



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των
Υπολογιστών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

ΘΑΝΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

A.M.: mcse20023

Εισηγητής: Δρ. Ιωάννης Χοχλιούρος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Τεχνολογικές Προκλήσεις και
Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G**

ΘΑΝΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ

A.M.: mcse20023

Εισηγητής: Δρ. Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής

Εξεταστική Επιτροπή: Δρ. Ιωάννης Χοχλιούρος, Καθηγητής

Δρ. Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής

Δρ. Νικόλαος Μυριδάκης, Καθηγητής

Ημερομηνία εξέτασης: 16.05.2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΘΑΝΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ του ΙΩΑΝΝΗ, με αριθμό μητρώου mcse20023 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ» του Τμήματος ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι την απόκτηση του πτυχίου μου και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση των επιβλεπόντων καθηγητών.

The undersigned NICOLETA IOANNIS THANOU with registry number mcse20023, student of post graduate program "SCIENCE & TECHNOLOGY OF COMPUTING AND COMPUTERS" of the COMPUTER ENGINEERING Dept. of the ENGINEERING Faculty of University West Attica, I declare that:

"I am the author of this Master's Thesis and that all the help I had for its preparation is fully recognized and refers to the work. Also, any sources from which I used data, ideas or words, whether exact or paraphrased, are listed in their entirety, with full reference to the authors, the publisher or the magazine, including the sources that may have been used by the internet. I also certify that this work has been written exclusively by me and is a product of intellectual property of both me and the foundation. Violation of my academic responsibility is an essential reason for the revocation of my degree".

I wish the denial of access to the full text of my work until my degree is obtained and upon my request to the library and approval of the supervising professors.

**Όνοματεπώνυμο & Υπογραφή Υποψηφίου
(Surname and first name of the candidate):**



**ΝΙΚΟΛΕΤΑ ΘΑΝΟΥ
(NIKOLETA THANOU)**

Πνευματική ιδιοκτησία © 2022 Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Όλα τα δικαιώματα διατηρούνται

Copyright © 2022 University of West Attica

All rights reserved

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών» του Τμήματος «Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών».

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ιωάννη Χοχλιούρο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξαρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλες τις πολύτιμες συμβουλές, την επιστημονική καθοδήγηση, καθώς και για τις γνώσεις του και τη συνεχή του υποστήριξη, που ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή κ. Αντώνη Μπόγρη και όλους τους καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, που μου έδωσαν τη δυνατότητα να εμβαθύνω και να διευρύνω τις γνώσεις μου στον ταχέως εξελισσόμενο τομέα της Πληροφορικής.

Ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες θέλω να δώσω στην οικογένεια μου για την ανεκτίμητη στήριξη που μου προσέφερε, τόσο στην παρούσα εργασία, όσο κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Έως σήμερα το σύστημα πέμπτης γενιάς (5G) κινητής επικοινωνίας, που βρίσκεται στο στάδιο της τυποποίησης (μαζική συνδεσιμότητα, εξαιρετική αξιοπιστία και εγγυημένη χαμηλή καθυστέρηση) αναπτύσσεται παγκοσμίως από το 2020 [29], έχει έναν πολύ μεγάλο αριθμό συνδρομητών, έχει κυκλοφορήσει σε πολλές χώρες και εξακολουθεί να βρίσκεται σε εξέλιξη σε όλο τον κόσμο [18]. Σε έναν ψηφιακό έξυπνο κόσμο, όπου τα πάντα χρειάζεται να «διασυνδεθούν» (δηλαδή άνθρωποι έως και οχήματα, συσκευές, δεδομένα, αισθητήρες, ακόμα και ρομπότ), τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελούν πλέον τους «αυτοκινητόδρομους» δεδομένων. Τα αναπτυσσόμενα, αυτή τη στιγμή, ασύρματα δίκτυα 5G παρόλο που προοδεύουν σημαντικά πέρα από το LTE είναι πιθανό να μην μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της μελλοντικής «ψηφιακής κοινωνίας», οι οποίες θα ενεργοποιήσουν πολλές περιπτώσεις χρήσης των μελλοντικών 6G δικτύων ([23], [4]).

Έχει ήδη ξεκινήσει ο ψηφιακός μετασχηματισμός της βιομηχανίας και θα συνεχιστεί η εν λόγω υλοποίηση πιο πέρα από την τρέχουσα δεκαετία ως συνεχής εξέλιξη της γενιάς 5G, με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων των διαφορετικών και ολοένα αναπτυσσόμενων βιομηχανιών και καθετοποιημένων τομέων της αγοράς [12]. Κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας, με τις τεχνολογίες να αναπτύσσονται συνεχώς, θα μπουν τα θεμέλια της εποχής του 6G, με ένα σύνολο προκλήσεων και ευκαιριών σε παγκόσμια κλίμακα. Το 2030 μπορεί κάλλιστα να είναι το έτος έναρξης της πλήρους χρήσης του 6G, εάν υποθεθεί ότι η διάρκεια ζωής μιας γενιάς δικτύου είναι περίπου 10 χρόνια και ότι χρειάζεται περίπου αυτό το χρονικό διάστημα από την ιδέα της αρχικής έρευνας έως την μετέπειτα πλήρως εφαρμοσμένη χρήση/διάδοση στην αγορά [24].

Έτσι, έχει φτάσει η στιγμή για τη βιομηχανία, για την ευρύτερη αγορά αλλά και για την ερευνητική και ακαδημαϊκή κοινότητα, ώστε να στραφεί η προσοχή τους στην επόμενη γενιά για την ικανοποίηση των μελλοντικών απαιτήσεων των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών έως το 2030 [13], παρέχοντας παγκόσμια κάλυψη, πολύ μεγαλύτερη οικονομική/φασματική/ενεργειακή απόδοση, καλύτερο επίπεδο δικτυακής ασφάλειας και ευφυΐας/νοημοσύνης, και μια νέα μορφής δικτυακής αρχιτεκτονικής [29]. Παράλληλα, οι αναδυόμενες τάσεις για την εξυπηρέτηση της κοινωνίας από την τεχνολογική πρόοδο σε όλα τα συναφή σενάρια και για όλους τους εμπλεκόμενους χρήστες απαιτούν «έξυπνες» υπηρεσίες και αυτοματοποιημένα συστήματα, ενίοτε υποστηριζόμενα από «εκτεταμένη» πραγματικότητα και από οπτικές επικοινωνίες [18]. Τα σύγχρονα περιβάλλοντα αναφοράς, προκειμένου να παρέχουν αυτοματοποιημένα συστήματα και μια έξυπνη εμπειρία ζωής, ενσωματώνουν εκατομμύρια αισθητήρες σε πόλεις, σπίτια, οχήματα, βιομηχανίες κ.α., με αποτέλεσμα ο ρυθμός δεδομένων να είναι υψηλός αναφορικά με την απαιτούμενη αξιόπιστη συνδεσιμότητα αυτών των εφαρμογών [19].

Με την εξάπλωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) εμφανίζονται νέες υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις και με χαρακτηριστικά που σε πολλές περιπτώσεις δεν υποστηρίζονται επαρκώς από την τρέχουσα πέμπτη γενιά κινητών κυψελοειδών δικτύων (5G). Το ασύρματο σύστημα 6G θα πρέπει να είναι «έξυπνο» και «προσαρμόσιμο» σε μεταβαλλόμενες υπηρεσίες στο IoT, απαιτώντας ουσιαστική σύγκλιση των επικοινωνιών, των υπολογιστικών δυνατοτήτων και της απόκρυψης δεδομένων (Communication, Computing and Caching - 3C) [26] ώστε να φέρει την επανάσταση σε όλα τα κοινωνικά στρώματα όπως επίσης και να επιταχύνει την καινοτομία και τον μετασχηματισμό της παγκόσμιας κοινωνίας και οικονομίας [27].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Σύμφωνα με τις προηγούμενες γενιές 3G, 4G/4G+ και την τρέχουσα γενιά 5G, όσο αυξάνεται η χωρητικότητα του δικτύου τόσο θα αυξάνονται και οι προσφερόμενες εφαρμογές του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το να μπορούν να δημιουργηθούν νέες υπηρεσίες και προϊόντα, ώστε να χρησιμοποιούν το εύρος ζώνης της επόμενης γενιάς 6G όπως και άλλες βελτιωμένες δυνατότητες (σε σύγκριση με το 5G) στο μέγιστο δυνατό βαθμό, όπως π.χ. υψηλότερη χωρητικότητα του συστήματος, χαμηλότερη καθυστέρηση, υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, υψηλότερη ασφάλεια και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) ([10], [19]).

Το σύστημα έκτης γενιάς (6G), που αναμένεται να έχει διάδοση/εφαρμογή ιδίως μεταξύ των ετών 2027 και 2030, θα υποστηρίζει επίσης την τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI) για την καθοδήγηση αυτόνομων συστημάτων [19]. Λόγω των μεγάλων συνόλων δεδομένων που προκύπτουν από το ιδιαίτερα εκτενές εύρος ζώνης, από τα εκτεταμένα ετερογενή δίκτυα, από τον μεγάλο αριθμό κεραιών και από τα διαφορετικά σενάρια επικοινωνίας και τις νέες απαιτήσεις υπηρεσιών, τα δίκτυα 6G θα φέρουν μια νέα σειρά έξυπνων εφαρμογών με τη βοήθεια των τεχνολογιών της Τεχνητής Νοημοσύνης και της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning - ML) [29]. Σύμφωνα με τον Marcus Weldon των Nokia Bell Labs, το 6G θα είναι μια «εμπειρία έκτης αίσθησης για ανθρώπους και μηχανές» όπου η βιολογία θα συναντά την τεχνητή νοημοσύνη [10].

Μετά την πανδημία το μέλλον θα προσφέρει τεράστιες ευκαιρίες όσο και προκλήσεις ως προς τον μετασχηματισμό της ανθρώπινης εμπειρίας, η οποία θα συνδέει φυσικούς, βιολογικούς και ψηφιακούς κόσμους, με σκοπό το σύστημα 6G να υλοποιήσει πλήρως το όραμα για την σύνδεση των άνω κόσμων [5]. Οι άνθρωποι πλέον θα μπορούν μέσω των εικονικών κόσμων να ενεργοποιούν τον φυσικό κόσμο και θα διακατέχονται από μια έκτη αίσθηση μέσω πολυάριθμων δικτυωμένων αισθητήρων, με το δίκτυο να λειτουργεί ως πηγή τεχνητής νοημοσύνης και αισθητήρων. Οραματιζόμαστε ένα μετα-πανδημικό μέλλον όπου θα αυξηθούν σημαντικά οι ανθρώπινες δυνατότητες με την τεχνολογία 6G και όπου θα είναι δυνατή η ανάπτυξη και η πλήρης ψηφιακή ένταξη [5].

Η μελλοντική κοινωνία μας θα βασίζεται σε παγκόσμια ανάπτυξη ενώ θα ψηφιοποιείται όλο και περισσότερο με σχεδόν απεριόριστη ασύρματη συνδεσιμότητα επιτρέποντας δυναμικά τη διασύνδεση «Άνθρωπος – Πράγμα/Αντικείμενο – Νοημοσύνη» (Human – Thing – Intelligence) ([10], [18]).

Η επόμενη γενιά επικοινωνίας 6G δεν πρόκειται να εκληφθεί απλά ως μια μορφή αξιοποίησης/διάθεσης περισσότερου φάσματος σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων, αλλά ως ένας συνδυασμός των μελλοντικών τεχνολογικών τάσεων με τη διάθεση εντυπωσιακών και καινοτόμων υπηρεσιών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να παρουσιάσει μια – όσο το δυνατό – ολοκληρωμένη εικόνα των προοπτικών και των χαρακτηριστικών του συστήματος έκτης γενιάς κινητών επικοινωνιών 6G [18]. Αρχικά θα προσδιορισθούν οι κύριες εφαρμογές που θα τύχουν υποστήριξης καθώς και οι τεχνολογικές τάσεις των ασύρματων συστημάτων 6G, ώστε να ανταποκρίνονται με επάρκεια στις δυναμικά μεταβαλλόμενες ανάγκες των τελικών χρηστών, των κοινωνιών και των οικονομιών. Εν συνεχεία θα παρουσιασθούν οι τεχνικές απαιτήσεις απόδοσης του 6G, οι προβλεπόμενες βασικές προκλήσεις και οι θεμελιώδεις αρχιτεκτονικές των κυψελοειδών δικτύων που θα οδηγήσουν σε επανάσταση, παρέχοντας πολλαπλές ομοιογενείς υπηρεσίες, ενίοτε υποστηριζόμενες και από την τεχνητή νοημοσύνη (π.χ. καταμεμημένες επικοινωνίες, χρήση υπολογιστικού νέφους, δικτυακός έλεγχος και ενεργειακή κατανάλωση σε όλη την εμβέλεια του δικτύου από τον πυρήνα έως τους ακραίους κόμβους). Τέλος τίθενται υπό συζήτηση διάφορα ερευνητικά ζητήματα, ένα ευρύ

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

φάσμα περιπτώσεων χρήσης και νέα σενάρια χρήσης που αξιοποιούν αυτές τις νέες τεχνολογίες, αναδεικνύοντας τα απαραίτητα βήματα που θα βοηθήσουν στην επίτευξη των επιθυμητών στόχων για τον σχεδιασμό της επόμενης γενιάς ασύρματων δικτύων 6G [28].

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: 6G Δίκτυα

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: 5G, 6G, Internet of Everything (IoE), Internet of Things (IoT), αναδυόμενες τεχνολογίες, αρχιτεκτονική δικτύου, ασύρματα δίκτυα, ασύρματες επικοινωνίες, τεχνητή νοημοσύνη (AI), δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, δικτυακή συνδεσιμότητα, εικονική πραγματικότητα, επικοινωνίες Terahertz (THz), έρευνα, ζώνη Terahertz, κινητή επικοινωνία, μηχανική μάθηση (ML), ρυθμός δεδομένων.

ABSTRACT

To date, the fifth generation (5G) mobile system, which is in the process of being standardised (mass connectivity, excellent reliability and guaranteed low latency) has been growing worldwide since 2020 [29], has a very large number of subscribers, has been released in many countries and is still underway around the world [18]. In a digital smart world, where everything needs to be "interconnected" (i.e. people up to vehicles, devices, data, sensors, and even robots), mobile networks are now the "highways" of data. The currently developing 5G wireless networks, although they are progressing significantly beyond LTE, are likely not to be able to cope with the demands of the future "digital society", which will trigger many cases of use of future 6G networks ([23], [4]).

The digital transformation of the industry has already begun and this implementation will continue beyond the current decade as a continuous evolution of the 5G generation, with the aim of meeting the demands of different and growing industries and vertically integrated market sectors [12]. During the current decade, with technologies constantly being developed, the foundations of the 6G era will be laid, with a set of challenges and opportunities on a global scale. 2030 may well be the year of the start of the full use of 6G, assuming that the lifespan of a generation of a network is about 10 years and that it takes about this period of time from the idea of initial research to the subsequent fully applied use/dissemination on the market [24].

Thus, the time has come for industry, for the wider market but also for the research and academic community, to turn their attention to the next generation to meet the future demands of information and communication technologies by 2030 [13], providing global coverage, much greater economic/spectral/energy efficiency, a better level of network security and intelligence/intelligence, and a new form of network architecture [29]. At the same time, emerging trends to serve society from technological progress in all relevant scenarios and for all users involved require "smart" services and automated systems, sometimes supported by "extensive" reality and visual communications [18]. Modern reference environments, in order to provide automated systems and a smart life experience, integrate millions of sensors in cities, homes, vehicles, industries, etc., resulting in a high data rate in terms of the required reliable connectivity of these applications [19].

With the spread of the Internet of Things (IoT), new services are emerging with different requirements and features that in many cases are not sufficiently supported by the current fifth generation of mobile cellular networks (5G). The 6G wireless system should be "smart" and "adaptable" to changing services in IoT, requiring substantial convergence of communications, computing capabilities and data retention (Communication, Computing and Caching - 3C) [26] in order to revolutionize all walks of life as well as accelerate innovation and the transformation of global society and economy [27].

According to previous generations of 3G, 4G/4G+ and the current generation of 5G, as the capacity of the network increases, the more its offered applications will increase. As a result, new services and products can be created to use the bandwidth of the next generation of 6G as well as other improved capabilities (compared to 5G) to the maximum extent possible, such as higher system capacity, lower latency, higher data rate, higher security and improved quality of service (QoS) ([10], [19]).

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

The sixth generation (6G) system, which is expected to be disseminated/implemented in particular between 2027 and 2030, will also support artificial intelligence (AI) to guide autonomous systems [19]. Due to the large datasets resulting from the highly extensive bandwidth, from the extensive heterogeneous networks, from the large number of antennas and from the different communication scenarios and the new service requirements, 6G networks will bring a new series of smart applications with the help of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies [29]. According to Marcus Weldon of Nokia Bell Labs, 6G will be a "sixth-sense experience for humans and machines" where biology meets artificial intelligence [10].

Our future society will be based on global growth while becoming more and more digitized with almost unlimited wireless connectivity, dynamically allowing the interconnection "Man – Thing – Intelligence" ([10], [18]).

The next generation of 6G communication will not be seen simply as a form of exploiting/allocating more spectrum in high frequency bands, but as a combination of future technological trends with the availability of impressive and innovative services. According to the above, the present diploma thesis aims to present a – as far as possible – complete picture of the perspectives and characteristics of the sixth generation 6G mobile communications system [18]. Initially, the main applications to be supported, as well as the technological trends of 6G wireless systems, will be identified in order to respond adequately to the dynamically changing needs of end-users, societies and economies. The technical performance requirements of 6G, the projected key challenges and the fundamental architectures of cellular networks that will lead to a revolution will be presented, providing multiple homogeneous services, sometimes also supported by artificial intelligence (e.g. distributed communications, cloud use, network control and energy consumption across the network range from core to extreme nodes). Finally, various research issues and a wide range of use cases that take advantage of these new technologies are under discussion, highlighting the necessary steps that will help achieve the desired goals for the design of the next generation of 6G wireless networks [28].

SCIENTIFIC AREA: 6G Networks

KEY WORDS: 5G, 6G, Internet of Everything (IoE), Internet of Things (IoT), emerging technologies, network architecture, wireless networks, wireless communications, artificial intelligence (AI), mobile communication networks, network connectivity, virtual reality (VR), Terahertz (THz) communications, research, Terahertz band, mobile communications, machine learning (ML), data rate.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	14
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	15
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	22
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
1.1 Εξέλιξη Δικτύου Κινητής Επικοινωνίας.....	22
1.1.1 Μηδενική Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (0G)	22
1.1.2 Πρώτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (1G).....	23
1.1.3 Δεύτερη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (2G).....	23
1.1.4 Τρίτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (3G).....	24
1.1.5 Τέταρτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (4G)	24
1.1.6 Πέμπτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (5G)	25
1.2 Όραμα για το 6G	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	32
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 6G	32
2.1 Υπερ-Ευφυές IoT (Hyper-Intelligent IoT)	33
2.2 Διαδίκτυο των Πάντων (IoE - Internet of Everything)	34
2.3 Ολογραφική Τηλεπαρουσία (Holographic Telepresence)	35
2.4 Κινητικότητα με Βάση τη Χρήση UAVs	39
2.4.1 Επικοινωνίες με Drones.....	40
2.5 Συνδεδεμένο και Αυτόνομο Όχημα (Connected and Autonomous Vehicle - CAV)	40
2.5.1 Έξυπνα Σιδηροδρομικά Δίκτυα και Αυτόνομα Οχήματα.....	41
2.6 Ρομποτικοί και Βιομηχανικοί Αυτοματισμοί	41
2.7 Ευφυής Περίθαλψη (Intelligent Healthcare).....	43
2.8 Εξατομικευμένα Σωματικά Δίκτυα (Personalized Body Area Networks).....	44
2.9 Έξυπνο Πλέγμα 2.0 (Smart Grid 2.0)	45
2.9.1 Υπερ-Έξυπνη Κοινωνία	45
2.9.2 Υπερ-Έξυπνη Πόλη.....	46
2.9.3 Έξυπνα Σπίτια.....	46
2.10 Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality).....	47
2.11 Ασύρματες Αλληλεπιδράσεις Εγκεφάλου-Υπολογιστή	48

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

2.12	Υπηρεσίες και Επικοινωνίες 5D	48
2.13	Έφαρμογές Time Sensitive/Time Engineered.....	48
2.14	Αναπτύξεις Hot Spot.....	49
2.15	Επιφάνειες για Ασύρματες Επικοινωνίες.....	50
2.15.1	Μετα-επιφάνειες (Metasurfaces) σε Εφαρμογές WPT.....	50
2.15.2	Κλωστοϋφαντουργικά Προϊόντα βασισμένα σε Μετα-επιφάνειες για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Σώματος (WBSN)	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3		51
3.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 6G.....	51
3.1	Επικοινωνίες Terahertz	51
3.2	Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες.....	55
3.2.1	Επικοινωνίες Ορατού Φωτός.....	56
3.2.2	Πιστότητα Φωτός.....	58
3.2.3	Επικοινωνία Οπτικής κάμερας.....	59
3.2.4	Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου.....	59
3.3	Τεχνητή Νοημοσύνη	59
3.3.1	Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση	62
3.4	Κωδίκευση Καναλιού	65
3.5	Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα	66
3.6	Τεχνολογίες Συλλογής και Μεταφοράς Ενέργειας	68
3.7	Ενσωμάτωση Επαίσθησης (Sensing) και Επικοινωνίας.....	69
3.8	Τεχνολογίες MIMO	69
3.9	Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες	72
3.10	Κβαντικές Επικοινωνίες.....	74
3.11	Blockchain.....	76
3.12	Τεχνολογίες Δικτύωσης.....	77
3.12.1	Διαδίκτυο των Νανο-Αντικειμένων (Internet of NanoThings - IoNT).....	77
3.12.2	Διαδίκτυο των Βιο-Νανο-Αντικειμένων (Internet of BioNanoThings - IoBNT) 78	
3.12.3	Τρισδιάστατη Δικτύωση.....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4		81
4.	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ – ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ 6G.....	81
4.1	Απαιτήσεις 6G.....	81
4.1.1	Μέγιστος Ρυθμός Δεδομένων.....	82
4.1.2	Ρυθμός Δεδομένων που τυγχάνει της Εμπειρίας Χρήστη	83
4.1.3	Φασματική Απόδοση (Spectral Efficiency)	83

4.1.4	Κινητικότητα	84
4.1.5	Λανθάνουσα Καθυστέρηση (latency).....	84
4.1.6	Πυκνότητα Σύνδεσης	85
4.1.7	Ενεργειακή Απόδοση.....	86
4.1.8	Χωρητικότητα Κίνησης Περιοχής.....	87
4.1.9	Αξιοπιστία	87
4.1.10	Εύρος Ζώνης Σήματος.....	88
4.1.11	Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης	88
4.1.12	Κάλυψη	89
4.1.13	Εγκαιρότητα.....	90
4.1.14	Ασφάλεια Δικτύου.....	90
4.1.15	Κεφαλαιουχικές και Λειτουργικές Δαπάνες	91
4.2	Προκλήσεις 6G	93
4.2.1	Δυνατότητα Συσκευής	94
4.2.2	Ζώνη Terahertz	95
4.2.3	Δίκτυο.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	98
5. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ 6G	98
5.1	Αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες (Cell Free - CF)	99
5.2	Αρχιτεκτονική Δικτύου με Υποστήριξη AI	103
5.3	Φετοτεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing).....	106
5.4	Υποδίκτυα (Sub-Networks)	108
5.5	3D Αρχιτεκτονική δικτύου.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	114
6. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ 6G	114
6.1	Περιπτώσεις Χρήσης	114
6.1.1	Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) και Εικονική Πραγματικότητα (VR)	115
6.1.2	Ολογραφική Επικοινωνία	116
6.1.3	Ηλεκτρονική Υγεία.....	116
6.1.4	Industry 4.0 και Ρομποτική	117
6.1.5	Μη Επανδρωμένη Κινητικότητα	118
6.1.6	Διάχυτη Συνδετικότητα (Pervasive Connectivity)	118
6.2	Σενάρια Χρήσης.....	119
6.2.1	Βελτιωμένο eMBB και URLLC.....	121
6.2.2	Βελτιωμένο uRLLC + mMTC.....	122
6.2.3	Βελτιωμένο eMBB και mMTC	123

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	126
7. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑ.....	126
7.1 6G BRAINS	129
7.2 AI@EDGE	131
7.3 DAEMON	133
7.4 DEDICAT6G	138
7.5 Hexa-X	141
7.6 MARSAL	144
7.7 REINDEER	146
7.8 RISE-6G	148
7.9 TeraFlow	149
7.10 B5G OPEN	151
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	152
8. ΠΕΡΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	152
8.1 Διατηρήσιμη Ανάπτυξη του 6G	152
8.1.1 Κοινωνικοί Στόχοι και Διατηρησιμότητα	154
8.1.2 Οικονομική Διατηρησιμότητα	155
8.1.3 Περιβαλλοντική Διατηρησιμότητα	156
8.2 Πιθανά Θέματα Υγείας και Ψυχολογικές Επιπτώσεις για τους Χρήστες	157
8.3 Προσδοκίες της Αγοράς	158
8.4 Επιχειρηματικά Μοντέλα	159
8.5 Λειτουργικές Ανάγκες	162
8.6 Εξάρτηση από Βασικές Επιστήμες	163
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9	164
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	164
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	170

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Εξέλιξη κυψελοειδών δικτύων, από 1G σε 6G, αναγράφοντας για κάθε γενιά μια αντιπροσωπευτική εφαρμογή [4]	22
Εικόνα 2: Αλλαγή της φύσης των κινητών επικοινωνιών με την πάροδο του χρόνου [26] ...	26
Εικόνα 3: Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης, τυποποίησης και διάθεσης 6G [22].....	30
Εικόνα 4: Αναδυόμενες εφαρμογές 6G [22].....	33
Εικόνα 5: Εξερεύνηση των ζωνών συχνοτήτων για 6G [9]	55
Εικόνα 6: Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης σε διαφορετικά στρώματα των ασύρματων δικτύων [16]	64
Εικόνα 7: Προς μελέτη ζητήματα για το Κατανεμημένο MIMO (Distributed MIMO) [9].....	70
Εικόνα 8: Ένα παράδειγμα τεχνολογίας μη ορθογωνικής εκπομπής, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας από το εύρος ζώνης συχνοτήτων (VM-MIMO) [9]	72
Εικόνα 9: Απεικόνιση των IRSs, για της περιπτώσεις διευκόλυνσης της επικοινωνίας NLoS σε έναν εσωτερικό χώρο [17]	73
Εικόνα 10: Βασικές δυνατότητες των δικτύων 6G [45]	82
Εικόνα 11: Παραδείγματα εφαρμογών (όπως διαστημικός τουρισμός, υποβρύχιος τουρισμός, τρένα υψηλής ταχύτητας) για LDHMC [22].....	84
Εικόνα 12: Μοντέλο CF μαζικού MIMO συστήματος [29].....	101
Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική CF που βασίζεται σε SDN [81]	102
Εικόνα 14: Εννοιολογικό περιγράμμα φετοτεμαχισμού δικτύου[29].....	106
Εικόνα 15: Τεμαχισμός με βελτιστοποίηση λογισμικού για συγκεκριμένες φέτες [8]	107
Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική διασύνδεσης υποδικτύου [5]	110
Εικόνα 17: Αναπαράσταση πολλαπλών KPI περιπτώσεων χρήσης 6G, μαζί με τις βελτιώσεις σε σχέση με τα δίκτυα 5G [4]	115
Εικόνα 18: Υπόδειγμα «μετατόπισης» από το 5G προς το 6G [97].....	120
Εικόνα 19: Εκτός από τα τυπικά σενάρια χρήσης 5G (eMBB, URRC και mMTC), προτείνονται για το σύστημα 6G τρία βελτιωμένα σενάρια που ονομάζονται uMBB, ULBC και mULC προκειμένου να υποστηριχθούν νέες περιπτώσεις και εφαρμογές χρήσης [13]	124
Εικόνα 20: Εννοιολογική προοπτική του έργου 6G BRAINS [114].....	130
Εικόνα 21: Βήματα μεθοδολογίας στο έργο DAEMON [118]	134
Εικόνα 22: Ενδεικτική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής προσέγγισης στο έργο DAEMON [118]	137
Εικόνα 23: Στόχοι του έργου Hexa-6G [121].....	142
Εικόνα 24: Βασική εννοιολογική προσέγγιση του έργου MARSAL με μια πλήρη ρύθμιση συστήματος 5G από δίκτυα πρόσβασης σε δίκτυα πυρήνα [123]	145
Εικόνα 25: Προτεινόμενη μεθοδολογία του έργου TeraFlow [129].....	150
Εικόνα 26: Κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές προοπτικές διατηρησιμότητας στη διατηρήσιμη ανάπτυξη του 6G [142].....	153
Εικόνα 27: Χρήσιμες επιλογές για την ανάπτυξη του προτιμώμενου διατηρήσιμου επιχειρηματικού μέλλοντος 6G [132]	162

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση 5G και 6G [20]	28
Πίνακας 2: Η λειτουργία των Windows σε ζώνες THz (Στην κεντρική συχνότητα κάθε παραθύρου υπολογίζεται η απώλεια ελεύθερου χώρου)	50
Πίνακας 3: Σύγκριση επικοινωνίας THz και VLC	58
Πίνακας 4: Σύγκριση των χαρακτηριστικών επικοινωνίας 5G και 6G [45]	93
Πίνακας 5: Απαιτήσεις απόδοσης (KPI) για την υποστήριξη της υλοποίησης σεναρίων χρήσης [13]	125

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

1G	First Generation of Mobile Communications
2G	Second Generation of Mobile Communications
3C	Communication, Computing and Caching
3D	Three-Dimensional
3G	Third Generation of Mobile Communications
3GPP	The Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation of Mobile Communications
5G	Fifth Generation of Mobile Communications
6G	Sixth Generation of Mobile Communications
aaS	as a Service
ABS	Aerial Base Station
ADC	Analog-to-Digital Converter
AGVN	Air-Ground Integrated Vehicular Network
AGW	Access Gateway
AI	Artificial Intelligence
AID	Autonomous Intelligent Driving
AoI	Age of Information
AoS	Age of Synchronization
AoT	Age of Task
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
B5G	Beyond fifth-generation
BAN	Body Area Network
BCI	Brain Computer Interface
BP	Belief Propagation
BS	Base Station
C4	Computation, Communication, Caching and Control
CAPEX	Capital Expenditures
CAV	Connected and Autonomous Vehicle
CDMA	Code Division Multiple Access
CF	Cell Free
CLS	Control, Localization and Sensing
CM	Constellation Modulation
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CNF	Cloud-native Network Function
CNN	Convolutional Neural Network
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP	Control Plane
CPE	Customer premises Equipment
CPF	Control Plane Function
CPU	Central Processing Unit
CSI	Channel State Information
CU	Centralised Unit
D&I	Data and Information
D2D	Device-to-Device
DL	Deep Learning
DLT	Distributed Ledger technology
DNN	Deep Neural Network
DRL	Daytime Running Light

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

DU	Distributed Unit
E2E	End to End
EC	European Commission
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EHF	Extremely High Frequency
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eMBB-Plus	enhanced Mobile Broadband Plus
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMF	Electromotive Force
ENI	Experiential Networked Intelligence
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	European Union
FA	False Alarm
FBS	Flight Base Station
FCC	Federal Communications Commission
FG	Focus Group
FIR	Far Infra-Red
FL	Federated Learning
FP8	Eighth Framework Program
FSO	Free Space Optical
FTN	Faster-than-Nyquist
GEO	Geostationary Earth Orbit
GHz	Giga Hertz
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
H2H	Hospital to Home
HAP	High Altitude Platform
HE	Horizon Europe
HO	Handover
HSR	Hyper-Surface of Revolution
HT	Holographic Telepresence
HTC	Holographic-Type Communication
HW	Hardware
IA	Impact Assessment
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ICT	Information and Communications Technology
IDS	Intrusion Detection System
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IIoMT	Intelligent Internet of Medical Things
IIoT	Industrial IoT
InP	Infrastructure Provider
IoBNT	Internet of Bio-Nano-Things
IoE	Internet of Everything
IoNT	Internet of Nano-Things
IoST	Internet of Space Things
IoT	Internet of Things
IoV	Internet of Vehicles
IP	Internet Protocol
IR	Infra-Red

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

IR	Intelligent Radio
IRS	Intelligent Reflective Surface
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
IWD	Intelligent Wearable Device
KPI	Key Performance Indicator
KVI	Key Value Indicator
LAP	Low Altitude Platform
LD	Laser Diode
LDHMC	Long Distance and High Mobility Communications
LED	Light Emitting Diode
LEO	Low Earth Orbit
LiFi	Light Fidelity
LIS	Large Intelligent Surface
LLN	Law of Large Numbers
LoRa	Long Range Radio
LoS	Line of Sight
LPWAN	Low-Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
M&O	Management and Orchestration
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MAP	Mobile Access Point
MB	MultiBand
MBB	Mobile Broadband
MBLL	Mobile Broad Bandwidth and Low Latency
mBBMT	Massive Broad Bandwidth Machine Type
MBRLLC	Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication
MC	Mission Critical
MD	Missed Detection
MEC	Mobile Edge Computing
MEC	Multi-access Edge Computing
MEO	Medium Earth Orbit
MHz	Mega Hertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
mLLMT	massive Low Latency Machine Type
MMI	Man-Machine Interface
mMIMO	massive Multi-Input-Multi-Output
MMS	Multimedia Messaging Service
MMSE	Minimum Mean Squared Error
mMTC	massive Machine Type Communications
mmWave	millimeter Wave
MNO	Mobile Network Operator
MPS	Managed Printing Service
MR	Mixed Reality
MR	Maximum Ratio
MSC	Mobile Switching Center

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

mULC	massive Ultra -Reliable Low-Latency Communication
mURLLC	massive URLLC
NB-IoT	NarrowBand IoT
NF	Network Function
NFV	Network Function Virtualization
NG	Next Generation
NGMN	Next-Generation Mobile Network
NGSO	Non-Geostationary Satellite Orbit
NI	Network Intelligence
NLOS	Non Line of Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NR	New Radio
NTN	Non Terrestrial Network
OCC	Optical Camera Communication
OLT	Optical Line Termination
OMA	Orthogonal Multiple Access
ONU	Optical Network Unit
OPEX	Operating Expenses
O-RAN	Open Radio Access Networks
OS	Operating System
OTT	Over-The-Top
OWC	Optical Wireless Communication
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PD	Photodiode
PHY	Physical layer
PNF	Physical Network Function
PoC	Proof of Concept
PON	Passive Optical Network
PPP	Public Private Partnership
PSTN	Public Switched Telephone Network
QC	Quantum Communication
QoE	Quality of Experience
QoL	Quality of Life
QoS	Quality of Service
R&D	Research and Development
R&I	Research and Innovation
R&I	Remove and Install
RAT	Radio Access Technology
RF	Radio Frequency
RFC	Request For Comments
RF-EH	Radio Frequency Energy Harvesting
RGB	Red, Green, Blue
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
RSA	Rivest-Shamir-Adleman
RSB	Regional Standardization Body
RTE	Runtime Environment
RTIE	Real-Time Intelligent Edge
RU	Remote Unit
Rx	Reception
SBA	Service Based Architecture
SCL	Successive Cancellation List

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

SCS	Successive Cancellation Stack
SDG	Sustainable Development Goal
SDN	Software Defined Networking
SLA	Service-Level Agreement
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SME	Small- and Medium-sized Enterprise
SM-MIMO	Spatial Modulation Multi-Input-Multi-Output
SPoF	Single Point of Failure
SR	Symbiotic Radio
SRE	Smart Radio Environment
SSN	Social Security Number
SURLLC	Secure Ultra-Reliable Low-Latency Communications
SW	Software
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
TA	Targeted Action
TDMA	Time Division Multiple Access
TED	Technology, Entertainment, Design
THz	Tera Hertz
TI	Tactile Internet
TSN	Time-Sensitive Networking
Tx	Transmission
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDN	Ultra-Dense Network
UE	User Equipment
UHD	Ultra-High Definition
uHDD	ultra-High Data Density
uHSLLC	ultra-High Speed low Latency Communications
ULBC	Ultra-Reliable Low-Latency Broadband Communication
uMBB	ubiquitous Mobile Broadband
uMUB	ubiquitous Mobile Ultra-Band
UN	United Nations
UP	User Plane
URLLC	Ultra-Reliable, Low Latency Communications
UV	Ultra Violet
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2X	Vehicle to Everything
VANET	Vehicular ad-hoc Network
VLC	Visible Light Communication
VM-MIMO	Virtual Massive MIMO
VNF	Virtual Network Function
VoIP	Voice over IP
VR	Virtual Reality
WAN	Wide Area Network
WBSN	Wireless Body Sensor Network
WET	Wireless Energy Transfer
WIET	Wireless Information and Energy Transfer
WiFi, Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wide Local Area Network
WPT	Wireless Power Transfer
WSN	Wireless Sensor Network
WWW, www	World Wide Web

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

XR Extended Reality
ZF Zero Forcing

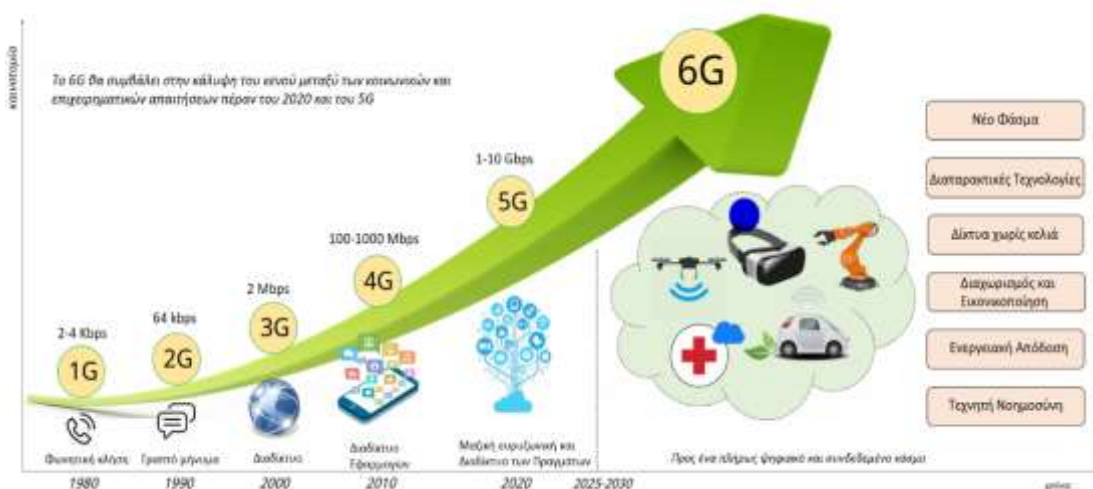
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση της εξέλιξης των δικτύων κινητής επικοινωνίας από την πρώτη έως και την πέμπτη (τρέχουσα) γενιά. Παρακάτω θα αναλύσουμε κατά πόσο κρίνεται αναγκαίο να ξεκινήσει η έρευνα για τα τεχνολογικά στοιχεία της επόμενης γενιάς του συστήματος κινητής τηλεφωνίας, εν ονόματι “6G”.

1.1 Εξέλιξη Δικτύου Κινητής Επικοινωνίας

Στη δεκαετία του 1890, ο νομπελίστας Γ. Μαρκόνι διεξήγαγε το πρώτο πείραμα ασύρματης τηλεγραφίας όπου αποδείχθηκε η ικανότητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων να χρησιμοποιηθούν για την ασύρματη μετάδοση σημάτων. Εν συνεχεία χρειάστηκαν περίπου 80 χρόνια για να γίνει η μετατροπή/μετάθεση σε εμπορικές εφαρμογές όπου οι άνθρωποι έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν, σε πραγματικό χρόνο, μεταξύ τους. Από τη δεκαετία του 1980 μια νέα γενιά εμφανίζεται σχεδόν κάθε δεκαετία, καθώς εξελίσσονται γρήγορα οι τεχνολογίες των κινητών επικοινωνιών [14]. Σκοπός της σχεδίασης της κάθε γενιάς κινητής επικοινωνίας (από την πρώτη έως και την πέμπτη) είναι η κάλυψη διαφόρων αναγκών, τόσο των τελικών χρηστών όσο και των φορέων εκμετάλλευσης των δικτύων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Εξέλιξη κυψελοειδών δικτύων, από 1G σε 6G, αναγράφοντας για κάθε γενιά μια αντιπροσωπευτική εφαρμογή [4]

1.1.1 Μηδενική Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (0G)

Πριν από τη δεκαετία του 1980 η «προ-κινητή» εποχή χαρακτηρίζεται ως η «μηδενική γενιά» (0G) δικτύων κινητής επικοινωνίας [22]. Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας ήταν ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα, προγενέστερα της σύγχρονης κινητής τηλεφωνίας. Επειδή κατά κάποιον τρόπο ήταν οι «προκάτοχοι» της πρώτης γενιάς των κινητών τηλεφώνων, αναφέρονται και ως συστήματα «μηδενικής γενιάς» [41]. Τα πρώιμα αυτά

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

συστήματα κινητής τηλεφωνίας παρείχαν απλή λειτουργικότητα ραδιοεπικοινωνίας με ειδικές συσκευές όπως τα walkie-talkies (χειροπομποδέκτες) [22].

Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα αυτά ήταν διαθέσιμα ως εμπορική υπηρεσία (μέρος του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου μεταγωγής) με τους δικούς τους αριθμούς τηλεφώνου και όχι ως μέρος ενός κλειστού δικτύου (όπως π.χ. για το σύστημα αποστολής ταξί ή για τους ασυρμάτους της αστυνομίας). Τέτοια κινητά τηλέφωνα ήταν σε χρήση συνήθως σε φορητά ή σε αυτοκίνητα και ο πομποδέκτης ήταν τοποθετημένος μέσα στο όχημα και κοντά στη θέση του οδηγού (καντράν, οθόνη και ακουστικό) [41].

1.1.2 Πρώτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (1G)

Το Nordic Mobile Telephone στην Ευρώπη και το Advanced Mobile Phone System στις Ηνωμένες Πολιτείες αντιπροσωπεύουν τα αναλογικά κυψελοειδή συστήματα πρώτης γενιάς (1G) που από το 1980 προσέφεραν για πρώτη φορά υπηρεσία φωνητικής κλήσης με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 2,4 kbps. Οι ηχητικές μεταδόσεις των δικτύων 1G ήταν αναλογικές και η ίδια η φωνή κατά τη διάρκεια μιας κλήσης διαμορφωνόταν μόνο σε υψηλότερη συχνότητα (συνήθως 150 MHz και άνω) [42].

Τα αναλογικά κυψελοειδή συστήματα αποτελούνται από τα εξής τρία βασικά στοιχεία: (i) Κινητό τηλέφωνο, (ii) τοποθεσίες κυψελών και (iii) κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Mobile Switching Center - MSC). Αυτά τα στοιχεία είναι ενσωματωμένα κατά τρόπο ώστε να σχηματίσουν ένα ραδιοσύστημα ικανό να μπορεί να συνδεθεί στο Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής (Public Switched Telephone Network - PSTN) [40]. Ωστόσο, επειδή δεν υπήρχε ασύρματο πρότυπο τούτο είχε ως αποτέλεσμα το να υπάρχει προβληματική μεταβίβαση, χαμηλή απόδοση της μετάδοσης και έλλειψη ασφάλειας ([13], [24]). Στην περίπτωση 1G οι τηλεφωνικές συνομιλίες δεν μπορούσαν να είναι ιδιωτικές ούτε και ασφαλείς, καθώς οι τηλεφωνικές υπηρεσίες δεν ήταν κρυπτογραφημένες [40].

1.1.3 Δεύτερη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (2G)

Στη συνέχεια, περίπου το 1990, τα αναλογικά συστήματα αντικαταστάθηκαν από τα ψηφιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G), που βασιζόνταν σε τεχνολογίες ψηφιακής διαμόρφωσης όπως TDMA (Time Division Multiple Access - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου) και CDMA (Code Division Multiple Access - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα) [24]. Οι τεχνολογίες 2G επέτρεψαν την παροχή συγκεκριμένων υπηρεσιών στα διάφορα υποκείμενα δίκτυα, όπως είναι τα μηνύματα κειμένου, εικόνων και πολυμέσων (Multimedia Messaging Service - MMS) [43]. Το κυρίαρχο πρότυπο στην εποχή του 2G, το οποίο σημείωσε μεγάλη εμπορική επιτυχία, ήταν το GSM (Global System for Mobile Communications - Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών), προσφέροντας σε παραπάνω από ένα δισεκατομμύριο του παγκόσμιου πληθυσμού ευκολία φωνητικής επικοινωνίας σε κινητά τηλέφωνα, υπηρεσίες χαμηλού επιπέδου δεδομένων και ανταλλαγή σύντομων μηνυμάτων κειμένου μεταξύ των χρηστών, ενώ επίσης παρείχε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 64 kbps [13].

Με τη χρήση της Γενικής Πακετικής Ραδιοϋπηρεσίας (General Packet Radio Service - GPRS), κατά την περίοδο της εισαγωγής του το 2G θεωρητικά προσέφερε μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς 40 Kbit/s. Με τα βελτιωμένα ποσοστά δεδομένων για την εξέλιξη GSM

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

(Enhanced Data Rates for GSM Evolution - EDGE), υπήρξε μια θεωρητική μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς έως 384 kbit/s [43].

Επίσης, στην πλατφόρμα 2G τα ψηφιακά συστήματα ήταν σχεδιασμένα για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, με αποτέλεσμα τα ψηφιακά σήματα να είναι «φιλικά προς το περιβάλλον», με τις συσκευές και τον συναφή εξοπλισμό να είναι σχετικά οικονομικά προσβάσιμα [40].

1.1.4 Τρίτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (3G)

Τα πρώτα εμπορικά δίκτυα 3G εισήχθησαν στα μέσα του 2001 και εφεξής. Το 3G βρήκε εφαρμογή στην ασύρματη φωνητική τηλεφωνία, στη σταθερή ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο, στην πρόσβαση στο Κινητό Διαδίκτυο¹, στην κινητή τηλεόραση και στις βιντεοκλήσεις [44].

Η τρίτη γενιά (3G) υποστήριξε περισσότερο βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας όπως είναι η μεταφορά δεδομένων πολυμέσων (εικόνες, μουσική και βίντεο), χρησιμοποιώντας παραλλαγές προηγμένων τεχνικών CDMA και επικοινωνίες δεδομένων ("i-mode") ([9], [14], [22]). Η τρίτη γενιά παρείχε πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο και ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων τουλάχιστον έως 2 Mbps με εύρος ζώνης 5 MHz και με σύγχρονες τεχνολογίες επικοινωνίας (όπως π.χ. ισχυρούς στροβιλοκώδικες (turbo-codes) ([24], [26])).

1.1.5 Τέταρτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (4G)

Τον Δεκέμβριο του 2009 τα εμπορικά δίκτυα LTE (Long Term Evolution - Μακροχρόνια Εξέλιξη) ξεκίνησαν την πρώτη στον κόσμο κινητή ευρυζωνική υπηρεσία τέταρτης γενιάς (4G) και μέσω αυτών το ασύρματο Internet έγινε πραγματικότητα [26]. Το σύστημα 4G υποστηρίζει την ευρεία διάδοση και χρήση των έξυπνων κινητών συσκευών (smartphones και tablets) σε όλο τον κόσμο, μέσω ενός ιδιοφυούς συνδυασμού πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multiple Input Multiple Output - MIMO) και πολυπλεξίας ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM). Τα δίκτυα 4G έχουν τη δυνατότητα διάθεσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας έως και 1 Gbits/s σε κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και έως 500 Mbits/s σε ανερχόμενη ζεύξη (uplink) [24] σε σχέση με τα δίκτυα 3G, με παροχή ρυθμού δεδομένων δεκάδων megabytes (μεγαδουφιοσυλλαβών) ανά δευτερόλεπτο [14]. Επίσης έχουν σημειώσει μεγάλη επιτυχία σε τεχνολογικό και εμπορικό επίπεδο, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας τη φασματική απόδοση ([15], [24]).

Το σύστημα 4G LTE-A εξασφαλίζει ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 3 Gb/s downlink και ρυθμό δεδομένων έως 1,5 Gb/s uplink με συνδεσιμότητα περίπου 600 χρηστών ανά κυψέλη και με λανθάνουσα κατάσταση περίπου 30-50 χιλιοστά το δευτερόλεπτο [25]. Ωστόσο, οι τεχνικές και οι τεχνολογίες που εφάρμοσαν την Προηγμένη Μακροχρόνια Εξέλιξη (LTE-Advanced - LTE-A) όπως και τους προκατόχους του, δεν έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν επιτυχημένα αποτελέσματα σε μελλοντική ασύρματη επικοινωνία [28]. Τέλος, στην τέταρτη γενιά εισήχθησαν επιπλέον βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητής

¹ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_web

τηλεφωνίας, όπως επικοινωνία μέσω πρωτοκόλλου Ίντερνετ (Internet Protocol - IP), φωνή μέσω IP (Voice over IP - VoIP), βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας και διαδικτυακά παιχνίδια [22].

1.1.6 Πέμπτη Γενιά Κινητών Επικοινωνιών (5G)

Τον Απρίλιο του 2019 μπήκαμε στην εποχή του 5G, όταν υπήρξε μια διαμάχη μεταξύ των τριών φορέων κινητής τηλεφωνίας της Νότιας Κορέας και της αμερικανικής Verizon σχετικά με το ποιος είναι ο πρώτος, στον κόσμο, πάροχος πέμπτης γενιάς (5G) υπηρεσιών επικοινωνίας. Το σύστημα 5G έχει τύχει αξιοσημείωτης προσοχής από την παγκόσμια οικονομία και κοινωνία και έχει καταστεί μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες λέξεις-κλειδιά στα μέσα ενημέρωσης, εισάγοντας πολλαπλές διαστάσεις τεχνολογικής καινοτομίας [13]. Το ασύρματο δίκτυο 5G αποτελεί το ξεκίνημα μιας πραγματικής ψηφιακής κοινωνίας, επιτυγχάνοντας επαναστατικές προόδους σχετικά με την κινητικότητα, την καθυστέρηση, τους ρυθμούς δεδομένων, την ενεργειακή απόδοση και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών, σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές [24]. Το 5G επεκτείνει τις υπηρεσίες κινητής επικοινωνίας από ανθρώπους προς «πράγματα/αντικείμενα» και από καταναλωτές προς κάθετες βιομηχανίες, ενώ οι προηγούμενες γενιές βελτίωναν απλώς τις δυνατότητες του δικτύου. Συνεπώς, το 5G αφενός μεν οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλο αριθμό διασυνδεσιμότητων μεταξύ ανθρώπων, μηχανών και πραγμάτων/αντικειμένων, αφετέρου δε επιτρέπει μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών σε ένα θεματικό εύρος κινούμενο από την παραδοσιακή ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία έως π.χ. τη Βιομηχανία 4.0, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), την εικονική πραγματικότητα (Virtual Reality - VR), την επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality - AR), τη μεικτή πραγματικότητα (Mixed Reality - MR) και την αυτόματη οδήγηση (autonomous driving) ([13], [22]).

Ο αυξημένος αριθμός των χρηστών και η μαζική ζήτηση για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και εύρος ζώνης ώθησε περαιτέρω την ανάπτυξη του δικτύου 5G στο άμεσο μέλλον. Τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν υψηλότερη συνδεσιμότητα, βελτιωμένη χωρητικότητα, υψηλές ταχύτητες δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση [25], ώστε να εξυπηρετείται σωρεία εφαρμογών, ιδίως στους καθιερωμένους τομείς της αγοράς² (verticals).

Το 5G θα επηρεάσει σε πολλές πτυχές την ανθρώπινη καθημερινή ζωή και την οικονομική δραστηριότητα, όπως επίσης και την ανάπτυξη της κοινωνικής δομής, με σκοπό τη μεγάλη διεύρυνση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε νέα πεδία και με νέα μέσα. Το ασύρματο σύστημα κινητής επικοινωνίας 5G κυρίως προτείνει τρία βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά [74], ήτοι: (i) Βελτιωμένη κινητή ευρυζωνική πρόσβαση **eMBB** (enhanced Mobile BroadBand) για παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων έως και 10 Gbps [22], (ii) μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής **mMTC** (massive Machine-Type-Communications) για υποστήριξη άνω των 100 συσκευών ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με την προηγούμενη γενιά, εφοδιάζοντας το δίκτυο 5G με τεράστια συνδεσιμότητα και (iii) εξαιρετικά αξιόπιστες, χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες **URLLC** (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) για ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων έως και 1 ms από άκρο σε άκρο. Σε συνέχεια αυτών των καινοτόμων χαρακτηριστικών, αναμένεται ότι το 5G θα υποστηρίζει

² Βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.bigcommerce.com/ecommerce-answers/what-is-a-vertical-market-online-selling-and-business-niches/>

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

τις ανάγκες της ασύρματης επικοινωνίας στην Κοινωνία της Πληροφορίας για την τρέχουσα δεκαετία (2020-2030) ([22], [25]). Ωστόσο, το 5G βρίσκεται ακόμα στα πρώτα στάδια εγκατάστασης και σαφώς υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης τόσο των τεχνικών χαρακτηριστικών του όσο και των εφαρμογών και του μοντέλου IoT [18].

Στην παρακάτω Εικόνα 2 φαίνεται το πώς αλλάζει η φύση των κινητών επικοινωνιών από γενιά σε γενιά, με τις γενιές 1G έως 4G να εστιάζουν σε παροχή υπηρεσιών μόνο σε «άτομα» ενώ με το 5G να αρχίζει η ενασχόληση με επικοινωνίες μεταξύ ανθρώπων και «πραγμάτων» [26]. Για τις συνδέσεις της επερχόμενης έκτης γενιάς, οι οποίες θα (δια-)συνδέουν όχι μόνο ανθρώπους αλλά και υπολογιστικούς πόρους, συσκευές, οχήματα ακόμα και ρομπότ, αναμένεται ότι θα ξεπεράσουν την εξατομικευμένη επικοινωνία και θα προχωρήσουν προς την πλήρη υλοποίηση του IoT (μια τάση που ήδη έχουν ξεκινήσει οι γενιές 4G και 5G) [28].



Εικόνα 2: Αλλαγή της φύσης των κινητών επικοινωνιών με την πάροδο του χρόνου [26]

1.2 Όραμα για το 6G

Ήδη από το 2020, το ξέσπασμα της πανδημίας COVID-19 έχει οδηγήσει παγκοσμίως σε δραματική μεταβολή της καθημερινής ζωής, με αποτέλεσμα να τίθενται προκλήσεις μείζονος σημασίας στις οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες. Εντούτοις, αυτή η κρίση της δημόσιας υγείας αναδεικνύει την αξία των υπηρεσιών και των εφαρμογών των συστημάτων 5G καθώς και τον σημαντικό ρόλο της ψηφιακής υποδομής ώστε να είναι διαρκής και αξιόπιστη η επικοινωνία σε όλες τις συναφείς εφαρμογές (π.χ. τηλε-εργασία, τηλε-εκπαίδευση, εξ αποστάσεως χειρουργική, χρήση ρομποτικών συστημάτων, χρήση οχημάτων χωρίς οδηγούς, μη επανδρωμένη παράδοση με χρήση drones, έξυπνη υγειονομική περίθαλψη, αυτόνομη βιομηχανική παραγωγή και πολλές άλλες) [13].

Παρά τις καταγιστικές εξελίξεις, δεν υπάρχουν επαρκείς εγγυήσεις για την επάρκεια του συστήματος 5G, ώστε να καλυφθούν όλες τις απαιτήσεις που εγείρονται από τις νέες υπηρεσίες, ακόμα και αυτές του εγγύς μέλλοντος. Συνιστά αντικείμενο προβληματισμού και συστηματικής μελέτης το κατά πόσο τα συστήματα 5G θα έχουν τελικά και ουσιαστικά τη δυνατότητα να είναι επαρκώς συμβατά με τον γρήγορο πολλαπλασιασμό των νέων εφαρμογών IoT³ (Internet of Everything - Διαδίκτυο των Πάντων), που ενεργοποιούνται από

³ Η έννοια του Διαδικτύου των Πάντων (Internet of Everything - IoE) επεκτείνει τη θεώρηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων/Αντικειμένων (Internet of Things - IoT), αποδίδοντας ιδιαίτερη

τη μαζική συνδεσιμότητα και που βασίζονται σε δεδομένα με αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Σε μια πρώτη εκτίμηση, τέτοιου είδους εφαρμογές αναμένεται να αυξηθούν ετησίως κατά 12% [18]. Το μελλοντικό δίκτυο θα πρέπει να είναι αρκετά «έξυπνο» ώστε να μπορεί να αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά της κάθε υπηρεσίας όπως επίσης και τις όποιες δυναμικές μεταβολές τους καθώς και να παρέχει την αναμενόμενη εξυπηρέτηση. Για να μπορέσει να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός και για την υποστήριξη ευφυών λειτουργιών, κάθε δικτυακός κόμβος θα πρέπει να έχει επαρκείς πόρους επικοινωνίας, υπολογιστικής δυνατότητας και προσωρινής αποθήκευσης [26].

Όπως οι έξυπνες τηλεφωνικές συσκευές (smartphones) προκάλεσαν τη διάδοση εφαρμογών 3G και δημιούργησαν ταυτόχρονα την ανάγκη για ανάπτυξη προς το 4G/4G⁺, με τον ίδιο τρόπο οι σύγχρονες έξυπνες συσκευές θα προκαλέσουν ορισμένες λειτουργίες IoT των επιχειρήσεων και θα ωθήσουν τη μετάβαση από την εποχή του 5G προς ένα μελλοντικό δίκτυο 6G [1]. Με την ταχεία αύξηση χρήσης των ασύρματων συσκευών και την επέκταση του Διαδικτύου των Πραγμάτων, σχεδόν διπλασιάζεται κάθε χρόνο ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, ξεπερνώντας τον αντίστοιχο ρυθμό των ενσύρματων επικοινωνιών [14]. Ο όγκος των δεδομένων της κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται συνεχώς με εκθετικό ρυθμό, με εκτίμηση (για το 2030) ενός αξιοσημείωτου ποσοστού περίπου 5 zettabyte το μήνα [18]. Μέχρι σήμερα, η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου αποτελούσε τον κύριο λόγο εξέλιξης του ασύρματου δικτύου [3].

Επιπλέον, πέρα από τη σημαντική πρόοδο στις τεχνολογίες αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπου και μηχανής και ιδίως λόγω σημαντικών μεταβολών σε κοινωνικές και/ή ατομικές τάσεις-συμπεριφορές αναφορικά με τη χρήση της τεχνολογίας, μέχρι το 2030 αναμένεται διείσδυση νέων υπηρεσιών IoE όπως από εκτεταμένη πραγματικότητα “XR” (δηλαδή συμπερίληψη επαυξημένης “AR” και εικονικής “VR” πραγματικότητας) έως και υπηρεσίες μεικτής πραγματικότητας “MR” (δηλαδή ιπτάμενα οχήματα, τηλεϊατρική, αυτόνομα συστήματα, απτικά και διεπαφές ανθρώπου – μηχανής) [18]. Η εμφάνιση του IoE αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μετάβασης από τις σημερινές υπηρεσίες βελτιωμένης κινητής ευρυζωνικής πρόσβασης (eMBB) προς εξαιρετικά αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες (URLLC). Ωστόσο, παρόλο που έχει διατεθεί το σύστημα 5G ως βασικός «ενεργοποιητής» (“enabler”) για το IoE, δεν έχει ακόμα επιτευχθεί η πλήρης υλοποίηση των υπηρεσιών IoE. Τα συστήματα 5G που κυκλοφορούν αυτή την στιγμή υποστηρίζουν βασικές υπηρεσίες IoE και URLLC (π.χ. αυτοματισμό εργοστασίων), αλλά υπάρχει αμφιβολία σχετικά με το κατά πόσο θα μπορούν να προσφέρουν τις μελλοντικές εφαρμογές IoE για τις έξυπνες πόλεις. Τέλος, οι πρώιμες κυκλοφορίες εφαρμογών 5G συνεχίζουν να χρησιμοποιούν συχνότητες κάτω από τα 6 GHz για την υποστήριξη της κινητικότητας, παρόλο που υπάρχει δυνατότητα υποστήριξης σταθερής πρόσβασης σε συχνότητες mmWave. Ο συνεχής πολλαπλασιασμός των υπηρεσιών IoE θα απαιτήσει ένα σύστημα που τελικά θα παρέχει υψηλή αξιοπιστία (reliability), χαμηλό λανθάνοντα χρόνο (latency) και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων (data rates) σε ετερογενείς συσκευές, ενώ το σύστημα που θα προσπαθήσει να ξεπεράσει τις προκλήσεις αυτές, θα είναι το ασύρματο σύστημα έκτης γενιάς (6G) κατά τις σύγχρονες τεχνολογικές τάσεις [3].

έμφαση σε επικοινωνίες «Μηχανής προς Μηχανή» (machine-to-machine - M2M) για την περιγραφή ενός συνθετότερου συστήματος που επίσης συμπεριλαμβάνει ανθρώπους, δεδομένα και διεργασίες.

⁴ Το 4G+ γνωστό και ως LTE-Advanced (LTE-A) είναι ένα πρότυπο κινητής επικοινωνίας που συνιστά βελτίωση του βασικού 4G (LTE) προτύπου. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Στον Πίνακα 1 παρατίθεται σύγκριση μεταξύ 5G και 6G, για διαφορετικές παραμέτρους.

Παράμετροι	5G	6G
Ρυθμός δεδομένων κορυφής (Peak data rate)	10 - 20 Gb/s	>1Tbps
Απόδοση (χρήσης) φάσματος (Spectrum efficiency)	3 ~ 5x σε σχέση με το 4G	>3x σε σχέση με το 5G
Ευαισθησία δέκτη (Receiver sensitivity)	Περίπου - 120dBm	< - 130 dBm
Χαμηλός λανθάνων χρόνος (Latency)	ms επίπεδο	<1 ms
Κινητικότητα (Mobility)	350 km/h	>1000 km/h
Πυκνότητα κίνησης (Traffic density)	10 Tb/s/km ²	>100 Tb/s/km ²
Ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency)	1000x σε σχέση με το 4G	10x σε σχέση με το 5G
Καθυστερήση επεξεργασίας (Processing delay)	100 ns	10 ns
Απαιτήσεις αξιοπιστίας από άκρο σε άκρο (End-to-end reliability requirements)	99.999 τοις εκατό	99.99999 τοις εκατό
Απαιτήσεις καθυστέρησης ραδιοεπικοινωνίας μόνο (Radio only delay requirements)	100 ns	10 ns

Πίνακας 1: Σύγκριση 5G και 6G [20]

Το 6G προβλέπεται να αξιοποιήσει τις εξελίξεις των νέων τεχνολογιών επικοινωνίας, να παρέχει πλήρη υποστήριξη των ανερχόμενων εφαρμογών, να (δια-)συνδέσει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών – με διαφορετικές απαιτήσεις υπολογιστικής ικανότητας – και υπηρεσιών, γεγονός που προϋποθέτει αρκετά υψηλό εύρος ζώνης και πολύ υψηλή κατανάλωση ενέργειας του δικτύου, με παροχή (σε πραγματικό χρόνο) πρόσβασης σε ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους και σε επαρκή μέσα αποθήκευσης ([7], [22]). Έτσι, το όραμα του 6G θα πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες που δεν έχει την δυνατότητα να αντιμετωπίσει σήμερα το 5G, προβλέποντας εντούτοις και σε περαιτέρω αναβαθμίσεις [28].

Χρειαζόμαστε, ιδίως, ένα φιλόδοξο όραμα επόμενης γενιάς 6G ως προς την αρχιτεκτονική των επικοινωνιών, όπου θα επιτρέπεται και ταυτόχρονα θα ενισχύεται, η ανάπτυξη, η διατηρησιμότητα και η πλήρης ψηφιακή ένταξη [5]. Σήμερα οραματιζόμαστε τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας 6G να παρέχουν μέγιστες ταχύτητες δεδομένων άνω του 1 Tbps στα άκρα του δικτύου, εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις από άκρο-σε-άκρο (End-to-End - E2E) που θα βρίσκονται ακόμη και κάτω από 0,1 ms και επίσης πρόσβαση σε τεχνολογίες αιχμής ισχυρής ευφυΐας με καθυστερήσεις επεξεργασίας κάτω από τα 10 ns.

Παρέχοντας μέχρι και 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με τα σημερινά δίκτυα 5G, το σύστημα 6G θα διαθέτει επικοινωνία συχνότητας terahertz και χωρική πολυπλεξία [24]. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC) αποφάσισε να «ανοίξει» προς διάθεση το

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

φάσμα TeraHertz (THz) για χρήση από το 6G [3], προτείνοντας τη χρήση blockchain (πλοκαδικής αλύσωσης) με σκοπό την ενεργοποίηση της ευέλικτης και δυναμικής κοινής χρήσης φάσματος συχνοτήτων [26].

Επίσης αναμένεται η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία του δικτύου να ξεπεράσουν το 99,99999%. Ένας παράλληλος στόχος του 6G είναι να παρέχεται συνδεσιμότητα παγκόσμιας κάλυψης μέσω και της ενσωμάτωσης δικτύων δορυφορικών επικοινωνιών και υποβρύχιων επικοινωνιών [24]. Αναμένεται συνεπώς να υποστηριχθεί ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα σύνδεσης περισσότερων από 10^7 συσκευών/km² με στόχο τη διευκόλυνση υλοποίησης του ΙοΕ. Τέλος, η απόδοση του φάσματος στο 6G θα είναι πάνω από 5 φορές μεγαλύτερη από το 5G, ενώ αναμένεται υποστήριξη κινητικότητας E2E έως και 1000 km/h [22]. Επιπλέον, το 6G για να καλύψει περισσότερες περιπτώσεις χρήσης θα πρέπει να παρέχει σχεδόν 100% γεωγραφική κάλυψη, ακρίβεια γεωγραφικής θέσης λιγότερο του εκατοστού και ρυθμό ενημέρωσης της τάξης χιλιοστών του δευτερολέπτου [29].

Επιπροσθέτως, απαιτείται η ενεργειακή τροφοδοσία των νέων δικτύων να μην υπερβαίνει τις ανάγκες ισχύος της προηγούμενης γενιάς, τουλάχιστον κατά τη στιγμή της εισαγωγής τους. Επομένως θα απαιτηθεί για το 6G ένα νέο υπολογιστικό πρότυπο που θα υποστηρίζει όλα τα οφέλη από την λογισμικοποίηση (softwarisation) χωρίς να υπάρχει επιπλέον κόστος στην κατανάλωση ενέργειας [29].

Το όραμα του 6G προβλέπεται να πλαισιωθεί έως το 2022 - 2023 ορίζοντας τις συναφείς απαιτήσεις και επιπλέον αξιολογώντας τις τεχνολογίες, την ανάπτυξη, τα πρότυπα, κτλ. Οι φορείς τυποποίησης όπως είναι το 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project - Εταιρισμικό Έργο 3^{ης} Γενιάς) και η ITU (International Telecommunication Union - Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών), αναμένεται έως το 2026-2027 να αναπτύξουν τις προδιαγραφές για την ανάπτυξη του 6G. Αρκετοί φορείς εκμετάλλευσης δικτύων έχουν ήδη ξεκινήσει ερευνητικές εργασίες και μελέτες για το 6G, με στόχο έως το 2028-2029 να προβούν σε επαρκείς δοκιμές δικτύου 6G και για να ξεκινήσουν την εγκατάσταση συναφών δικτύων επικοινωνίας περί το 2030.

Το προαναφερόμενο μελλοντικό χρονοδιάγραμμα ως προς την ανάπτυξη, την τυποποίηση και τη διάθεση του 6G παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 3 [22].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G



Εικόνα 3: Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης, τυποποίησης και διάθεσης 6G [22]

Εν κατακλείδι, όσον αφορά στο μελλοντικό 6G, θα πρόκειται για ένα σύνολο τεχνολογιών που θα μπορούν να προσφέρουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα σχετικά με τη διεκπεραιωτικότητα (throughput), τη χωρητικότητα (capacity) του δικτύου, τη φασματική απόδοση (spectral efficiency), την ενεργειακή απόδοση (energy efficiency), τη χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος (power consumption) και την καθυστέρηση (latency), εξασφαλίζοντας πολύ καλύτερη αντιμετώπιση όλων των εμπλεκόμενων χρηστών, ιδίως δε εκείνων στα άκρα των δικτυακών κυψελών [28]. Πέρα από ένα ασφαλές, έξυπνο, αξιόπιστο και επεκτάσιμο επίγειο ασύρματο δίκτυο, το 6G επίσης προσβλέπει στο να έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης και δορυφορικών επικοινωνιών για να σχηματίσει ένα «πανταχού παρόν» ασύρματο δίκτυο και για να επιτευχθεί μια πραγματικά ασύρματη «πανταχού παρούσα» επικοινωνία [16]. Ομοίως, το 6G επιδιώκει την υποστήριξη επικοινωνιών υψηλής ακρίβειας ώστε να παρέχεται η απαιτούμενη αισθητηριακή εμπειρία (δηλαδή όσφρηση, αφή, όραση και ακοή) [18]. Επιπλέον, τα νέα ευφυή συστήματα θα επιδιώκουν τη μετάδοση πολύ περισσότερου όγκου δεδομένων και με ταχύτερους ρυθμούς μέσω νευρωνικών συστημάτων [6].

Συμπερασματικά, σε γενικές γραμμές θα αναμένουμε να δούμε ως μέρος της εξέλιξης του 5G την εισαγωγή βελτιωμένων μορφών εφαρμογών/ευκολιών που θα μπορούν να εισαχθούν με τρόπο συμβατό (δηλαδή χωρίς απαιτήσεις για καταλυτικές μεταβολές) και με εύλογο κόστος εντός του πλαισίου 5G για την κάλυψη νέων απαιτήσεων απόδοσης. Από την άλλη πλευρά, τυχόν τροποποιήσεις που συνιστούν θεμελιώδη αλλαγή και οι οποίες δεν θα είναι συμβατές με το υπάρχον πλαίσιο 5G ή που μπορούν να ενσωματωθούν στο δίκτυο ή στις σχετικές συσκευές μόνο με υψηλό κόστος, θα αποτελέσουν μέρος του πεδίου αναφοράς της επόμενης γενιάς [8].

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρέχει μια κατά το δυνατό πληρέστερη επισκόπηση του μελλοντικού συστήματος επικοινωνίας 6G, με θεώρηση στοιχείων από τρέχουσες τάσεις και από ερευνητικές εργασίες σε παγκόσμια κλίμακα [19].

Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής:

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

- Στο πρώτο κεφάλαιο καταγράφεται η εξέλιξη των δικτύων από την πρώτη έως την έκτη γενιά κινητών επικοινωνιών, επισημαίνοντας τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε επιμέρους γενιάς.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα όραμα πιθανών εφαρμογών προς το 6G, με σκοπό την επίτευξη των απαιτούμενων βασικών δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs) των δικτύων 6G.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται μια εκτενής εικόνα των αναδυόμενων «τεχνολογιών ενεργοποίησης» τις οποίες δύνανται να χρησιμοποιήσουν τα μελλοντικά δίκτυα 6G και που είναι ικανές για να παρέχουν ιδανικές λύσεις ασύρματης δικτύωσης, με σκοπό την ικανοποίηση των μελλοντικών απαιτήσεων της κοινωνίας μας.
- Το τέταρτο κεφάλαιο αποσκοπεί στη διαμόρφωση ενός πιο συγκεκριμένου οράματος για το 6G, εκτιμώντας τις προβλεπόμενες απαιτήσεις απόδοσης των τεχνολογιών ενεργοποίησης σχετικά με την καθυστέρηση, την απόδοση, τη μαζική συνδεσιμότητα κ.α., οι οποίες είναι ύψιστης σημασίας και εντελώς απαραίτητες για την υλοποίηση των εφαρμογών 6G. Τέλος, παρουσιάζει πιθανές μελλοντικές προκλήσεις (φυσικού και υψηλότερου στρώματος) που παρουσιάζονται στον καθένα από τους εξεταζόμενους τομείς, αναδεικνύοντας έτσι τις σημαντικές ευκαιρίες που προσφέρει η νέα γενιά 6G.
- Το πέμπτο κεφάλαιο εξερευνά τις έννοιες της βασικής δικτυακής αρχιτεκτονικής για την εποχή του 6G, όπως διαφαίνονται από την τρέχουσα βιβλιογραφία.
- Το έκτο κεφάλαιο εντοπίζει τις σύγχρονες περιπτώσεις χρήσης που αναπτύσσονται επί του παρόντος και οι οποίες αναδεικνύουν την ανάγκη για μια μακροπρόθεσμη εξέλιξη πέρα από 5G, καθώς υπερβαίνουν την απόδοση των εφαρμογών 5G και σχετίζονται με τρέχουσες τάσεις της αγοράς. Επίσης αναλύονται νέα σενάρια χρήσης ώστε να ικανοποιηθούν οι τεχνικές απαιτήσεις αυτών των περιπτώσεων χρήσης.
- Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφονται τρέχοντα ερευνητικά έργα που συνδέονται άμεσα με τα δίκτυα και τις εφαρμογές 6G.
- Στο όγδοο κεφάλαιο αναδεικνύονται οι τρεις θεμελιώδεις ανάγκες που αντιμετωπίζει η κοινωνία, όπως οι κοινωνικοί στόχοι, οι προσδοκίες της αγοράς και οι λειτουργικές ανάγκες, λόγω της συνεχιζόμενης εξέλιξης της βιομηχανίας κινητών επικοινωνιών. Επίσης, γίνονται αναφορές και σε άλλα θέματα ρυθμιστικού, επιχειρηματικού, κοινωνικού ή άλλου περιεχομένου που θα είναι σε θέση να επηρεάσουν την προοπτική για τη διαμόρφωση του 6G.
- Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο καταγράφονται διάφορα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 6G

Η ανθρώπινη κοινωνία του 2030 θα διαμορφωθεί από την ανάπτυξη ευρέος φάσματος νέων εφαρμογών [22]. Οι μελλοντικές εφαρμογές δικτύωσης θα οδηγήσουν σε νέες εξελίξεις στην αντίστοιχη τεχνολογία [30].

Ορισμένες εφαρμογές των συστημάτων 5G συνεχίζουν την ανάπτυξή τους στις υπάρχουσες ζώνες 5G, οι οποίες ενδεχομένως θα αναπλαισιωθούν στα συστήματα 6G με την πάροδο του χρόνου, βασιζόμενες πρωτίστως στη χρήση της ζώνης των THz. Θα προκύψουν αρκετές εφαρμογές όπως π.χ. η περίπτωση της «συνδεσιμότητας για οτιδήποτε» (“connectivity for everything”), σύμφωνα με την προοπτική επεκτάσεων του IoT. Ένα παράδειγμα προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί η κυψελοειδής επικοινωνία τύπου V2X (Όχημα προς Οτιδήποτε - Vehicle to Everything) που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό mmWave και ζωνών μικροκυμάτων, έχοντας ως στόχο της επίτευξη αυτόνομης οδήγησης [23].

Στα μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας 6G, θα ενσωματωθεί πλήρως και η διάσταση της AI. Η διαχείριση πόρων, η επεξεργασία σήματος σε φυσικό επίπεδο, οι επικοινωνίες που βασίζονται σε υπηρεσίες κ.α. αναμένεται να ενοποιηθούν σε ένα σύνθετο «σχήμα» με τη χρήση κατάλληλων εφαρμογών και μεθόδων AI. Επίσης αναμένεται προώθηση του ψηφιακού μετασχηματισμού της βιομηχανικής παραγωγής (δηλαδή της επανάστασης Industry 4.0), οδηγώντας σε εξ ολοκλήρου αυτοματοποίηση της παραγωγικότητας [31]. Οι εφαρμογές 6G χαρακτηρίζονται και ως υπηρεσίες τύπου uMUB (ubiquitous Mobile Ultra-Band - πανταχού παρούσα Κινητή Υπερ-Ευρυζωνική Πρόσβαση), uHDD (ultra-High Data Density - υπερ-Υψηλή Πυκνότητα Δεδομένων), uHSLC (ultra-High-Speed Low Latency Communications - Επικοινωνίες υπερ-Υψηλής Ταχύτητας με Χαμηλή Καθυστέρηση) και mMTC (massive Machine Type Communication - μαζική Επικοινωνία Τύπου Μηχανής) [19].

Στο 6G, οι ήδη υφιστάμενες – κατά το 5G – υπηρεσίες uRLLC, eMBB και mMTC θα επεκταθούν σε άλλες τρεις διαστάσεις, που είναι οι uMUB, uHDD και uHSLC. Στα συστήματα 6G, το uMUB επιτρέπει τη μετάδοση, σε όλο τον τομέα χερσαίων-εναέριων-θαλάσσιων-διαστημικών επικοινωνιών, οποιασδήποτε επιθυμητής απόδοσης. Το uHDD πληροί όλα τα κριτήρια για εξαιρετική αξιοπιστία και πυκνότητα δεδομένων. Από την άλλη μεριά, το uHSLC παρέχει εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες και πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Επίσης οι παραπάνω νέες υπηρεσίες θέτουν απαιτήσεις από άκρο σε άκρο σχετικά με κοινό σχεδιασμό επαίσθησης και με επικοινωνιακές και/ή υπολογιστικές δυνατότητες [45].

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις κύριες αναδυόμενες εφαρμογές που θα οδηγήσουν στην υλοποίηση του οράματος των συστημάτων της επόμενης γενιάς 6G, βασιζόμενες στις δυνατότητες των δικτύων του μέλλοντος [7]. Αυτές απεικονίζονται ενδεικτικά στην Εικόνα 4 ([7], [22]).

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G



Εικόνα 4: Αναδυόμενες εφαρμογές 6G [22]

2.1 Υπερ-Ευφυές IoT (Hyper-Intelligent IoT)

Το IoT είναι το δίκτυο που (δια-)συνδέει δισεκατομμύρια συσκευές και είναι αυτό που κυρίως προβλέπει έναν εκθετικά αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, στη ροή του χρόνου. Ειδικότερα, σύμφωνα με τρέχουσες εκτιμήσεις, έως το 2025 προβλέπεται ότι θα υπάρχουν πάνω από 75 δισεκατομμύρια συσκευές IoT. Στην επικοινωνία IoT η ανθρώπινη παρέμβαση είναι ελάχιστη έως μηδαμινή και πραγματοποιείται μεταξύ μηχανών ή από μηχανή προς το δίκτυο. Κύριος στόχος των χειριστών του δικτύου είναι το να παρέχουν αξιόπιστη (δια-)συνδεσιμότητα σε αυτόν τον τεράστιο αριθμό συσκευών αλλά και στα παραγόμενα, εξ αυτών, δεδομένα. Το IoT αποτέλεσε κινητήρια δύναμη για το 5G αλλά εξακολουθεί να είναι μια σημαντική πρόκληση, δεδομένων των υπερβολικών – ως προς το πλήθος – προβλεπόμενων συσκευών που καλείται πλέον να εξυπηρετήσει [11].

Η επεξεργασία δεδομένων IoT στα 4G/5G συστήματα περιλαμβάνει την αποστολή των δεδομένων στο άκρο του δικτύου (network edge), καθώς και την επεξεργασία των ληφθέντων δεδομένων και την προώθησή τους – για περαιτέρω χρήσεις – προς το κεντρικό υπολογιστικό νέφος (cloud). Ωστόσο, υπάρχουν «μειονεκτήματα» στην τρέχουσα μορφή δικτυακής ανάπτυξης καθώς δεν μπορεί να υποστηριχθεί η επεξεργασία δεδομένων στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες οι ασύρματες συνδέσεις (π.χ. δυσπρόσιτες τοποθεσίες, ορεινές περιοχές, IoT εφαρμογές σε εναέρια και θαλάσσια περιβάλλοντα) ή/και όταν το γίνεται το δίκτυο πολύ «πυκνό» λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων που πιθανόν να δημιουργηθούν και τα οποία θα πρέπει να μεταδοθούν σε όλο το δίκτυο. Έτσι επιταχύνεται η έρευνα και η ανάπτυξη των μελλοντικών δικτύων 6G που επιδιώκεται να παρέχουν ανά πάσα στιγμή διαθέσιμες και έξυπνες λύσεις για υπερ-πυκνό (hyper-dense) IoT [22].

Η επόμενη γενιά των υπερ-ευφυών εφαρμογών IoT έρχεται για να βελτιστοποιήσει την επεξεργασία δεδομένων που θα λάβει χώρα δια της χρήσης μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Με στόχο την παροχή πιο έξυπνων υπηρεσιών η νέα γενιά θα ενσωματώσει ψηφιακούς βοηθούς, ρομποτικές συσκευές και UAVs (Unmanned Aerial Vehicles - Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα). Στο πλαίσιο του IoT αναμένεται η χρήση και η σύνδεση εξαιρετικά μεγάλου αριθμού τερματικών συσκευών και αισθητήρων, μεταξύ τους όσο και στο Διαδίκτυο, γεγονός που συνεπάγεται τη δημιουργία τεράστιου όγκου δεδομένων που θα πρέπει να τυγχάνουν αποτελεσματικής επεξεργασίας, ιδίως στα άκρα του δικτύου [22].

Κύριο χαρακτηριστικό της κοινωνίας του μέλλοντος θα αποτελέσει η ευρεία χρήση και ο μεγαλύτερος αριθμός προγραμματισμένης διασυνδεσιμότητας της πλατφόρμας του 5G. Το 5G θα περιλαμβάνει τις απαραίτητες υποδομές για την ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία της κοινωνίας αποδίδοντας επίσης έμφαση σε τομείς νέων εφαρμογών (όπως π.χ. ο έλεγχος ύδρευσης, γεωργικές εφαρμογές, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, μεταφορές και τα δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας (logistics)). Για την κάλυψη όλων αυτών των προοπτικών αναδύεται η ανάγκη της λειτουργίας πολλαπλών τύπων δικτύων, πολύ πέρα από τα σημερινά τυπικά επίγεια δίκτυα. Γίνονται αξιοσημείωτες προσπάθειες ώστε να αναπτυχθεί ένα «ευρύτερο» δίκτυο στο οποίο, με την ενοποίηση των επίγειων αλλά και πολλών δορυφορικών προγραμματισμένων δικτύων θα υπάρχει παγκόσμια αδιάλειπτη ευρυζωνική πρόσβαση, κυρίως για τους δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO). Τέλος είναι αναγκαία τόσο η καλύτερη δυνατή ασφάλεια για την επιτυχή λειτουργία των παραπάνω υποδομών, όσο και η αυξημένη αξιοπιστία των αισθητήρων που θα παρακολουθούν την υποδομή, για το σκοπό της μετάβαση προς μια πραγματικά (δια-)συνδεδεμένη κοινωνία, με τις καλύτερες δυνατές εγγυήσεις [23].

