς το απαιτήσουν.

Στην περίπτωση της Ελλάδας, η συζήτηση αποκτά ακόμη μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Παρότι τα δίκτυα 5G έχουν αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους εξακολουθεί να βρίσκεται σε εξέλιξη. Για τον μέσο χρήστη, η βασική διαφορά που προσφέρει σήμερα το 5G είναι κυρίως η ταχύτερη πρόσβαση στο διαδίκτυο. Οι πιο σύνθετες εφαρμογές που συνδέονται με τη νέα γενιά δικτύων δεν έχουν ακόμη περάσει στην καθημερινότητα του μεγαλύτερου μέρους του πληθυσμού. Επομένως, είναι λογικό να υπάρχει προβληματισμός σχετικά με το αν η μετάβαση στο 6G αποτελεί άμεση προτεραιότητα ή αν θα πρέπει πρώτα να αξιοποιηθούν σε μεγαλύτερο βαθμό οι δυνατότητες του 5G.

Μέσα από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας και των τεχνολογικών εξελίξεων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, προκύπτει ότι η απάντηση δεν βρίσκεται σε ακραίες θέσεις. Το 6G δεν αποτελεί απλώς ένα εργαλείο marketing, όπως επίσης δεν αποτελεί και μια τεχνολογία που είναι απαραίτητη άμεσα για κάθε χρήστη. Πιθανότατα πρόκειται για μια φυσική συνέχεια της τεχνολογικής εξέλιξης, η

οποία όμως προωθείται ταυτόχρονα και από τον έντονο ανταγωνισμό της αγοράς. Η ιστορία δείχνει ότι πολλές φορές οι τεχνολογίες προηγούνται των αναγκών των χρηστών και στη συνέχεια δημιουργούν νέες εφαρμογές που μεταβάλλουν τον τρόπο ζωής και εργασίας των ανθρώπων.

Η μετάβαση προς το 6G μπορεί να θεωρηθεί τόσο αποτέλεσμα πραγματικών τεχνολογικών απαιτήσεων όσο και συνέπεια των οικονομικών και εμπορικών κινήτρων που χαρακτηρίζουν τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Το κατά πόσο η νέα γενιά δικτύων θα δικαιώσει τις προσδοκίες που τη συνοδεύουν θα εξαρτηθεί από την πρακτική αξιοποίηση των δυνατοτήτων της και από την ικανότητά της να προσφέρει ουσιαστικές λύσεις σε προβλήματα που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Μόνο τότε θα μπορέσει να κριθεί αν το 6G αποτελεί μια πραγματικά επαναστατική εξέλιξη ή απλώς το επόμενο βήμα μιας συνεχούς τεχνολογικής και εμπορικής πορείας.

6.9 Επίλογος

Η μελέτη που παρουσιάστηκε ανέδειξε την εξέλιξη των επίγειων και ασύρματων δικτύων, από τις πρώτες γενιές κινητής τηλεφωνίας έως το σημερινό 5G και την επερχόμενη γενιά 6G. Μέσα από τη σύγκριση των τεχνολογικών χαρακτηριστικών, αναδείχθηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα του 6G έναντι των προηγούμενων γενιών, όπως οι υψηλότερες ταχύτητες, η μειωμένη καθυστέρηση και η αυξημένη αξιοπιστία. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη σύνδεση των δικτύων του μέλλοντος με την τεχνητή νοημοσύνη, η οποία αναμένεται να διαμορφώσει ένα ενιαίο, ευφυές οικοσύστημα συνδεσιμότητας. Παράλληλα, εντοπίστηκαν οι βασικές προκλήσεις υλοποίησης του 6G σε τεχνικό, επενδυτικό και ρυθμιστικό επίπεδο.