2.2 Διαδίκτυο των Πάντων (IoE - Internet of Everything)

Το IoE είναι η ενσωμάτωση και ο αυτόνομος συντονισμός μεταξύ μεγάλου αριθμού αντικειμένων ή/και συσκευών, αισθητήρων και υπολογιστικών στοιχείων, διαδικασιών, δεδομένων και ανθρώπων, χρησιμοποιώντας το Διαδίκτυο [32]. Το IoE έχει ως βασική ιδέα να δημιουργήσει νέες προοπτικές, ενσωματώνοντας με έξυπνο τρόπο διάφορες συσκευές με δυνατότητες παρακολούθησης μιας κατάστασης, επαίσθησης και λήψης αποφάσεων. Μερικές από τις παραμέτρους που μπορούν να θεωρήσουν και να εκλάβουν οι αισθητήρες τύπου IoE είναι η θέση, η ταχύτητα, η πίεση, τα βιοσήματα και η θερμοκρασία. Εφαρμογές που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους αισθητήρες μπορούν να εντοπίζονται σε συστήματα έξυπνων πόλεων, κυκλοφοριακής κίνησης, υγειονομικής περίθαλψης ή ακόμα και σε βιομηχανίες, με σκοπό την υποβοήθηση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων [22].

Το σύστημα 6G θα παρέχει πλήρη υποστήριξη στο IoE. Στο σημερινό περιβάλλον του 5G όπου το IoE βρίσκεται ακόμα στην αρχή, αντιμετωπίζονται ήδη αρκετές προκλήσεις σε ένα εύρος από την τυποποίηση μέχρι και την ενεργό εμπορευματοποίηση [19]. Σε κάθε περίπτωση, το 6G θα αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα ανάπτυξης για το IoE, βοηθώντας στην προσαρμογή και ενοποίηση αισθητήρων τύπου μηχανής και μαζικών συσκευών επικοινωνίας [22].

Το IoE «δεσμεύει» σε ένα σύστημα διάφορες «οντότητες» υπό μια ευρεία έννοια (όπως π.χ. ανθρώπους, φυσικά αντικείμενα, δεδομένα και διαδικασίες) εισάγοντας την προοπτική δικτυακής ευφυΐας και τυγχάνει χρήσης σε «έξυπνες» κοινωνίες (π.χ. έξυπνες βιομηχανίες,

έξυπνα αυτοκίνητα, έξυπνη υγεία). Από την άλλη μεριά, τα IoTs αναφέρονται γενικά σε αντικείμενα, σε φυσικές συσκευές και στην μεταξύ τους επικοινωνία [19]. Στο IoE απαιτείται να υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης “N” έξυπνων συσκευών, όπου το N μπορεί να φτάσει έως στην τάξη των δισεκατομμυρίων. Ωστόσο, για την υποστήριξη και τη διευκόλυνση των N συσκευών με χαμηλή καθυστέρηση, χρειάζονται υψηλοί ρυθμοί δεδομένων [33]. Έτσι λοιπόν το 6G και το IoE μπορούν μαζί όχι μόνο να δημιουργήσουν δεδομένα μεγάλου μεγέθους αλλά και να «επανεφεύρουν» την ψηφιοποίηση με ευέλικτη και βελτιωμένη ανάλυση δεδομένων, διευκολύνοντας με αυτό τον τρόπο διάφορες επιχειρηματικές διαδικασίες [22].

Ένας από τους πιο σημαντικούς περιορισμούς για την υποστήριξη μαζικής συνδεσιμότητας IoE στο 6G είναι η χρήση ενεργειακά αποδοτικών κόμβων αισθητήρων. Τα χαμηλής κατανάλωσης δίκτυα ευρείας περιοχής (Low-Power Wide Area Networks - LPWANs) συμμετέχουν στις περισσότερες περιπτώσεις χρήσης IoE, καθώς έχουν τη δυνατότητα, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και με μπαταρία μεγάλης διάρκειας ζωής (ενίστε >10 χρόνια), για να υποστηρίξουν κάλυψη ευρείας περιοχής (έως 20 Km). Η εφαρμογή αυτή μπορεί να υποστηριχθεί από τις δυνατότητες των uMUB, uHSLC και uHDD της επικοινωνίας 6G [19].

Εν κατακλείδι, το IoE προϋποθέτει συνεχή και μαζική επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, ώστε να διευκολύνονται οι υπηρεσίες, τα πράγματα-αντικείμενα και οι συμμετέχοντες άνθρωποι, ως ένα «ολοκληρωμένο και ενιαίο σύνολο» [22].

2.3 Ολογραφική Τηλεπαρουσία (Holographic Telepresence)

Μια «πραγματική» εμπειρία χρήστη θα δύναται να παρέχεται μέσω ολογραμμάτων, απτικών και άλλων αισθητηριακών δεδομένων, ενισχύοντάς την με τη χρήση πολυμέσων και διευκολύνοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών, σε έναν κόσμο όπου δεν θα υπάρχει εμφανής διαχωρισμός μεταξύ της εικονικής και της πραγματικής υπόστασης [30]. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται πολύ υψηλή διεκπεραιωτικότητα δεδομένων η οποία εμπεριέχει πολύ καλό συντονισμό μεταξύ των δεσμών ροών, τόσο μεταξύ πολλαπλών πηγών ροής όσο και αποδεκτών, καθώς επίσης και η δυνατότητα γρήγορης ιεράρχησης των στοιχείων δεδομένων μεταξύ και εντός των ροών, για κάθε καθοδήγηση από τις εφαρμογές. Κάτι τέτοιο θα μπορεί να συνδυαστεί και με την πρόοδο στον τρόπο αποτύπωσης και απόδοσης του περιβάλλοντος, από τα τελικά σημεία. Στο πλαίσιο αυτό, οι νέου τύπου ολογραφικές επικοινωνίες θα έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την έγκαιρη παράδοση και την πολύ υψηλή απόδοση [30].

Στον εικονικό τρόπο επικοινωνίας οι πολυνοσηματικές επικοινωνίες και τα ολογράμματα θα αποτελέσουν τα επόμενα σύνορα. Σήμερα η ολογραμματική τηλεπαρουσία είναι ήδη σε εξέλιξη [23]. Η εφαρμογή HT (Holographic Telepresence) συναγωνίζεται τη φυσική παρουσία, προβάλλοντας με υψηλό επίπεδο ρεαλισμού τρισδιάστατες (3D) και πλήρους κίνησης εικόνες (μακρινών) αντικειμένων και ανθρώπων, σε πραγματικό χρόνο. Πιθανές χρήσεις της εφαρμογής αυτής είναι η 3D τηλεδιάσκεψη, η τηλεδιάσκεψη πλήρους κίνησης, η μετάδοση ειδήσεων ή οι ομιλίες τύπου TED⁵ [22].

⁵ TED: Technology, Entertainments, Design. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://el.wikipedia.org/wiki/TED> (συνέδριο)

Η ολογραφική κοινωνία υψηλής πιστότητας είναι ο πρώτος οδηγός ο οποίος αναφέρεται σε εφαρμογές όπου υπάρχει διαδραστική και ταυτόχρονη επικοινωνία [11]. Οι ολογραφικές εφαρμογές τείνουν σταδιακά να καταστούν πραγματικότητα, λόγω της σημαντικής προόδου που έχει σημειώσει η τεχνολογία της ολογραφικής απεικόνισης. Πολλές από αυτές τις εφαρμογές θα έχουν τη δυνατότητα ροής και μετάδοσης των ολογραφικών δεδομένων από απόμακρυσμένα μέρη σε όλο το δίκτυο για να αποδοθούν ακολούθως σε μια ολογραφική τοπική οθόνη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών είναι η περίπτωση της ΗΤ στην οποία οι απομακρυσμένοι συμμετέχοντες προβάλλονται ως ολογράμματα σε μια αίθουσα, βρισκόμενοι από κοινού με τους πραγματικά συμμετέχοντες στη σχετική διάσκεψη. Σε μια άλλη χρήση, οι τεχνικοί εφαρμογών απομακρυσμένης αντιμετώπισης προβλημάτων που βρίσκονται σε απόσταση, θα μπορούν να αλληλεπιδρούν με ολογραφικές αποδόσεις των συναφών αντικειμένων. Επιπλέον, στον τομέα της εκπαίδευσης μπορεί να προσφέρονται – μέσω εξαιρετικών ρεαλιστικών ολογραφικών αντικειμένων – δυνατότητες στους χρήστες ώστε να έχουν απομακρυσμένη δυναμική αλληλεπίδραση, για διδακτικούς σκοπούς. Ακόμα, τα ολογράμματα μπορούν να συμπεριληφθούν και στη ρομποτική τηλεχειρουργική, μέσω οπτικοακουστικών ροών. Στόχος όλων αυτών των εφαρμογών είναι τόσο η διατήρηση της αποδεκτής ποιότητας των ροών δεδομένων όσο και η ελαχιστοποίηση του όγκου των δεδομένων. Αυτό συμβαίνει με εστίαση πρωτίστως στα δεδομένα που φαίνεται να έχουν την υψηλότερη επίδραση στην ποιότητα (π.χ. εκπομπή δεδομένων εικόνας των πεδίων που εστιάζουν στην υψηλότερη ποιότητα) όσο μεταδίδονται άλλες, χαμηλότερης ποιότητας εικόνες (π.χ. εικόνες μειωμένης ανάλυσης) ή όταν δεν υφίσταται καμία άλλη μετάδοση (π.χ. έκπτωση μερικών γωνιών και κλίσεων) [30]. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι απαιτείται μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων, υψηλή προσαρμοστικότητα και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση στα συστήματα ελέγχου προκειμένου να προσαρμόζουν κατάλληλα τα ολογραφικά περιεχόμενα, δεδομένου ότι ένας χρήστης μπορεί να αλλάξει θέση ή άποψη ([11], [30]).

Αρχικά η ΗΤ καταγράφει πλάνα ανθρώπων και περιεχόμενων αντικειμένων, τα οποία ακολούθως υπόκεινται σε συμπίεση και έπειτα μεταδίδονται μέσω ευρυζωνικού δικτύου, σε ένα αρχικό στάδιο. Αργότερα αποσυμπίεζονται στον ακροδέκτη οι πληροφορίες που έχουν μεταδοθεί και, μέσω ακτινών λέιζερ, οι πληροφορίες αυτές προβάλλονται σε μια οθόνη. Το διαδραστικό και απτικό περιεχόμενο των εφαρμογών ΗΤ αποτελεί καθοριστικό παράγοντα προσέλκυσης του κοινού, επιτρέποντας στους ανθρώπους να εμφανίζονται ταυτόχρονα σε πολλές τοποθεσίες και συμβάλλοντας έτσι στην ελαχιστοποίηση του κόστους των επαγγελματικών ταξιδιών [22].

Τα ολογράμματα παρέχουν μια πλούσια εμπειρία στον χρήστη και αποτελούν την εξέλιξη στην επικοινωνία μέσω του βίντεο [23]. Το βίντεο ήδη αποτελεί συχνή επιλογή για τις επικοινωνίες και εξελίσσεται σε αντίστοιχο με επαυξημένη πραγματικότητα (AR), με αποτέλεσμα να αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς η σχετική ανάλυση. Ιδίως η πανδημία COVID-19 έχει δώσει τη δυνατότητα στις κυβερνήσεις, στις επιχειρήσεις, στους πολίτες, στους επαγγελματίες του τομέα της υγείας και στους ασθενείς να διατηρούν μια εικονική επαφή μέσω βίντεο, παραμένοντας έτσι ενεργοί επαγγελματικά και κοινωνικά, χωρίς να είναι αναγκασμένοι να ταξιδεύουν. Αντίστοιχα, και για τα εκπαιδευτικά ιδρύματα όταν αυτά χρειάζεται να παραμείνουν κλειστά, η διαδικτυακή εκπαίδευση καθίσταται εφικτή με τη χρήση επικοινωνίας μέσω βίντεο. Ακόμα και τώρα, εργαστηριακές δράσεις και κορυφαία συνέδρια σε όλο τον κόσμο διεξάγονται εικονικά μέσω ζωντανών βίντεο. Προβλέπεται ότι αυτές οι εξελίξεις θα συνεχίσουν να είναι ενεργές και στην μετά COVID-19 εποχή [23].

Η Επικοινωνία Ολογραφικού Τύπου (Holographic-Type Communication - HTC) θέτει απαιτήσεις για τρεις επιπλέον «βαθμούς ελευθερίας» (ήτοι: κλίση, γωνία και θέση παρατηρητή ως προς το ολόγραμμα), γεγονός που προϋποθέτει πολλαπλών επόψεις για τη λήψη μιας πλήρους αναπαράστασης [11].

Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή λήψη των ολογραμμάτων είναι ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Οι ολογραφικές εικόνες, πέρα από τις τυπικές τους ιδιότητες (δηλαδή βάθος, χρώμα, ανάλυση και ρυθμός των πλαισίων), απαιτούν μετάδοση από πολλαπλές οπτικές γωνίες λαμβάνοντας υπόψη τις γωνίες, τις διακυμάνσεις των κλίσεων και τις θέσεις των παρατηρητών ως προς το ολόγραμμα. Παράλληλα, η συνεπής παροχή υψηλών ρυθμών δεδομένων απαιτεί επιπλέον συγχρονισμό, ώστε οι μεταδόσεις να συντονίζονται υπό πολλαπλές οπτικές γωνίες, διασφαλίζοντας έτσι την απρόσκοπτη εμπειρία του χρήστη και την παράδοση του περιεχομένου. Για ορισμένες εφαρμογές υπάρχει πιθανότητα συνδυασμού των ολογραμμάτων με δεδομένα που προέρχονται από άλλες πηγές, επιτρέποντας έτσι την ανατροφοδότηση των δεδομένων από ένα απομακρυσμένο σημείο προς μια οντότητα απόδοσης. Συμπληρωματικές εφαρμογές θα μπορούσαν να εμφανιστούν με συνδυασμούς ολογραμμάτων και απτικών δικτύων, ιδιαίτερα εάν υπάρχει δυνατότητα παροχής αφής [23].

Οστόσο υπάρχουν και ανασταλτικοί παράγοντες για την υιοθέτηση της τεχνολογίας HT. Το 5G παρέχει υψηλό ρυθμό δεδομένων (10 Gbps) και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (1 ms). Εντούτοις, το 6G αποτελεί βασικό παράγοντα για την υπηρεσία αυτή με ταχύτητες δεδομένων της τάξης πολλαπλών Gbps και με λανθάνουσα κατάσταση 0,1 ms, για πλήρη και αδιάλειπτη καθηλωτική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα, για να χαρακτηριστεί επιτυχημένη μια εφαρμογή HT, η ποιότητα της σύνδεσης απαιτεί εξαιρετικά υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση, χαρακτηριστικά που δυνητικά θα παρέχει η επικοινωνία 6G [22].

Είναι χρήσιμο και συνιστά πρόκληση το να συμπεριλάβουμε στο μέλλον αρκετές αισθήσεις στην επικοινωνία, όπως είναι η αφή, η όσφρηση και η γεύση, με σκοπό τη δημιουργία συναρπαστικών εμπειριών [11]. Εξετάζεται επίσης η προοπτική ώστε η επικοινωνία να συμπεριλαμβάνει και τις πέντε αισθήσεις, καθώς τα ολογράμματα, ο ήχος και το βίντεο περιλαμβάνουν τις αισθήσεις της ακοής και της όρασης. Οι αισθήσεις της γεύσης και της όσφρησης εμπλέκονται με τα συναισθήματα και για το λόγο αυτό θεωρούνται ως κατώτερες αισθήσεις. Δεν αποκλείεται όμως ο εμπλουτισμός ψηφιακών εμπειριών με γεύσεις και μυρωδιές, εάν θεωρήσουμε ότι όλες οι εμπειρίες αισθήσεων μπορούν να είναι ενσωματωμένες στα ολογράμματα. Έτσι λοιπόν, οι φορητές συσκευές έχοντας και την αντίληψη/επαίσθηση συναισθήματος, θα είναι σε θέση π.χ. να βελτιώνουν την εμπειρία των χρηστών, να διευκολύνουν τις κοινωνικές συναναστροφές και να παρακολουθούν την ψυχική υγεία⁶, χρησιμοποιώντας σαν μέσο επικοινωνίας τα ολογράμματα [23].

Είναι πιθανό το να συμπεριλαμβάνονται πολλαπλά κανάλια ολογραφικών δεδομένων. Για την εξασφάλιση μιας εσωτερικά συγχρονισμένης ολογραφικής απόδοσης μπορεί να γίνεται αντιστοίχιση μιας ξεχωριστής ροής σε κάθε ένα από αυτά τα κανάλια, με αυστηρές χρονικές απαιτήσεις. Ορισμένα κανάλια είναι πιθανόν να παρουσιάσουν διαφορετικές απαιτήσεις προσαρμοστικότητας/επανατακτικότητας (resilience). Μια πώση (απόρριψη) δεδομένων,

⁶ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: J. Shu, M. Chiu, and P. Hui (2019, November): **Emotion sensing for mobile computing**, *IEEE Communications Magazine*, vol.57, no.11, pp.84-90, doi: 10.1109/MCOM.001.1800834

αν και δεν είναι επιθυμητή, θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια μικρή υποβάθμιση στην ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών, οδηγώντας όμως και πάλι σε ένα αποδεκτό αποτέλεσμα. Εντούτοις, σε άλλες περιπτώσεις, μια πτώση δεδομένων σε ένα κανάλι μπορεί να οδηγήσει σε μια πλήρη κατάργηση της προτεραιότητας των δεδομένων για το συγκεκριμένο κανάλι. Το να τεθεί ένα κανάλι σε προτεραιότητα σε σχέση με άλλα κανάλια (ή/και να τύχει αυτό το κανάλι πλήρους απόρριψης) πιθανόν να είναι προτιμότερο από το να υπάρχει μια ελαφρά ομοιόμορφη υποβάθμιση μεταξύ όλων των καναλιών. Τέλος, υπάρχει το ενδεχόμενο οι συγκεντρωτικοί πόροι των ολογραφικών δεδομένων να είναι κοινόχρηστοι και πιθανόν να χρειάζεται συνεχής ανακατανομή μεταξύ των καναλιών, δεδομένου ότι τα περιεχόμενα που θα μεταδοθούν προσαρμόζονται συνεχώς στις σχηματομορφές (patterns) βελτιστοποίησης, σύμφωνα με τα τμήματα των ολογραφικών εικόνων που εξέρχονται και εισέρχονται από την εστίαση του χρήστη αλλά και τη διαδραστικότητα των χρηστών [30].

Πελάτες με υπηρεσίες δικτύου HTC μπορούν να καθορίσουν τις εξής παραμέτρους: α) Ο αριθμός των καναλιών για ολογραφικά δεδομένα, β) το εφικτό συνολικό εύρος ζώνης που μπορεί να τύχει καταχώρισης μεταξύ των καναλιών, γ) ο αποδεκτός από άκρο σε άκρο λανθάνων χρόνος που προδιαγράφεται ως μια απαίτηση εντός του οποίου θα πρέπει να πληρείται τόσο από όλα τα ολογραφικά κανάλια, όσο και από οποιοδήποτε δηλωτικό κανάλι – ή κανάλι δήλωσης⁷ – και, δ) η απαιτούμενη καθυστέρηση για το κανάλι επιστροφής (“back channel”⁸), καθορίζοντας εκ των προτέρων κατά πόσο απαιτείται η πρόβλεψη αλλαγών στην οπτική γωνία του χρήστη και η αλληλεπίδραση του χρήστη για να λάβει χώρα η προσαρμογή των μεμονωμένων ροών των καναλιών [30].

Η υπηρεσία του δικτύου HTC μπορεί να δομείται από ένα σύνολο συντονισμένων υπηρεσιών αποτελούμενων από:

- α) Ένα σύνολο καναλιών για τη μεταφορά ολογραφικών δεδομένων από την ολογραφική πηγή προς τον προορισμό/ακροσημείο απόδοσης. Καθένα από τα εν λόγω κανάλια θα μερίζεται την ίδια, εντός του χρόνου, απαίτηση. Επιπλέον, το συνολικό εύρος ζώνης για το κάθε κανάλι δεν θα πρέπει να ξεπερνά το εκχωρημένο συνολικό εύρος ζώνης της συντονισμένης υπηρεσίας.
- β) Ένα κανάλι για τη μεταφορά των δεδομένων δήλωσης από την πηγή έως το ακροσημείο απόδοσης, του οποίου καναλιού η καθυστέρηση δεν θα πρέπει να ξεπερνά την καθυστέρηση από οποιοδήποτε άλλο εκ των λοιπών καναλιών ολογραφικών δεδομένων.
- γ) Ένα κανάλι ελέγχου στην αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από το ακροσημείο απόδοσης μέχρι την ολογραφική πηγή, για τη ρύθμιση των δεδομένων δήλωσης και ροής. (Αυτό το κανάλι μπορεί να διατίθεται μέσω μιας χωριστής υπόστασης μιας –

⁷ Το κανάλι δήλωσης υποδεικνύει το πώς να γίνεται η σύνθεση της ολογραφικής εικόνας από τις πολλαπλές ροές. Τα δεδομένα αυτά απαιτούν ιδιαίτερη προστασία, καθώς οποιαδήποτε αλλοίωσή τους μπορεί να έχει σαν αντίκτυπο το να καταστήσει «άχρηστα» άλλα ολογραφικά δεδομένα [30].

⁸ Το “back channel” (κανάλι επιστροφής) περιλαμβάνεται για να ελέγχει τη μετάδοση και την ιεράρχηση μεταξύ 3D «παραθέσεων» (“tiles”) ή πεδίων πίνακα εικόνων (image array fields). Αυτό συμβαίνει διότι αλλάζουν οι απόψεις του τελικού χρήστη και κατά συνέπεια διαφορετικά τμήματα των ολογραφικών δεδομένων «μπαινούν και βγαίνουν» από την όψη [30].

εντός του χρόνου – υπηρεσίας και δεν χρειάζεται να περιλαμβάνεται ως μέρος της συντονισμένης υπηρεσίας) [30].

Το RFC 1633⁹ υποστηρίζει την εξέλιξη τόσο του δικτύου όσο και των εφαρμογών, ενώ για την ανάγκη συμβατότητας απαιτείται η σχετική σταθερότητα των διεπαφών των υπηρεσιών. Έτσι, οι διεπαφές υπηρεσιών του δικτύου του έτους 2030 θα συνιστούν μια εξελικτική προσέγγιση και θα υποστηρίζουν γνωστά μοτίβα διεπαφών, περιλαμβανομένων των υποδοχών (πριζών). Σε κάθε περίπτωση οι διεπαφές των υπηρεσιών του δικτύου θα πρέπει να επιτρέπουν στις εφαρμογές την πρόσβαση και την εκμετάλλευση των συναφών υπηρεσιών, επιτρέποντας εξελικτικές δράσεις/προοπτικές για τη διάθεση υποστήριξης (π.χ. για υπηρεσίες υψηλής ακρίβειας) [30].

2.4 Κινητικότητα με Βάση τη Χρήση UAVs

Εκτενής χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles - UAVs) λαμβάνει χώρα σε αμυντικές εφαρμογές όπως είναι π.χ. τα αυτόνομα drones, τα τηλεκατευθυνόμενα αεροσκάφη, κ.ο.κ., ενώ με την πάροδο του χρόνου η εφαρμογή τους έχει επεκταθεί και σε πολιτικό πεδίο (όπως π.χ. για την περιβαλλοντική ανίχνευση, την προστασία των γεωργικών καλλιεργειών, την αντιμετώπιση καταστροφών και την παρακολούθηση της κυκλοφορίας [22]). Άλλες περιπτώσεις χρήσης του 5G στις οποίες έχουν διερευνηθεί οι εφαρμογές UAVs είναι η παράδοση προμηθειών, δράσεις διάσωσης και επικοινωνίας και η δημόσια ασφάλεια [7].

Τα UAVs αποκτούν σημαντική χρησιμότητα ως ιπτάμενοι κόμβοι αναμετάδοσης ή/και ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης (BSs) με σκοπό να επεκτείνουν τη συνδεσιμότητα σε περιοχές πληγείσες από καταστροφές, σε αγροτικές περιοχές και σε περιοχές hotspot [7]. Τα UAVs μπορούν να υποστηρίξουν ασύρματες εκπομπές και εκπομπές υψηλών ταχυτήτων για την περίπτωση στην οποία απουσιάζει ή δεν λειτουργεί ο κυψελοειδής σταθμός βάσης [19]. Επίσης παρέχουν συνδρομή σε τομείς όπως η επιστημονική έρευνα, η γεωργία, το εμπόριο, η παράδοση προϊόντων, η διαχείριση καταστροφών κ.α. [19]. Μια τέτοια εφαρμογή των UAVs προϋποθέτει γρήγορη επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων, όπως επίσης και βέλτιστη κάλυψη επικοινωνίας, διατηρώντας συγχρόνως ιδανική θέση στον τρισδιάστατο χώρο [7]. Κύρια χαρακτηριστικά των UAVs εν συγκρίσει με τη σταθερή υποδομή είναι η ελεγχόμενη κινητικότητα, η εύκολη ανάπτυξη και η συνδεσιμότητα οπτικής επαφής (Line of Sight - LoS) [22]. Η ενσωμάτωση του 6G με την τεχνητή νοημοσύνη πρόκειται να επιλύσει σημαντικά προβλήματα που συσχετίζονται με την κινητικότητα των UAVs, όπως η μεταφορά ισχύος και ο αποτελεσματικός σχεδιασμός διαδρομής [22]. Η επιτυχία των παραπάνω εργασιών απαιτεί έλεγχο εξαιρετικής ακρίβειας, πολύ μικρή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, εγγύηση αξιοπιστίας καθώς και υψηλή υπολογιστική ισχύ, γεγονός που θέτει σημαντική επιβάρυνση στα UAVs περιορισμένης ισχύος. Επιπλέον, οι παρεμβολές μεταξύ ιπτάμενων και σταθερών σταθμών βάσης αναδεικνύονται σε μείζον ζήτημα λόγω της μεταβαλλόμενης θέσης και της κινητικότητας των UAVs. Επί του παρόντος, η ανάπτυξη σταθμών βάσης πάνω σε UAVs αποτελεί ένα από τα αντικείμενα μελέτης στην Έκδοση 17¹⁰

⁹ Internet Engineering Task Force (IETF) (1994): RFC 1633: “Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview”. Available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1633>

¹⁰ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.3gpp.org/release-17>

του 3GPP, όμως η σχετική τεχνολογία αναμένεται ότι θα είναι λειτουργική κατά τη διάδοση του 6G [7].

2.4.1 Επικοινωνίες με Drones

Οι επικοινωνίες με drones αποτελούν μια από τις προβλεπόμενες εφαρμογές στην ζώνη των THz, αναμένοντας να πετύχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και για να υποστηρίξουν αυξημένη κινητικότητα. Επίσης η ανάπτυξη μεγάλων συστοιχιών κεραιών για επέκταση της κάλυψης ενεργοποιεί ιδιαίτερα στενές δέσμες, γεγονός που ενδογενώς περιορίζει την πιθανότητα ωτακουστίας – ή λαθρακρόασης – (eavesdropping) και κατά συνέπεια μπορούν να επιτυγχάνονται ασφαλείς επικοινωνίες [18]. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες μορφές επικοινωνίας και αυτόνομων συστημάτων που βασίζονται σε drones, ως εξής:

- **Αποστολές Έρευνας και Διάσωσης:** Αποτελούν μια από τις κρίσιμες εφαρμογές των δικτύων drones, λόγω της ευελιξίας τους σε σύγκριση με επανδρωμένα οχήματα, τα οποία για να αναπτυχθούν χρειάζονται περισσότερο χρόνο [18].
- **Αποστολή και Παράδοση:** Μεγάλες εταιρείες ταχυμεταφορών σε παγκόσμια κλίμακα, έχοντας ως σκοπό την αξιόπιστη, γρήγορη και οικονομική παράδοση, υιοθέτησαν την παράδοση πακέτων μέσω εφαρμογών με χρήση drones. Πρόκειται για μια από τις πλέον ελκυστικές πολιτικές, καθώς το βάρος των περισσότερων πακέτων είναι κάτω από το μέγιστο βάρος που αντέχει ένα drone. Σύμφωνα με την Amazon, το 83% των πακέτων έχουν βάρος κάτω από 2,5 kgr, ενώ η FedEx υποστηρίζει ότι το μέσο βάρος μια συσκευασίας είναι λιγότερο από 5 kgr ([38], [18]).
- **Θαλάσσια Drones:** Πολλές υποβρύχιες στρατιωτικές και πολιτικές αποστολές μπορούν διεκπεραιωθούν με υποβρύχια drones, όπως εξερεύνηση-αναγνώριση πετρελαιοκηλίδων αλλά και μελέτες σχετικά με το οικοσύστημα ή/και με θαλάσσιους οργανισμούς [18].

2.5 Συνδεδεμένο και Αυτόνομο Όχημα (Connected and Autonomous Vehicle - CAV)

Τόσο ο βιομηχανικός όσο και ο ακαδημαϊκός κλάδος επιδεικνύουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα συστήματα μεταφορών επόμενης γενιάς όπως για τα συνεργατικά δίκτυα οχημάτων, το Διαδίκτυο των Οχημάτων (Internet of Vehicles - IoV), την αυτόνομη οδήγηση, τα Δίκτυα Οχημάτων Ad-hoc¹¹ (VANETs), τα διαστημικά διασυνδεδεμένα δίκτυα αέρος-εδάφους και τα δίκτυα αέρος-εδάφους. Ανοίγει λοιπόν ο δρόμος προς ένα μελλοντικό 6G Σύστημα Ευφυών Μεταφορών (Intelligent Transportation System - ITS) και έξυπνων επικοινωνιών V2X, μέσω των μελλοντικών δικτύων οχημάτων με ενσωματωμένες δυνατότητες τεχνητής νοημοσύνης (AI). Ιδίως η εμφάνιση των CAVs θα προσφέρει ευκαιρίες ριζικής αλλαγής στις αστικές μεταφορές και θα οδηγήσει στην ανάπτυξη παραγωγικών, περισσότερο «πράσινων» και βιώσιμων πόλεων [22].

Η αυτόνομη υποδομή κρίσιμης αποστολής (Mission Critical - MC) βασίζεται σε παρόμοιους αντικειμενικούς στόχους σχετικά με την καθυστέρηση. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση πρέπει να είναι υπερβολικά μικρή προς αποφυγή ανεπιθύμητων καταστάσεων, όπως μπορεί να είναι οι περιπτώσεις σύγκρουσης μεταξύ οχημάτων που ελέγχονται και

¹¹ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε, π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicular_ad_hoc_network

λειτουργούν από απόσταση. Στο πλαίσιο αυτό, δεν νοείται καμία ανοχή για απώλεια πακέτων. Το να καταστεί η καθυστέρηση «όσο το δυνατό συντομότερη» όπως συμβαίνει στο Διαδίκτυο, δεν είναι αρκετό. Τουναντίον, θα πρέπει να πληρούνται ποσοτικοποιημένοι αντικειμενικοί στόχοι, διαφορετικά δεν θα μπορούν να τυγχάνουν υποστήριξης οι αυτόνομες εφαρμογές κρίσιμης αποστολής [30].

Η σύνδεση των αυτόνομων οχημάτων βασίζεται κυρίως σε τεχνικές με χρήση τεχνητής νοημοσύνης, μαζί με εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση για την παροχή αποτελεσματικού σχεδιασμού διαδρομής και λήψης αποφάσεων. Στο προσεχές μέλλον το 6G θα επιφέρει αξιόπιστα, αυτόνομα, ασφαλή και εμπορικά βιώσιμα – και χωρίς οδηγό – αυτοκίνητα, αναμένοντας την επένδυση των περισσότερων εταιρειών σε CAVs. Με μια τέτοια καινοτομία θα προκύψει ένα νέο οικοσύστημα, που θα καθιστά πιο άνετη την καθημερινή ζωή (όπως τα δημόσια μέσα μεταφοράς και τα ταξί χωρίς οδηγό ([36], [37])).

2.5.1 Έξυπνα Σιδηροδρομικά Δίκτυα και Αυτόνομα Οχήματα

Τα αυτόνομα οχήματα και οι επικοινωνίες τύπου V2I (Vehicle-to-Infrastructure - Όχημα σε Υποδομή) μπορούν να οδηγήσουν σε ανταλλαγή πληροφοριών μέσω των συστημάτων 6G. Ωστόσο είναι αμφίβολο το κατά πόσο οι ζώνες THz είναι κατάλληλες για τέτοιου είδους εφαρμογές, λόγω των μικρών αποστάσεων (περιορισμένη εμβέλεια) και των περίπλοκων συνθηκών κυκλοφορίας. Σε ένα σιδηροδρομικό περιβάλλον αναφοράς, η μετάδοση συγκεντρωτικών δεδομένων και κρίσιμων – για την ασφάλεια – πληροφοριών των επιβατών, επιτυγχάνονται μέσω προσαρμοστικών ζεύξεων υψηλής ταχύτητας μεταξύ της υποδομής και των κεραιών των τρένων. Τέτοιες ζεύξεις εξαιρετικά υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων είναι κατάλληλες για εφαρμογές THz, αν και η υψηλή κινητικότητα δημιουργεί έντονη ευαισθησία σχετικά με σφάλματα σχηματισμού δέσμης και εξάπλωσης Doppler¹². Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα υψηλών συχνοτήτων για πρόσβαση μεταξύ κεραιών που υπάρχουν στις καμπίνες για συγκέντρωση δεδομένων από τους επιβάτες και από τους συναφείς εξοπλισμούς χρηστών (UEs), όπως π.χ. ένα κινούμενο hotspot [23].

2.6 Ρομποτικοί και Βιομηχανικοί Αυτοματισμοί

Η βιομηχανία, μέσω συστημάτων αυτοματισμού μπορεί να ελέγχει τις διαδικασίες και τα εν χρήσει μηχανήματα χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο δίκτυο ενεργοποιητών και αισθητήρων, μειώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο το εργασιακό κόστος και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα. Η σταθερή ανάπτυξη του βιομηχανικού αυτοματισμού γίνεται στα πλαίσια του TI (Tactile Internet¹³ - Απτικό Διαδίκτυο), έχοντας τον πλήρη έλεγχο των υψηλά ευαίσθητων κινούμενων συσκευών και διαφαλίζοντας πλήρωση των απαιτήσεων λανθάνουσας καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Η διαρκώς αυξανόμενη ανάγκη για διεργασίες ελέγχου διαφορετικών απαιτήσεων καθυστέρησης, αξιοπιστίας, ρυθμούς

¹² Το φαινόμενο Ντόπλερ (Doppler) είναι η παρατηρούμενη αλλαγή στη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός κύματος από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: https://el.wikipedia.org/wiki/Φαινόμενο_Ντόπλερ.

¹³ Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://5g.co.uk/guides/what-is-the-tactile-internet/>

δεδομένων και ασφάλειας, αναμένεται ότι θα επηρεάσει καταλυτικά την ανάπτυξη νέων ασύρματων λύσεων, προσαρμοσμένων σε αυτές τις συγκεκριμένες απαιτήσεις [18].

Η επανάσταση Industry 4.0¹⁴ ξεκίνησε στα δίκτυα 5G, με εστίαση στην επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή για ρομποτικούς και βιομηχανικούς αυτοματισμούς, η οποία απαιτεί μεγάλη ακρίβεια χρονισμού τόσο για τη διασπορά των εντολών ελέγχου όσο και για την συλλογή των δεδομένων τηλεμετρίας [30].

Ο τομέας εφαρμογών Industry 5.0¹⁵ αναφέρεται σε άτομα που θα εργάζονται κοντά σε έξυπνες μηχανές και σε ρομπότ, προσθέτοντας έτσι την ανθρώπινη προσωπική «πινελιά» στους πυλώνες του αυτοματισμού και της αποτελεσματικότητας του Industry 4.0 [22]. Ο όρος «αυτοματισμός» σημαίνει αυτόματο έλεγχο διαδικασιών, συσκευών και συστημάτων [19]. Οι βασικές τεχνολογίες του Industry 5.0 αναμένεται να είναι σε μεγάλο βαθμό παρόμοιες με αυτές του Industry 4.0. Ειδικότερα, στο Industry 5.0 ένας τεράστιος αριθμός πραγμάτων/αντικειμένων θα συνδέονται μέσω ασύρματων ή ενσύρματων τεχνολογιών για να παρέχονται διάφορες υπηρεσίες και εφαρμογές, οι οποίες θα ενεργοποιούνται από την πλήρη ενσωμάτωση των «μεγάλων δεδομένων» (“big data”), της υπολογιστικής νέφους/υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου (cloud/edge computing) και της τεχνητής νοημοσύνης ([22], [34]).

Η επιτυχής υιοθέτηση τόσο των σημερινών όσο και των μελλοντικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης της βασικής βιομηχανίας 4.0 και των εφαρμογών πέρα από αυτή, θα εξασφαλίσουν την ωριμότητα των βιομηχανικών δικτύων του μέλλοντος [23]. Εκτιμάται ότι οι νέες δικτυακές υπηρεσίες της επόμενης δεκαετίας (οι γνωστές και ως υπηρεσίες “Network 2030”¹⁶) πρέπει να υποστηρίζουν αξιοπιστία κρίσιμης βαθμίδας και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση για την παράδοση των πακέτων δεδομένων [30]. Ωστόσο, στην εποχή της επόμενης γενιάς 6G οι μηχανές τεράστιας συνδεσιμότητας θα απαιτούν έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, με υψηλούς ρυθμούς (μετάδοσης) δεδομένων. Παράλληλα, θα υπάρχει απαίτηση για τεχνητή νοημοσύνη που θα επιτρέπει την εκπομπή και την επεξεργασία οπτικών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας, ενεργοποιώντας «ψηφιακά δίδυμα» (“digital twins”) των μηχανών και των λειτουργιών, καθώς επίσης και εξ αποστάσεως αντιμετώπιση βλαβών. Για το λόγο αυτό προβλέπεται η χρήση συχνοτήτων mmWave επιπρόσθετα με τις ζώνες κάτω από τα 6 GHz για τα βιομηχανικά δίκτυα της επόμενης δεκαετίας [23].

Στον ρομποτικό και βιομηχανικό αυτοματισμό απαιτείται όχι μόνο η μη υποκείμενη σε υπερβάσεις λανθάνουσα κατάσταση αλλά και μια «αιτιοκρατική» λανθάνουσα κατάσταση, με πακέτα που όχι μόνο δεν θα υπερβαίνουν μια συγκεκριμένη τιμή (λανθάνουσας κατάστασης) αλλά και τα οποία δεν θα παραδίδονται πιο γρήγορα. Αυτό προκύπτει καθώς μερικοί βιομηχανικοί ελεγκτές απαιτούν εξαιρετικά ακριβή συντονισμό και διαπόσταση των ρευμάτων τηλεμετρίας και των δεδομένων ελέγχου, διευκολύνοντας έτσι την ακριβή λειτουργία των ρομποτικών επηρεαστήρων (effectors) με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας [30].

Τα συνεργατικά ρομπότ (collaborative robots και εν συντομία “cobots”) έχουν άμεση συνεργασία με τους ανθρώπους που εργάζονται, αναλαμβάνοντας επαναλαμβανόμενες, επικίνδυνες και κουραστικές εργασίες, με σκοπό να αυτοματοποιήσουν την παραγωγή και

¹⁴ Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution

¹⁵ Βλέπε επίσης: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en

¹⁶ Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://www.network-2030.com/>

να εξασφαλίσουν την ασφάλεια και την υγεία των εργαζομένων. Τα cobots, για να υποστηρίξουν τις αναδυόμενες εφαρμογές, θα πρέπει να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο και να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων. Ωστόσο τούτο σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι πρακτικό, λόγω των περιορισμών που υπάρχουν τόσο στις επικοινωνιακές και υπολογιστικές συνδέσεις όσο και στη χωρητικότητα αποθήκευσης. Επιπλέον, στο Industry 5.0 η ενεργοποίηση των cobots προϋποθέτει σύγχρονες λύσεις ασφάλειας, αξιοπιστίας και εμπιστοσύνης. Οι εφαρμογές και η απόδοση των cobots μπορούν να επιφέρουν σημαντική βελτίωση μέσω της ενεργοποίησης της δυνατότητας των υπηρεσιών 3CLS¹⁷ (Control, Localization, and Sensing - Έλεγχος, Εντοπισμός και Επαίσθηση) [22].

2.7 Ευφυής Περίθαλψη (Intelligent Healthcare)

Διάφορες καταλυτικές εξελίξεις έχουν ήδη σημειωθεί στην ανάπτυξη της υγειονομικής περίθαλψης και πλέον έχουμε φτάσει, με την έλευση της ψηφιακής ευεξίας, στην περίπτωση της Healthcare 5.0¹⁸. Η έξυπνη υγειονομική περίθαλψη που θα βασίζεται στην τεχνητή νοημοσύνη θα αναπτυχθεί πάνω σε διάφορες νέες μεθοδολογίες όπως είναι η Ποιότητα Ζωής (Quality of Life - QoL), οι ευφυείς φορητές συσκευές (Intelligent Wearable Devices - IWDs), οι υπηρεσίες H2H (Hospital-to-Home - από το Νοσοκομείο στο Σπίτι), το Ευφυές Διαδίκτυο Ιατρικών Πραγμάτων (Intelligent Internet of Medical Things - IIoMT) και νέα επιχειρηματικά μοντέλα ([22], [33]).