Τέλος, εξετάστηκε η θέση της Ελλάδας, όπου διαπιστώθηκε ότι, παρά την πρόοδο στο 5G, η χώρα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο προετοιμασίας για το 6G, με την επιτυχή μετάβαση να προϋποθέτει συντονισμένη δράση κράτους, πανεπιστημίων και επιχειρήσεων.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη

Η παρούσα εργασία επιχείρησε να προσεγγίσει συνολικά το ζήτημα των τεχνολογιών έκτης γενιάς (6G), εντάσσοντάς τις στο ευρύτερο πλαίσιο της εξέλιξης των τηλεπικοινωνιών. Ξεκινώντας από τις θεμελιώδεις έννοιες της επικοινωνίας, των δικτύων υπολογιστών και των μοντέλων αναφοράς, όπως το μοντέλο OSI και η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP, τέθηκε το εννοιολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο οικοδομείται η κατανόηση των σύγχρονων ασύρματων δικτύων.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε η ιστορική πορεία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, από τα αναλογικά συστήματα της πρώτης γενιάς έως τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), αναδεικνύοντας ότι κάθε γενιά δεν αντικατέστησε απλώς την προηγούμενη, αλλά πρόσθεσε νέες δυνατότητες σε ταχύτητα, χωρητικότητα και αξιοπιστία. Με βάση αυτήν την εξέλιξη, αναλύθηκαν οι τεχνολογίες και η αρχιτεκτονική του 6G - οι συχνότητες των THz-, η AI-native, η ενοποίηση επίγειων, εναέριων και δορυφορικών δικτύων και οι νέες, καθηλωτικές εφαρμογές που αυτές καθιστούν εφικτές.

Ακολούθως, η συγκριτική θεώρηση 5G και 6G ανέδειξε τόσο τα ποσοτικά όσο και τα ποιοτικά άλματα της επόμενης γενιάς, ενώ η εξέταση της ελληνικής πραγματικότητας τοποθέτησε το ζήτημα σε εθνικό πλαίσιο, παρουσιάζοντας την ανάπτυξη του 5G, τις προκλήσεις και τις προοπτικές μετάβασης στο 6G. Συνολικά, η σύνοψη αυτή καταδεικνύει ότι το 6G δεν αποτελεί απλώς μια ακόμη τεχνολογική αναβάθμιση, αλλά μια βαθύτερη μετάβαση που αναμένεται να επηρεάσει καθοριστικά τόσο τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές όσο και την καθημερινή ζωή τα επόμενα χρόνια.

7.2 Τελικά συμπεράσματα εργασίας και προτάσεις βελτίωσης

Η παρούσα εργασία επιχείρησε να προσεγγίσει συνολικά την πορεία εξέλιξης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, από τις πρώτες αναλογικές γενιές έως τα σύγχρονα δίκτυα 5G και τις τεχνολογίες της επόμενης γενιάς 6G. Μέσα από τη μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών, της αρχιτεκτονικής και των εφαρμογών κάθε γενιάς, αναδείχθηκε ότι κάθε μετάβαση δεν αποτελεί απλώς μια αριθμητική αύξηση επιδόσεων, αλλά μια ουσιαστική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, λειτουργούν και αξιοποιούνται τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Η συγκριτική θεώρηση των διαδοχικών γενεών ανέδειξε επιπλέον ότι κάθε νέα τεχνολογία οικοδομείται πάνω στις κατακτήσεις της προηγούμενης, αξιοποιώντας τη συσσωρευμένη εμπειρία και ταυτόχρονα διορθώνοντας τους περιορισμούς της, γεγονός που καθιστά τη μελέτη της ιστορικής αυτής συνέχειας απαραίτητη για την κατανόηση των επερχόμενων εξελίξεων. Από την ανάλυση προκύπτει ότι το 6G δεν αποτελεί απλή συνέχεια του 5G, αλλά μια ποιοτικά διαφορετική προσέγγιση, στην οποία η τεχνητή νοημοσύνη AI ενσωματώνεται εξαρχής στην αρχιτεκτονική του δικτύου AI-native, η ενοποίηση επίγειων, εναέριων και δορυφορικών υποδομών στοχεύει σε καθολική κάλυψη, η αξιοποίηση νέων ζωνών φάσματος υπόσχεται πρωτοφανείς ταχύτητες και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Οι εξελίξεις αυτές αναμένεται να στηρίξουν εφαρμογές όπως η ολογραφική επικοινωνία, οι έξυπνες πόλεις και τα αυτόνομα συστήματα, διευρύνοντας σημαντικά το πεδίο των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα δίκτυα.