Λαμβάνοντας υπόψη τα βασικά χαρακτηριστικά 6G (δηλαδή τον υψηλό ρυθμό δεδομένων, την αξιοπιστία και τη χαμηλή καθυστέρηση), θα μπορεί να διευκολύνεται η ταχεία και αξιόπιστη μεταφορά μεγάλου πλήθους ιατρικών δεδομένων με σκοπό τη βελτίωση της πρόσβασης και την ποιότητας της υγειονομικής περίθαλψης όπως και την επίτευξη της εξ αποστάσεως χειρουργικής ([18], [19]).

Πλέον είναι εφικτή η μέτρηση δεδομένων υγείας και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, λόγω των πρόσφατων εξελίξεων στις υπολογιστικές συσκευές και στους φορητούς αισθητήρες που έχουν οι ασθενείς. Ακολουθώντας, τα δεδομένα αφού συλλεχθούν από τις φορητές συσκευές και αποστέλλονται στο ιατρικό προσωπικό για εξ αποστάσεως διάγνωση/αξιολόγηση. Επιπλέον, ο ιατρός θα έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης επέμβασης από απόσταση μέσω απτικού Διαδικτύου, ολογραφικών επικοινωνιών και έξυπνων ρομπότ σε συστήματα 6G [22].

Για μια συνεχή και αξιόπιστη παρακολούθηση των φυσιολογικών ανθρώπινων σημάτων είναι επιθυμητοί κυρίως οι αισθητήρες σώματος, με σκοπό την παροχή τεχνολογιών επικοινωνίας χωρίς μπαταρία, για εφαρμογές στις διεπαφές ανθρώπου-μηχανής, σε θέματα κλινικής διάγνωσης και αθλητισμού [19]. Για παράδειγμα, οι φακοί επαφής Smart Google μέσω των μικροσκοπικών συσκευών που περιέχουν, έχουν την δυνατότητα να μετρούν τα επίπεδα γλυκόζης στα δάκρυα των ασθενών με διαβήτη και να στέλνουν τα

¹⁷ Εδώ θεωρούμε το 6G ως ένα σύστημα πολλαπλών χρήσεων που μπορεί να προσφέρει πολλές υπηρεσίες 3CLS με εγγενή χαρακτηριστικά την παρακολούθηση, τον έλεγχο, τον εντοπισμό και υπολογιστικές δράσεις.

¹⁸ Για περισσότερα σχετικά πληροφοριακά στοιχεία βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.semanticscholar.org/paper/Healthcare-5.0%3A-A-Paradigm-Shift-in-Digital-System-Mohanta-Das/072234648f05496b7f5dc40e65a39a58cbe359f6>

αποτελέσματα σε έναν ασύρματο ελεγκτή [18]. Επίσης με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογιών είναι εφικτή η διάγνωση και η αντιμετώπιση σοβαρών ασθενειών, όπως π.χ. η νόσος Πάρκινσον και η επιληψία. Άλλες εμφυτεύσιμες νευρικές συσκευές στον εγκέφαλο θα αποτελέσουν την απαιτούμενη διεπαφή εγκεφάλου – υπολογιστή, για τη διάγνωση και τη μελέτη ασθενειών [18].

Η επικοινωνία THz συνιστά μια ακόμα σημαντική εφαρμογή του 6G με πολλές περιπτώσεις χρήσης στην υγειονομική περίθαλψη όπως στη δερματολογία (μέσω της παλμικής απεικόνισης terahertz), στη φαρμακευτική βιομηχανία, στη στοματική υγειονομική περίθαλψη και στην ιατρική απεικόνιση εν γένει [19]. Η χρήση των νανο-αισθητήρων επιτρέπει την παρακολούθηση διαφορετικών ιόντων στο ανθρώπινο αίμα, π.χ. γλυκόζη, επίπεδα χοληστερόλης, λοιμώξεις και καρκινικούς δείκτες. Εν συνεχεία, τα δεδομένα που συλλέγονται θα προωθούνται μέσω επικοινωνιών THz σε μια μικρο-διασύνδεση (π.χ. κινητό τηλέφωνο ή ιατρική συσκευή). Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι ακτινοβολίες THz είναι ασφαλείς για τα ανθρώπινα σώματα [18].

Οι υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης τις οποίες παρέχουν τα υφιστάμενα δίκτυα επικοινωνίας, είναι εξαρτώμενες από την θέση. Αντιθέτως, η ιατρική εμπειρογνωμοσύνη που παρέχει το TI (Tactile Internet) δεν θα έχει περιορισμούς φυσικής θέσης ή/και χρόνου. Τέτοιες πιθανές εφαρμογές του TI στην υγειονομική περίθαλψη είναι η τηλε-διάγνωση, η τηλε-χειρουργική και η τηλε-αποκατάσταση. Δηλαδή, ένας γιατρός μπορεί να διαγνώσει εξ αποστάσεως έναν ασθενή ελέγχοντας ένα ρομπότ, δια της λήψης απτικής ανατροφοδότησης και οπτικοακουστικών πληροφοριών [18].

Τέλος, τα σήματα ραδιοσυχνότητας προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, γεγονός που αποτελεί απειλή για τα ακριβά ιατρικά μηχανήματα. Γι'αυτόν το λόγο, στις μονάδες εντατικής θεραπείας δεν επιτρέπεται η χρήση κινητών τηλεφώνων τα οποία λειτουργούν με ραδιοσυχνότητες. Η εφαρμογή της ενδοκλινικής μετάδοσης δεδομένων είναι ασφαλής για την ανθρώπινη υγεία και θεωρείται ως «ελκυστική» για την περίπτωση της OWC (Optical Wireless Communication - Οπτική Ασύρματη Επικοινωνία). Η OWC έχει τη δυνατότητα να εφαρμόζεται στα κτίρια υγειονομικής περίθαλψης παρέχοντας υψηλό και ασφαλή ρυθμό δεδομένων σε μικρές αποστάσεις επιπλέον του φωτισμού, γεγονός που ελαχιστοποιεί το κόστος υλοποίησης, παρέχοντας μια φιλική ως προς την υγεία εναλλακτική σε σύγκριση με τις ραδιοσυχνικές (RF) επικοινωνίες [18].

2.8 Εξατομικευμένα Σωματικά Δίκτυα (Personalized Body Area Networks)

Τα Σωματικά Δίκτυα¹⁹ (Body Area Networks - BANs) μπορούν να παρακολουθήσουν κατά τρόπο εξατομικευμένο και να διαχειριστούν τα θέματα παρακολούθησης της υγείας – περίθαλψης μέσω κινητών ενσωματωμένων συστημάτων υγείας (mHealth). Τα εξατομικευμένα BANs έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν πληροφορίες για την υγεία μέσω πολλαπλών αισθητήρων, να διεκπεραιώνουν δυναμική ανταλλαγή πληροφοριών με το περιβάλλον και επιπλέον να αλληλεπιδρούν με υπηρεσίες δικτύωσης (εμπεριέχοντας και τα κοινωνικά δίκτυα). Τα εξατομικευμένα BANs μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε ιατρικούς τομείς, όπως είναι η αποφυγή καλωδίωσης σε πολυ-υπνογραφικές εξετάσεις (διάγνωση διαταραχών ύπνου) όσο και σε μη ιατρικούς τομείς όπως είναι οι εφαρμογές ασφαλούς

¹⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Body_area_network

ελέγχου ταυτότητας, η ανίχνευση συναισθημάτων και η ψυχαγωγία. Πρόσφατα, στο πλαίσιο της επόμενης γενιάς IoT αναπτύχθηκαν το Internet of Bio-Nano-Things²⁰ (IoBNT) και το Internet of Nano-Things²¹ (IoNT) για να προσφέρουν υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης. Οι δυνατότητες ενσωμάτωσης των τεχνολογιών IoT και των ασύρματων τεχνολογιών στα συστήματα IoBNT και BAN έχουν αποδειχθεί ως αρκετά ικανοποιητικές. Εντούτοις, θα πρέπει να τύχουν περαιτέρω διερεύνησης για τη βελτίωση της απόδοσης των εξατομικευμένων BANs καθώς και για την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες [22].

2.9 Έξυπνο Πλέγμα 2.0 (Smart Grid 2.0)

Στο Smart Grid 2.0²² η παρακολούθηση της κατανάλωσης μπορεί να γίνει με ακρίβεια μέσω της ενσωμάτωσης έξυπνων συστημάτων λήψης αποφάσεων, δηλαδή με τη χρήση έξυπνων μετρητών. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές επιδιώκεται η ανίχνευση της ποιότητας ισχύος, η ανίχνευση διακοπών ισχύος και η απόκριση σε αιτήματα δικτυακής ζήτησης και συνδεσιμότητας ώστε να καλύπτεται η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας [22]. Με την ανάπτυξη του έξυπνου ενεργειακού πλέγματος, οι επικοινωνίες έχουν καταστεί μείζον ζήτημα καθώς ένας πολύ μεγάλος αριθμός συσκευών θα πρέπει να μπορούν να συνδέονται από απόσταση, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του ηλεκτρικού ενεργειακού εξοπλισμού. Για την υλοποίηση τέτοιου είδους δράσεων ελέγχου, το σύστημα χρειάζεται εκπομπή υψηλής ποιότητας, ενισχυμένη ασφάλεια και αποτελεσματική διαχείριση των επικοινωνιακών πόρων [15].

Μέχρι στιγμής η επικοινωνία πέμπτης γενιάς με περιορισμένο, σχετικά, αριθμό συσκευών ανταποκρίνεται στην απαίτηση υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης για την εμπορευματοποίηση του έξυπνου δικτύου [22]. Ωστόσο, απαιτούνται συστήματα επικοινωνίας 6G ώστε να αντιμετωπίζεται η διαφοροποίηση και πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής [20]. Για παράδειγμα, απαιτείται η ενσωμάτωση αισθητήρων στα συστήματα λήψης αποφάσεων (όπως είναι η μηχανική μάθηση), για την παρακολούθηση εκπομπών CO₂, ώστε να υπάρξουν τα κατάλληλα μέτρα κατανομής και εξισορρόπησης φόρτου [15]. Τα συστήματα επικοινωνίας 6G αναμένεται να υλοποιήσουν διάφορες εκφάνσεις του έξυπνου δικτύου όπως είναι η π.χ. εξισορρόπηση φόρτου, οι ετερογενείς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αποτελεσματική διανομή κ.α. [22].

2.9.1 Υπερ-Έξυπνη Κοινωνία

Με τα χαρακτηριστικά του 6G θα επιταχυνθεί η οικοδόμηση έξυπνων κοινωνιών, χρησιμοποιώντας επικοινωνία μηχανής προς μηχανή (M2M), βασιζόμενη σε συλλογή ενέργειας και σε AI [31], με εφαρμογές στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και σε αυτοματισμούς. Ιδιαίτερα ευφυής θα καταστεί η κοινωνία με την ασύρματη συνδεσιμότητα 6G, μέσω αυτόνομων οχημάτων και έξυπνων φορητών συσκευών. Επιπλέον, μέσω της ασύρματης τεχνολογίας 6G θα αναπτυχθούν σε πολλές πόλεις τα ιπτάμενα ταξί [19].

²⁰ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://mbite.unl.edu/files/papers/2015/j1.pdf>

²¹ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.speranzainc.com/internet-of-nano-things/>

²² Βλέπε, π.χ.: <https://www.power-grid.com/smart-grid/smart-grid-2-0-challenges-utilities/#gref>

2.9.2 Υπερ-Έξυπνη Πόλη

Τα έξυπνα οχήματα, η αυτόνομη οδήγηση, οι έξυπνες κατασκευές, τα drones και τα έξυπνα ρομπότ αφορούν σε αναδυόμενες εφαρμογές έξυπνων πόλεων και βιομηχανιών με έλεγχο υψηλής ακρίβειας, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (συνήθως κάτω από 1 ms) και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, της τάξης 99,9999% [35]. Οι προαναφερθείσες εφαρμογές έχουν ήδη τύχει διερεύνησης στην περίπτωση χρήσης του URLLC στο 5G, ενώ το βιομηχανικό και το μαζικό IoT έχουν τύχει διερεύνησης στην περίπτωση χρήσης mMTC στο 5G (χρήση που γενικά αντιστοιχεί σε εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης). Εντούτοις, όλες αυτές οι εφαρμογές εκτιμάται ότι θα τύχουν ευρείας διάδοσης αλλά και χρήσης στην εποχή του 6G. Η υπερβολική πυκνότητα του δικτύου θα έχει σαν αποτέλεσμα να συγκεντρώνεται σε κάθε μικρή περιοχή μεγάλος αριθμός συνδεδεμένων ασύρματων αισθητήρων, φωτογραφικών μηχανών, υπολογιστικών στοιχείων, κρυφών μνημών και ελεγκτών (χαμηλής και υψηλής ισχύος) και να δημιουργείται τεράστιος όγκος δεδομένων που θα πρέπει να μεταδοθεί σε όλο το δίκτυο 6G. Ωστόσο, λόγω των εκτενών δράσεων επεξεργασίας, ανίχνευσης και επικοινωνίας, προκύπτουν υψηλές απαιτήσεις αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας. Παράλληλα, τα υπεραστικά ταξίδια μεγάλης ταχύτητας και οι μεταφορές (όπως π.χ. με χρήση τρένων υψηλής ταχύτητας), αναμένεται να τύχουν ευρείας διάδοσης και να ενισχύσουν την ανάγκη για συνδεσιμότητα υψηλής αξιοπιστίας. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να οριστεί στην επόμενη γενιά 6G μια νέα κατηγορία περιπτώσεων χρήσης για μαζικά αυτόνομα συστήματα [7], αναφορικά με την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, την πυκνότητα των δεδομένων και την πυκνότητα σύνδεσης, το εύρος ζώνης, το υπολογιστικό φορτίο και την ενεργειακή απόδοση. Εκτιμάται λοιπόν ότι οι εφαρμογές mMTC και URLLC θα είναι απλές περιπτώσεις χρήσης, υπό αυτή τη νέα προσεγγιστική θεώρηση.

Κατάλληλος εξοπλισμός για την παρακολούθηση της ρύπανσης και των επιπέδων θορύβου στον αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις έξυπνες πόλεις, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Επίσης, μια άλλη χρήση τέτοιων εξοπλισμών θα μπορούσε να συμβαίνει σε κλειστούς χώρους στάθμευσης για καλύτερη διαχείριση της κυκλοφορίας, υποδεικνύοντας τις διαθέσιμες θέσεις και διευκολύνοντας στην εύρεση θέσης στάθμευσης. Επιπλέον, αισθητήρες με δυνατότητα backscatter (οπισθόδρομης σκέδασης) μπορούν με ευκολία να τοποθετηθούν σε κτίρια, γέφυρες, λαμπτήρες οδών και χώρους στάθμευσης, συμβάλλοντας στο όραμα των έξυπνων πόλεων με χαμηλό ενεργειακό κόστος [18].

2.9.3 Έξυπνα Σπίτια

Μια άλλη εφαρμογή θα μπορούσε να αφορά στην ενσωμάτωση, στις κατοικίες, αισθητήρων χαμηλής ισχύος backscatter που θα διαθέτουν συσκευές συλλογής ενέργειας για την εκτέλεση ευρέος φάσματος εργασιών (όπως π.χ. για παρακολούθηση κίνησης, για ανίχνευση καπνού, για διαρροή φυσικού αερίου και οξειδίου του άνθρακα). Άλλη εφαρμογή μπορεί να συσχετίζεται με έξυπνους κάδους απορριμάτων, στους οποίους οι ενσωματωμένες συσκευές backscatter θα παρακολουθούν και θα αναφέρουν τη στάθμη των απορριμάτων ανά κάδο, πληροφορώντας σχετικά τα αντίστοιχα φορτηγά αποκομιδής των απορριμάτων [18].

2.10 Εκτεταμένη Πραγματικότητα (Extended Reality)

Η **εκτεταμένη πραγματικότητα (XR)** αναφέρεται σε μια αναδυόμενη τεχνολογία όπου οι υπολογιστές, καθώς και τα δυνάμενα για να φορεθούν μέσα (γνωστά και ως “wearables”), δημιουργούν αλληλεπιδράσεις ανθρώπου-μηχανής, συγχωνεύοντας εικονικούς και πραγματικούς κόσμους. Οι τέσσερις τεχνολογίες XR, VR, AR, και MR που προβαίνουν σε AI και τρισδιάστατων αντικειμένων, συλλέγουν δεδομένα αναφορικά με τον προσανατολισμό, τη θέση και την επιτάχυνση, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς αισθητήρες. Αυτό προϋποθέτει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, ισχυρή συνδεσιμότητα, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή ανάλυση, που όλα τους θα διευκολυνθούν με τη χρήση του 6G [22]. Η μελλοντική ανάπτυξη των εφαρμογών XR θα επιτευχθεί με την uHSLC υπηρεσία 6G [19].

Εικονική πραγματικότητα (VR): Η εφαρμογή VR επιτρέπει στους χρήστες, μέσω μιας πλατφόρμας προσομοίωσης VR, να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με διάφορες κινήσεις [18]. Πρόκειται για μια τριδιάστατη προσομοίωση με υπολογιστή, με σκοπό τη δημιουργία ενός φανταστικού κόσμου ή/και τη δημιουργία ρεαλιστικών αισθήσεων αντιγράφοντας ένα πραγματικό περιβάλλον, το οποίο δημιουργείται με την εμπλοκή και των πέντε αισθήσεων [19]. Το Tactile Internet (TI) αναμένεται να παρέχει την απαιτούμενη χαμηλή καθυστέρηση για να διευκολύνει τα από κοινού εικονικά περιβάλλοντα, καθώς τα σημερινά συστήματα VR δεν υποστηρίζουν σταθερό και απρόσκοπτο συντονισμό επικοινωνίας στους χρήστες. Υπό αυτή τη θεώρηση, η απτική ανάδραση κρίνεται ως απαραίτητη, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα στους χρήστες να αγγίζουν αντικείμενα σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας και να μπορούν να επαισθάνονται τις ενέργειες τους στο ίδιο αντικείμενο επαφής. Το TI αναμένεται να αποτελέσει τον βασικό ενεργοποιητή για απτικές επικοινωνίες εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης και με απαιτήσεις αξιοπιστίας. [18].

Επαυξημένη πραγματικότητα (AR): Τα σημερινά συστήματα AR παρέχουν μόνο προεπεξεργασμένο περιεχόμενο, λόγω των εγγενών καθυστερήσεων στο δίκτυο επικοινωνίας αλλά και των περιορισμένων υπολογιστικών δυνατοτήτων τους [18]. Η περίπτωση AR προβάλλει ζωντανά την υπάρχουσα πραγματικότητα και τα στοιχεία του προστίθενται, χρησιμοποιώντας τον υπολογιστή με διάφορες εισόδους αισθητήρων (π.χ. ήχο, γραφικά, βίντεο δεδομένα του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (Global Positioning System - GPS)) [19]. Μολαταύτα, οι εφαρμογές AR αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς, ιδίως λόγω της διαθεσιμότητας γυαλιών AR και ισχυρών έξυπνων συσκευών που διαθέτουν μικρούς – ως προς το μέγεθος – αισθητήρες και κάμερες. Το TI επιτρέπει την αύξηση πληροφοριών με δυναμικό τρόπο και σε πραγματικό χρόνο, στα περιεχόμενα [18].

Μεικτή πραγματικότητα (MR): Η MR ή αλλιώς υβριδική πραγματικότητα, έχοντας ως σκοπό την αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, συγχωνεύει τον εικονικό και τον πραγματικό κόσμο δημιουργώντας νέα περιβάλλοντα αναφοράς. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συνιστά η μαγνητική τομογραφία, στην οποία μπορούν να ανταποκρίνονται το πραγματικό και το τεχνητό περιεχόμενο σε πραγματικό χρόνο [19].

2.11 Ασύρματες Αλληλεπιδράσεις Εγκεφάλου-Υπολογιστή

Ο έλεγχος των καθημερινών συσκευών στις έξυπνες κοινωνίες, ιδιαίτερα σε οικιακές και σε ιατρικές συσκευές, προσεγγίζεται από την αποκαλούμενη διεπαφή εγκεφάλου-υπολογιστή (γνωστή ως Brain Computer Interface - BCI²³). Η BCI λαμβάνει τα εγκεφαλικά σήματα που μεταδίδονται από μια ψηφιακή συσκευή και στη συνέχεια τα αναλύει και τα ερμηνεύει σε ενέργειες ή/και σε εντολές. Εν συγκρίσει με τα συστήματα 5G, οι υπηρεσίες BCI απαιτούν υψηλότερες μετρήσεις απόδοσης, ενώ το ασύρματο BCI προϋποθέτει υψηλό ρυθμό δεδομένων, εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση.

2.12 Υπηρεσίες και Επικοινωνίες 5D

Η εκτεταμένη πραγματικότητα (XR), η ασύρματη αλληλεπίδραση εγκεφάλου – υπολογιστή (BCI) και οι ολογραφικές επικοινωνίες αναφέρονται σε υπηρεσίες και μορφές επικοινωνίας που βασίζονται στην «τεχνολογία των πέντε διαστάσεων» (“5D”), δηλαδή σε όραση, ακοή, όσφρηση, αφή και γεύση. Για να μπορέσουν αυτές οι εφαρμογές να παρέχουν στους χρήστες τους μια εμπειρία πολύ κοντά στην πραγματικότητα θα πρέπει να ενσωματώνουν απτικές δυνατότητες και απτική υψηλής ακρίβειας. Επίσης, για την πραγματοποίηση αυτών των εφαρμογών, οι τεχνολογίες 6G θα πρέπει να προσφέρουν εξαιρετικά υψηλές απαιτήσεις απόδοσης της τάξεως των Gbps έως Tbps, με καθυστέρηση 1-10 μs. Τέτοιες περιπτώσεις χρήσης προϋποθέτουν από κοινού εκπλήρωση των URLLC και eMBB, που έχουν εξεταστεί ξεχωριστά μόνο για τα δίκτυα 5G [7].

Οι φορητές συσκευές προηγμένων δυνατοτήτων (π.χ. εικόνες υψηλής ευκρίνειας, συσκευές XR, ολογράμματα) και οι πέντε αισθήσεις επικοινωνίας προωθούν την επικοινωνία μεταξύ των ανθρώπων και των πραγμάτων/αντικειμένων. Επίσης παρέχονται ψυχαγωγικές επιχειρηματικές υπηρεσίες (π.χ. αθλήματα, παιχνίδια) χωρίς περιορισμούς τόπου και χρόνου [19]. Τα 6G συστήματα επικοινωνίας θα μεταφέρουν δεδομένα από απόσταση, τα οποία θα λαμβάνονται από τις πέντε αισθήσεις, χρησιμοποιώντας τη νευρολογική διαδικασία. Θα ανιχνεύονται οι αισθήσεις του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος ενώ θα μπορεί να χρησιμοποιείται το ανθρώπινο σώμα σε τοπικές συνθήκες περιβάλλοντος. Η εν λόγω εφαρμογή ενισχύεται αποτελεσματικά και από την τεχνολογία BCI [19].

2.13 Έφαρμογές Time Sensitive/Time Engineered

Εφαρμογές που είναι ευαίσθητες ως προς τον χρόνο (time sensitive) κρίνονται ως σημαντικές με την έλευση των νέων εφαρμογών IoT. Ειδικότερα, ο παράγοντας χρόνος γίνεται πιο σημαντικός στα μελλοντικά δίκτυα, ιδίως δε εκεί όπου οι άνθρωποι δεν είναι οι κύριοι χρήστες των δεδομένων. Τέτοιες εφαρμογές είναι π.χ. τα αυτόνομα συστήματα και ο βιομηχανικός αυτοματισμός [11].

Τόσο οι άνθρωποι όσο και οι μηχανές παρουσιάζουν καθυστερήσεις ως προς την παράδοση των πληροφοριών, αλλά σε διαφορετικό βαθμό. Στην πλήρως διασυνδεδεμένη μελλοντική κοινωνία η έγκαιρη παράδοση των πληροφοριών θα αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, ενώ οι

²³ Βλέπε, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Brain%E2%80%93computer_interface

νέες εφαρμογές που παρέχουν έξυπνη αλληλεπίδραση με το δίκτυο θα προϋποθέτουν έγκαιρη άφιξη των δεδομένων και εγγυημένη χωρητικότητα. Με την ενσωμάτωση των συσκευών (gadgets) στην καθημερινότητα μας, οι εμπειρίες και οι γρήγορες αποκρίσεις – όντας πλέον αμφότερες στενά συσχετισμένες – θα αποτελούν βασικά στοιχεία για την υλοποίηση δράσεων και τη διάθεση ειδικών εφαρμογών. Η καθυστέρηση στην άφιξη των πληροφοριών και η επικαιρότητα είναι ιδιαίτερα κρίσιμες σε ένα δίκτυο όπου τα τελικά σημεία επικοινωνίας αποτελούνται από έναν τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων αισθητήρων. Σε άλλα μελλοντικά μέσα επικοινωνίας, όπως αυτά που θα βασίζονται σε απτικό έλεγχο, η ευαισθησία ως προς τον χρόνο θα έχει σημαντικό αντίκτυπο. Τα συμβατικά τμήματα-δίκτυα του Διαδικτύου έχουν την ικανότητα παροχής εικόνας και ήχου, που ταξινομούνται ως μη απτικός έλεγχος επικοινωνίας. Παρόλα αυτά, αναμένεται ότι θα παρέχεται από το ΤΙ μια κατάλληλη πλατφόρμα αφής και ενεργοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Τα συστήματα 5G δεν είναι ικανά για να παρέχουν πλήρη εικονικοποίηση οποιασδήποτε εκτελέσιμης δεξιότητας σε ένα άλλο σημείο του κόσμου και μεταφορά αυτής σε ένα επιλέξιμο μέρος, χωρίς να συμβαίνει υπέρβαση του ορίου λανθάνοντος χρόνου της ανθρώπινης αντίδρασης (που είναι το 1 ms), με αυτό να οφείλεται στον σχεδιασμό του συστήματος και στους αρχιτεκτονικούς περιορισμούς του. Τον στόχο αυτό θα τον αντιμετωπίσουν τα συστήματα 6G, λόγω της λιτής αρχιτεκτονικής του δικτύου και των δυνατοτήτων για περισσότερο προηγμένη επεξεργασία [23].

2.14 Αναπτύξεις Hot Spot

Πρόκειται για μια συμβατική εφαρμογή στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν συστήματα με εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε εξωτερικούς ή εσωτερικούς χώρους. Ωστόσο, λόγω της περιορισμένης ακτίνας κάλυψης τόσο σε εξωτερικά περιβάλλοντα (που είναι περίπου τάξης των 100 m) όσο και στα εσωτερικά περιβάλλοντα (που είναι ακόμα λιγότερο) τυχόν παρούσες αναπτύξεις κρίνονται μάλλον ως «αντιοικονομικές» και αυτό οφείλεται στη μοριακή απορρόφηση και στην έλλειψη ελεύθερου χώρου (βλ. Πίνακα 2). Στην περίπτωση που απαιτείται περισσότερο εύρος ζώνης, υπάρχει η δυνατότητα συγκέντρωσης περισσότερων παραθύρων, με το μειονέκτημα να συμβεί επιπλέον συντόμευση της εφικτής απόστασης κατά τη μετάδοση.

Παράθυρο (Window) #	f_c [THz]	B_{3dB} [GHz]	Απώλεια σε 10mm [dB]	Απώλεια σε 1m [dB]	Απώλεια σε 100m [dB]	Απώλεια απορρόφησης [dB/Km]
W1	0.245	210	60.18	80.18	120.18	3
W2	0.41	65.61	64.65	84.65	124.65	20
W3	0.49	86.21	66.2	86.2	126.2	40
W4	0.66	152.59	68.79	88.79	128.79	60
W5	0.84	141.91	70.88	90.88	130.88	80
W6	0.94	47.3	71.86	91.86	131.86	150

W7	1.03	57.98	72.65	92.65	132.65	-
----	------	-------	-------	-------	--------	---

Πίνακας 2: Η λειτουργία των Windows σε ζώνες THz (Στην κεντρική συχνότητα κάθε παραθύρου υπολογίζεται η απώλεια ελεύθερου χώρου)

2.15 Επιφάνειες για Ασύρματες Επικοινωνίες

2.15.1 Μετα-επιφάνειες (Metasurfaces) σε Εφαρμογές WPT

Τα μελλοντικά δίκτυα οραματίζονται να παρέχουν, ειδικά σε συσκευές/αισθητήρες χαμηλής ισχύος, διαρκή αναπλήρωση ενέργειας μέσω της τεχνολογίας WPT²⁴. Ωστόσο υπάρχει ανησυχία για το εάν υφίσταται η δυνατότητα των συσκευών να συλλέγουν αρκετή ενέργεια στα ασύρματα κανάλια. Οι μετα-επιφάνειες έχουν την ικανότητα παροχής κατεύθυνσης και συγκέντρωσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, επιτρέποντας την επιτυχή μεταφορά και συλλογή ενέργειας. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έχει μελετηθεί στις μετα-επιφάνειες η δυνατότητα ενσωμάτωσης έξυπνων τραπεζιών (smart tables) ώστε να υπάρχει ταυτόχρονη τροφοδοσία πολλαπλών ασύρματων συσκευών, όπως και η ενσωμάτωση βιολογικών εφαρμογών (όπου μια φορητή συσκευή θα τοποθετείται στην επιφάνεια του ανθρώπινου δέρματος βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα του εμφυτευμένου συστήματος WPT) [18].

2.15.2 Κλωστοϋφαντουργικά Προϊόντα βασισμένα σε Μετα-επιφάνειες για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Σώματος (WBSN)

Οι ενεργειακά ασφαλείς και αποδοτικές εφαρμογές WBSN (Wireless Body Sensor Network) δημιουργήθηκαν λόγω της ανάπτυξης συναφών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Συγκεκριμένα, τα ρούχα εφοδιάζονται με αγώγιμα υφάσματα μετα-επιφανειών, μέσω των οποίων τα ασύρματα σήματα οδεύουν από την επιφάνεια του σώματος προς τα ρούχα δημιουργώντας διασύνδεση με ασύρματες φορητές συσκευές, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός WBSN. Το WBSN έχει ως στόχο την ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος. Δεδομένου ότι οι φορητές συσκευές βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το σώμα, προκύπτει ως αποτέλεσμα μικρή κατανάλωση ισχύος από τις ασύρματες συσκευές, βελτιώνοντας έτσι τον ρυθμό δεδομένων των συσκευών αυτών καθώς επίσης και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα προϊόντα έχουν τη δυνατότητα να ενεργοποιούν προσωπικά δίκτυα αισθητήρων που είναι εξαιρετικά αποδοτικά, απρόσβλητα σε παρεμβολές και επομένως ασφαλή. Σε μελλοντικές εφαρμογές υπάρχει η προοπτική κατασκευής αθλητικών ρούχων υψηλής τεχνολογίας που θα έχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης διεπαφής ανθρώπου-μηχανής και παρακολούθησης της υγείας [18].

²⁴ Βλέπε επίσης: https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 6G

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κύριες επαναστατικές τεχνολογίες που ενδεχομένως θα εισαχθούν στο σύστημα 6G και οι οποίες θα αποτελέσουν τους βασικούς παράγοντες των μελλοντικών συστημάτων επικοινωνίας 6G [22]. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι νέες θεμελιώδεις τεχνολογίες χρειάζονται συνήθως μια δεκαετία – ή και περισσότερο – ώστε να υλοποιηθούν εκτενώς στην πράξη και να τύχουν ουσιαστικής διάδοσης και χρήσης στην αγορά, οι παρακάτω νέες τεχνολογίες αποτελούν σήμερα βασικό αντικείμενο ερευνητικών δράσεων με στόχο την αναλυτική μελέτη τους για την ουσιαστική εφαρμογή τους [8].

Οι τεχνολογίες αυτές προβλέπεται να εισάγουν ένα πλήθος νέων εφαρμογών, που σχετίζονται με αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία, την απόδοση, την καθυστέρηση, την ενεργειακή κατανάλωση και τη χωρητικότητα, σε σχέση με τις αντίστοιχες απαιτήσεις των υφιστάμενων συστημάτων 5G. Παρακάτω παρουσιάζεται το εννοιολογικό υπόβαθρο αυτών των βασικών τεχνολογιών που θα διαμορφώσουν τα μελλοντικά δίκτυα 6G, επιτρέποντας έτσι στο δίκτυο να πραγματοποιήσει καινοτόμες και ενίοτε επαναστατικές λειτουργίες [18].

Οι διάφορες νέες τεχνολογίες που προβλέπεται να αποτελέσουν μέρος για τη μελλοντική διαμόρφωση του συστήματος 6G, είναι οι εξής:

1. Επικοινωνίες Terahertz
2. Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες
3. Τεχνητή Νοημοσύνη
4. Κωδίκευση Καναλιού
5. Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα
6. Τεχνολογίες Συλλογής και Μεταφοράς Ενέργειας
7. Ενσωμάτωση Επαίσθησης και Επικοινωνίας
8. Τεχνολογίες MIMO
9. Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες (IRS)
10. Κβαντικές Επικοινωνίες
11. Blockchain (Πλοκαδική Συναλύτωση)
12. Τεχνολογίες Δικτύωσης

3.1 Επικοινωνίες Terahertz

Η επικοινωνία Terahertz είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία θα έχει μεγάλο αντίκτυπο στις καθημερινές δραστηριότητες, ιδίως με την πρόοδο βασικών τεχνολογιών και τη διάδοση συναφών με αυτές συσκευών. Η ανάπτυξη και χρήση του φάσματος terahertz στις επικοινωνίες και σε άλλους τομείς έχει τύχει ιδιαίτερης προσοχής σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, στις Ηνωμένες Πολιτείες στην Ιαπωνία και αλλού, ενώ ιδιαίτερη μέριμνα αναπτύσσεται και από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) [1].

Το φάσμα αποτελεί το «θεμέλιο» των κινητών επικοινωνιών και με τη διάδοση/ανάπτυξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας (από τη δεκαετία του 1980), διαπιστώνεται σε κάθε γενιά σημαντική επέκταση των πόρων του φάσματος, εξαιτίας της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης

ρυθμών δεδομένων [24]. Η χρήση mmWave²⁵ δεν αρκεί να αντιμετωπίσει για μια ακόμα δεκαετία τη συνεχή αύξηση για πολλαπλές ευρυζωνικές εφαρμογές. Προβλέπεται λοιπόν για τις ασύρματες τεχνολογίες στην εποχή του 6G να λειτουργούν σε συχνότητες ακόμα υψηλότερες, δηλαδή σε συχνότητες της τάξεως πλέον των THz [13]. Συνεπώς, η ζώνη THz αποκτά κυρίαρχο ρόλο στην επικοινωνία 6G και προορίζεται να αποτελέσει το «επόμενο σύνορο» στις επικοινωνίες με υψηλές ταχύτητες δεδομένων [19]. Ωστόσο θα πρέπει το μέγεθος των κυψελών 6G να συρρικνωθεί από μικρές κυψέλες σε «μικροσκοπικές κυψέλες» (“tiny cells”), των οποίων η ακτίνα θα περιορίζεται σε μερικές δεκάδες μέτρα, για να λαμβάνει χώρα η εκμετάλλευση υψηλότερων συχνοτήτων mmWave και THz [3]. Ο συγκεκριμένος τύπος επικοινωνίας θα χρησίμευε για επικοινωνία σε μικρές αποστάσεις, με μηδενικά ποσοστά σφάλματος και με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα δεδομένων [22]. Με μια τέτοια θεώρηση, στην επικοινωνία 6G επιταχύνεται η παροχή υπηρεσιών uHSLC, uMUB και uHDD [16].

Η νέα φασματική ζώνη συχνοτήτων Terahertz βρίσκεται μεταξύ οπτικών κυμάτων και μικροκυμάτων [1]. Το 6G, σε σύγκριση με το 5G, προβλέπεται να παρέχει πάνω από 1000 φορές αύξηση στους ρυθμούς δεδομένων, καλύπτοντας έτσι τον βασικό στόχο ρυθμού 1 Tbps [22]. Η ζώνη THz δύναται να παρέχει συνδέσεις Terabit/δευτερόλεπτο (Tbps) για ένα πλήθος εφαρμογών, όπως ιδιαίτερα γρήγορη και μαζική μεταφορά δεδομένων σε κοντινές συσκευές καθώς επίσης και υψηλής ευκρίνειας τηλεδιάσκεψη σε μικρές κυψέλες μεταξύ κινητών συσκευών. Εντούτοις, οι περιπτώσεις χρήσης των συγκεκριμένων ζωνών στις ασύρματες επικοινωνίες είναι ακόμα υπό διερεύνηση, παρόλο που οι εν λόγω ζώνες έχουν τύχει ήδη ικανοποιητικής εφαρμογής στην απεικόνιση και ανίχνευση αντικειμένων, όπως επίσης και στην αστρονομική έρευνα (συγκεκριμένα στη φασματοσκοπία ακτινοβολίας THz). Σε κάθε περίπτωση, η πρόοδος που έχει σημειωθεί στους τομείς σχετικά με το σχεδιασμό πομποδέκτη και κεραιών, αναδεικνύουν τις συνδέσεις THz ως μια «πολλά υποσχόμενη επιλογή» σχετικά με την υλοποίηση εσωτερικών δικτύων επικοινωνίας [16].

Η ζώνη συχνοτήτων των κυμάτων THz ή αλλιώς ακτινοβολία υποχιλιοστών (submillimeter radiation), είναι συνήθως μεταξύ 0,1 THz και 10 THz και τα αντίστοιχα μήκη κύματος είναι μεταξύ 0,03 mm - 3 mm [19]. Σύμφωνα με την ITU-R (ITU Radiocommunication Sector - Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών - Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών) το κύριο μέρος της ζώνης THz στις κυψελοειδείς επικοινωνίες είναι η περιοχή από 275 GHz έως 3 THz [62]. Με την προσθήκη της ζώνης THz (δηλαδή 275 GHz - 3 THz) στην υπάρχουσα ζώνη mmWave (30 - 300 GHz), επιτυγχάνεται αύξηση της χωρητικότητας των κυψελοειδών επικοινωνιών 6G. Συγκεκριμένα αυξάνεται η συνολική χωρητικότητα της ζώνης τουλάχιστον κατά 11,11 φορές [19].

Η χρήση της ζώνης THz στα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνίας ενθαρρύνεται από μοναδικά χαρακτηριστικά, όπως είναι τα εξής:

1. Υποστήριξη πολύ υψηλών ρυθμών δεδομένων, λόγω του εκτενώς διαθέσιμου ζωνικού εύρους [19].

²⁵ Το κύμα χιλιοστών (mmWAVE) ή ζώνη χιλιοστών, είναι η ζώνη φάσματος με μήκη κύματος μεταξύ 1 χιλιοστού (300 GHz) και 10 χιλιοστών (30 GHz). Είναι γνωστή και ως ζώνη εξαιρετικά υψηλής συχνότητας (EHF - Extremely High Frequency) από τις δράσεις της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU). Για περισσότερα πληροφοριακά στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/millimeter-wave-MM-wave>.

2. Το μεγάλο εύρος ζώνης του κύματος Terahertz καλύπτει το ζητούμενο εύρος ζώνης για το φάσμα της ασύρματης ευρυζωνικής μετάδοσης [6].
3. Το κύμα Terahertz είναι καταλληλότερο για υψηλής ταχύτητας και μικρής εμβέλειας ασύρματη επικοινωνία, καθώς απορροφάται εύκολα από την υγρασία του αέρα [6].
4. Οι παρεμβολές μειώνονται, καθώς δημιουργούνται στενά πλάτη δέσμης από τις υψηλά κατευθυντικές κεραιές. Το κύμα THz έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει ασφαλείς επικοινωνίες λόγω της στενής δέσμης κύματος και παλμού σύντομης διάρκειας, περιορίζοντας δραστικά την πιθανότητα υποκλοπής ([19], [24]).
5. Διαστημική επικοινωνία: Σε εξωτερικούς χώρους, το κύμα Terahertz έχει σχετικά διαφανή ατμοσφαιρικά παράθυρα κοντά σε 350, 450, 620, 735 και 870 μικρόμετρα (microns). Μπορεί να γίνεται εκπομπή χωρίς να υπάρχουν απώλειες και να επιτυγχάνεται επικοινωνία μακρινών αποστάσεων με πολύ χαμηλή ισχύ. Επιπλέον, σε σύγκριση με την ασύρματη οπτική επικοινωνία, η δέσμη έχει μεγαλύτερο εύρος, ο δέκτης μπορεί εύκολα να ευθυγραμμίζεται, ο κβαντικός θόρυβος είναι χαμηλότερος και το τερματικό της κεραιάς μπορεί να είναι μικρουργημένο (miniaturised) και επίπεδο. Επομένως, το κύμα Terahertz μπορεί να χρησιμοποιείται ευρέως σε διαστημικές επικοινωνίες, ειδικά για επικοινωνία ζωνικού εύρους μεταξύ δορυφόρων και μεταξύ δορυφόρου και εδάφους [1].
6. Τα χαρακτηριστικά διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δείχνουν ότι η διάλεια ελεύθερου χώρου είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας, επομένως το κύμα THz έχει μεγαλύτερη μείωση στον ελεύθερο χώρο συγκρινόμενο με τη ζώνη χαμηλών συχνοτήτων [6].
7. Σε κινούμενο ρυθμό, ο χρόνος συμφωνίας του καναλιού συσχετίζεται γραμμικά με τη φέρουσα συχνότητα, το οποίο σημαίνει ότι ο χρόνος συμφωνίας της ζώνης των Terahertz είναι πολύ μικρός και η εξάπλωση Doppler είναι μεγάλη, συγκριτικά με τη ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στο τρέχον κυψελοειδές σύστημα [6].
8. Το σήμα Terahertz έχει μεγάλη ευαισθησία σε σκιά (shadow) και έχει μεγάλη επιρροή στην κάλυψη [6].
9. Τα συστήματα επικοινωνίας THz δεν εμφανίζουν ευαισθησία στα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, διευκολύνοντας έτσι την παρακολούθηση και διαμόρφωση δέσμης. Αυτό οδηγεί σε μια μάλλον καλή λύση για ασύρματη οπισθοζευκτική επικοινωνία (backhaul) και για εσωτερικές επικοινωνίες [13].
10. Τα κύματα THz, καθώς διαπερνούν με μικρή εξασθένηση ορισμένα υλικά, τα καθιστούν κατάλληλα για ειδικά σενάρια [24].
11. Υψηλή ενεργειακή απόδοση: Το κύμα Terahertz σε σχέση με την ασύρματη οπτική επικοινωνία έχει χαμηλή ενέργεια φωτονίων (περίπου 10-3 eV), μόνο το 1/40 του ορατού φωτός. Έτσι δύναται να χρησιμοποιηθεί ως φορέας πληροφοριών για την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης [1].

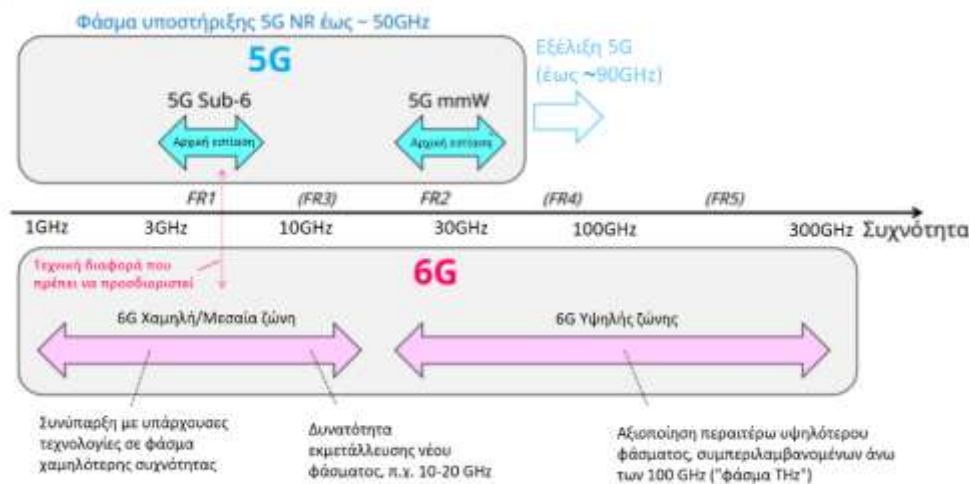
Για να μπορέσει να γίνει χρήση της τεχνολογίας αυτής στο 6G, θα πρέπει να βελτιωθούν οι δυνατότητές της, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει. Τέτοιες βελτιώσεις είναι οι ακόλουθες:

- i. Τα κύματα THz επίσης υποφέρουν από υψηλή απώλεια διαδρομής και κατά συνέπεια βασίζονται πρωτίστως σε κατευθυντικές κεραιές και σε κανάλια LOS για

όσο διάστημα προσφέρουν πολύ περιορισμένη κάλυψη. Ωστόσο, όταν είναι διαθέσιμη μια ικανοποιητική ζεύξη LOS, η υψηλή φέρουσα συχνότητα διαθέτει ένα ζωνικό εύρος το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο από εκείνο οποιασδήποτε κληροδοτημένης τεχνολογίας, καθιστώντας το ικανό ώστε να παρέχει ταυτόχρονα εξαιρετικά υψηλές επιδόσεις αναφορικά με θέματα διεκπεραιωτικότητας, καθυστέρησης και απόδοσης [13].

- ii. Η απώλεια διάδοσης, η μεγάλη απώλεια εισχώρησης, η μοριακή απορρόφηση και οι προκλήσεις μηχανίκευσης (engineering) για κυκλώματα ραδιοσυχνοτήτων (RF), αποτέλεσαν εμπόδιο στα εμπορικά συστήματα αναφορικά με την υιοθέτηση συνδέσμων Terahertz. Μολαταύτα, η επικοινωνία Terahertz μπορεί να μεγιστοποιήσει την απόδοσή της με το να λειτουργήσει σε ζώνες συχνοτήτων που δεν επηρεάζονται σοβαρά από τη μοριακή απορρόφηση [4].
- iii. Το σύστημα Terahertz αφορά σε μια προσανατολισμένη, χωρικά, μετάδοση σήματος, κάτι που σημαίνει γρήγορη μεταβολή του συσχετισμού των κυψελών, της ακτίνας της υπηρεσίας και της εξασθένησης διαδρομής. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το μεταβαλλόμενο πρόβλημα της διακοπτόμενης σύνδεσης, τίθεται ως προϋπόθεση ένας γρήγορος και ευέλικτος μηχανισμός προσαρμογής [6].
- iv. Τα κύματα THz απαιτούν ηλεκτρομαγνητικά αναδιαμορφώσιμα υλικά για την κατασκευή ηλεκτρονικών συσκευών. Συναφείς συσκευές που κατασκευάζονται από τέτοιου είδους υλικά, εμφανίζουν μεγάλες απώλειες στη ζώνη συχνοτήτων THz. Σε αυτό το πλαίσιο, το γραφένιο²⁶ αναγνωρίζεται ως ένας κατάλληλος υποψήφιος για την αναμόρφωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων THz (μέσω της χρήσης λεπτών στρωμάτων αυτού του υλικού). Στοιχεία ασύρματης επικοινωνίας THz, που βασίζονται στο γραφένιο, επιδεικνύουν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα σχετικά με τη δημιουργία, τη διαμόρφωση και την ανίχνευση κυμάτων THz [22].
- v. Η επικοινωνία THz θα βελτιώσει τις δυνατότητες του 6G με την υποστήριξη της ασύρματης γνωστικής ικανότητας (cognition), της επαίσθησης (sensing), της απεικόνισης (mapping), της επικοινωνίας (communication) και του εντοπισμού θέσης (location) [19].
- vi. Η ασύρματη επικοινωνία THz, χρησιμοποιώντας τεχνολογία MIMO, δίνει τη δυνατότητα σε μικρά μεγέθη κεραιών να αποκτήσουν κατευθυντικότητα κεραιών και να επιτύχουν κέρδος διαφοροποίησης [22].
- vii. Αν και οι επικοινωνίες THz προσφέρουν πλεονεκτήματα, ορισμένα ζητήματα χρήζουν αντιμετώπισης και επίλυσης, προκειμένου οι εν λόγω επικοινωνίες να τύχουν ουσιαστικής χρήσης στο πλαίσιο 6G. Οι συναφείς προκλήσεις συμπεριλαμβάνουν και τον σχεδιασμό αποτελεσματικών πομποδεκτών, με προηγμένες τεχνολογίες κεραιοσυστοιχιών για αύξηση της εμβέλειας [20].
- viii. Τα κύματα Terahertz δεν έχουν την δυνατότητα να διαδοθούν σε μεγάλη απόσταση και σε σχέση με τα «χιλιοστομετρικά κύματα» έχουν ισχυρότερη τάση για να ταξιδεύουν σε ευθεία διαδρομή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα η βελτίωση της απόδοσης σε ζώνες χιλιοστών και χαμηλών συχνοτήτων, όπως και η εξερεύνηση νέων ζωνών συχνοτήτων, παρέχοντας έτσι ισχυρό κίνητρο εισαγωγής του 6G σε παρόχους υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας [9].

²⁶ Το γραφένιο είναι ουσιαστικά ένα απομονωμένο ατομικό επίπεδο του γραφίτη. Τα γραφενικά επίπεδα έχουν χωριστεί ακόμη καλύτερα σε παρεμβαλλόμενες ενώσεις γραφίτη. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων, την περιγραφή στην ιστοσελίδα: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AD%CE%BD%CE%B9%CE%BF>



Εικόνα 5: Εξερεύνηση των ζωνών συχνοτήτων για 6G [9]

3.2 Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες

Τα συστήματα Οπτικής Ασύρματης Επικοινωνίας (Optical Wireless Communications - OWC) επιτρέπουν ευρυζωνική συνδεσιμότητα και αναδεικνύονται ως μια από τις βασικές τεχνολογίες των δικτύων 6G [18].

Μερικά από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών είναι η εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, το υψηλό εύρος ζώνης, ο υψηλός ρυθμός δεδομένων, η εγγενής ασφάλεια του φυσικού επιπέδου, το χαμηλό κόστος και η δυνατότητα «ασυλίας» σε παρεμβολές, ικανοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις για πέρα από τα υφιστάμενα ασύρματα δίκτυα 5G. Η περίπτωση των OWC αφορά σε μια πολλά υποσχόμενη συμπληρωματική τεχνολογία των παραδοσιακών ασύρματων επικοινωνιών που λειτουργούν μέσω ζωνών RF και που χρησιμοποιούν ως μέσο μετάδοσης το ορατό φως ή το υπεριώδες (UV) και υπέρυθρο (IR) [2]. Στα συστήματα OWC επιτρέπεται μεγάλης εμβέλειας μετάδοση δεδομένων διαμέσου υψηλής ταχύτητας ασύρματων συνδέσεων στο εύρος υπέρυθρων συχνοτήτων, περίπτωση που συναντάται συχνά στα οπισθοζευκτικά²⁷ ασύρματα δίκτυα [18]. Ωστόσο η περίπτωση OWC θέτει και μειονεκτήματα όπως είναι π.χ. η μη γραμμικότητα των LEDs (Light-Emitting Diodes - Δίοδοι Φωτοεκπομπής), οι ατμοσφαιρικές απώλειες, η διασπορά πολλαπλών διαδρομών, ο θόρυβος στο περιβάλλον φωτός και τα σφάλματα σκόπευσης (pointing errors) [13].

Οι τεχνολογίες OWC είναι ήδη γνωστές, όπως η επικοινωνία ορατού φωτός (Visible Light Communication - VLC), η πιστότητα φωτός (Light Fidelity - LiFi), η οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου (Free Space Optical - FSO) και η επικοινωνία οπτικής κάμερας (Optical Camera Communication - OCC). Τέλος, η περίπτωση OWC θα ενισχύσει σίγουρα τις υπηρεσίες uMUB, uHDD, mMTC και uHSLC των συστημάτων επικοινωνίας 6G [19].

²⁷ Το ασύρματο backhaul (οπισθοζευξη) είναι η υποδομή ασύρματου δικτύου και επικοινωνίας που είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά δεδομένων επικοινωνίας από κόμβους ή τελικούς χρήστες στην υποδομή ή στο κεντρικό δίκτυο και αντίστροφα. Συνεπώς είναι η ενδιάμεση υποδομή ασύρματης επικοινωνίας που συνδέει μικρότερα δίκτυα με το πρωτεύον δίκτυο. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://el.theastrologypage.com/wireless-backhaul>.

3.2.1 Επικοινωνίες Ορατού Φωτός

Η περίπτωση VLC (Visible Light Communications - VLC) αποτελεί μια από τις τεχνολογίες της ασύρματης οπτικής επικοινωνίας (OWC) για επικοινωνίες μικρής εμβέλειας, με τη χρήση του ορατού φωτός. Το φάσμα συχνοτήτων των εφαρμογών VLC είναι από 430 THz έως 790 THz [22] και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για «ενεργοποίηση» πολλαπλών εφαρμογών [20].

Η οπτική ζώνη έχει τη δυνατότητα να παρέχει απεριόριστο εύρος ζώνης χωρίς να χρειάζεται άδεια από τις αρμόδιες ρυθμιστικές Αρχές. Επίσης μέσω της χρήσης της μπορεί να πραγματοποιηθεί υψηλής ταχύτητας πρόσβαση και με χαμηλό κόστος, λόγω διαθεσιμότητας οπτικών εκπομπών και ανιχνευτών [13]. Τέτοιες συσκευές μπορούν να υφίστανται αλλαγές σε διαφορετικές εντάσεις φωτός, για να διαμορφώσουν το προς μετάδοση σήμα στον κατάλληλο δέκτη. Η τεχνολογία της επικοινωνίας ορατού φωτός (VLC) προβλέπεται να προσφέρει υψηλής ταχύτητας συνδεσιμότητα σε εσωτερικούς χώρους [18], καθώς υποφέρει από τον θόρυβο άλλων πηγών φωτός (π.χ. ήλιος), έχει περιορισμένο εύρος κάλυψης και προϋποθέτει πηγή φωτισμού [4].

Το φάσμα ορατού φωτός λόγω της υιοθέτησης των LEDs και της τεχνολογικής προόδου, συνιστά μια σημαντική προοπτική για τις εφαρμογές OWC. Ένα από τα πλεονεκτήματα των LEDs που τις κάνει να διαφέρουν από τις παλαιότερες τεχνολογίες φωτισμού, είναι η γρήγορη μετάβαση σε διαφορετικά επίπεδα έντασης φωτός, επιτρέποντας έτσι την κωδικοποίηση των δεδομένων με διαφορετικούς τρόπους στο εκπεμπόμενο φως [61].

Στα συστήματα VLC ως πομποί χρησιμοποιούνται οι δίοδοι λέιζερ (Laser Diodes - LDs) και οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LEDs), ενώ ως δέκτες οι φωτοανιχνευτές (Photodetectors - PDs). Στην περίπτωση που γίνεται χρήση των LEDs και των LDs, οι ταχύτητες δεδομένων των VLC μπορούν να φτάσουν από 10 Gbps έως 100 Gbps και το εύρος μετάδοσής τους έως τα 20 m [18]. Με τους συγκεκριμένους πομποδέκτες μπορεί να επιτευχθεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (100 mW για 10 Mbps έως 100 Mbps) και υψηλό εύρος ζώνης χωρίς να υπάρχουν ραδιοφωνικές ή ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [13]. Εντούτοις, οι νέοι πομποδέκτες είναι χαμηλής εμβέλειας [20].

Ο ρυθμός δεδομένων των VLC που βασίζονται σε RGB LED²⁸ (Red Green Blue Light Emitted Diode - Δίοδος Εκπεμπόμενου Φωτός σε Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε) δύναται να φτάσει πολλαπλά Gb/s, ενώ για τις VLC που βασίζονται σε μπλε LED²⁹ με επικάλυψη φωσφόρου οι τιμές ρυθμού δεδομένων φθάνουν έως 1 Gb/s. Η καλύτερη σε επίδοση τεχνολογία LED είναι η micro-LED³⁰ (microscopic LED - μικροσκοπική LED), πετυχαίνοντας στο εργαστήριο ταχύτητες δεδομένων πάνω από τα 10 Gb/s [60]. Η τεχνολογία VLC προβλέπεται να φτάσει στην εποχή 6G σε ρυθμό δεδομένων εκατοντάδων Gb/s, ακόμα και Tb/s με την πρόοδο των τεχνολογιών (π.χ. τεχνολογία ψηφιακής διαμόρφωσης), της συνεχούς βελτίωσης διάρκειας ζωής και της φωτεινής απόδοσης των λαμπτήρων LEDs [24].

Λευκό φως που βασίζεται σε διαφορετικά μήκη κύματος θα είναι ιδιαίτερα ευεργετικό για τη βελτίωση των επιδόσεων διεκπεραιωτικότητας μέσω της πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους

²⁸ Οι RGB LEDs παράγουν κόκκινο, πράσινο, μπλε και άσπρο χρώμα, οπότε συνδυάζοντας τα χρώματα αυτά, είναι ικανές να παράγουν μια μεγάλη ποικιλία χρωμάτων σε αντίθεση με τις μονόχρωμες LEDs (<https://ti-einai.gr/rgb-led/>).

²⁹ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode

³⁰ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: <https://en.wikipedia.org/wiki/MicroLED>

κύματος, επιφέροντας δυνητικά ρυθμούς πάνω από 100 Gbps για σημεία πρόσβασης VLC με υπερ-υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Η προσθήκη μαζικής παραλληλοποίησης κεραιοσυστοιχιών (arrays) microLEDs θα βελτιώσει τον ρυθμό δεδομένων με στόχο την επίτευξη Tbps στην επικοινωνία 6G [19]. Για την υλοποίηση χαμηλής πολυπλοκότητας μπορεί να γίνει πραγματοποίηση των σεναρίων VLC με χρήση LEDs χωρίς επιπλέον απαίτηση τροφοδοτικών, επομένως η χρήση των LEDs θα μπορούσε να λάβει χώρα για ταυτόχρονη πραγματοποίηση επικοινωνίας, φωτισμού και εντοπισμού θέσης [18]. Επίσης η περίπτωση VLC καθίσταται μια αποτελεσματική λύση σε περιπτώσεις χρήσης όπου υπάρχει «ευαισθησία» σχετικά με το κόστος πρόσβασης και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (π.χ. τεράστιο δίκτυο IoT και WSNs). Αυτό συμβαίνει λόγω του χαμηλού κόστους, της απόδοσης ισχύος και της μεγάλης διάρκειας ζωής (μέχρι 10 χρόνια) των LEDs [13].

Διάφορα σεναρία εφαρμογών όπου έχει χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη τεχνολογία, είναι τα εξής: υποβρύχιες επικοινωνίες, εσωτερικοί χώροι (νοσοκομεία, σπίτια, γραφεία, καμπίνες αεροσκαφών), επικοινωνίες οχημάτων, υπόγεια ορυχεία, ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs) και συστήματα αναγνώρισης ορατού φωτός [22].

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας VLC είναι τα εξής [22]:

- i. Το φάσμα ορατού φωτός εμπίπτει σε ζώνη χωρίς υποχρεώσεις αδειοδότησης, επομένως είναι ελεύθερο στη χρήση από τους εμπλεκόμενους φορείς.
- ii. Εν συγκρίσει με τα σήματα RF, κατέχει πολύ υψηλό εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα, το φάσμα του ορατού φωτός είναι 10^4 φορές εκτενέστερο σε σχέση με τα ραδιοκύματα.
- iii. Δεδομένου ότι το ορατό φως εμποδίζεται από αντικείμενα (π.χ. τοίχος), έχει υψηλή χωρική επαναχρησιμοποίηση.
- iv. Εκτιμάται με ακρίβεια η κατεύθυνση άφιξης του ορατού φωτός.
- v. Υποστηρίζεται πολύ υψηλός ρυθμός δεδομένων (για χρήση LEDs της τάξης των 10 Gbps και για διόδους Laser της τάξης των 100 Gbps).
- vi. Η χρήση των LEDs εξασφαλίζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.
- vii. Η «εκ φύσεως» ασφάλεια, λόγω της μη διεισδυτικής φύσης του ορατού φωτός, της απομόνωσης του σήματος και της μονοκατευθυντικής διάδοσης.
- viii. Σε σχέση με τη ραδιοεπικοινωνία είναι λιγότερο δαπανηρή, κυρίως ως προς το εύρος THz και mmWave. Δεν απαιτούνται πολλά έξοδα, καθώς στο VLC γίνεται χρήση των πηγών φωτισμού ως σταθμών βάσης [24].
- ix. Ασφαλής χρήση επικοινωνίας, πληρώνοντας τους κανονισμούς για το δέρμα και τα μάτια.
- x. Η μη ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ ζώνης ορατού φωτός και ζώνης ραδιοσυχνοτήτων. Προβλέπεται να έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε περιπτώσεις συγκεκριμένων εφαρμογών, όπως π.χ. σε ιατρικά μηχανήματα που παρουσιάζουν ευαισθησία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, σε εφαρμογές φωτισμού για επιβάτες αεροπλάνων και σε επικοινωνίες οχημάτων έξυπνων συστημάτων μεταφοράς [13].

Οι προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν ώστε να πραγματοποιηθεί στο 6G επικοινωνία με το ορατό φως, περιλαμβάνουν τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, τη συνδεσιμότητα των LEDs στο Διαδίκτυο, καθώς και θέματα κάλυψης και κινητικότητας [20].

Παρόλο που η τεχνολογία VLC θεωρείται ως μια τεχνολογία επικοινωνίας υψηλής ασφάλειας, μπορεί εντούτοις να είναι «επιρρεπής» σε ορισμένα σημεία ή ακόμα και να

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

παραβιαστεί τελικά. Για την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας VLC στο σύστημα 6G απαιτείται σχεδιασμός αποδοτικών συστημάτων με ελάχιστες απώλειες και με τεχνικές για έλεγχο της αποτελεσματικότητας των συναφών συστημάτων. Επιπλέον, θα χρειαστούν κατάλληλες και ευέλικτες τεχνικές κρυπτογράφησης, ειδικά σχεδιασμένες για τα συστήματα ορατού φωτός, ώστε να καλυφθούν καλύτερα οι ανάγκες των επερχόμενων υπηρεσιών 6G [22].

Η περίπτωση VLC επίσης βασίζεται σε κανάλια LOS, καθώς δεν έχει ούτε τη δυνατότητα διείσδυσης ούτε επαρκή περίθλαση για την παράκαμψη συνήθων εμποδίων. Ταυτόχρονα, λόγω των ζητημάτων σχετικά με παρεμβολές παρακείμενων κυψελών και του πανταχού παρόντος λευκού θορύβου του περιβάλλοντος, τα συστήματα VLC γενικά απαιτούν κατευθυντικές κεραιές με στενές δέσμες. Οι λόγοι αυτοί καθιστούν τα συστήματα VLC εξαιρετικά ευαίσθητα ως προς τη θέση και την κινητικότητα των χρηστών, οδηγώντας σε υψηλές απαιτήσεις για ιχνηλάτηση της δέσμης [13].

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται οι επικοινωνίες VLC και THz [24].

	THz	VLC
Διαθέσιμο εύρος ζώνης	Δεκάδες έως εκατοντάδες GHz	Εκατοντάδες THz
Απόσταση μετάδοσης	Μη οπτική επαφή (NLOS- non-line-of-sight)	Οπτική επαφή (LOS)
Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	Ναι	Όχι
Το ποσοστό ημερομηνίας αρχειοθέτησης	100 Gbps	10 Gbps
Ρύθμιση φάσματος	Με λήψη άδειας	Χωρίς άδεια
Ικανότητα διείσδυσης	Ειδικά αδιαφανή υλικά	Διαφανή υλικά
Παρεμβολή μεταξύ κυψελών	Σοβαρή	Καμία
Κόστος	Ακριβό	Φτηνό
Ισχύς μετάδοσης	Υψηλή	Χαμηλή
Διάχυτες απώλειες ανάκλασης	Με λήψη άδειας	Χωρίς άδεια

Πίνακας 3: Σύγκριση επικοινωνίας THz και VLC

3.2.2 Πιστότητα Φωτός

Ένα υποσύνολο των εφαρμογών OWC συνιστά η οπτική λύση LiFi (Light Fidelity - Πιστότητα Φωτός), που πραγματοποιεί αμφίδρομη ασύρματη επικοινωνία υψηλής ταχύτητας και που προβλέπεται να συμπληρώσει την περίπτωση WiFi (Wireless Fidelity). Συγκεκριμένα, για να

πραγματοποιήσει φωτισμό, η LiFi αξιοποιεί στην ανερχόμενη ζεύξη τις RFs ή το υπέρυθρο φως και στην κατερχόμενη ζεύξη το ορατό φως [18].

3.2.3 Επικοινωνία Οπτικής κάμερας

Άλλη μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία OWC είναι η επικοινωνία με οπτική κάμερα (Optical Camera Communication - OCC), η οποία κυρίως χρησιμοποιείται σε εσωτερικά περιβάλλοντα για πλοήγηση και εντοπισμό θέσης. Ένας δέκτης OCC αποτελείται από ενσωματωμένες κάμερες ή αισθητήρες εικόνων, ενώ ένας πομπός OCC είναι μια συνήθης εμπορική LED [18]. Επιπλέον, το φάσμα εκτείνεται μεταξύ υπέρυθρης και υπεριώδους ζώνης, με μήκος κύματος εντός του εύρους των 10.000 nm [18]. Ο «αισθητήρας φαντασίας» (imagine sensor) μπορεί να μετατρέψει το οπτικό σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο συνεπάγεται πλεονέκτημα ευκολότερης υλοποίησης εξαιτίας της μεγάλης εξάπλωσης έξυπνων τηλεφώνων με ενσωματωμένη κάμερα [13]. Για το λόγο αυτό, οι εφαρμογές OCC μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν σε τέτοιου είδους έξυπνες συσκευές [18].

3.2.4 Οπτικές Επικοινωνίες Ελεύθερου Χώρου

Οι οπτικές επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (Free-Space Optical - FSO) είναι επίγειες δισημειακές OWCs και λαμβάνουν χώρα στη ζώνη πλησίον της IR (Infared - Υπέρυθρη). Το σύστημα FSO χρησιμοποιώντας υψηλής ισχύος υψηλά συγκεντρωμένη δέσμη λέιζερ στον πομπό, μπορεί να επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, δηλαδή 10 Gbps ανά μήκος κύματος σε μεγάλες αποστάσεις (έως 10.000 km). Επίσης προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική λύση για τη συμφόρηση της οπισθόζευξης σε επίγεια δίκτυα και επιτρέπει διασταυρούμενες διασυνδέσεις μεταξύ επίγειων, διαστημικών και εναέριων πλατφορμών. Επιπλέον, διευκολύνει στην επίτευξη ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας μεταξύ δορυφόρων για την περίπτωση των αναδυόμενων εφαρμογών αστερισμού δορυφόρων LEOs (Low-Earth Orbit - Χαμηλή-Γήινη Τροχιά) [13].

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των συστημάτων FSO, όταν υπάρχει περιορισμός χρήσης μιας εξαιρετικά στενής δέσμης λέιζερ στη μεριά του πομπού, είναι ο παράγοντας επανάχρησης υψηλών συχνοτήτων, η στιβαρότητα ως προς τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η φυσική ασφάλεια [21]. Ωστόσο η απόδοση των συστημάτων αυτών επηρεάζεται αρνητικά από διάφορους παράγοντες όπως είναι η μη γραμμικότητα των LEDs, ο λευκός περιβαλλοντικός θόρυβος κ.α. [18].

3.3 Τεχνητή Νοημοσύνη

Η πιο πρόσφατη και κρίσιμη τεχνολογία των συστημάτων επικοινωνίας 6G είναι η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI) [19]. Αν και το 5G εισάγει ήδη και αξιοποιεί την τεχνητή νοημοσύνη σε διάφορες εφαρμογές του, υφίστανται περιορισμοί ως προς την αποτελεσματικότητα σχετικά με τη δικτυακή λειτουργία, τη δικτυακή διαχείριση και τη δικτυακή συντήρηση. Σε κάθε περίπτωση, το 6G προσδοκά να καταστεί ένα πραγματικό ευφυές γνωστικό ασύρματο σύστημα, πραγματοποιώντας πλήρη ευφυΐα από το στρώμα εφαρμογών έως το φυσικό στρώμα [27]. Συγκριτικά με το 5G, στο 6G θα δημιουργηθούν ευφυέστερα δίκτυα και με επικοινωνίες πραγματικού χρόνου, εξαιτίας της δυναμικής εξέλιξης της μηχανικής μάθησης [19].

Η εισαγωγή AI οδηγεί σε αύξηση της αποτελεσματικότητας και σε μείωση της καθυστέρησης επεξεργασίας των βημάτων επικοινωνίας. Η AI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την γρήγορη επίτευξη δράσεων που είναι χρονοβόρες, όπως για παράδειγμα η μεταπομπή (handover) και η επιλογή δικτύου. Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος της σε επικοινωνίες M2M³¹ (Machine-to-Machine Communication - Επικοινωνία Μηχανής-με-Μηχανή), μηχανής-ανθρώπου (machine-to-human) και ανθρώπου-μηχανής (human-to-machine) [19]. Επίσης στην επικοινωνία 6G η τεχνητή νοημοσύνη θα βοηθήσει στο να επιτευχθούν οι στόχοι των υπηρεσιών uHDD, uMUB, mMTC και uHSLC [19].

Τα τελευταία χρόνια η τεχνητή νοημοσύνη και ιδιαίτερα η Εκ Βαθέων Μάθηση (Deep Learning - DL), έχει αποτελέσει πεδίο πολλών πρακτικών εφαρμογών με την παράλληλη ανάπτυξη ποικίλων υπολογιστικών πόρων υλισμικού (SW) και λογισμικού (HW) και με το ξεκίνημα μια εποχής όπου κυριαρχούν τα μεγάλα δεδομένα (big data). Τόσο η βιομηχανία όσο και η ακαδημαϊκή κοινότητα επιδιώκουν την ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, για να την επίτευξη σημαντικών βελτιώσεων αναφορικά με τις αποδόσεις αυτών. Η βασική ιδέα συνίσταται στην εισαγωγή της τεχνητής νοημοσύνης, κυρίως της DL, στον τομέα της κατανομής πόρων και της ασύρματης διαχείρισης [1].

Αυτές οι βραχυπρόθεσμες λειτουργίες 6G που θα αξιοποιήσουν την τεχνητή νοημοσύνη, θα συμπληρωθούν και από την αποκαλούμενη ως «συλλογική δικτυακή ευφυΐα» (“collective network intelligence”) η οποία προωθείται στα άκρα του δικτύου (network edge) για να παρέχεται κατανομημένη αυτονομία μέσω της εκτέλεσης AI και αλγορίθμων μάθησης σε αντίστοιχες συσκευές [3]. Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης (π.χ. Συνελκτικό Νευρωνικό Δίκτυο (Convolutional Neural Network - CNN) και Βαθύ Νευρωνικό Δίκτυο (Deep Neural Network - DNN)), έχουν τη δυνατότητα αυτόματης εκμάθησης των χαρακτηριστικών μέσω των ακατέργαστων δεδομένων και είναι σε θέση να προσεγγίζουν – χωρίς κάποιο αυστηρά συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο – τα μη γραμμικά και πολύπλοκα ρεαλιστικά κανάλια επικοινωνίας. Η χρήση των συγκεκριμένων αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης, μπορεί να γίνεται ώστε σε ένα ασύρματο σύστημα μετάδοσης να βελτιώνεται η απόδοση των μεμονωμένων μονάδων ή ακόμα και ολόκληρη η δομή των πομποδεκτών. Ως αποτέλεσμα έχουν προκύψει καινοτόμες δυνατότητες στα ασύρματα συστήματα μετάδοσης καθώς και σημαντικά πλεονεκτήματα σε πολλούς τομείς όπως είναι η ρομποτική, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η όραση στον υπολογιστή [27].

Οι περιπτώσεις χρήσης της τεχνητής νοημοσύνης για το 6G σχετικά με τη δημιουργία SSN³² (Social Security Number - Αριθμός Κοινωνικής Ασφάλισης) αφορούν στη δυνατότητα διαχείρισης του ελέγχου του δικτύου, των λειτουργιών του και των διαθέσιμων δικτυακών πόρων. Επίσης στο 6G, μέσω της τεχνητής νοημοσύνης, θα επιτρέπεται η αυτόματη παροχή MPS³³ (Managed Printing Services - Υπηρεσίες Διαχειριζόμενης Εκτύπωσης) στους χρήστες, όπως επίσης και η αποστολή και η δημιουργία 3D απεικονίσεων ραδιοπεριβάλλοντος [3]. Επίσης, η τεχνητή νοημοσύνη στο άκρο του δικτύου (edge AI) μπορεί να ωθήσει τις τοπικές

³¹ Ο όρος M2M περιγράφει και την αυτόματη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ μηχανών και συσκευών.

³² Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: https://en.wikipedia.org/wiki/Social_Security_number

³³ Η υπηρεσία MPS περιλαμβάνει τη διαχείριση του συνόλου των διαδικασιών που αφορούν στη λειτουργία του εκτυπωτικού εξοπλισμού, με κύριο στόχο τη μείωση του υφισταμένου κόστους και την αύξηση της παραγωγικότητας. Για συναφή πληροφοριακά στοιχεία βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: <https://portal.singularlogic.eu/service/219/managed-printing-services-mps>.

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

συσκευές για εκπλήρωση εργασιών λειτουργίας και διαχείρισης, οδηγώντας σε καλύτερη αντιμετώπιση των προκλήσεων (όπως είναι η ασφάλεια των δεδομένων και οι περιορισμοί ως προς την επεξεργασία τους) [59].

Η χρήση της τεχνολογίας AI καθίσταται μείζονος σημασίας. Ειδικότερα, η κατά AI ανάλυση διαφόρων ειδών πληροφοριών, επιπροσθέτως των πληροφοριών που λαμβάνονται από τα ραδιοσήματα, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια εντοπισμού θέσης και αντικειμένων. Επιπλέον, ορισμένοι τομείς τεχνολογίας έχουν επεκταθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνουν αναγνώριση αντικειμένων και συμπεριφοράς, πέραν της απλής ανίχνευσης αντικειμένων, σε συνδυασμό με τη βελτίωση των υπολογιστικών δυνατοτήτων. Ειδικότερα, εξετάζονται οι εξής τεχνολογίες: Υπολογισμός του ποσοστού συμφόρησης σε μια συγκεκριμένη περιοχή, ανίχνευση εισβολής (ενός ή περισσότερων ατόμων), αναγνώριση χειρονομίας (με τα χέρια και/ή τα δάχτυλα), αναγνώριση ανθρώπινων ενεργειών (όπως μαγείρεμα, περπάτημα, παρακολούθηση τηλεόρασης, κτλ.), αναγνώριση χρηστών και παρακολούθηση ζωτικών σημείων³⁴ [9].

Τα εργαλεία AI προβλέπεται να είναι απαραίτητα ιδίως σε προγραμματιζόμενες μετα-επιφάνειες, ώστε να διευκολύνουν ταυτόχρονες λειτουργίες σε μια συνεχή συνδεσιμότητα καθώς επιτρέπουν να προσδιοριστεί η καλύτερη πολιτική λειτουργιών (σύμφωνα με τις τεχνικές που είναι βασισμένες στα δεδομένα). Επίσης η AI, καθώς προσφέρει ένα δυναμικό και αποτελεσματικό μέσο προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου (π.χ. επιλογή διαδρομής, διαμόρφωση συμβόλων, ζώνη συχνοτήτων και ρυθμός κωδικοποίησης), καθίσταται αρκετά «ελκυστική» στις ασύρματες ετερογενείς εφαρμογές διαφορετικών απαιτήσεων χρηστών QoS και δικτύων [18].

Εν κατακλείδι, αναμένεται ότι η AI θα έχει πλήρη ενσωμάτωση στο έξυπνο σύστημα δικτύου 6G, προσφέροντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά [1]:

- Κυριαρχία της τεχνητής νοημοσύνης στο δίκτυο του μέλλοντος αναφορικά με διατεματικά θέματα, συμπεριλαμβάνοντας το ευφυές δίκτυο πυρήνα (core network) και το ευφυές ακραίο δίκτυο (edge network), τεματικά έξυπνων τηλεφώνων και τεματικά του ευφυούς Διαδικτύου των Πραγμάτων (γνωστού και ως το υπερ-Διαδίκτυο των Πραγμάτων).
- Επιδόσεις αυτο-εξέλιξης (όπως π.χ. σχετικά με αποδοτικότητα, τροποποιησιμότητα, αποτελεσματικότητα και ασφάλεια). Επίσης ποιότητα αυτο-εξέλιξης (σε σχέση με τη δοκιμασιμότητα, τη συντηρησιμότητα, την επανάχρηση, την κλιμακοθετησιμότητα, τη φορητότητα και την ευελιξία).
- Ο υπάρχων μηχανισμός επικοινωνίας και επεξεργασίας σήματος μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση του παραδοσιακού «κλασικού» πλαισίου της θεωρίας επικοινωνιών και να υιοθετήσει μηχανισμούς που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη, σε μια ευρύτερη κλίμακα.
- Δίνεται η δυνατότητα στη δικτυακή υποδομή για αυτο-βελτίωση και αυτο-οργάνωση όπως ακριβώς σε ένα αυτόνομο ανεξάρτητο σύστημα.

³⁴ Ζωτικά σημεία είναι οι μετρήσεις των πιο βασικών λειτουργιών του σώματος. Τα κύρια ζωτικά σημεία, που παρακολουθούνται τακτικά από παρόχους υγειονομικής περίθαλψης και επαγγελματίες υγείας, περιλαμβάνουν τα εξής: θερμοκρασία σώματος, ρυθμός παλμού και ρυθμός αναπνοής (<https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/vital-signs-body-temperature-pulse-rate-respiration-rate-blood-pressure>).

3.3.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση

Η τεχνητή νοημοσύνη και συγκεκριμένα η Μηχανική Μάθηση (Machine Learning - ML) μπορεί να επιτελέσει κυρίαρχο ρόλο σε θέματα σχετικά με τη δικτυακή διαχείριση. Οι Clark, Partridge, Ramming & Wroclawski³⁵ το 2003 εισήγαγαν την έννοια του «Επιπέδου Γνώσης» (“Knowledge Plane”) και το περιέγραψαν ως ένα διάχυτο σύστημα βασισμένο σε ML, εντός του δικτύου, το οποίο παρέχει συμβουλές και υπηρεσίες σε άλλα στοιχεία του δικτύου. Τα τελευταία χρόνια, με τη δικτύωση να ορίζεται από NFV³⁶ (Network Functions Virtualization - Εικονικοποίηση Λειτουργιών δικτύου) και από το SDN³⁷ (Software Defined Network - Δίκτυο που καθορίζεται από Λογισμικό), η απόκτηση μεγάλου όγκου δεδομένων έχει γίνει πολύ πιο εύκολη. Για το 6G αυτό θα οδηγήσει σε μια σημαντική περίπτωση διαχείρισης και ενορχήστρωσης βασισμένη σε ML, για την επίτευξη μιας καλύτερης προοπτικής προς την πλήρη αυτοματοποίηση του δικτύου [16].

Υπάρχει συγκεκριμένο όραμα για τη χρήση τεχνικών AI/ML με περισσότερο ουσιαστικό τρόπο, συγκριτικά με προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στα συστήματα 5G. Δηλαδή, αναμένεται να συμβεί μια μετάβαση από μια κατάσταση στην οποία η AI αντιμετωπίζεται ως μια μορφή βελτίωσης σε μια άλλη, όπου η AI θα αποτελεί βασικό δομικό χαρακτηριστικό για το σχεδιασμό της ραδιοδιεπαφής και για βελτιστοποίηση (των δικτυακών λειτουργιών). Ειδικότερα τούτο αφορά στην αυτο-βελτίωση πομπών και δεκτών, στη χρήση γνωστικού φάσματος και στην ενημερότητα του πλαισίου εφαρμογής [8].

Επίσης οι τεχνικές AI/ML μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση των συστημάτων επικοινωνίας, ενσωματώνοντας τα πρότυπα κινητικότητας όπως και τα πρότυπα κυκλοφορίας και θέσης, πέρα από την απλή επίγνωση του περιβάλλοντος [58]. Για παράδειγμα, οι βιντεοκάμερες σε περιβάλλοντα όπως είναι τα δάπεδα των εργοστασίων, θα μπορούν μέσω των δικτύων DL να καταγράφουν την κίνηση και την παρουσία μηχανημάτων και συσκευών, με δεδομένα που δύναται να υποστούν επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, έχοντας ως στόχο αρχικά την πρόβλεψη αλλαγών στο περιβάλλον διάδοσης και εν συνεχεία τη βελτιστοποίηση της επικοινωνίας. Η τυχαιότητα στις συνδέσεις επικοινωνίας μπορεί να μειωθεί μέσω των νέων ενσωματωμένων τεχνικών απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων στο σύστημα επικοινωνίας [8].

Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα των τεχνολογιών AI και ML έχει σχέση με το ότι αμφότερες έχουν χαρακτηριστικά που βασίζονται στα δεδομένα που χρησιμοποιούν. Οι μέθοδοι AI και ML βελτιώνουν την καθυστέρηση και την αποτελεσματικότητα του δικτύου, με χαρακτηριστικά μάθησης από τεράστια δεδομένα και όχι σύμφωνα με προκαθορισμένους ή/και σταθερούς κανόνες. Επιπλέον, τα επόμενης γενιάς ασύρματα

³⁵ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: D.-D. Clark, C. Partridge, J.-C. Ramming, and J.-T. Wroclawski (2003, October): **A knowledge plane for the Internet**, doi: 10.1145/863955.863957, available at:

https://www.researchgate.net/publication/221164618_A_Knowledge_Plane_for_the_Internet

³⁶ Η τεχνολογία NFV, αποσκοπεί στη μεταφορά δικτυακών ή τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, που σήμερα συνήθως λειτουργούν σε αποκλειστικές και εξειδικευμένες πλατφόρμες, σε εικονικές υποδομές cloud. Βλέπε επίσης: <http://www.infocom.gr/wp-content/uploads/2015/10/nfv-2-10-15-sent.pdf>.

³⁷ Η τεχνολογία SDN αποσκοπεί στην αύξηση της ικανότητας του δικτύου να προσαρμόζεται δυναμικά στις ανάγκες των εφαρμογών και των υπηρεσιών που αυτό εξυπηρετεί. Βλέπε π.χ.: <http://www.infocom.gr/wp-content/uploads/2015/10/nfv-2-10-15-sent.pdf>.