Παράλληλα, η μελέτη κατέδειξε ότι η μετάβαση προς την επόμενη γενιά συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Η αξιοποίηση των υψηλών συχνοτήτων, η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση, η πολυπλοκότητα των υποδομών και τα κρίσιμα ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας αποτελούν εμπόδια που πρέπει να αντιμετωπιστούν, ώστε οι θεωρητικές δυνατότητες του 6G να μετουσιωθούν σε πραγματικά οφέλη για τους χρήστες και την κοινωνία. Ιδιαίτερη βαρύτητα φαίνεται να αποκτά το

ζήτημα της ισόρροπης γεωγραφικής κάλυψης, καθώς ο μεγάλος αριθμός σταθμών βάσης που απαιτούν οι υψηλές συχνότητες ενδέχεται να διευρύνει το ψηφιακό χάσμα μεταξύ αστικών και απομακρυσμένων περιοχών, εάν δεν προβλεφθούν στοχευμένες πολιτικές για τη δίκαιη πρόσβαση όλων των πολιτών στις νέες υπηρεσίες. Όσον αφορά την Ελλάδα, διαπιστώθηκε ότι η χώρα έχει κάνει σημαντικά βήματα στην ανάπτυξη του 5G, με ουσιαστικές επενδύσεις των παρόχων και πιλοτικές εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Η εμπειρία αυτή, σε συνδυασμό με τη συμμετοχή σε ερευνητικά προγράμματα, μπορεί να αποτελέσει στέρεη βάση για μια έγκαιρη και ισορροπημένη προετοιμασία ενόψει της μετάβασης στο 6G, αρκεί να υπάρξει συντονισμένος σχεδιασμός σε τεχνολογικό, ρυθμιστικό και κοινωνικό επίπεδο. Η αξιοποίηση των ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών εργαλείων και η ενεργός συμμετοχή της χώρας στα διεθνή σχήματα τυποποίησης μπορούν να ενισχύσουν τη διαπραγματευτική της θέση και να εξασφαλίσουν ότι οι εθνικές ιδιαιτερότητες και ανάγκες θα ληφθούν υπόψη κατά τη διαμόρφωση των μελλοντικών προτύπων.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, μια πρώτη πρόταση για την ομαλή διαχείριση της μετάβασης αφορά τις υποδομές και τη διαχείριση του φάσματος. Είναι σκόπιμο η ανάπτυξη των μελλοντικών δικτύων να γίνεται σταδιακά και πάνω στις υπάρχουσες υποδομές 5G, με έγκαιρο σχεδιασμό για την απελευθέρωση και αξιοποίηση νέων ζωνών συχνοτήτων, ώστε να αποφεύγεται η σπατάλη πόρων και να διασφαλίζεται η συνέχεια των υπηρεσιών προς τους χρήστες. Στην κατεύθυνση αυτή, η υιοθέτηση ανοικτών και προτυποποιημένων αρχιτεκτονικών, καθώς και η virtualization των λειτουργιών του δικτύου, μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και να μειώσουν την εξάρτηση από συγκεκριμένους προμηθευτές εξοπλισμού. Μια δεύτερη πρόταση σχετίζεται με την ενίσχυση της έρευνας και της συνεργασίας. Η συμμετοχή ακαδημαϊκών ιδρυμάτων, ερευνητικών φορέων και τηλεπικοινωνιακών παρόχων σε κοινά προγράμματα, τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, μπορεί να επιταχύνει τη μεταφορά τεχνογνωσίας και να συμβάλει στην ανάπτυξη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού, στοιχείο καθοριστικό για την επιτυχή υιοθέτηση της επόμενης γενιάς δικτύων. Παράλληλα, η δημιουργία πειραματικών υποδομών και ζωνών δοκιμών, όπου επιχειρήσεις και ερευνητικές ομάδες θα μπορούν να αναπτύσσουν και να αξιολογούν νέες εφαρμογές υπό ρεαλιστικές συνθήκες, θα συμβάλει στη γρηγορότερη ωρίμανση των τεχνολογιών και στη σύνδεση της έρευνας με την αγορά. Μια τρίτη πρόταση επικεντρώνεται στο ρυθμιστικό, ενεργειακό και κοινωνικό πλαίσιο της μετάβασης. Η έγκαιρη διαμόρφωση κατάλληλων κανονιστικών πλαισίων για την προστασία των δεδομένων και της ιδιωτικότητας, η προτεραιότητα σε πράσινες και ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, καθώς και η ενημέρωση των πολιτών για τα οφέλη και τους περιορισμούς των νέων δικτύων, κρίνονται απαραίτητες ώστε η τεχνολογική πρόοδος να συμβαδίζει με τη βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή. Εξίσου σημαντική κρίνεται η θέσπιση μηχανισμών διαφάνειας και λογοδοσίας για τα αυτοματοποιημένα συστήματα που στηρίζονται στην ΑΙ, ώστε οι αποφάσεις που λαμβάνονται από το δίκτυο να παραμένουν ελέγξιμες και κατανοητές, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη των χρηστών απέναντι στις νέες τεχνολογίες.