δίκτυα επικοινωνίας έχουν την τάση να εξελίσσονται σε πολύπλοκα συστήματα και οι απαιτήσεις υπηρεσιών ποικίλλουν σε διαφορετικά δίκτυα και εφαρμογές [46]. Οι αλγόριθμοι AI και ML, χάρη στην προσαρμοστικότητα και προγνωστικότητά τους, έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν έξυπνα και αυτο-ενήμερα δίκτυα. Τα AI/ML εφαρμόζονται σε διάφορα στρώματα του δικτύου, ανάλογα με τις εκάστοτε δυνατότητες. Στο εξαιρετικά πυκνό ασύρματο δίκτυο του μέλλοντος αυξάνονται οι απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης, όπως και της κίνησης δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό λοιπόν, οι μέθοδοι AI και ML μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με το να αναπτύξουν αποδοτικότερο προγραμματισμό και κατανομή δικτυακών πόρων και στοιχείων[29].

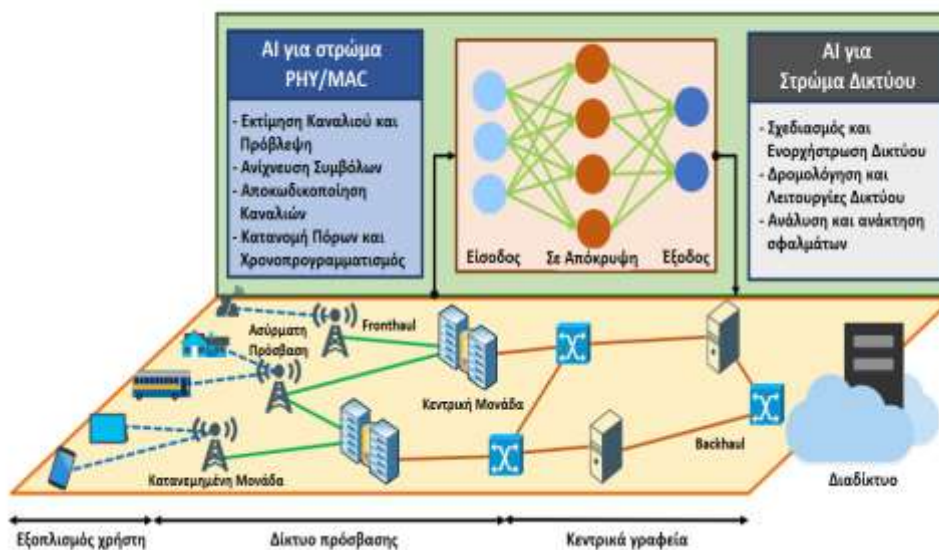
Λύσεις που βασίζονται σε ML, οι οποίες αποτελούν υποσύνολο εκείνων που βασίζονται σε AI, αναμένεται ότι θα αποτελέσουν βασικό στοιχείο στις έξυπνες προγραμματιζόμενες μετα-επιφάνειες επιτρέποντας να επιτευχθεί ένα σύνθετο επίπεδο συντονισμού και έτσι να διατηρείται μια επιθυμητή παγκόσμια συμπεριφορά, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονη κλιμακοθετησιμότητα, μείωση ενέργειας και επίβαρου.

Θα μπορούσε ακόμα να εφαρμοστεί η ML στην επεξεργασία σήματος ραδιοσυχνοτήτων, στην εξόρυξη όπως και στη χαρτογράφηση φάσματος. Επίσης μέσω της εφαρμογής ML, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση της καθυστέρησης, δια της παροχής προγνωστικής ανάλυσης ώστε να προσδιορίζεται καλύτερος τρόπος μετάδοσης των πληροφοριών μεταξύ των τελικών χρηστών [19]. Τέλος ο συνδυασμός της ML με τις φωτονικές τεχνολογίες μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω εξέλιξη των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης 6G για τη δημιουργία συστήματος γνωστικού ραδιοδικτύου που θα βασίζεται στη φωτονική³⁸ [19].

Η DL (η οποία θεωρείται υποκατηγορία της ML), μπορεί να μιμείται βιολογικά νευρικά συστήματα και να εξαγει χαρακτηριστικά των συστημάτων όπου αυτή εφαρμόζεται, με αυτοματοποιημένο τρόπο. Επίσης διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών με σκοπό να παρέχονται αποτελεσματικότερες λύσεις για εξυπνότερη δικτυακή διαχείριση, για να επιτρέπεται λεπτομερέστερη πρόβλεψη και εκτίμηση των καναλιών διαλείψεων (fading channels), για το σχηματισμό προσαρμοστικότερης εκπομπής (ισχύς, ρυθμός κωδίκευσης, προκωδικευτής, διάρθρωση διαμόρφωσης) σε μαζικές διατάξεις MIMOs, για να παρέχεται αποτελεσματικότερος σχεδιασμός RF (παραμόρφωση για την αντιστάθμιση του ενισχυτή ισχύος, διαμόρφωση δέσμης και μείωση παράγοντα κορυφής), για τη διάθεση καλύτερων λύσεων δικτυακής διαχείρισης και τέλος για να προσφέρεται αποτελεσματικότερη ενορχήστρωση για δράσεις δικτυακού τεμαχισμού (network slicing), για την υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (edge computing) και για διαχείριση των εικονικών πόρων [13].

Σύμφωνα με την Εικόνα 6 η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε στρώμα του ασύρματου δικτύου. Συγκεκριμένα, στο στρώμα δικτύου η χρήση των αλγόριθμων ML μπορεί να γίνεται για ομαδοποίηση της κίνησης και για την προσαρμογή των δικτυακών πόρων σε διάφορα σενάρια [76]. Επιπλέον, οι εν λόγω αλγόριθμοι μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην ανίχνευση πολλών χρηστών και στην εκτίμηση καναλιών. Στο στρώμα MAC (Medium Access Control - Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου) όπως και στο φυσικό στρώμα (PHY), μεταξύ άλλων η DL μπορεί να βελτιστοποιήσει τις στρατηγικές κατανομής πόρων για τη διανομή ενέργειας και για τις διατάξεις κωδικοποίησης και διαμόρφωσης [16]. Πέραν των ανωτέρω, οι αλγόριθμοι ML μπορούν να συνδράμουν στην καναλική εκτίμηση και στην ανίχνευση πολλαπλών χρηστών.

³⁸ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε μεταξύ άλλων: <https://el.wikipedia.org/wiki/Φωτονική>



Εικόνα 6: Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης σε διαφορετικά στρώματα των ασύρματων δικτύων [16]

3.3.2 Τεχνητή Νοημοσύνη και Ομοσπονδιακή Μάθηση (Federated Learning)

Πρόσφατα, η Federated Learning (FL) αποτέλεσε μια νέα ιδέα της AI, η οποία βελτιώνει το απόρρητο στα δεδομένα του χρήστη και αξιοποιεί την επεξεργαστική ισχύ στη συσκευή. Οι συμβατικές κεντρικές προσεγγίσεις ML είναι κατάλληλες σε περιπτώσεις όπου υπάρχει κεντρική συλλογή και επεξεργασία δεδομένων. Εντούτοις, λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων στην κινητή τηλεφωνία και λόγω της προόδου του υπολογιστικού εξοπλισμού, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν πολλά προβλήματα με τις προσεγγίσεις AI (π.χ. ανίχνευση κυματομορφής, σχεδιασμός φυσικού στρώματος, ταξινόμηση διαμόρφωσης και επεξεργασία σήματος). Η FL αναδεικνύεται ως η «καλύτερη λύση της κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης» ξεπερνώντας τους περιορισμούς της κεντρικής τεχνητής νοημοσύνης³⁹ (για παράδειγμα τα μεγάλα έξοδα επικοινωνίας και το απόρρητο των δεδομένων) με το να επιτρέπει στις επικοινωνίες 6G την «πανταχού παρούσα AI» [22].

Η μέθοδος της ομοσπονδιακής μάθησης επεξεργάζεται σε τοπικό επίπεδο τα ακατέργαστα δεδομένα και διανέμει – σε προστατευμένη μορφή – τα επεξεργασμένα δεδομένα, εκπληρώνοντας έτσι την απαίτηση για προστασία της ιδιωτικότητας των δεδομένων και χωρίς να εκτίθενται τυχόν ευαίσθητα δεδομένα. Μολαταύτα, η ομοσπονδιακή μάθηση δημιουργεί μόνο ένα κοινό μοντέλο για καθολική εφαρμογή⁴⁰. Χρησιμοποιώντας ξανά το μεγαλύτερο μέρος των «προεκπαιδευμένων μοντέλων» σε διαφορετικό περιβάλλον και προσαρμόζοντας μόνο ορισμένες από τις παραμέτρους, η FL είναι σε θέση να παρέχει

³⁹ Η κεντρική τεχνητή νοημοσύνη δίνει τη θέση της σε πιο «δημοκρατικά» και ανοιχτού χαρακτήρα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, τα οποία γίνονται όλο και πιο προσίτα στους επιστήμονες δεδομένων, τόσο μέσω κώδικα όσο και μέσω ανοιχτών οικοσυστημάτων. Βλέπε π.χ.: <https://www.kdnuggets.com/2019/08/death-centralized-ai-rise-open-ai.html>.

⁴⁰ Καθολική εφαρμογή σημαίνει ότι για να υπάρχει δίκαιο, μια νομική αρχή πρέπει να εφαρμόζει τους ίδιους γενικούς κανόνες με ομοιόμοφο τρόπο σε παρόμοιους γενικούς κανόνες με ομοιόμοφο τρόπο σε παρόμοιες ή σχεδόν πανομοιότυπες περιπτώσεις. Βλέπε σχετικά, *μεταξύ άλλων*: <https://www.lawinsider.com/dictionary/universal-application>.

γρήγορες προσαρμογές χρησιμοποιώντας μόνο μικρή ποσότητα τοπικών δεδομένων. Ωστόσο πέρα από τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (AI για δικτύωση) για τη συνδρομή της λειτουργίας του δικτύου είναι επίσης σημαντικό να χρησιμοποιηθούν οι πανταχού παρόντες πόροι υπολογιστικής, συνδεσιμότητας και αποθήκευσης, ώστε να παρέχονται στους τελικούς χρήστες κινητές υπηρεσίες AI για κινητές συσκευές (δηλαδή τελικά δίκτυωση για AI). Κάτι τέτοιο εξασφαλίζει την παροχή πόρων σε τερματικά νέου τύπου που απαιτούν μεγάλο αριθμό σε υπολογιστικούς πόρους (π.χ. ρομπότ, γυαλιά VR, έξυπνα αυτοκίνητα, drones), επιτρέποντας υπολογισμούς βασισμένους σε AI [13].

Εν κατακλείδι, στα μελλοντικά δίκτυα 6G, μέσω των τεχνικών AI και FL επιτρέπεται ο σχεδιασμός έξυπνων μηχανισμών για την εκμετάλλευση των μαζικών δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και των συνεχώς αυξανόμενων υπολογιστικών πόρων που αμφότερα υπάρχουν διαθέσιμα στην άκρη του δικτύου [22].

3.4 Κωδίκευση Καναλιού

Η κωδίκευση καναλιού (channel coding) αποτελεί τη βάση της ασύρματης επικοινωνίας. Για τη σχεδίαση ενός μελλοντικού ασύρματου συστήματος επικοινωνίας 6G είναι απαραίτητη η μελέτη του σχετικού μηχανισμού κωδίκευσης. Ειδικότερα, οι τεχνολογίες υλοποίησης, τα ισχυρά πλινθία (chips) και οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι κωδίκευσης καναλιών αποτελούν αντικείμενα για την εφαρμογή της κωδίκευσης καναλιών στα μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας [1].

Ο μηχανισμός κωδίκευσης καναλιών με σκοπό την απόκτηση των απαραίτητων βασικών αρχών κωδικοποίησης για τα μελλοντικά σενάρια, μπορεί να βασιστεί στους υπάρχοντες μηχανισμούς κωδίκευσης (π.χ. Turbo⁴¹, Polar⁴², LDPC⁴³, κ.α.). Είναι χρήσιμο το να γίνεται επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού καναλικής κωδίκευσης για την επόμενη γενιά ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας, σύμφωνα με τυχόν περιορισμούς μηχανικής κατά την εφαρμογή αλλά και σύμφωνα με το θεωρητικό όριο απόδοσης [1].

Ο υπάρχων σχεδιασμός καναλικής κωδίκευσης που είναι σε χρήση θεωρείται πως είναι ένα δισημειακό κανάλι Gauss⁴⁴, σε αντίθεση με την πραγματική επικοινωνία η οποία είναι ένα κανάλι παρεμβολής/διάλειψης σε ένα πολύπλοκο δικτυακό σενάριο με πολλούς χρήστες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ώστε ο υπάρχων μηχανισμός κωδίκευσης να είναι μη βέλτιστος στο πραγματικό κανάλι παρεμβολής. Εντούτοις επιδιώκεται ο βέλτιστος σχεδιασμός σύμφωνα με τη παραδοχή του καναλιού παρεμβολών (π.χ. καναλική κωδίκευση με πολλούς χρήστες), καθώς οι παρεμβολές των δικτύων επικοινωνίας αναμένεται ότι θα είναι πολύπλοκότερες στο μέλλον [1].

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, τα κανάλια είναι πιο περίπλοκα σε πραγματικά σενάρια. Απαιτείται συνεπώς η δημιουργία νέων δομών που θα μπορούν να προσαρμόζονται στα πολύπλοκα κανάλια διάλειψης, αλλά και η σχεδίαση ενός κώδικα με πεπερασμένο μήκος, συνδεδεμένου και με άλλες μεθόδους κωδίκευσης, έχοντας σαν δεδομένο ότι υπάρχει

⁴¹ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Turbo_code

⁴² Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polar_code_\(coding_theory\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polar_code_(coding_theory))

⁴³ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-density_parity-check_code

⁴⁴ Βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.icg.isy.liu.se/courses/infotheory/lect6.pdf>

σαφής εξάρτηση του πολικού (polar) κώδικα⁴⁵ με την χωρητικότητα του καναλιού σύμφωνα με την κατασκευή του. Επίσης υπάρχουν μεγάλες καθυστερήσεις αποκωδίκευσης στους αλγόριθμους αποκωδίκευσης που ακολούθησαν την ιδέα της σειριακής κωδίκευσης, όπως είναι π.χ. οι αλγόριθμοι SCS (Successive Cancellation Stack - Διαδοχική Στοίβα Ακύρωσης) και SCL (Successive Cancellation List - Διαδοχική Λίστα Ακύρωσης). Ένας παράλληλος αλγόριθμος κωδίκευσης όπως είναι ο BP (Belief Propagation - Διάδοση Πεποιθήσεων), δεν προσφέρει καλή απόδοση στη διόρθωση των σφαλμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το γεγονός ότι είναι επίσης αναγκαία η μελέτη παράλληλων αλγορίθμων κωδίκευσης με χαμηλή καθυστέρηση και καλύτερη απόδοση για τη διόρθωση των σφαλμάτων [27].

Η μη δυαδική κωδίκευση είναι κατάλληλη για συνδυασμό με συστήματα διαμόρφωσης υψηλής τάξης (high-order) και συστήματα MIMO. Ωστόσο, τα κυκλώματα αποκωδίκευσης χρειάζονται περισσότερους αποθηκευτικούς πόρους και λογικές μονάδες στον μη δυαδικό υπολογιστικό μηχανισμό. Για τη μείωση της πολυπλοκότητας του μη δυαδικού αλγορίθμου αποκωδίκευσης, μπορεί να εξεταστεί μια μέθοδος απεικόνισης ενός πολυτομεακού αλγορίθμου σε έναν δυαδικό τομέα. Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων επικοινωνίας σε μια περίπλοκη περίπτωση, με πολλά τερματικά στο 6G, και επικοινωνίας πολυτερματικού προς πολυτερματικό στο 6G, απαιτείται σύνθετη εξέταση της εσωτερικής σχέσης μεταξύ ρυθμού και μήκους κώδικα [27]. Μια νέα μέθοδος είναι η συγχώνευση της AI και της κωδίκευσης καναλιών. Η χρήση των αλγορίθμων AI (επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο και γενετικό δίκτυο) μπορεί να λάβει χώρα σε αντικατάσταση της τυχαίας και δομημένης κωδίκευσης και αποκωδίκευσης. Ωστόσο ο συνδυασμός αυτός είναι ακόμα σε αρχικό ερευνητικό στάδιο και εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα προβλήματα, όπως π.χ. ο μεγάλος χρόνος εκπαίδευσης και τα πολύπλοκα δίκτυα εκμάθησης. [27].

3.5 Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα

Σημαντικό ρόλο στην ασύρματη επικοινωνία 6G θα έχει και η περίπτωση UAV (Unmanned Aerial Vehicle – Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα), που αναμένεται ότι θα αποτελέσει μια νέα μορφή λειτουργίας στις ασύρματες επικοινωνίες. Η χρήση της τεχνολογίας UAV θα λάβει χώρα για να παρέχεται ασύρματη συνδεσιμότητα με υψηλές ταχύτητες δεδομένων, ενώ ο εγκατεστημένος σταθμός βάσης στο UAV θα παρέχει συνδεσιμότητα κινητής τηλεφωνίας. Το UAV χαρακτηρίζεται από ισχυρές ζεύξεις οπτικής επαφής, ευκολία στην ανάπτυξη, αλλά και από ελεγχόμενη κινητικότητα με σημαντικό βαθμό ελευθερίας. Εύλογο είναι το ότι τέτοια ειδικά χαρακτηριστικά δεν σημειώνονται σε μια σταθερή υποδομή σταθμών βάσης [6]. Η υλοποίηση υποδομών επίγειας επικοινωνίας είναι οικονομικά ανέφικτη σε έκτακτες καταστάσεις, ενώ επίσης και σε ασταθή περιβάλλοντα δεν είναι πάντοτε εφικτή η παροχή υπηρεσιών. Αντιθέτως, τα UAVs έχουν την δυνατότητα να χειρίζονται εύκολα τέτοιες καταστάσεις [19]. Τα UAVs προσφέρουν οικονομική λύση σε έκτακτες καταστάσεις (π.χ. αναζήτηση και διάσωση, περίθαλψη από καταστάσεις καταστροφών) παρέχοντας προσωρινές ασύρματες υπηρεσίες σε δύσβατες περιοχές (π.χ. σήραγγες, σπήλαια, ερειπωμένα κτίρια, απομακρυσμένες δασικές περιοχές) σε πυρκαγιές/σεισμούς, δηλαδή σε περιπτώσεις στις οποίες δεν υπάρχει η δυνατότητα

⁴⁵ Ο Πολικός Κώδικας καλύπτει όλο το φάσμα των θεμάτων σχεδιασμού, κατασκευής, εξοπλισμού, λειτουργίας, εκπαίδευσης, έρευνας και διάσωσης και προστασίας του περιβάλλοντος που αφορούν σε πλοία που δραστηριοποιούνται στα αφιλόξενα ύδατα που περιβάλλουν τους δύο πόλους (<https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx>).

κάλυψης από HAPs⁴⁶ (High Altitude Platform - Πλατφόρμα Μεγάλου Υψομέτρου) και δορυφόρους [13].

Σύμφωνα με τους Zeng, Zhang & Lim⁴⁷, η επικοινωνία οπισθοσκέδασης (backscatter) με τα UAVs μπορεί να έχει βοηθητικό ρόλο σε διάφορες εργασίες επικοινωνίας, για παράδειγμα να παρέχει περιβαλλοντική ισχύ και να δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες καναλιού σε απομακρυσμένους αισθητήρες. Επίσης, για ένα ευφυές δίκτυο 6G, μια εξαιρετική λύση για υλοποίηση UAVs θα μπορούσε να είναι η κατανομή πόρων βασισμένη σε DL [19].

Με τις πρόσφατες εξελίξεις των UAVs έχει αποδοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα δίκτυα τύπου “UAV swarms” («σμήνη UAVs») για ιατρικές εφαρμογές, επικοινωνία, επιτήρηση, διαχείριση καταστροφών κ.α., τα οποία αποτελούν πλέον αναπόσπαστο στοιχείο στην προοπτική που εισάγεται από το 6G. Στα δίκτυα τύπου UAV swarms χρησιμοποιείται ασύρματη επικοινωνία για αλληλεπίδραση και μερισμό των πληροφοριών ανάμεσα στα συμμετέχοντα UAVs. Τα UAV swarms, λειτουργώντας ως μεμονωμένος κόμβος που πρέπει να υπόκειται σε συνεχή έλεγχο έχοντας περιορισμένο χρόνο πτήσης, περιορισμένο ωφέλιμο φορτίο και περιορισμένο εύρος επικοινωνίας, καθίστανται τελικά ικανά για να ξεπεράσουν πιθανούς περιορισμούς των UAVs. Επίσης αποτελούνται από ετερογενή UAVs που ελέγχουν τον εαυτό τους καθώς κινούνται με συντονισμένο τρόπο [22].

Οι αναπτυσσόμενοι εναέριοι σταθμοί βάσης (Aerial Base Stations - ABSs) μπορούν να παρέχουν οικονομική, αξιόπιστη, ευέλικτη και κατ’ απαίτηση απρόσκοπτη και ευρυζωνική συνδεσιμότητα, μέσω της χρήσης UAV swarms [22]. Στην εποχή του 6G θα αυξηθούν οι απαιτήσεις για σύνδεση τεράστιων αριθμών συσκευών ΙοΕ που μπορεί να είναι σε περιοχή εκτός κάλυψης των επίγειων κυψελοειδών δικτύων και για τις οποίες ενδέχεται να είναι δύσκολη η σύνδεσή τους με τη χρήση συμβατικών τεχνολογιών ΙοΤ (π.χ. Long Range Radio - LoRa και NarrowBand ΙοΤ - NB-ΙοΤ). Τα UAV swarms ιδίως προβλέπεται να είναι χρήσιμα στο 6G για τη σύνδεση ΙοΤ δικτύων ευρείας περιοχής [49], δεδομένου ότι είναι πολύ δύσκολη η παροχή συνδεσιμότητας χρησιμοποιώντας δορυφόρους (π.χ. λόγω των περιορισμένων ρυθμών δεδομένων). Ο ρόλος των UAV swarms ως εναέριοι ή ιπτάμενοι σταθμοί βάσης (BSs), είναι να επιτρέψουν την επεκτασιμότητα της ραδιοκάλυψης σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιοχές με λιγότερο πληθυσμό. Έτσι, για να επιτευχθεί δικτύωση 3D με επικοινωνίες χωρίς κυψέλες, μπορεί να γίνει ενσωμάτωση των UAV swarms σε δορυφορικά και/ή επίγεια δίκτυα [22].

Τα UAVs θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και ως αυτοματοποιημένοι και ασύρματοι φορητοί φορτιστές, ενισχυόμενοι από την εξέλιξη της ασύρματης μετάδοσης ισχύος. Ειδικότερα, με την ταυτόχρονη ασύρματη τεχνολογία πληροφοριών και μεταφοράς ισχύος (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer - SWIPT), η μετάδοση πληροφοριών και οι αποστολές για φόρτιση μπαταρίας μπορούν να γίνουν σε μια συνεχόμενη σύνδεση [50]. Επίσης το UAV έχει ήδη ευρεία χρήση στην εκτός σύνδεσης βιντεοσκόπηση και φωτογράφιση, εξαιτίας της καλά αναπτυγμένης ενσωμάτωσής του σε πολυμεσικές συσκευές (π.χ. μέσω βιντεοκάμερας ή μικροφώνου). Στο μέλλον το UAV πρόκειται να κατέχει μεγαλύτερο ρόλο σε επιγραμμική ρευμάτωση βίντεο (online video streaming),

⁴⁶ Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://www.ekt.gr/el/news/9919>

⁴⁷ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: Y. Zeng, R. Zhang, and T.-J. Lim (2016, May): **Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges**, *IEEE Communications Magazine*, vol.54, issue.5 doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7470933?arnumber=7470933>

επιτρέποντας εμπειρία πολλαπλών αισθητήρων όπως επίσης και τηλεπισκόπηση, καθώς θα είναι εξοπλισμένο με διάφορους αισθητήρες [13]. Αναμένεται η ύπαρξη των UAVs σε μεγάλο βαθμό στις επερχόμενες Εκδόσεις 16⁴⁸ και 17⁴⁹ της 3GPP [51].

3.6 Τεχνολογίες Συλλογής και Μεταφοράς Ενέργειας

Καθώς σταδιακά ωριμάζει η προοπτική της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, προβλέπεται η παροχή βασικής μεταφοράς ισχύος από σταθμούς βάσης 6G για τις δικτυακές συσκευές (κυρίως για αισθητήρες και εμφυτεύματα). Άλλο ένα κύριο συστατικό των συστημάτων 6G είναι το ότι αναμένεται να αποτελέσουν σημαντικό ρόλο οι συμπληρωματικές «ενεργειοκεντρικές» θεωρήσεις, όπως π.χ. η οπισθοσκέδαση (backscatter) και η συλλογή ενέργειας [3].

Η συλλογή ενέργειας έχει ως στόχο να αξιοποιήσει την ενέργεια από το περιβάλλον, αντικαθιστώντας τους συμβατικούς τρόπους τροφοδοσίας των αισθητήρων και των συσκευών. Οι δύο κύριες πηγές συλλογής ενέργειας είναι οι ανθρωπογενείς πηγές και οι φυσικές πηγές. Ειδικότερα, στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως π.χ. μηχανικές δονήσεις, ηλιακή ενέργεια, άνεμος, ανθρώπινη δραστηριότητα, κ.α. Η ανθρωπογενής συλλογή ενέργειας γίνεται μέσω WET (Wireless Energy Transfer - Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας), όπου για τη μεταφορά ενέργειας (από την πηγή στον προορισμό) χρησιμοποιείται αποκλειστικός φάρος ισχύος (power beacon). Η περίπτωση WET υπόκειται σε εκτενή διερεύνηση, καθώς οι φυσικές πηγές συλλογής ενέργειας δεν μπορούν να προσφέρουν εγγυημένη QoS, λόγω του περιοδικού και απρόβλεπτου χαρακτήρα τους ([22], [57]).

Με το όραμα για ένα καθολικό σύστημα επικοινωνίας και για μια παρεχόμενη σταθερή βάση στο IoE, τα μελλοντικά δίκτυα 6G συνεχώς θα πολλαπλασιάζονται ενσωματώνοντας έναν μεγάλο αριθμό (δια-)συνδεδεμένων συσκευών. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα ενδεχομένως το να μην ενδείκνυται, στην εποχή του 6G, η αποτελεσματική επέκταση του συμβατικού τρόπου τροφοδοσίας (αντικαταστάσιμες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες) των συσκευών αυτών (καθώς μπορούν να είναι επικίνδυνες, μη χρηστικές, δαπανηρές και να έχουν αρνητικές επιπτώσεις π.χ. όταν λειτουργούν μέσα στο ανθρώπινο σώμα). Έτσι οι τεχνολογίες συλλογής ενέργειας για τα επόμενης γενιάς δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [22] μπορούν να αποτελέσουν μια ικανοποιητική λύση για την πλήρωση του σκοπού αυτού. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το ότι τα ραδιοσήματα έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης μεταφοράς πληροφοριών και ενέργειας, η οποία αναφέρεται ως «Συγκομιδή Ενέργειας Ραδιοσυχνοτήτων» (Radio Frequency Energy Harvesting - RF-EF) ([47], [48]). Ωστόσο, για να είναι επωφελής η χρήση των τεχνικών αυτών, θα πρέπει η ασύρματη μεταφορά ενέργειας και πληροφοριών να ολοκληρώνεται αποτελεσματικά σε διαφορετικές απαιτήσεις λειτουργίας και υλισμικού [22].

Στο 6G προβλέπεται οποιαδήποτε IoT συσκευή να καταναλώσει αρκετά περισσότερη ενέργεια, εξαιτίας των υψηλότερων υπολογιστικών απαιτήσεων επεξεργασίας AI. Η WPT (Wireless Power Transmission - Ασύρματη Μετάδοση Ισχύος) θα έχει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα 6G, κάτι που δεν συνέβαινε στην περίπτωση του 5G. Αρχικά, και με τη συνεχή αύξηση της πυκνότητας του ασύρματου δικτύου, θα υπάρξει σημαντική μείωση της

⁴⁸ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.3gpp.org/release-16>

⁴⁹ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.3gpp.org/release-17>

απόστασης επικοινωνίας. Με τη χρήση των UAVs ως σταθμών βάσης, θα μειωθεί ακόμα περισσότερο η απόσταση, ενισχύοντας περισσότερο τον ρόλο της WPT. Η WPT θα ωφελήσει ιδιαίτερα τα UAVs καθώς θα τους επιτρέπει να κινούνται συνεχώς. Επίσης η συλλογή ενέργειας από σήματα RF μπορεί να αποτελέσει τροφοδοτικό σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, λόγω της εξελικτικής προόδου της τεχνολογίας συλλογής ενέργειας [6].

Άλλη μια καινοτόμος τεχνολογία στην επικοινωνία 6G θα είναι η WIET (Wireless Information and Energy Transfer - Ασύρματη Μεταφορά Πληροφοριών και Ενέργειας), που χρησιμοποιεί τα ίδια κύματα και πεδία με αυτά των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία WIET χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και φόρτιση μπαταριών των ασύρματων συστημάτων και έτσι η υποστήριξη των συσκευών που δεν έχουν μπαταρία θα γίνεται από τις συνδέσεις 6G. Επίσης τα ενδύματα με δυνατότητα ενεργοποίησης από κοντινό πεδίο (near-field-enabled), δίνουν την ευκαιρία στην ιατρική για συνεχή παρακολούθηση με αισθητήρες που δεν περιέχουν μπαταρία [19].

3.7 Ενσωμάτωση Επαίσθησης (Sensing) και Επικοινωνίας

Στο 6G, θα υπάρχει στενή ενσωμάτωση των αισθητήρων με τις επικοινωνίες, για την υποστήριξη συναφών αυτόνομων συστημάτων. Κύριος «οδηγός» των αυτόνομων ασύρματων δικτύων είναι η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε διαφορετικούς κόμβους και η συνεχής επαίσθηση των δυναμικά μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών καταστάσεων [6]. Η επαίσθηση θα είναι άμεσα ενσωματωμένη στην επικοινωνία μέσω του 6G. Πραγματικοί παράγοντες πρόκλησης ώστε να επιτευχθεί η ενοποίηση αυτή, είναι οι πολύπλοκοι πόροι επικοινωνίας, ο πολύ μεγάλος αριθμός των αντικειμένων προς επαίσθηση, οι πολυ-επίπεδοι υπολογιστικοί πόροι και οι πόροι κρυφής μνήμης πολλών επιπέδων [19].

Για να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια σε εκτενέστερους εσωτερικούς χώρους στους οποίους ενίοτε υπάρχει περιορισμένη ορατότητα οπτικής επαφής, θα πρέπει να βελτιωθούν οι λύσεις τοπικής προσαρμογής. Η ακρίβεια επαίσθησης μπορεί να βελτιωθεί, ακόμα και όταν τα ορατά σημεία πρόσβασης είναι περιορισμένα, συγχωνεύοντας δεδομένα σε κάμερα, RF όπως και αισθητήρες σε ρομπότ και εφαρμόζοντας νέες μεθόδους χαρτογράφησης καναλιών, βασισμένες σε τεχνικές AI/ML και σε συστήματα με μεγάλες κεραιοσυστοιχίες (arrays) [52]. Η πλατφόρμα 6G, συνδυάζοντας τις γνωστικές (cognitive) τεχνολογίες μαζί με τις δυνατότητες επαίσθησης πολλαπλών τρόπων, θα δημιουργήσει μια «έκτη αίσθηση» σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών. Δηλαδή θα μπορεί να αναλύσει προτιμήσεις, μοτίβα συμπεριφοράς όπως και ανθρώπινα συναισθήματα, επιτρέποντας ώστε η διάδραση με τον φυσικό κόσμο να γίνεται με ένα πολύ πιο διαισθητικό τρόπο [8].

3.8 Τεχνολογίες MIMO

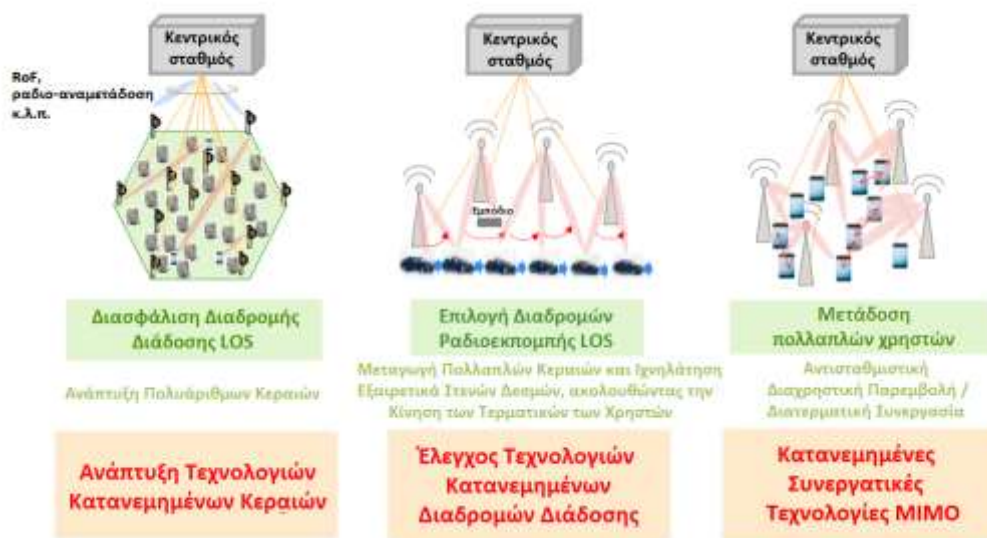
Ιδιαίτερη σημασία θα έχει η τεχνολογία MIMO για το σύστημα 6G, καθώς θα υποστηρίξει υπηρεσίες mMTC, uHSLC και uHDD. Η εφαρμογή της τεχνικής MIMO θα αποτελέσει έναν βασικό τρόπο βελτίωσης της φασματικής απόδοσης. Η ανάπτυξη της τεχνικής αυτής είναι ανάλογη με την ανάπτυξη της φασματικής απόδοσης. Έτσι λοιπόν, η περίπτωση mMIMO (massive MIMO), εξαιτίας της απαίτησης για υψηλότερες συχνότητες, υψηλότερους

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

ρυθμούς δεδομένων και καλύτερη ενεργειακή και φασματική απόδοση, αναμένεται ότι θα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των συστημάτων 5G και 6G [19].

Η τεχνολογία mMIMO χρησιμοποιείται ήδη στο 5G με έναν πολύ μεγάλο αριθμό στοιχείων κεραίας και αποτέλεσε την κύρια αφορμή για αποτελεσματική χρήση των χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter waves) [53]. Στην εξέλιξη της πέμπτης και έκτης γενιάς, προβλέπονται επιπλέον προηγμένες μορφές mMIMO, όπως είναι το πολλαπλών επιπέδων / πολλαπλών στοιχείων mMIMO και το κατανεμημένο mMIMO, συνδυασμένο με την Τοπολογία Νέου Ραδιοδικτύου (New Radio Network Topology) για διαμόρφωση κατανεμημένης κεραίας, το οποίο είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρο για ζώνες υψηλών συχνοτήτων (π.χ. κύματα terahertz και χιλιοστών) [9]. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, είναι απαραίτητο να μελετηθεί ο τρόπος επίτευξης των παρακάτω τεχνολογιών [9]:

- i. Τεχνολογία ανάπτυξης κατανεμημένων κεραιών για τη διασφάλιση διαδρομών LOS για κινητά τερματικά, με μεγάλη πιθανότητα.
- ii. Τεχνολογίες ελέγχου κατανεμημένων διαδρομών διάδοσης για τη μεταγωγή των διαδρομών επικοινωνίας και για την ιχνηλάτηση πολύ στενών δεσμών, σύμφωνα με την κίνηση των τερματικών των χρηστών.
- iii. Τεχνολογία για την επίτευξη κατανεμημένης συνεργατικής MIMO που διασφαλίζει εκπομπή σε πολλαπλούς χρήστες με μεγάλο αριθμό τερματικών χρηστών, χρησιμοποιώντας διάφορες συνεργατικές μεθόδους (π.χ. επικοινωνίες μεταξύ των τερματικών).



Εικόνα 7: Προς μελέτη ζητήματα για το Κατανεμημένο MIMO (Distributed MIMO) [9]

Οι BSs με mMIMO, δηλαδή με πολλές ανεξάρτητες ελεγχόμενες κεραίες, πολυπλέκουν πολλαπλές ροές δεδομένων στον τομέα συχνότητας - χρόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών μέχρι και σε δίκτυα υψηλής πυκνότητας. Μια τέτοια τεχνολογία είναι κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές IoT, στις οποίες

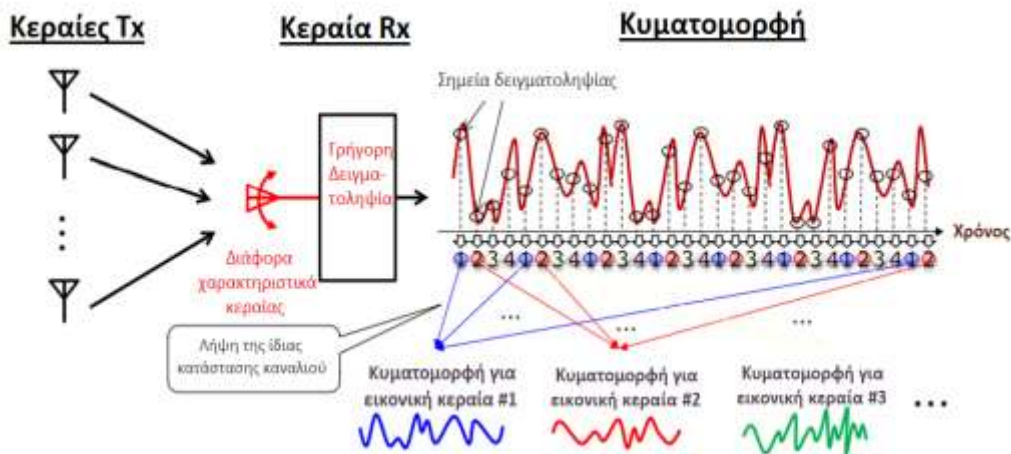
υπάρχει συγκέντρωση πολλών συσκευών. Σύμφωνα με τους Lee & Yang⁵⁰, το mMIMO έχει τη δυνατότητα κάλυψης 8000 περίπου βιομηχανικών IoT συσκευών χαμηλής καθυστέρησης, με 400 κεραιές. Ένα σύστημα με χαμηλό κόστος υλισμικού, μπορεί να επιτύχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλή πολυπλοκότητα μέσω εφαρμογής πρακτικών τεχνικών υβριδικής κωδικοποίησης. Είναι απαραίτητη μια τεχνική υβριδικού προ-κωδικοποιητή, κυρίως για συστήματα υψηλών συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι απαγορευτικό από τεχνική άποψη το να «εξοπλίζεται» κάθε στοιχείο ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε μια μεγάλη κεραιοσυστοιχία, με μεμονωμένη αλυσίδα ραδιοσυχνοτήτων που είναι υποχρεωτική για έναν πλήρως ψηφιακό προ-κωδικοποιητή. Ένας πλήρως ψηφιακός προ-κωδικοποιητής οδηγεί σε πολύ μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα όταν αυξάνεται το εύρος ζώνης, καθώς χρειάζεται να επεξεργαστεί δισεκατομμύρια δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Μολαταύτα, ο σχεδιασμός ενός υβριδικού προ-κωδικοποιητή, του οποίου η λειτουργία είναι κοντά σε έναν ψηφιακό προ-κωδικοποιητή συνιστά δύσκολο πρόβλημα, εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων [7].

Η τεχνολογία Virtual Massive MIMO (VM-MIMO), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική για την επίτευξη απολαβής κεραιών χωρικής πολυπλεξίας με μια μόνο κεραία σε σχέση με το mMIMO, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 8. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία αυτή μπορεί να αυξήσει τα κανάλια πολυπλεξίας διαίρεσης χώρου και να δημιουργήσει έναν ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό εικονικών κεραιών, αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά της κεραίας σε εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων με περιοδικό τρόπο και χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας λήψης σε σχέση με το εύρος ζώνης της συχνότητας, όπως συμβαίνει και στο FTN⁵¹. Ωστόσο το VM-MIMO, σε αντίθεση με το FTN μπορεί να επεκτείνει το εύρος ζώνης, εν συγκρίσει με το όριο Shannon⁵², δημιουργώντας έτσι διακύμανση στη διαδρομή διάδοσης με υψηλό ρυθμό δεδομένων [9].

⁵⁰ B.M. Lee and H. Yang (2019, June): **Massive MIMO with massive connectivity for industrial internet of things**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.67, no.6, pp.5187-5196, doi: 10.1109/TIE.2019.2924855, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8752284>

⁵¹ Πρόσφατα έχει μελετηθεί η σηματοδότηση τύπου FTN (Faster-than-Nyquist), η οποία συσκευάζει δεδομένα μη ορθογώνια με ρυθμό δειγματοληψίας ταχύτερο από το εύρος ζώνης. Η σηματοδότηση FTN μπορεί να έχει και άλλο κέρδος, όπως είναι η αναλογία μέγιστης προς τη μέση ισχύ (Peak-to-Average Power Ratio - PAPR) [9].

⁵² Το όριο Shannon ή η χωρητικότητα Shannon ενός καναλιού επικοινωνίας αναφέρεται στον μέγιστο ρυθμό δεδομένων χωρίς σφάλματα που μπορεί θεωρητικά να μεταφερθεί μέσω του καναλιού εάν η σύνδεση υπόκειται σε τυχαία σφάλματα μετάδοσης δεδομένων, για ένα συγκεκριμένο επίπεδο θορύβου. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Noisy-channel_coding_theorem.



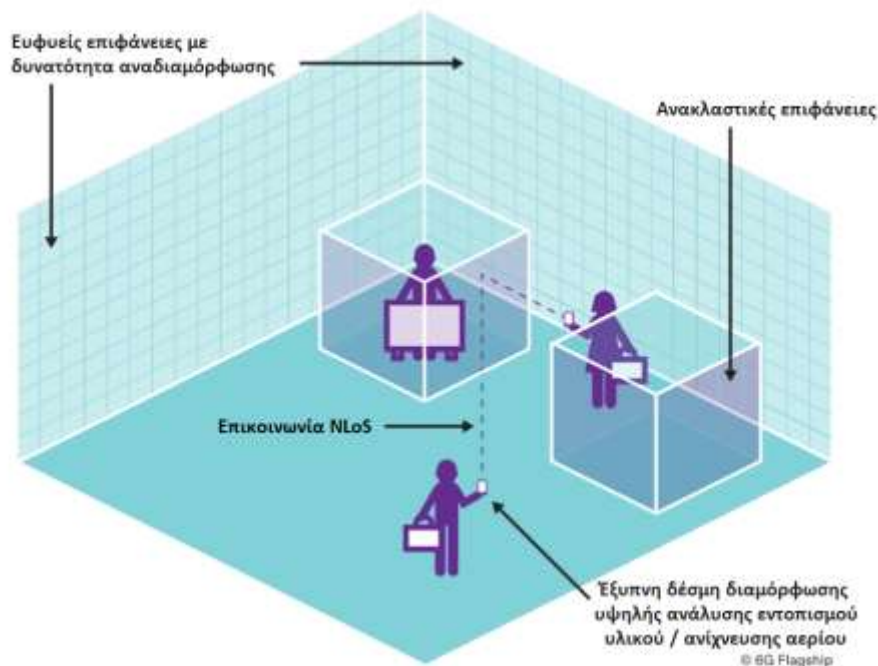
Εικόνα 8: Ένα παράδειγμα τεχνολογίας μη ορθογωνικής εκπομπής, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας από το εύρος ζώνης συχνοτήτων (VM-MIMO) [9]

3.9 Έξυπνες Ανακλαστικές Επιφάνειες

Η IRS (Intelligent Reflective Surface - Έξυπνη Ανακλαστική Επιφάνεια)⁵³ αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό παθητικών στοιχείων κεραίας, στα οποία υπάρχει η εκ νέου δυνατότητα διαμόρφωσης του πλάτους και των μετατοπίσεων φάσης. Η ανακλώμενη διαδρομή των σημάτων που προσκρούουν στην επιφάνεια μπορεί να αλλάξει, συντονίζοντας με κατάλληλο τρόπο τη μετατόπιση φάσης του κάθε στοιχείου, για τη μεγιστοποίηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεν παρεμβαλλόμενα σήματα προστίθενται καταστροφικά, ενώ τα επιθυμητά σήματα προστίθενται εποικοδομητικά [7]. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να είναι μια ιδανική λύση στα επερχόμενα δίκτυα 6G, καθώς θα ελαχιστοποιήσει τη μετάδοση ισχύος και θα μεγιστοποιήσει τον ρυθμό δεδομένων [19].

Η κατανάλωση ενέργειας, η πολυπλοκότητα και το κόστος υλισμικού μπορούν να έχουν σημαντική μείωση, καθώς δεν απαιτούνται πολύπλοκες λειτουργίες για την επεξεργασία, την αποκωδικοποίηση και την κωδικοποίηση ραδιοσυχνοτήτων όπως και για την αναδιάρθρωση των στοιχείων της IRS. Αυτές οι ιδιότητες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες σε ογκώδεις συσκευές IoT που είναι πυκνά εγκατεστημένες [7]. Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται μια πιθανή περίπτωση χρήσης των IRSs σε έναν εσωτερικό χώρο, όπου με αυτές επεκτείνεται το εύρος της ασύρματης επικοινωνίας και διευκολύνεται η επικοινωνία χωρίς οπτική επαφή (Non Line of Sight - NLOS) [17].

⁵³ Οι IRSs μπορούν να έχουν διαφορετικά ονόματα, όπως είναι π.χ. οι αναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RISs) και οι μεγάλες ευφυείς επιφάνειες (Large Intelligent Surfaces - LISs) [17].



Εικόνα 9: Απεικόνιση των IRSs, για της περιπτώσεις διευκόλυνσης της επικοινωνίας NLoS σε έναν εσωτερικό χώρο [17]

Προκαταρκτικές έρευνες δείχνουν ότι κυρίως σε πυκνά εγκατεστημένες μαζικές συσκευές IoT, μπορεί να προωθηθεί πολύ υψηλότερη φασματική απόδοση, χρησιμοποιώντας στις IRSs μεγάλο αριθμό παθητικών στοιχείων σκέδασης, για την επίτευξη στενών και ακριβών δεσμών στο άκρο του δέκτη. Επιπλέον, δεν κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός πολύ μεγάλου αριθμού κεραιών στον πομπό, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά το κόστος υλισμικού και η πολυπλοκότητα, ζητήματα που πρωτίστως αντιμετωπίζουν οι υλοποιήσεις εφαρμογών mMIMO [7]. Επίσης ο μηχανισμός παθητικής ανάκλασης στον οποίο βασίζεται η IRS, λειτουργεί σχεδόν για όλες τις οπτικές συχνότητες και τις συχνότητες RF, σε αντίθεση με τις ενεργές mMIMO κεραιοσυστοιχίες των οποίων η εφαρμογή πρέπει να συμβαίνει για κάθε μεμονωμένη RAT (Radio Access Technology - Τεχνολογία Ραδιοπρόσβασης). Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές για τα συστήματα 6G από θέμα κόστους, επειδή λειτουργούν σε εξαιρετικά ευρύ φάσμα [13].

Οι IRSs αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και στις υψηλές συχνότητες, συγκεκριμένα στο πλαίσιο των επικοινωνιών mmWave / THz [54]. Οι εγκαταστάσεις IRSs μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος και να επεκτείνουν το εύρος επικοινωνίας, επιλύοντας έτσι διάφορα υπάρχοντα ζητήματα. Τέτοια ζητήματα αφορούν π.χ. στο ότι είναι δύσκολη η εφαρμογή μεγάλων κεραιοσυστοιχιών σε υψηλές συχνότητες, καθώς δεν είναι ακόμα ώριμη η τεχνολογία αναμετάδοσης και είναι χαμηλός ο αριθμός των φυσικών διαδρομών διάδοσης σε υψηλότερες συχνότητες (μεγαλύτερες απώλειες διαδρομής και χαμηλότερη σκέδαση). Τέλος, οι μεγάλες (συγκριτικά ως προς το μήκος κύματος λειτουργίας τους) ηλεκτρονικές IRS μπορούν με πολύ μικρά ίχνη να εφαρμοστούν σε υψηλές συχνότητες, διευκολύνοντας περαιτέρω την ανάπτυξη τους [17].

Μπορούν να αντιμετωπιστούν διάφορα προβλήματα, ενσωματώνοντας τις IRSs στο υφιστάμενο ασύρματο οικοσύστημα. Οι IRSs μπορούν να αναπτυχθούν ως παθητικός

αναμεταδότης για τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου ώστε να ξεπεραστούν τυχόν περιορισμοί. Αυτό συμβαίνει καθώς οι ασύρματες εφαρμογές που είναι βασισμένες στο μεγάλο εύρος ζώνης και οι οποίες υφίστανται σε συχνότητες κυμάτων χιλιοστού ή υψηλότερες (τέτοιες συχνότητες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε φραγμούς), είναι όλο και περισσότερες [7].

Οι IRSs μπορούν να αποτελέσουν λύση και για να αντιμετωπιστούν προβλήματα ασφαλείας φυσικού στρώματος, όπου στους παράνομους χρήστες ή στην υποκλοπή προστίθενται καταστροφικά τα κοινά σήματα προκωδικοποίησης/διαμόρφωσης δέσμης του πομπού και της IRS. Επίσης η IRS μπορεί να βοηθήσει στα εξής [7]:

- i. Ασύρματη μεταφορά ενέργειας: Ενισχύεται η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος από έναν δέκτη πληροφοριών, με τη διαμόρφωση δέσμης στην IRS. Επίσης παρέχεται εγγύηση για την απαιτούμενη συλλογή ενέργειας του ενεργειακού δέκτη.
- ii. Επικοινωνίες UAV: Βελτιώνεται η ποιότητα επικοινωνίας ανάμεσα στους χρήστες εδάφους και στα UAVs, μέσω της ανάπτυξης IRS σε ένα κτίριο.
- iii. Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου για φορητές συσκευές: Υποβοήθηση της διαδικασίας εκφόρτωσης και βελτίωση των συνθηκών καναλιού, χρησιμοποιώντας μορφοποίηση δέσμης IRS.

Εντούτοις, παρόλο που η πολυπλοκότητα υλισμικού στον πομπό μπορεί να υποστεί μείωση, προκύπτουν νέα θέματα πολυπλοκότητας λόγω των πολλών παθητικών στοιχείων κεραίας στις IRSs, των οποίων οι δυνατότητες για την επεξεργασία του σήματος είναι περιορισμένες [7]. Επίσης η IRS συνεχίζει έως και σήμερα να μην διαθέτει ώριμες τεχνικές εκτίμησης και ακριβή μοντελοποίηση τόσο των καναλιών όσο και της ίδιας της επιφάνειάς της, κυρίως στο εύρος του κοντινού πεδίου, παρά τη μεγάλη τεχνική ανταγωνιστικότητα που παρουσιάζει το νέο φάσμα 6G [13].

3.10 Κβαντικές Επικοινωνίες

Σύμφωνα με τους Gisin και Thew⁵⁴ η κβαντική επικοινωνία (Quantum Communication - QC) είναι ένας τρόπος για να γίνει μεταφορά μιας κβαντικής κατάστασης από τον αποστολέα προς τον δέκτη. Η εν λόγω μορφή επικοινωνίας μπορεί να εκτελέσει εργασίες τις οποίες οι κλασικές παραδοσιακές τεχνικές είτε δεν μπορούν να εκτελέσουν αποτελεσματικά είτε δεν μπορούν να τις εκτελέσουν καθόλου [22]. Οι κβαντικές επικοινωνίες είναι η ανταλλαγή πληροφοριών που γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της κβαντικής μηχανής και έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως [16]:

- i. Δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υφίσταται ενδεχόμενο παραβίασης.
- ii. Ικανότητα παράλληλων υπολογισμών μεγάλης κλίμακας.
- iii. Δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης και κωδικοποίησης μεγάλου αριθμού πολλαπλών ρών δεδομένων.

Με την εξέλιξη των δικτύων προβλέπεται η ενσωμάτωση περισσότερου φάσματος, υψηλότερης πολυπλοκότητας στα επεξεργασμένα σήματα, μεγαλύτερης ποικιλίας

⁵⁴ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: N. Gisin and R. Thew (2007, March): **Quantum communication**, *Nature Photonics*, vol.1, no.3, pp.165-171, doi: 10.1038/nphoton.2007.22.

μπροστινών άκρων (front-ends) του πομποδέκτη, αυστηρότερων απαιτήσεων αξιοπιστίας και έτσι οι υπολογιστικές απαιτήσεις των ασύρματων συστημάτων αναμένεται να αυξηθούν [55]. Για το λόγο αυτό, ο κβαντικός υπολογισμός θεωρείται ως βασική τεχνολογία υλοποίησης πολύπλοκων υπολογιστικών συστημάτων [16].

Πιο συγκεκριμένα, από την ανάγκη διασύνδεσης πολλών κβαντικών δυφίων (bits), δηλαδή της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων ή των εκατομμυρίων και, καθώς οι υπολογιστικά εντατικές εργασίες δεν δύναται να εκτελεστούν σε ένα μόνο κβαντικό πλινθίο (chip), δημιουργείται η έννοια των κβαντικών επικοινωνιών [16]. Ο κβαντικός υπολογισμός παρέχει σημαντικές βελτιώσεις για την υπολογιστική ικανότητα, λόγω της χρήσης qubits⁵⁵ (κβαντικών δυφίων) τα οποία μπορούν να «κρατήσουν» περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με τα συμβατικά δυαδικά δυφία [7]. Η κβαντική χωρητικότητα αναφέρεται στην ποσότητα των κβαντικών πληροφοριών, δηλαδή των qubits, των οποίων η μετάδοση μπορεί να γίνει μέσω ενός θορυβώδους κβαντικού καναλιού. Η χωρητικότητα των qubits που διαθέτουν τα κβαντικά κανάλια ορίζεται ως ο ρυθμός στον οποίο γίνεται αύξηση της κβαντικής ή κλασικής πληροφορίας με κάθε χρήση του κβαντικού καναλιού [16].

Τα κβαντικά συστήματα έχουν μεγάλη χρησιμότητα ως προς την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, οι παραδοσιακές μέθοδοι σε ένα πρόβλημα για τη βέλτιστη δρομολόγηση πολλαπλών στόχων (περιλαμβανομένου και του αλγορίθμου γεωγραφικής δρομολόγησης), επιδεικνύουν σημαντικές πολυπλοκότητες αναφορικά με την προσφορά βέλτιστων λύσεων, ενώ με λύσεις που είναι λιγότερο σύνθετες συχνά δεν προκύπτει το βέλτιστο αναμενόμενο αποτέλεσμα. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να επιτύχουν τόσο την βέλτιστη λύση, όσο και την αποτελεσματική μείωση της πολυπλοκότητας [16]. Επιπλέον, έρευνες έχουν δείξει ότι επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας με τους κβαντικούς υπολογιστές, σε σύγκριση με τους κλασικούς υπερ-υπολογιστές [7].

Η κβαντική επικοινωνία καθίσταται προτιμότερη για το 6G λόγω του ενδογενούς χαρακτηριστικού της υψηλής ασφάλειας [20]. Η βασική διαφορά μεταξύ κλασικής δυαδικής επικοινωνίας και κβαντικής επικοινωνίας είναι στο κατά πόσο μπορεί να ανιχνευθεί τυχόν υποκλοπή, επιτόπου. Η κωδικοποίηση των πληροφοριών σε κβαντική κατάσταση γίνεται με τη χρήση κβαντικών σωματιδίων ή φωτονίων τα οποία δεν μπορούν να κλωνοποιηθούν ή να προσπελαστούν αν δεν παραβιαστούν, και αυτό συμβαίνει λόγω των κβαντικών αρχών (π.χ. απαράγραπτος νόμος περί συσχέτισης κβαντικώς εμπελεγμένων σωματιδίων⁵⁶) [24].

Επίσης στην κβαντική επικοινωνία είναι αντιφατική η ταυτόχρονη επίτευξη υψηλών ρυθμών και μεγάλων αποστάσεων. Έτσι, κβαντικοί επαναλήπτες (repeaters) θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να παρέχεται ασφάλεια σε κβαντική επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων και υψηλής ταχύτητας δεδομένων, καθώς διαιρούν την απόσταση της κβαντικής επικοινωνίας σε ενδιάμεσα μικρότερα τμήματα και διορθώνουν τόσο τα σφάλματα λειτουργίας όσο και την απώλεια φωτονίων ([20],[24]).

⁵⁵ Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://el.wikipedia.org/wiki/Qubit>

⁵⁶ Η κβαντική εμπλοκή σημαίνει ότι πολλαπλά σωματίδια συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε η μέτρηση της κβαντικής κατάστασης ενός σωματιδίου να μπορεί να καθορίζει τις πιθανές κβαντικές καταστάσεις των άλλων σωματιδίων. Αυτή η σύνδεση δεν εξαρτάται από τη θέση των σωματιδίων στο διάστημα. Ακόμα και εάν τα εμπλεκόμενα σωματίδια διαχωρίζονται κατά δισεκατομμύρια μίλια, η αλλαγή ενός σωματιδίου θα προκαλέσει μια αλλαγή στο άλλο (<https://www.greelane.com/el/επιστήμη-τεχνολογία-μαθηματικά/επιστήμη/what-is-quantum-entanglement-2699355/>). Βλέπε επίσης: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_entanglement

3.11 Blockchain

Στα μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας το blockchain (πλοκαδική συναλύσωση) είναι μια βασική τεχνολογία διαχείρισης μαζικών δεδομένων [19]. Τα blockchains είναι ουσιαστικά κατανεμημένες βάσεις δεδομένων, βασισμένες σε κατανεμημένο καθολικό (distributed ledger-based), στις οποίες οι καταχωρήσεις και οι ενημερώσεις των συναλλαγών μπορεί να γίνονται με ασφάλεια, χωρίς να χρειάζονται κεντρικοί μεσάζοντες [24]. Επομένως τα blockchains συμπληρώνουν τέλεια το τεράστιο IoT με απόρρητο, βελτιωμένη ασφάλεια, αξιοπιστία και διαλειτουργικότητα. Έτσι μερικές από τις πολλές διευκολύνσεις που θα παρέχει η τεχνολογία blockchain θα είναι οι αυτόνομες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων IoT, η διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε συσκευές, η ιχνηλασιμότητα μαζικών δεδομένων και η αξιοπιστία μαζικής συνδεσιμότητας των συστημάτων επικοινωνίας 6G, για την επίτευξη του στόχου της υπηρεσίας uHSLC [19].

Η κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζει η δικτύωση blockchain στο 5G, αφορά στις διεκπεραιώσεις (10 ~ 1000 συναλλαγές /δευτερόλεπτο). Μια άλλη πρόκληση αφορά στη ζήτηση για τοπική και διεθνή τυποποίηση και σε θέματα κανονιστικής ρύθμισης για τη μαζική εφαρμογή blockchain στο 5G. Επιπλέον, το 5G μελετά το ζήτημα ώστε να υπάρχει ομαλή διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε διαφορετικές μορφές πλατφόρμας blockchain. Το 6G, αυξάνοντας το μέγεθος των πλοκάδων του δικτύου, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους συναίνεσης, εφαρμόζοντας καινοτόμες αρχιτεκτονικές blockchain και τεχνικές μερισμού, αποσκοπεί στο να μπορέσει να μετριάσει τους παραπάνω περιορισμούς [19].

Η τεχνολογία αυτή καθίσταται ιδανική για χρήση σε πολλές εφαρμογές στην επικοινωνία 6G λόγω των ακέραιων χαρακτηριστικών της, όπως είναι η μυστικότητα/ανωνυμία και η αποκεντρωμένη αντοχή ως προς ενδεχόμενη παραβίαση, προσεγγίζοντας έτσι με ασφάλεια τη διαχείριση φάσματος με το να επαληθεύονται οι συναλλαγές, να προλαμβάνεται η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και να καθιερώνεται η διαφάνεια. Το blockchain, προκειμένου να παρουσιάσει χαρακτηριστικά που δεν υπάρχουν στις υπάρχουσες δομές, συνδυάζει μηχανισμούς συναίνεσης, προηγμένη κρυπτογραφία και κατανεμημένη δομή δικτύου, που ενισχύουν την ασφάλεια και εξαλείφουν το πρόβλημα ενός μεμονωμένου σημείου αποτυχίας⁵⁷ [19].

Η περίπτωση του blockchain εκλαμβάνεται ως η νέα μορφή επαναστατικής τεχνολογίας για τις μελλοντικές κινητές επικοινωνίες. Ειδικότερα, το blockchain εγγυάται για όλη την επικοινωνία ισχυρότερα χαρακτηριστικά ασφάλειας, επιτρέποντας σε διάφορες δικτυακές οντότητες να έχουν ασφαλή πρόσβαση σε κρίσιμα δεδομένα ενώ ένα μη ελέγξιμο κατανεμημένο γενικό καθολικό (untamable distributed ledger) στο οποίο περιέχονται τα δεδομένα μπορεί να υπόκειται σε μερισμό από όλες τις σχετιζόμενες οντότητες [56]. Επίσης εκτός από τα ζητήματα που έχουν σχέση με την ασφάλεια, το blockchain προσφέρει

⁵⁷ Ένα μεμονωμένο σημείο αποτυχίας (Single Point of Failure - SPOF) είναι οποιοδήποτε μη περιττό μέρος ενός συστήματος που, εάν δυσλειτουργούσε, θα προκαλούσε την αποτυχία ολόκληρου του συστήματος. Ένα μόνο σημείο αποτυχίας είναι αντίθετο προς τον στόχο της υψηλής διαθεσιμότητας σε ένα υπολογιστικό σύστημα ή δίκτυο, μια εφαρμογή λογισμικού, μια επιχειρηματική πρακτική ή οποιοδήποτε άλλο βιομηχανικό σύστημα. Βλέπε επίσης: <https://avinetworks.com/glossary/single-point-of-failure/>.

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

ορισμένα πλεονεκτήματα σχετικά με την ενορχήστρωση πόρων και με τη δικτυακή πρόσβαση. Ένας αποκεντρωμένος μηχανισμός ελέγχου που βασίζεται σε blockchain επιτρέπει την εγκατάσταση άμεσων ζευξέων επικοινωνίας μεταξύ των δικτυακών οντοτήτων, γεγονός το οποίο οδηγεί σε μείωση του διαχειριστικού κόστους. Επίσης, αντί για μια κεντρικοποιημένη βάση δεδομένων, η ενοποίηση του blockchain σε σύστημα μερισμού του μπορεί να αυξήσει τη φασματική απόδοση [24].

Εν κατακλείδι, το blockchain μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στο να βελτιώσει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά [22]:

- i. Διαχείριση κινητικότητας και ενορχήστρωσης σχετικά με τους πόρους, το φάσμα και με παρεμβολές.
- ii. Λειτουργίες σχετικά με τη δικτύωση 3D και με την επικοινωνία χωρίς κυψέλες (cell-free).
- iii. Επιχειρηματικά μοντέλα για αξιόπιστες και αποκεντρωμένες ψηφιακές αγορές, συμπεριλαμβάνοντας ενδιαφερόμενους όπως πάροχοι υποδομής (Infrastructure Providers - InPs), βιομηχανικοί κλάδοι, μισθωτές δικτύων, πάροχοι εφαρμογών στο άκρο του δικτύου (edge providers) και πάροχοι Over-The-Top (OTT).

Η ρεαλιστική χρήση και η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας blockchain έχει αναγνωρισθεί από πολλούς τομείς, καθώς προσφέρουν και εκτελούν τεχνολογικές λύσεις βασισμένες σε αυτή. Τέτοιοι επιχειρηματικοί τομείς είναι τα χρηματοοικονομικά και οι τραπεζικές εργασίες, η ναυτιλία και οι μεταφορές, η βιομηχανική αλυσίδα εφοδιασμού, ο κατασκευαστικός τομέας, οι εκπαιδευτικές διαδικασίες και οι διαδικασίες πιστοποίησης, η ιατρική υγειονομική περίθαλψη και τα αρχεία ασθενών, όπως επίσης και οι κινητές επικοινωνίες [22].

Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να μετριάσουν οι προκλήσεις 6G, όπως π.χ. η υψηλή απόδοση συναλλαγών, τα υπολογιστικά έξοδα, οι «ελαφροί» αλγόριθμοι συναίνεσης, η επεκτασιμότητα και η κβαντική αντίσταση, ώστε να γίνεται η βέλτιστη αξιοποίηση της χρήσης του blockchain [22].

3.12 Τεχνολογίες Δικτύωσης

Μέχρι στιγμής έχουν παρουσιαστεί λεπτομερώς οι βασικές τεχνολογίες που αναμένεται να διαδραματίσουν αναπόσπαστο ρόλο στην επόμενη γενιά ασύρματων δικτύων. Ωστόσο, εκτός από αυτές υπάρχουν πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες ακόμα σε πρώιμο στάδιο, που αναμένεται να φέρουν επανάσταση στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τις επικοινωνίες δεδομένων στο εγγύς μέλλον. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τρεις τέτοιες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες δικτύωσης, οι οποίες είναι η νανοδικτύωση, η βιοδικτύωση και η τρισδιάστατη δικτύωση.

3.12.1 Διαδίκτυο των Νανο-Αντικειμένων (Internet of NanoThings - IoNT)

Μια ποικιλία από μετασηματιστικά σενάρια των ασύρματων επικοινωνιών προβλέπεται στο εγγύς μέλλον να καταστούν πραγματικότητα, πέρα από την ανάγκη περισσότερων πόρων φάσματος για τη φιλοξενία μιας πληθώρας ασύρματων υπηρεσιών και συσκευών. Με την έλευση της πανταχού παρούσας ασύρματης παρουσίας, παρατηρούμε καταστάσεις όπου δεν αποδίδονται αποδεκτές επιδόσεις από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ή δεν υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης λόγω περιορισμών του υλισμικού (όπως π.χ. σε νερό

υψηλής αλμυρότητας ή σε εξαιρετικά μικρό εύρος μετάδοσης ενδο-αγγειακών καναλιών) [16].

Για επικοινωνίες THz στα παραπάνω σενάρια, τα μήκη κύματος των σημάτων εμπίπτουν στην περιοχή των νανομέτρων (δηλαδή σε μέγεθος μεταξύ 10^{-9} έως 10^{-7} m) όσο αυξάνονται οι συχνότητες λειτουργίας, δημιουργώντας προκλήσεις και κίνητρα για μελέτες των επικοινωνιών στα νανοδίκτυα. Στην περίπτωση του IoNT (Internet of NanoThings) χρησιμοποιούνται πομποδέκτες και συσκευές της κλίμακας νανομέτρων, των οποίων η συμπεριφορά διαφοροποιείται από αυτή των κλασικών συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας [16].

Η νέα τεχνολογία επικοινωνίας νανοκλίμακας χρησιμοποιείται για επικοινωνία με εξαιρετικά μικρό μήκος κύματος και καθίσταται κατάλληλη για απόσταση της τάξης 1 m ή cm [20]. Το κάθε νανο-αντικείμενο (nano-thing), λόγω του πολύ μικρού του μεγέθους καταναλώνει πολύ λίγη ενέργεια, ενώ υπάρχει το όραμα της αυτο-τροφοδοσίας (π.χ. χρήση πιεζοηλεκτρικών νανο-γεννητριών για συλλογή ενέργειας από δονήσεις). Τα νανο-αντικείμενα μπορούν, πέρα από την μετάδοση σήματος, να επιτρέψουν νέες δυνατότητες νανο-ανίχνευσης υψηλότερης ευαισθησίας, καθώς επίσης και να εκτελέσουν αποθήκευση και βασική επεξεργασία δεδομένων [16]. Για τη δημιουργία συσκευών με νανομετρική εμβέλεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά υλικά όπως είναι τα μετα-υλικά και το γραφένιο [20].

Βασικές προκλήσεις αυτής της επικοινωνίας είναι η μοντελοποίηση των καναλιών και ο σχεδιασμός πομποδέκτη νανοκλίμακας [20].

3.12.2 Διαδίκτυο των Βιο-Νανο-Αντικειμένων (Internet of BioNanoThings - IoBNT)

Το IoBNT είναι δίκτυο μορίων που επικοινωνούν μεταξύ τους. Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2015, προσπαθώντας να συνδυάσει τις τηλεπικοινωνίες με ιατρικές λύσεις [16].

Το IoBNT προσφέρει πολλές ευκαιρίες αλλά και προκλήσεις [16], όπως είναι οι εξής:

- Εξαιτίας της διεπιστημονικής έρευνας τόσο στην ανάλυση δεδομένων όσο και στις επικοινωνίες, μπορεί να διευκολυνθεί η μοντελοποίηση βιολογικών εργασιών (νόσος Αλτσχάιμερ και σχηματισμός καρκινικών κυττάρων) όπως και η σχεδίαση επιπλέον μέτρων ελέγχου τέτοιων ασθενειών.
- Μπορούν να αναπτυχθούν και να αξιοποιηθούν μοντέλα επικοινωνίας, παρόλο που υπάρχει αξιοσημείωτη ποικιλία εκφράσεων γενετικών κωδικών σε επίπεδο οργάνου και κυττάρου, αναλογικά με τους διαφορετικούς τύπους εφαρμογών δεδομένων των ασύρματων δικτύων.
- Ενσωμάτωση στοιχείων ετερογενών επιπέδων στην υπό όραμα ολιστική αρχιτεκτονική δικτύου του IoBNT, συμπεριλαμβάνοντας και τα κύτταρα μεταξύ των ιστών, των οργάνων και των συστημάτων πριν την σύνδεσή τους στο εξωτερικό Διαδίκτυο, ώστε να μπορούν οι γιατροί να αξιολογήσουν την κατάσταση και να προτείνουν ανάλογες θεραπείες. Εντούτοις, απαιτείται η δημιουργία λύσεων ιατρικών εφαρμογών που θα υλοποιηθούν τόσο σε μοριακά όσο και σε βιολογικά περιβάλλοντα και που θα πρέπει να βασίζονται σε προηγμένα εργαλεία στατιστικής ανάλυσης όπως και σε μια σταθερή κατανόηση της φυσικής πίσω από τη μοριακή

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

επικοινωνία, για να είναι εν τέλει εφικτή η αποκάλυψη και μελέτη βασικών κανόνων.

Το IoBNT προβλέπεται να έχει πολύ μεγάλες δυνατότητες στη μοριακή διάγνωση αναδυόμενων ιών όπως είναι ο COVID-19. Επίσης, άλλες μελέτες συμπεριλαμβάνουν τη χρήση βιο-νανο-αισθητήρων για να εξεταστεί εάν κάποιο άτομο έχει μολυνθεί, εντοπίζοντας αντισώματα από τα δείγματα αίματος [16].

Έως τώρα οι μελέτες εστιάζουν στο IoBNT ως προς τους τομείς ανάλυσης χωρητικότητας, σχεδιασμού νανοομπών, μοντελοποίησης καναλιών φυσικού επιπέδου, διατάξεων κωδικοποίησης και διαμόρφωσης. Σε κάθε περίπτωση, μέσω της έρευνας που τελεί υπό εξέλιξη, θα πρέπει να ξεπεραστούν τα εξής ζητήματα στα οποία εξακολουθούν σήμερα να υφίστανται σημαντικά κενά [16]:

- Πειραματική επικύρωση: Η επικύρωση των θεωρητικών μοντέλων μοριακών επικοινωνιών θα πρέπει να γίνεται σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα καναλιών, συμπεριλαμβάνοντας επαρκείς πειραματικές δοκιμές. Μερικές φορές το κόστος δοκιμής για τα πειράματα αυτά μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλό, καθώς θα πρέπει οι εφαρμοζόμενες διαδικασίες να ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες και να είναι ουσιαστικά εκτελέσιμες στην πράξη.
- Αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων: Τα μεγάλα σύνολα δεδομένων που λαμβάνονται από προσομοιώσεις ή πειράματα, μπορεί να έχουν πολλές μεταβλητές ελέγχου, θέτοντας έτσι (πολύ) υψηλές απαιτήσεις σχετικά με την ενημέρωση και τη διαχείριση.

Εντούτοις, τόσο το B-IoT και το N-IoT θέτουν αρκετές προκλήσεις ως προς την υλοποίηση, με μια από αυτές να είναι ο σχεδιασμός τεχνολογιών φυσικού στρώματος για τη μοριακή επικοινωνία. Επίσης, λόγω της διαφορετικής φύσης του B-IoT και του N-IoT σε σχέση με το παραδοσιακό IoT, θα πρέπει να προταθούν νέες διατάξεις δρομολόγησης. Τέλος, πρέπει να αναπτυχθούν αποτελεσματικές βιο-συσκευές και νανο-συσκευές, καθώς αυτές βρίσκονται σήμερα ακόμα σε πρώιμα στάδια [20].

3.12.3 Τρισδιάστατη Δικτύωση

Μια σημαντική προοπτική του 6G αφορά στη χρήση επικοινωνιών 3D, που περιλαμβάνει την ενοποίηση επίγειων και αερομεταφερόμενων δικτύων. Εναέρια οχήματα μη εξοπλισμένα με οπτικά συστήματα καθώς και δορυφόροι χαμηλής τροχιάς μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην 3D επικοινωνία ως σταθμοί βάσης [20]. Σε αντίθεση με τις επικοινωνίες 2D, η τρισδιάστατη επικοινωνία θέτει ουσιαστικά μια διαφορετική φύση, καθώς εισάγει τη διάσταση του υψομέτρου. Έτσι νέες διατάξεις κρίνονται απαραίτητες στα δίκτυα επικοινωνίας 3D για τον χειρισμό της κινητικότητας και για την κατανομή των πόρων.

Η τρισδιάστατη δικτύωση, για να ενεργοποιήσει τα δίκτυα επικοινωνίας, χρησιμοποιεί συσκευές χρήστη και σταθμούς βάσης που βασίζονται σε drones. Κατά συνέπεια θα πρέπει να σχεδιαστούν νέα μοντέλα για ένα δίκτυο 3D, λόγω της ουσιαστικά διαφορετικής φύσης του σε σχέση με ένα δίκτυο 2D [20]. Η τρισδιάστατη δικτύωση επιτρέπει στο 6G να «αναδυθεί» ως ένα παγκόσμιο σύστημα επικοινωνίας επεκτείνοντας την κάλυψή του από το έδαφος στον αέρα και προς το διάστημα, όπως υπογειώς ή/και σε υποβρυχίως. Είναι

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

ενδιαφέρον και συνιστά αντικείμενο περαιτέρω μελέτης το γεγονός ότι οι εναέριοι σταθμοί βάσης (Aerial Base Stations - ABSs) που τροφοδοτούνται από UAV(s) μπορούν να προσφέρουν κατ'απαίτηση, αξιόπιστη και ευρυζωνική ασύρματη κάλυψη, με οικονομικά ευέλικτο και αποδοτικό τρόπο [22].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ – ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ 6G

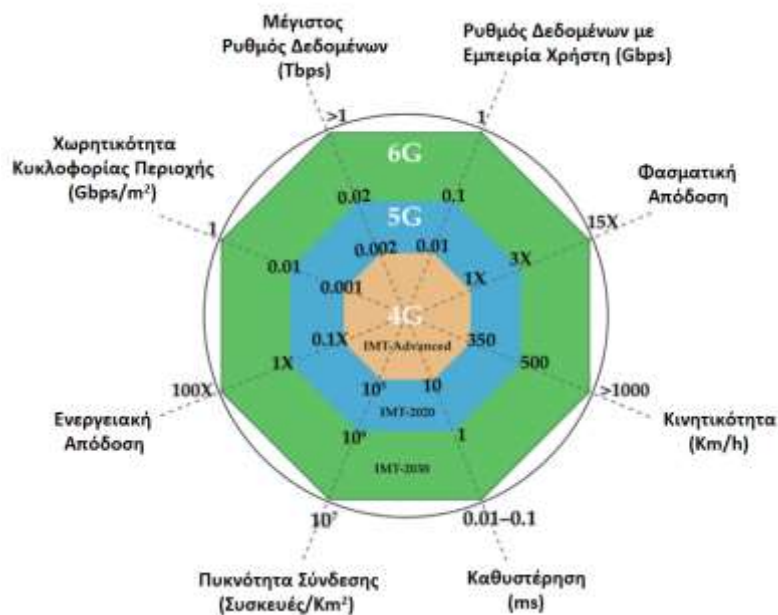
Η ευφυής κοινωνία της πληροφορίας, που είναι ιδιαίτερα ψηφιοποιημένη, εμπνευσμένη από την ευφυΐα και καθοδηγούμενη από δεδομένα σε παγκόσμια κλίμακα, θα επεκταθεί περαιτέρω στην τρέχουσα δεκαετία και ενόψει της επερχόμενης έλευσης του 6G. Τα δίκτυα 6G αποτελούν το «κλειδί» για την επίτευξη του παραπάνω μεγάλου σχεδίου, ιδίως με την προοπτική διάθεσης (πλήρους ή σχεδόν πλήρους) ασύρματης κάλυψης, ενοποίησης όλων των λειτουργιών και «σύνδεσης για τα πάντα», υποστηρίζοντας πολλαπλές εφαρμογές στις καθιερωμένες αγορές. Έτσι, τα δίκτυα 6G είναι αναγκαία για την επεξεργασία ενός πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, με χαμηλή καθυστέρηση και με εξαιρετικά υψηλή απόδοση [65]. Το κεφάλαιο επικεντρώνεται στο όραμα/απαιτήσεις, στις προκλήσεις όπως επίσης και στους Βασικούς Δείκτες Απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs) που τίθενται στα δίκτυα 6G.

4.1 Απαιτήσεις 6G

Οι αναδυόμενες ευφυείς υπηρεσίες πληροφοριών είναι η κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη των μελλοντικών δικτύων ασύρματης επικοινωνίας. Η γρήγορη ανάπτυξη των αναδυόμενων υπηρεσιών (όπως είναι π.χ. το έξυπνο IoT, η ηλεκτρονική υγεία και η αυτόνομη οδήγηση), έχει ως αντίκτυπο την εκρηκτική ανάπτυξη της κίνησης των δεδομένων της κινητής τηλεφωνίας, υπερβαίνοντας σημαντικά το αντίστοιχο όριο των υφιστάμενων δικτύων 5G. Εκτιμάται ότι περίπου σε μια δεκαετία τα δίκτυα 5G θα φτάσουν μάλλον στα όρια τους, βάσει των συναφών προδιαγραφών επί των οποίων έχουν δομηθεί [65].

Οι απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων 6G θα διαφοροποιηθούν και θα διευρυνθούν σε σχέση με το 5G, συμπεριλαμβάνοντας τόσο βελτιωμένες απαιτήσεις 5G όσο και νέες απαιτήσεις. Όπως σήμερα συμβαίνει με την περίπτωση του 5G, κατά κανόνα δεν είναι υποχρεωτική η ταυτόχρονη τήρηση όλων των απαιτήσεων για κάθε συγκεκριμένο σενάριο εφαρμογής. Αντιθέτως, ανάλογα με την εκάστοτε ειδική περίπτωση χρήσης, ενδέχεται να τίθενται συγκεκριμένες συνδυαστικές απαιτήσεις [9].

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται οι τεχνικές απαιτήσεις του 6G σε σχέση με εκείνες του 4G και 5G [45] και, εν συνεχεία, περιγράφονται αναλυτικότερα οι απαιτήσεις της επικοινωνίας 6G.



Εικόνα 10: Βασικές δυνατότητες των δικτύων 6G [45]

4.1.1 Μέγιστος Ρυθμός Δεδομένων

Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων (maximum data rate) είναι ο υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε ιδανικές συνθήκες, στις οποίες γίνεται πλήρης εκχώρηση των διαθέσιμων ραδιοπόρων σε έναν μόνο κινητό σταθμό. Παραδοσιακά, συνιστά την πλέον «συμβολική» παράμετρο για τη διαφοροποίηση των διαφορετικών διαδοχικών γενεών κινητών συστημάτων [13].

Λόγω της τεχνολογικής προόδου (π.χ. επικοινωνίες THz) και της εξαιρετικά υψηλής αναμενόμενης ζήτησης των χρηστών που θα αναδυθεί στο προσεχές μέλλον, για το 6G ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων θα είναι τουλάχιστον 1 Tbps, γεγονός που τον καθιστά κατά μια τάξη μεγέθους και 50 φορές υψηλότερο από τον αντίστοιχο ρυθμό δεδομένων των δικτύων 5G. Ειδικότερα, εκτιμάται ότι ο μέγιστος ρυθμός θα είναι της τάξης των 10 Gbps για την περίπτωση ανερχόμενης ζεύξης (uplink) και της τάξης των 20 Gbps για την περίπτωση κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Όσον αφορά στα δίκτυα 6G που θα βασίζονται σε επικοινωνίες THz, προβλέπεται ώστε ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων να φθάσει μέχρι και σε τιμές της τάξης των 10 Tbps ([13], [66]).

Στο 6G μπορεί να είναι εφικτή η προσφορά/διάθεση υπερβολικά μεγάλων ρυθμών δεδομένων για την αντιμετώπιση της προοπτικής της συνδεσιμότητας σε μαζική κλίμακα όπως και για την παροχή εξαιρετικά υψηλής διεκπεραιωτικότητας. Αυτό μπορεί να είναι εφικτό ακόμα και σε ακραίες συνθήκες ή/και σε σενάρια έκτακτων αναγκών, όπου ενδεχομένως να ποικίλλουν οι πυκνότητες των διατιθέμενων συσκευών, η διαθεσιμότητα φάσματος και υποδομών καθώς και τα μοτίβα δικτυακής κίνησης [18].

Επιπλέον, όσο οι τελικοί χρήστες θα χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο περιεχόμενο υψηλής ευκρίνειας, τόσο θα πρέπει οι ρυθμοί δεδομένων της κινητής τηλεφωνίας να βελτιώνονται σε επίπεδο διάθεσης Gbps [22].

4.1.2 Ρυθμός Δεδομένων που τυγχάνει της Εμπειρίας Χρήστη

Ο ρυθμός δεδομένων που τυγχάνει εμπειρίας από τον χρήστη (user experienced data rate) ορίζεται ως το 5% της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής της διεκπεραιωτικότητας του χρήστη. Δηλαδή, ένας χρήστης έχει 95% δυνατότητα για να λάβει τουλάχιστον αυτόν τον ρυθμό δεδομένων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή θέση. Έχει νόημα το να μετράται η αντιληπτή απόδοση, ειδικά στο άκρο της κυψέλης και τούτο αντικατοπτρίζει την ποιότητα του σχεδιασμού του δικτύου (όπως είναι η πυκνότητα σταθμοτόπου (site), η αρχιτεκτονική, η διακυβελική βελτιστοποίηση, κτλ.). Σε ένα σενάριο ανάπτυξης 5G σε «πυκνό» αστικό περιβάλλον, ο στόχος του ρυθμού που αντιλαμβάνεται ο χρήστης είναι να επιτυγχάνονται τιμές της τάξης των 50 Mbps για ανερχόμενη ζεύξη (uplink) και τιμές της τάξης των 100 Gbps για κατερχόμενη ζεύξη (downlink) [13]. Ο ρυθμός δεδομένων της εμπειρίας χρήστη αναμένεται να είναι μέχρι και 1 Gbps, τιμή 10 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για το 5G. Σε ορισμένα ειδικά σενάρια (όπως είναι π.χ. τα εσωτερικά hotspots), ο ρυθμός δεδομένων εμπειρίας χρήστη, αναμένεται να φτάσει μέχρι και σε τιμές 10 Gbps [65].