Συνολικά, η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η μετάβαση προς το 6G αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία που υπερβαίνει τα στενά τεχνολογικά όρια και αγγίζει οικονομικές, ρυθμιστικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις. Η επιτυχής διαχείρισή της απαιτεί μακροπρόθεσμο σχεδιασμό, συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων φορέων και διαρκή προσαρμογή στις ραγδαία εξελισσόμενες τεχνολογικές συνθήκες, ώστε τα δίκτυα του μέλλοντος να αξιοποιηθούν προς όφελος τόσο της οικονομίας όσο και του κοινωνικού συνόλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Παπαδημητρίου, Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες. Θεσσαλονίκη:Εκδόσεις Τζιόλα, 2018.
- [2] Γ. Τσιλιγάννης, Θεμελιώδεις Αρχές Ασύρματων Δικτύων. Λευκωσία:Open University Of Cyprus, 2021.
- [3] Σ. Καρκαλάκος, Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών. Πάτρα:University Of Patras, 2019.
- [4] T. S. Rappaport, Wireless Communications:Principles and Practice. Upper Saddle River, NJ:Prentice Hall, 2024.
- [5] G. Maragos, Ιστορική Εξέλιξη Ασύρματων Επικοινωνιών. Αθήνα:University of West Attica, 2017.
- [6] V. K. Quy, A. Chehri, N. M. Quy, N. D. Han and N. T. Ban, "Innovative Trends in the 6G Era: A Comprehensive Survey of Architecture, Applications, Technologies, and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 39824-39844, 2023.
- [7] S. Redl, M. Weber, and M. Oliphant, An Introduction to GSM. Boston:Artech House, 1995.
- [8] E. Dahlmans, S. Parkvall & J. Skold, 4G. LTE-Advanced for Mobile Broadband. Oxford:Academic Press 2014.
- [9] A. Gupta and R. Jha, "A Survey of 5G Network:Architecture and Emerging Technologies", *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [10] ITU-R, "IMT Vision–Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond", Recommendation ITU-R M. 2083, 2015.
- [11] M. Latva-Aho and K. Leppänen, "Key Drivers and Research Challenges for 6G Wireless Systems", 6G Flagship, University of Oulu, 2019.
- [12] R. Chataut, M. Nankya, and R. Akl, "6G Networks and the AI Revolution—Exploring Technologies, Applications, and Emerging Challenges," *Sensors*, vol. 24, no. 6, Art. no. 1888, Mar. 2024, doi: 10.3390/s24061888.
- [13] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A Vision of 6G Wireless Systems:Applications, Trends, Technologies & Challenges " *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2020.
- [14] Nokia, "The Road to 6G", Nokia Research Report, 2021.
- [15] Samsung, "6G:The Next Hyper-Connected Experience", Samsung Research, 2020.
- [16] R. Feng, C.-X. Wang, J. Huang, and X. Gao, "Recent Advances of 6G Ultra-Massive MIMO Technologies in Spatial and Beam Domains," *arXiv:2501.10429 [cs.IT]*, Jan. 2025.
- [17] D. Tse&P. Viswanath, Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge:Cambridge University Press, 2005.
- [18] Kassam, J., Castanheira, D., Silva, A., Dinis, R. and Gameiro, A. (2025). Cell-Free Massive MIMO Technology and Applications in 6G . In *Massive MIMO for Future Wireless Communication Systems* (eds A.L. Imoize and W. Montlouis). <https://doi.org/10.1002/9781394228331.ch4>
- [19] Capital.gr, «5G-Advanced: Το επόμενο βήμα των δικτύων στην εποχή του AI», 2026. [Online]. Available: <https://www.capital.gr/technology/3987928/5g-advanced-to-epomeno-bima-ton-diktuon-stin-epoxi-tou-ai/>

- [20] Jiang, Zhang, Ren, Han, Chen & Hanzo, "Machine Learning Paradigms for Next-Generation Wireless Networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 98–105, 2017.
- [21] E. Stacy, "Advancing Telecom Network Optimization with Causal AI, LLMs, and Machine Learning," *Multidisciplinary Innovations & Research Analysis*, vol. 7, no. 1, pp. 108–122, 2026. [Online]. Available: <https://openviewjournal.com/index.php/mira>.
- [22] Krishnamoorthy, R., Begum, M.A., Maguluri, L.P. *et al.* Quantum-Driven Reinforcement Learning for Spectral Energy Optimization in Massive MIMO Hybrid Beamforming for 6G. *Wireless Pers Commun* **144**, 405–434 (2025). <https://doi.org/10.1007/>
- [23] Alwakeel, A.M. 6G virtualized beamforming: a novel framework for optimizing massive MIMO in 6G networks. *J Wireless Com Network* **2025**, 23 (2025). <https://doi.org/10.1186/>
- [24] K. David and H. Berndt, "6G Vision and Requirements: Is There Any Need for Beyond 5G?" *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, 2018.
- [25] IEEE Innovation at Work, "What makes a city smart?," IEEE Innovation at Work, Feb. 09, 2023. [Online]. Available: <https://innovationatwork.ieee.org/what-makes-a-city-smart/>.
- [26] T. S. Rappaport et al. , "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729–78757, 2019.
- [27] Y. Zhang et al. , "Green Communications for Future Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 5, pp. 64–69, 2020.
- [28] Mao, Liu, Wu & Kato, "Security and Privacy on 6G Network Edge: A Survey", *IEEE COMST* **25**(2), 1095–1127, 2023.
- [29] C. Pan *et al.*, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, June 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2001076.
- [30] ITU-R, "Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2030 and Beyond", Recommendation ITU-R M.2160, International Telecommunication Union, 2023.
- [31] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies", *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [32] Salahdine, F., Han, T. & Zhang, N. 5G, 6G, and Beyond: Recent advances and future challenges. *Ann. Telecommun.* **78**, 525–549 (2023). <https://doi.org/10.1007/>
- [33] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [34] Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), «Δημοπρασία δικαιωμάτων χρήσης ραδιοσυχνοτήτων στις ζώνες 700 MHz, 2 GHz, 3400-3800 MHz και 26 GHz». [Online]. Available: <https://www.eett.gr>
- [35] Business Daily, «Το "θαύμα" στην ανάπτυξη των δικτύων 5G: Πώς η Ελλάδα κλέβει την παράσταση», 2022. [Online]. Available: https://www.businessdaily.gr/tehnologia/69127_thayma-stin-anaptyxi-ton-diktyon-5g-pos-i-ellada-klebei-tin-parastasi
- [36] Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, «5G δίκτυα και εφαρμογές στην Ελλάδα: τομείς αξιοποίησης και πιλοτικά έργα». [Online]. Available: <https://digitalstrategy.gov.gr>
- [37] Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης, «Βίβλος Ψηφιακού Μετασχηματισμού 2020-2025», Αθήνα, 2021. [Online]. Available: <https://digitalstrategy.gov.gr/vivlos>

- [38] Hexa-X, «Hexa-X: A flagship for 6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical and digital worlds», EU Horizon 2020 Project, 2021-2023. [Online]. Available: <https://hexa-x.eu>
- [39] Rozenman, G.G., et al.: The quantum internet: a synergy of quantum information technologies and 6G networks. *IET Quant. Comm.* 4(4), 147–166 (2023). <https://doi.org/10.1049/qtc2.12069>
- [40] S. Hashima, A. Gendia, K. Hatano, O. Muta, M. S. Nada and E. M. Mohamed, "Next-Gen UAV-Satellite Communications: AI Innovations and Future Prospects," in *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 6, pp. 1990-2021, 2025, doi: 10.1109/OJVT.2025.3587028.
- [41] K. Katsaros et al., "AI-Native Multi-Access Future Networks—The REASON Architecture," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 178586-178622, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3507186.
- [42] V. K. Quy, A. Chehri, N. M. Quy, N. D. Han and N. T. Ban, "Innovative Trends in the 6G Era: A Comprehensive Survey of Architecture, Applications, Technologies, and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 39824-39844, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3269297.
- [43] W. Rafique, J. Rani Barai, A. O. Fapojuwo and D. Krishnamurthy, "A Survey on Beyond 5G Network Slicing for Smart Cities Applications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 27, no. 1, pp. 595-628, Feb. 2025, doi: 10.1109/COMST.2024.3410295.
- [44] M. Na *et al.*, "Operator's Perspective on 6G: 6G Services, Vision, and Spectrum," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 8, pp. 178-184, August 2024, doi: 10.1109/MCOM.001.2400060.
- [45] J. S. Gracias, G. S. Parnell, E. Specking, E. A. Pohl, and R. Buchanan, "Smart Cities—A Structured Literature Review," *Smart Cities*, vol. 6, no. 4, pp. 1719–1743, 2023, doi: 10.3390/smartcities6040080.
- [46] M. Ghassemian *et al.*, "6G Empowering Future Robotics: A Vision for Next-Generation Autonomous Systems," in *IEEE Communications Magazine*, doi: 10.1109/MCOM.001.2600109.
- [47] C. Moremada *et al.*, "Evolution in Security and Privacy for 6G Networks: AI Perspectives and Key Enablers," *2026 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Málaga, Spain, 2026, pp. 666-673, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit68295.2026.11577544
- [48] G. Tsoulos, G. Athanasiadou, D. Zarbouti, G. Nikitopoulos, V. Tsoulos and N. Christopoulos, "5G and 4G in the Field: Performance Assessment through Trials," *2024 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*, Thessaloniki, Greece, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/PACET60398.2024.10497064.
- [49] D. Sabella *et al.*, "Innovation Management in 6G Research: The Case of Hexa-X Project," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 2, pp. 142-149, February 2024, doi: 10.1109/MCOM.018.2300040.
- [50] C. Bratsoudis *et al.*, "Techno-economic Analysis of Sustainable Terrestrial, Aerial and Space 6G Networks," *2024 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Cape Town, South Africa, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCWkshp64532.2024.11101200.
- [51] T. Norp, P. Sachdeva, C. Anton, K. Trichias and P. Mohnani, "6G Research & Innovation Activities in Europe: An Overview of EU & Nationally funded Programmes," *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Belgium, 2024, pp. 1109-1114, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit60053.2024.10597076.

[52] Prasad, R., Prasad, A.R., Mihovska, A., & Nidhi, (Eds.). (2023). 6G Enabling Technologies: New Dimensions to Wireless Communication (1st ed.). River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003360889>