Εάν οι ταχύτητες επικοινωνίας βελτιωθούν περαιτέρω ώστε να επιτρέπεται στην ασύρματη τεχνολογία να παραδίδει «εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα επικοινωνίας» με υπέρβαση του ορίου των 100 Gbps, τότε οι νέες «αισθητηριακές υπηρεσίες» (“sensory services”) θα καταστούν πραγματικότητα. Αυτές οι υπηρεσίες έχουν ως στόχο να παρέχουν ποιότητα εμπειρίας χρήστη «ίση» με αυτή που επιτυγχάνεται με τις πέντε αισθήσεις ή ακόμα και ανώτερη και συγκρίσιμη με την «πολυαισθητηριακή επικοινωνία»⁵⁸ (“multi-sensory communication”) [9].

4.1.3 Φασματική Απόδοση (Spectral Efficiency)

Σε ό,τι αφορά στο επερχόμενο δίκτυο 6G, προβλέπεται εκθετική αύξηση του αριθμού των διασυνδεδεμένων έξυπνων συσκευών-αντικειμένων. Ειδικότερα, αναμένεται ότι στις πολλαπλές χιλιάδες των συναφών συσκευών θα συμπεριλαμβάνονται μηχανήματα, εξοπλισμοί, αισθητήρες, κτλ., ανά κυβικό μέτρο. Σε κάθε περίπτωση, βιντεορροεύματα (video streams) εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (όπως π.χ. ολογραφικά περιεχόμενα) απαιτούν φάσμα υψηλού εύρους ζώνης που ενδεχομένως να μην υπόκειται σε υποστήριξη από το φάσμα χιλιοστομετρικού κύματος. Αυτό θα επιφέρει μια πραγματικά δύσκολη – ως προς τη διαχείριση – πρόκληση αναφορικά με την αποτελεσματικότητα μιας περιοχής στη οποία ένας μεγάλος αριθμός συσκευών μπορεί να μην είναι σε θέση για να επιτυγχάνουν σύνδεση στο τρέχον δίκτυο, με ενδεδειγμένο τρόπο. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέας τεχνολογίας στο 6G (όπως στις ζώνες THz και sub-THz) η οποία θα μπορεί να «γεφυρώσει» απαιτήσεις για εφαρμογές που είναι βασισμένες σε δίκτυο υψηλής φασματικής απόδοσης [22].

Η μέγιστη φασματική απόδοση αποτελεί έναν σημαντικό KPI για τη μέτρηση της προόδου των τεχνολογιών ραδιομετάδοσης. Για μέγιστες φασματικές αποδόσεις, η ελάχιστη απαίτηση στο 5G είναι της τάξης των 15 bps/Hz στην ανερχόμενη σύνδεση και 15 bps/Hz στην κατερχόμενη ζεύξη. Αναμένεται, σύμφωνα με τα εμπειρικά δεδομένα, οι προηγμένες ραδιοτεχνολογίες 6G να επιτύχουν τρεις φορές υψηλότερη φασματική απόδοση από αυτή του υφιστάμενου συστήματος 5G [13].

⁵⁸ Στην πολυαισθητηριακή επικοινωνία χρησιμοποιείται φως και ήχος, κίνηση, οπτικά, οσφρητικά και ακουστικά ερεθίσματα, με σκοπό να προσφέρεται ένα ευρύ φάσμα αισθητηριακών εμπειριών. Βλέπε π.χ.: <https://www.eastsilc.org/page/multisensory-strategies-6670>.

4.1.4 Κινητικότητα

Κινητικότητα (mobility) σημαίνει την υψηλότερη ταχύτητα κίνησης ενός κινητού σταθμού που υποστηρίζεται από ένα δίκτυο, με διάθεση αποδεκτής ποιότητας εμπειρίας (Quality of Experience - QoE). Στο 5G, για την υποστήριξη του σεναρίου ανάπτυξης τρένων υψηλής ταχύτητας, η υψηλότερη κινητικότητα που τυγχάνει υποστήριξης είναι στα 500 Km/h [13]. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχουν πολλοί τύποι κινητικότητας οι οποίοι εισάγονται από τους δορυφόρους, τα UAVs και τα τρένα εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, που μπορούν να κινούνται με πολύ υψηλή ταχύτητα, σαφώς μεγαλύτερη από το όριο των 500 km/h, σε σύγκριση με τους υπάρχοντες επίγειους τερματικούς σταθμούς [29]. Ειδικότερα, το 6G στοχεύει στη μέγιστη ταχύτητα των 1000 Km/h, εάν επιπλέον ληφθούν υπόψη και τα εμπορικά αεροπορικά συστήματα [13].

Στα δίκτυα μεγάλων διαστάσεων, οι Επικοινωνίες Μεγάλων Αποστάσεων και Υψηλής Κινητικότητας (Long Distance and High Mobility Communications - LDHMC) [67] συνιστούν βασικές απαιτήσεις για το 6G. Στο 5G, οι υπηρεσίες LDHMC είναι αδιάψευστες καθώς μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι και ταχύτητες 500 km/h. Επιπλέον, τρέχουσες έρευνες έχουν δείξει πως η κινητικότητα ενός δικτυακού κόμβου θέτει σημαντικές προκλήσεις σε διαφορετικά περιβάλλοντα (π.χ. σε βαθιά υδάτινα περιβάλλοντα). Επομένως, στο 6G θα πρέπει να τίθενται απαιτήσεις αρραγών (seamless) υπηρεσιών για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων και υψηλής κινητικότητας (π.χ. για τιμές μεγαλύτερες από 1.000 km/h) για μελλοντικές εφαρμογές ([22], [72]).



Τρένο υψηλής ταχύτητας
(απαιτείται > 600 χλμ/ώρα)



Τουρισμός βαθιών υδάτων
(απαιτείται υποβρύχια
επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας
και υψηλής κινητικότητας)



Ξενάγηση στο διάστημα
(απαιτείται επικοινωνία μεγάλης
απόστασης και υψηλής κινητικότητας)

Εικόνα 11: Παραδείγματα εφαρμογών (όπως διαστημικός τουρισμός, υποβρύχιος τουρισμός, τρένα υψηλής ταχύτητας) για LDHMC [22]

4.1.5 Λανθάνουσα Καθυστέρηση (latency)

Η πέμπτη γενιά δεν σχεδιάστηκε με εγγυημένο συγχρονισμό χρόνου, αλλά είναι ικανή για χαμηλή καθυστέρηση τάξης ενός χιλιοστού του δευτερολέπτου. Έτσι, υπάρχει μια χρονική διαφορά μεταξύ διαφορετικών ροών ή διαφορετικών συνεδριών που δημιουργούνται από διαφορετικά αντικείμενα τα οποία χρειάζονται αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Στο 6G, αναμένεται ότι πολλά αντικείμενα θα ενσωματωθούν και θα υπόκεινται σε μεταξύ τους διαδράσεις είτε σε φυσικά είτε σε εικονικά περιβάλλοντα. Επομένως, οι χρονικές διαφορές

μεταξύ όλων των επικοινωνιακών συνδέσμων και/ή αντικειμένων θα πρέπει να βρίσκονται εντός ενός καθορισμένου ορίου για την παροχή φυσικής αντίδρασης και για την αναμενόμενη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Από την άλλη πλευρά, το «τρέμουλο χρόνου» (“time jitter”) είναι εξίσου σημαντικό για τις μελλοντικές επικοινωνίες που θα υπερβαίνουν τη διάσταση των σημερινών δυνατοτήτων κατά το 5G. Καθώς η αλληλεπίδραση των αντικειμένων είναι απαραίτητη στο 6G, η ανάγκη για γεωγραφικό εντοπισμό υψηλής ανάλυσης και υψηλής ευκρίνειας θα παίζει πλέον «ζωτικό» ρόλο στην όποια επικείμενη μελλοντική υλοποίηση [45].

Εάν συγκρίνουμε ένα σύστημα φυσικής σύντηξης (fusion system) στον κυβερνοχώρο με ένα ανθρώπινο σώμα, τότε η ασύρματη επικοινωνία θα ήταν το νευρικό σύστημα που μεταδίδει πληροφορίες. Μια θεμελιώδης απαίτηση θα είναι η χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End to End - E2E), προκειμένου να πραγματοποιηθεί, σε πραγματικό χρόνο, μια πιο προηγμένη διαδραστική υπηρεσία που θα βασίζεται σε μηχανισμούς AI. Προς την έλευση της εποχής του 6G αναμένεται περαιτέρω ανάπτυξη της επικοινωνίας μεταξύ των πραγμάτων (όπως σχετικά με AI) και των συσκευών. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρήσης θα απαιτηθεί «εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση» – περίπου 1ms ή και λιγότερο – βασισμένη σε E2E. Εάν επιτευχθεί μια τόσο χαμηλή καθυστέρηση, τότε μπορεί π.χ. να είναι εφικτή η πραγματοποίηση διαδραστικής εξυπηρέτησης πελατών σε μη επανδρωμένα καταστήματα, στα οποία μια μορφή ρομποτικής, ελεγχόμενης εξ’ αποστάσεως από την τεχνητή νοημοσύνη, θα δύναται να εξυπηρετεί τους πελάτες σε επίπεδο ικανό ώστε να ανταγωνίζεται ή/και ενδεχομένως να υπερτερεί αυτού των ανθρώπινων ομολόγων [9].

Η λανθάνουσα καθυστέρηση μπορεί να διαφοροποιηθεί σε λανθάνουσα καθυστέρηση επιπέδου χρήστη και σε λανθάνουσα καθυστέρηση επιπέδου ελέγχου. Η πρώτη εξ αυτών αναφέρεται στη χρονική καθυστέρηση που προκαλείται σε ένα ραδιοδίκτυο κατά την αποστολή ενός πακέτου στην πηγή έως και την λήψη του στον προορισμό, υποθέτοντας ότι ένας κινητός σταθμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση. Στο 5G η ελάχιστη απαίτηση για καθυστέρηση επιπέδου χρήστη είναι 1 ms για εφαρμογές URLLC και 4 ms για εφαρμογές eMBB. Η τιμή αυτή προβλέπεται να μειωθεί περισσότερο, έως τα 100 μs ή ακόμα και μέχρι τα 10 μs. Η λανθάνουσα καθυστέρηση σε επίπεδο ελέγχου είναι ο χρόνος μετάβασης από μια κατάσταση της πλέον «αποδοτικής μπαταρίας⁵⁹» (π.χ. άεργη κατάσταση) στην έναρξη συνεχούς μεταφοράς δεδομένων (π.χ. σε ενεργή κατάσταση). Η ελάχιστη λανθάνουσα καθυστέρηση για το επίπεδο ελέγχου θα πρέπει να είναι 10 ms στο 5G, ενώ αναμένεται επίσης σημαντική βελτίωση στο 6G [13].

4.1.6 Πυκνότητα Σύνδεσης

Η πυκνότητα σύνδεσης (connection density) είναι ο KPI που εφαρμόζεται για αξιολόγηση στο σενάριο χρήσης mMTC. Λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμένο αριθμό ραδιοπόρων, ο ελάχιστος αριθμός συσκευών με μια μορφή «χαλαρής» ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS) είναι της τάξης των 10^6 συσκευών/km² στο 5G [13]. Στην εποχή του 6G αναμένεται να υπάρχουν πολύ περισσότερες διαθέσιμες φορητές συσκευές χρηστών αλλά και ένας εκπληκτικός αριθμός συσκευών IoT, οι οποίες όχι μόνο θα συλλέγουν εικόνες αλλά και θα ανιχνεύουν πληροφορίες στον πραγματικό κόσμο. Σε μια τέτοια περίπτωση

⁵⁹ Η απόδοση της μπαταρίας (battery efficiency) είναι η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να ληφθεί από μια μπαταρία σε σχέση με την ποσότητα ενέργειας που έχει τοποθετηθεί σε αυτή.

Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων:

<https://www.fluxpower.com/blog/top-5-factors-that-affect-industrial-battery-efficiency>.

ενδεχομένως να υπάρχει απαίτηση για εξαιρετικά μαζική συνδεσιμότητα [9]. Έτσι, προβλέπεται ότι η πυκνότητα σύνδεσης θα μπορεί να υποστηρίξει μέχρι 10^7 συσκευές ανά περιοχή (σε km^2), δηλαδή τιμή 10 φορές υψηλότερη σε σχέση με αυτή του 5G ([65], [45]). Αυτό πρακτικά ισοδυναμεί με ένα δυναμικό σενάριο 10 εκατομμυρίων συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο [9].

4.1.7 Ενεργειακή Απόδοση

Το εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας δίκτυο κινητής τηλεφωνίας έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης. Πέρα από την παραγωγή τεράστιων εκπομπών άνθρακα, καταλαμβάνει και σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους. Στο μέλλον, τα δίκτυα 6G θα έχουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης, εξαιρετικά υψηλή απόδοση και εξαιρετικά μεγάλο αριθμό «πανταχού παρόντων ασύρματων κόμβων», με αποτέλεσμα να προκύψουν σημαντικές – και ίσως μη δυνάμενες να προβλεφθούν επακριβώς – προκλήσεις σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας. Σημαντικό προβάλλει το πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης, με επιδίωξη να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης ενέργειας όσο γίνεται περισσότερο ανά δυφίο (J/bit) [1].

Επίσης οι πανταχού παρόντες και «πυκνοί» – ως προς τη διασπορά τους – αισθητήρες του ασύρματου δικτύου επαίσθησης που θα καταλαμβάνουν ζωτικό χώρο στο περιβάλλον των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, επιφέρουν δύο σημαντικά προβλήματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας. Κατά πρώτο λόγο, ο τεράστιος αριθμός αισθητήρων θα έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Κατά δεύτερο λόγο, ο τρόπος που θα διατίθεται ενέργεια με αποτελεσματικό και εύκολο τρόπο για την πανταχού παρούσα ανάπτυξη, συνιστά μια συμπληρωματική πρόκληση. Άλλες προκλήσεις συναφείς με θέματα ενεργειακής κατανάλωσης οι οποίες θα χρειαστεί να τύχουν αντιμετώπισης στην εποχή του 6G, αφορούν π.χ. στην εξαιρετικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος επεξεργασίας κεραιών και στην πολύ μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για την επεξεργασία δεδομένων για τους σκοπούς της «ευφυούς συνδεσιμότητας» [1].

Η ενεργειακή απόδοση έχει ιδιαίτερη σημασία για την υλοποίηση αποδοτικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας και για τη μείωση των συνολικών εκπομπών άνθρακα για την επίτευξη «πράσινων» και με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα Τεχνολογιών Πληροφοριών και Επικοινωνιών⁶⁰ (Information and Communications Technologies - ICTs). Σε συνέχεια της ανάπτυξης των δικτύων 5G, τίθενται ήδη ορισμένοι προβληματισμοί για τη σχετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας, παρόλο που η ενεργειακή απόδοση ανά δυφίο έχει ήδη σημειώσει σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές κινητών επικοινωνιών. Στα δίκτυα 6G η ενεργειακή απόδοση θα είναι 10-100 φορές καλύτερη από αυτή του 5G προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση ανά δυφίο, ταυτόχρονα με τη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του ευρύτερου τομέα δραστηριοτήτων κινητής τηλεφωνίας [13].

Στο δίκτυο 5G διατίθενται ορισμένες τεχνολογικές λύσεις για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας χαμηλής ισχύος με τα δίκτυα επικοινωνίας 5G. Για παράδειγμα, τέτοιες λύσεις μπορούν να είναι η επικοινωνία οπισθοσκέδασης (backscatter), η υβριδική αναλογική/ψηφιακή προκωδικοποίηση, κ.α. Σε κάθε περίπτωση, αυτές οι προσεγγίσεις ενδεχομένως να μην είναι συνολικά σε θέση ώστε να έχουν τον έλεγχο των περιβαλλοντικών ζητημάτων, όπως είναι η φύση της ασύρματη επικοινωνίας, και ενδέχεται να οδηγούν σε μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση [68]. Συνεπώς, η επικοινωνία 6G θα

⁶⁰ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.:

https://en.wikipedia.org/wiki/Information_and_communications_technology

πρέπει να εστιάζει στη διατήρηση της μετάδοσης υψηλής ταχύτητας, μειώνοντας παράλληλα και την ενεργειακή κατανάλωση [22].

Μια μείζων απαίτηση ώστε να επιτευχθεί ο παγκόσμιος στόχος για βιώσιμη κοινωνία και ανάπτυξη, είναι η «εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η μείωση κόστους» των τερματικών συσκευών και των δικτύων. Η συγκεκριμένη απαίτηση είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο από περιβαλλοντική σκοπιά, όσο και από επιχειρηματική άποψη (όπως άλλωστε συμβαίνει και με τις προηγούμενες γενιές κινητής επικοινωνίας, του 5G περιλαμβανομένου). Στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας επιδιώκεται να επιτευχθεί δραστική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, μέσω της μείωσης των CAPEX⁶¹ (Capital Expenditures - Κεφαλαιουχικές δαπάνες) / OPEX⁶² (Operating Expenses - Λειτουργικά Έξοδα) ανά μονάδα ταχύτητας επικοινωνίας (bit), αλλά και χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό προηγμένων τεχνολογιών για μη κινητές και κινητές επικοινωνίες. Ενόψει της επικείμενης έλευσης του 6G, ενδέχεται οι συσκευές να μην χρειάζονται πλέον μπαταρίες ιδίως λόγω της επερχόμενης ανάπτυξης νέων τεχνολογιών παροχής ενέργειας, π.χ. μέσω ασύρματων σημάτων [9].

4.1.8 Χωρητικότητα Κίνησης Περιοχής

Η χωρητικότητα κίνησης περιοχής (area traffic capacity) είναι μια μέτρηση της συνολικής κίνησης στην κινητή τηλεφωνία, την οποία δύναται ένα δίκτυο να φιλοξενήσει ανά μονάδα επιφάνειας, σε σχέση με το διαθέσιμο εύρος ζώνης, τη φασματική απόδοση και την πυκνότητα του δικτύου [13]. Το 5G προβλέπεται να επιτρέψει χωρητικότητα κίνησης 10 Mbps/m² σε αποκλειστικές περιοχές hotspot. Ωστόσο, εφαρμογές όπως είναι τα πολυμέσα 3D-4D θα απαιτούσαν υψηλότερη χωρητικότητα κίνησης, την οποία οι τρέχουσες επικοινωνίες 5G ενδεχομένως να μην είναι σε θέση να υποστηρίξουν. Έτσι το 6G θα επιδιώξει την παροχή δεκαπλάσιας χωρητικότητας κίνησης περιοχής συγκριτικά με το 5G, φτάνοντας μέχρι και σε 1 Gb/s/m² για εφαρμογές του πραγματικού κόσμου [22].

Εκτός από τις παραπάνω οκτώ βασικές τεχνικές απαιτήσεις, υπάρχουν και άλλοι δείκτες KPIs που ενδεχομένως να απαιτηθούν ώστε να αξιολογηθούν σωστά οι απαιτήσεις του 6G [13]. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από αυτούς τους KPIs.

4.1.9 Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία (reliability) αφορά στην ικανότητα εκπομπής μιας δεδομένης ποσότητας κίνησης, σε μια προκαθορισμένη χρονική διάρκεια και με υψηλή πιθανότητα επιτυχίας [13]. Το 5G υποστηρίζεται από το uRLLC και η αξιοπιστία του είναι 99,999% [69]. Συγκεκριμένα, η ελάχιστη απαίτηση για αξιοπιστία στα δίκτυα 5G μετράται με 1-10⁻⁵ πιθανότητα επιτυχίας, κατά τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων των 32 δυφιοσυλλαβών (bytes) εντός 1 ms, έχοντας ως δεδομένο την ποιότητα καναλιού κάλυψης στα άκρα του δικτύου για ένα σενάριο ανάπτυξης αστικού μακρο-περιβάλλοντος [13]. Μολαταύτα, μέχρι το 2030, οι

⁶¹ Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες συνιστούν σημαντικές αγορές τις οποίες πραγματοποιεί μια εταιρεία και έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιηθούν μακροπρόθεσμα. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε επίσης, *μεταξύ άλλων*: <https://www.investopedia.com/ask/answers/112814/whats-difference-between-capital-expenditures-capex-and-operational-expenditures-opex.asp>.

⁶² Τα λειτουργικά έξοδα είναι τα καθημερινά έξοδα στα οποία επιβαρύνεται μια εταιρεία για τη διατήρηση της λειτουργίας των δραστηριοτήτων της. Βλέπε επίσης, *μεταξύ άλλων*: <https://www.investopedia.com/ask/answers/112814/whats-difference-between-capital-expenditures-capex-and-operational-expenditures-opex.asp>.

εισαγόμενες καινοτομίες θέτουν απαιτήσεις εξαιρετικά υπερ-υψηλής αξιοπιστίας όχι μόνο στην περίπτωση MTC αλλά και σε διάφορες άλλες επικοινωνίες (π.χ. WiFi, επικοινωνία συσκευής με συσκευή, επικοινωνία συσκευής σε cloud, κτλ.) [22]. Έτσι στο σύστημα 6G αναμένεται βελτίωση τουλάχιστον δύο τάξεων μεγέθους, δηλαδή $1-10^{-7}$ ή 99.9999% [13].

Η εξαιρετικά αξιόπιστη ασύρματη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου συνιστά μια σημαντική απαίτηση και προς τούτο το 6G αναμένεται να επιτύχει υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας σε σχέση με το 5G. Επίσης, με την επέκταση της ασύρματης κάλυψης σε ουρανό και θάλασσα και με την εξάπλωση των drones και των ρομπότ, ενδέχεται να απαιτείται επικοινωνία υψηλής αξιοπιστίας σε ευρύτερης έκτασης περιοχές και όχι μόνο σε σχετικά «εντοπισμένους» ή/και ενίοτε περιορισμένους τομείς (π.χ. σε εργοστάσια βιομηχανικής παραγωγής). Έτσι αναμένεται η πραγματοποίηση μιας μορφής εξαιρετικά αξιόπιστης επικοινωνίας, σε διάφορες καταστάσεις. Υπό τη θεώρηση των αυξανόμενων απειλών ασφάλειας (όπως π.χ. προηγμένες κυβερνο-επιθέσεις και διαρροή προσωπικών δεδομένων), επιδιώκεται η διάθεση υπηρεσιών ασφαλούς επικοινωνίας και ενισχυμένης ασφάλειας, για τα δίκτυα που θα εξυπηρετούν διάφορες βιομηχανίες, γραφεία διοίκησης και τερματικά [9].

4.1.10 Εύρος Ζώνης Σήματος

Το εύρος ζώνης σήματος (signal bandwidth) είναι το μέγιστο συναθροισμένο εύρος ζώνης του συστήματος. Το εύρος ζώνης μπορεί να υποστηρίζεται από πολλαπλές ή μεμονωμένες φέρουσες RF. Στο 5G η απαίτηση για εύρος ζώνης είναι τουλάχιστον 100 MHz. Το 6G αναμένεται να υποστηρίζει μέχρι και 1 GHz για λειτουργία σε ζώνες υψηλότερης συχνότητας ή και ακόμα παραπάνω, σε επικοινωνίες τύπου OWC ή THz [13].

4.1.11 Ακρίβεια Προσδιορισμού Θέσης

Η ακρίβεια προσδιορισμού θέσης (positioning accuracy) στην υπηρεσία εντοπισμού θέσης στο 5G είναι καλύτερη από τα 10 m. Η υψηλότερη, κατά το δυνατό, ακρίβεια προσδιορισμού θέσης έχει σήμερα μεγάλη ζήτηση σε πολλές βιομηχανικές και κάθετες εφαρμογές, κυρίως σε εσωτερικούς χώρους όπου δεν υπάρχει δυνατότητα κάλυψης από δορυφορικά συστήματα εντοπισμού θέσης [13]. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του 6G θα είναι ο εντοπισμός και η επαίσθηση (sensing), χρησιμοποιώντας το υποκείμενο δίκτυο επικοινωνίας [8]. Με την εφαρμογή ραδιοσταθμού σε ζώνη THz, που έχει δυνατότητες στον εντοπισμό θέσης με υψηλή ακρίβεια, αναμένεται από τα δίκτυα 6G η υποστήριξη ακρίβειας της τάξης του επιπέδου των εκατοστών (cm) [13]. Σε ό,τι αφορά στην περίπτωση της επαίσθησης, αναμένεται η πραγματοποίηση δυνατοτήτων αναγνώρισης ενεργειών και αντικειμένων, όπως και της ανίχνευσης αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια, επιτυγχάνοντας «συγχώνευση» των τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας και τεχνητής νοημοσύνης [9]. Η ακριβής επαίσθηση αντικειμένων μπορεί να μετρηθεί βάσει των πιθανοτήτων χαμένης ανίχνευσης (Missed Detection - MD), του ψευδούς συναγερμού⁶³ (False Alarm - FA) και των σφαλμάτων εκτίμησης παραμέτρων (parameter estimation errors) [8].

⁶³ Ένας ψευδής συναγερμός ή συναγερμός ενόχλησης, είναι η παραπλανητική ή λανθασμένη αναφορά μιας έκτακτης ανάγκης, προκαλώντας περιττό πανικό ή/και διαθέτοντας πόρους (όπως π.χ. υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης) σε ένα μέρος όπου ουσιαστικά δεν χρειάζονται. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/False_alarm.

4.1.12 Κάλυψη

Η κάλυψη (coverage) στον ορισμό απαίτησης του 5G εστιάζεται πρωτίστως στην ποιότητα του λαμβανόμενου ραδιοσήματος, σε έναν μόνο σταθμό βάσης. Η απώλεια σύζευξης⁶⁴ (coupling loss) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της περιοχής που εξυπηρετείται από έναν σταθμό βάσης. Στα δίκτυα 6G η έννοια της κάλυψης επιδιώκεται να επεκταθεί, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η κάλυψη θα είναι «πανταχού παρούσα παγκοσμίως» και θα μετατοπιστεί από 2D (στα επίγεια δίκτυα) σε 3D (σε ένα ολοκληρωμένο επίγειο - δορυφορικό - εναέριο σύστημα) [13].

Τα μελλοντικά δίκτυα προβλέπεται να παρέχουν υπηρεσίες στη γη, στις υδάτινες εκτάσεις, στον αέρα και στο διάστημα, με ασφαλείς και ισχυρές συνδέσεις δικτύου. Τα δίκτυα 6G προβλέπεται να ανταποκριθούν και να αντιμετωπίσουν τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας [63].

Επίσης για την επίτευξη 100% κάλυψης παγκοσμίως, στην εποχή του 6G είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός δικτύου ενοποίησης (integration network) διαστήματος - γης. Για την ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου, οι σταθμοί βάσης θα πρέπει να τοποθετηθούν στην πλατφόρμα της ανώτερης στρατόσφαιρας και στους δορυφόρους LEOs, οι οποίοι θα μπορούν να παρέχουν πλήρως δικτυακά σήματα σε ορισμένες απομακρυσμένες περιοχές [64].

Η ενιαία περιοχή κάλυψης δορυφόρου ορίζεται ως μια περιοχή της γης όπου φαίνεται ο δορυφόρος υπό μια ελάχιστη προκαθορισμένη γωνία ανύψωσης. Για παγκόσμια κάλυψη ή για πολυ-δορυφορική κάλυψη απαιτείται η εφαρμογή μιας πολιτικής διαχείρισης για τον συντονισμό των εμπλεκόμενων δορυφόρων. Επίσης, για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης σε ποικίλο πληθυσμό χρηστών, έχει προταθεί και υλοποιηθεί ένας αριθμός δορυφορικών δικτύων LEOs, ικανών ώστε να υποστηρίζουν τόσο τις περιοχές με επίγεια ενσύρματα δίκτυα όσο και με ασύρματα δίκτυα. Για την πλήρη κάλυψη της επιφάνειας της γης είναι απαραίτητη κάποια επικάλυψη μεταξύ των παρακείμενων δορυφόρων, ώστε να διατηρείται η συνέχεια των υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο. Η παγκόσμια κάλυψη μπορεί να θεωρηθεί ως μια μορφή διαλειτουργικής συμπληρωματικής διαδικασίας δικτύωσης πολλαπλών δορυφόρων, οργανωμένων σε αστερισμούς, με καθέναν από αυτούς να συνεισφέρει με την ατομική του κάλυψη [73].

Εν κατακλείδι, με την πρόοδο της τεχνολογίας και της επιστήμης, ο χώρος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων θα επεκταθεί περαιτέρω και οι ενεργές περιοχές επικοινωνίας θα επεκταθούν σε μεγάλο υψόμετρο, στους ωκεανούς και στο διάστημα. Οι κόμβοι επικοινωνίας – κυρίως οι κόμβοι IoT – θα κατανεμηθούν σε μια περιοχή αρκετά ευρύτερη από εκείνη που καταλαμβάνουν οι χρήστες, παρά το γεγονός ότι το δίκτυο επικοινωνίας είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις ανθρώπινες κοινωνικές δραστηριότητες. Μελλοντικά λοιπόν επιδιώκεται η οικοδόμηση ενός δικτύου με τα εξής χαρακτηριστικά: (α) Πανταχού παρουσία, καλύπτοντας το διάστημα, το έδαφος, τον αέρα και τη θάλασσα). (β) Παντογνωσία (με τη βοήθεια διαφόρων αισθητήρων). (γ) Εισαγωγή της διάστασης «Όλα σε ένα» (δηλαδή θεώρηση του Διαδικτύου των Πάντων). (δ) Δυνατότητα αξιοποίησης «για όλες τις χρήσεις» (με βάση την DL και τα μεγάλα δεδομένα). Ο σκοπός ενός τέτοιου δικτύου

⁶⁴ Η απώλεια σύζευξης ορίζεται ως η συνολική μακροπρόθεσμη απώλεια καναλιού μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός τερματικού σταθμού και περιλαμβάνει κέρδη κεραίας, σκίαση και απώλεια διαδρομής [13].

είναι το να υπάρξει ουσιαστική συνειδητοποίηση των πραγματικών αναγκών σύνδεσης αλλά και διάδρασης, οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή.

Εν κατακλείδι, ο επικοινωνιακός στόχος του μελλοντικού δικτύου επικοινωνίας θα είναι ο εξής: «Οποιοσδήποτε μπορεί να επικοινωνήσει με Οποιονδήποτε ή να αλληλεπιδράσει με οποιοδήποτε σχετικό αντικείμενο, ανά πάσα στιγμή» [1].

4.1.13 Εγκαιρότητα

Στα μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας η εγκαιρότητα (timeliness) είναι μια αναδυόμενη απαίτηση επιδόσεων στον τομέα του χρόνου. Τυπικές μετρήσεις της εγκαιρότητας περιλαμβάνουν την ηλικία των πληροφοριών⁶⁵ (Age of Information - AoI) και τις πρόσφατες προτεινόμενες παραλλαγές της, όπως την ηλικία συγχρονισμού⁶⁶ (Age of Synchronization - AoS) και την ηλικία δράσης⁶⁷ (Age of Task - AoT). Η έννοια της εγκαιρότητας εστιάζει στη «φρεσκάδα» των πιο πρόσφατων δεδομένων και υπηρεσιών που παραδίδονται επιτυχώς στον τελικό χρήστη, σε αντίθεση με την κλασική μέτρηση λανθάνοντος χρόνου χωρίς μνήμη η οποία αποδίδει έμφαση στη συνολική καθυστέρηση που παρουσιάζουν οι συνεδρίες υπηρεσιών ή όλα τα πακέτα δεδομένων καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας παράδοσής τους. Έτσι στο σύστημα υπάρχει μια ενδογενής διάκριση χρόνου γέννησης σε σχέση με παρωχημένες υπηρεσίες/δεδομένα, όπως και μια μνήμη σχετικά με την/τις ιστορική(-ές) του κατάσταση(-εις). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση τόσο του αντίκτυπου όσο και της πολυπλοκότητας του χρονοπρογραμματισμού εργασιών για τη βελτιστοποίηση του συστήματος [13].

4.1.14 Ασφάλεια Δικτύου

Η ασφάλεια (security) και το απόρρητο (privacy) είναι χαρακτηριστικά εντελώς απαραίτητα για δράσεις που αφορούν σε αξιολόγηση αναφορικά με το κατά πόσο είναι κατ-ουσία και επαρκώς ασφαλής η λειτουργία ενός δικτύου για την προστασία των δεδομένων, της υποδομής, των περιουσιακών στοιχείων και των συσκευών. Τα κύρια καθήκοντα ασφάλειας για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι:

- (α) Ακεραιότητα (integrity): Εγγυάται ότι οι πληροφορίες δεν τροποποιούνται με παράνομο τρόπο.

⁶⁵ Το AoI περιγράφει την εγκαιρότητα της γνώσης μιας οντότητας ή μιας διαδικασίας από μια οθόνη. Συγκεκριμένα, το AoI είναι μια μέτρηση από άκρο σε άκρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό της λανθάνουσας καθυστέρησης σε συστήματα και εφαρμογές ενημέρωσης κατάστασης. Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: R.D. Yates, Y. Sun, D.R. Brown III, S.K. Kaul, E. Modiano and S. Ulukus (2021): **Age of Information: An Introduction and Survey**, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.39, pp.1183-1210. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2007.08564.pdf>.

⁶⁶ Το AoS μετρά τον χρόνο που έχει παρέλθει αφού οι πιο πρόσφατες πληροφορίες στον δέκτη αποσυγχρονίζονται και υιοθετείται για τη μέτρηση της «φρεσκάδας» των δεδομένων, από την οπτική γωνία των χρηστών του δικτύου. Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: H. Tang, J. Wang, Z. Tang, J. Song (2020, March): **Scheduling to Minimize Age of Synchronization in Wireless Broadcast Networks with Random Updates**. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1907.07380.pdf>.

⁶⁷ Η μέτρηση απόδοσης AoT προτείνεται για αξιολόγηση της χρονικής αξίας των εργασιών υπολογισμού. Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: X. Song, X. Qin, Y. Tao, B. Liu, P. Zhang (2019, May): **Age Based Task Scheduling and Computation Offloading in Mobile-Edge Computing Systems**. In: *Proceedings of the 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshop (WCNCW)*, pp.1-6, doi: 10.1109/WCNCW.2019.8902529

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

- (β) Εμπιστευτικότητα (confidentiality): Εμποδίζει την έκθεση ευαίσθητων πληροφοριών σε μη εξουσιοδοτημένες οντότητες.
- (γ) Επαλήθευση ταυτότητας (authentication): Διασφαλίζει το ότι τα μέρη επικοινωνίας είναι αυτά που ισχυρίζονται πως είναι.

Ορισμένοι KPIs μπορούν να εφαρμοστούν για ποσοτική μέτρηση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας, όπως είναι π.χ. το ποσοστό των απειλών ασφάλειας που προσδιορίζονται από αλγόριθμους αναγνώρισης απειλών, μέσω των οποίων μπορεί να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης ανωμαλιών [13].

Η χωρητικότητα των τεχνικών ασφάλειας για το 5G δεν θα ήταν επαρκής για το 6G, καθώς το 6G θα έχει εκτενή χρήση για τη σύνδεση πολλών κινητών συσκευών, έξυπνων συσκευών σε εφαρμογές αυτοματισμού, συσκευών XR και AI, έξυπνων πόλεων ακόμα και δορυφόρων.

Για τη δημιουργία αξιόπιστης ασφάλειας δικτύου για το 6G είναι απαραίτητες καινοτόμες κρυπτογραφικές τεχνικές, ενοποιημένες τεχνικές δικτυακής ασφάλειας και τεχνικές ασφάλειας του φυσικού στρώματος, ιδίως με χαμηλότερη πολυπλοκότητα και κόστος [45].

Επίσης, τα συστήματα 5G εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις ασφάλειας ως προς τη διαφάνεια, τη διαλειτουργικότητα δεδομένων, την αποκέντρωση και τις ευπάθειες απορρήτου του δικτύου. Στο 6G, δεν επαρκούν η τρέχουσα διαδικασία απορρήτου ασφάλειας και οι μέθοδοι ρύθμισης για τη διατήρηση της φυσικής ασφάλειας του δικτύου. Οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι κρυπτογράφησης που βασίζονται στα κρυπτο-συστήματα δημόσιου κλειδιού RSA⁶⁸ (Rivest-Shamir-Adleman) παρέχουν ασφάλεια και μυστικότητα μετάδοσης στα δίκτυα 5G. Ωστόσο, αυτά τα κρυπτο-συστήματα RSA δεν είναι πλέον ασφαλή λόγω της πίεσης των τεχνολογιών Big Data και AI. Έτσι, για μελλοντική επικοινωνία τύπου 6G, πρέπει να αναπτυχθεί μια νέα τεχνική απορρήτου στο φυσικό στρώμα, βασισμένη σε Big Data και σε AI. Ο σχεδιασμός ασφάλειας φυσικού στρώματος και οι ασφαλείς αλληλεπιδράσεις με τα ανώτερα στρώματα είναι υποχρεωτικά στο 6G [19].

4.1.15 Κεφαλαιουχικές και Λειτουργικές Δαπάνες

Οι κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τη μέτρηση της προσιτότητας των υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, με αποτέλεσμα η εμπορική επιτυχία ενός κινητού συστήματος να επηρεάζεται σε ουσιαστικό βαθμό. Οι δαπάνες μιας εταιρείας κινητής τηλεφωνίας μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: Σε κεφαλαιουχικές δαπάνες (Capital Expenditure - CAPEX), που αφορούν στο κόστος που δαπανάται για την κατασκευή επικοινωνιακής υποδομής εν γένει, και σε λειτουργικές δαπάνες (Operational Expenditure - OPEX) που αφορούν σε δράσεις λειτουργίας και συντήρησης.

Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας υφίστανται πίεση υψηλού CAPEX, εξαιτίας της πυκνότητας του δικτύου. Η αντιμετώπιση προβλημάτων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (π.χ. αστοχίες συστημάτων, επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, υποβαθμίσεις απόδοσης, κτλ.) δεν μπορεί ακόμα να αποφύγει τις μη αυτόματες λειτουργίες για το σύνολο των περιπτώσεων. Έτσι, ένας πάροχος κινητής τηλεφωνίας πρέπει να διατηρεί μια επιχειρησιακή ομάδα με πολλούς διαχειριστές δικτύου υψηλής εμπειρογνωμοσύνης και τεχνογνωσίας, γεγονός που οδηγεί σε ένα δαπανηρό OPEX το οποίο προς το παρόν είναι περίπου τριπλάσιο από αυτό του

⁶⁸ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε π.χ.: [https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_\(cryptosystem\)](https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_(cryptosystem))

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

CAPEX και συνεχώς αυξάνεται. Συνεπώς, θα πρέπει εκλαμβάνεται υπόψη και το σύνολο των δαπανών, ως ένας βασικός παράγοντας κατά τον σχεδιασμό του 6G [13].

Στον παρακάτω Πίνακα 4 συνοψίζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ 5G και 6G. Αναδεικνύονται οι δραστικές μεταβολές που θα επιφέρει το 6G στις κινητές επικοινωνίες. Επίσης, μέσω του πίνακα εξάγεται το συμπέρασμα αναφορικά με τις επικείμενες βελτιώσεις που θα επιφέρει το 6G, αναφορικά με το ρυθμό δεδομένων, το φάσμα, την καθυστέρηση και την πυκνότητα συνδεσιμότητας μέχρι και 10-100 φορές σε σχέση με το 5G [45].

Χαρακτηριστικά	5G	6G
Συχνότητα λειτουργίας	3 GHz – 300 GHz	Έως 1 THz
Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	20 Gbps	1 Tbps
Καθυστέρηση	1 ms	10–100 μs
Κινητικότητα	500 Km/h	>1000 Km/h
Διαθέσιμο φάσμα	30 GHz	10-100 φορές υψηλότερο από το 5G
Φασματική απόδοση	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Ενεργειακή απόδοση	Υψηλή	Υπερυψηλή
Πυκνότητα Σύνδεσης	10 ⁶ συσκευές/χλμ ²	10 ⁷ συσκευές/χλμ ²
Κάλυψη	99,99%	99.9999%
Ακρίβεια εντοπισμού θέσης	Ακρίβεια μέτρου	Ακρίβεια εκατοστόμετρου
Δορυφορική ενσωμάτωση	Μερική	Πλήρης
Ενσωμάτωση αυτοματισμού	Μερική	Πλήρης
Δικτυακή ενημερότητα	Μερική αντιληπτικότητα	Πανταχού παρούσα ευφυΐα
Αξιοπιστία	1 – 10 ⁻⁵	1 – 10 ⁻⁹
Επίπεδο εξυπηρέτησης	VR/AR/3D	Απτικό
XR	Μερική	Πλήρης
Απτική επικοινωνία	Μερική	Πλήρης
Στοιχεία έξυπνης πόλης	Σε διάσταση	Ολοκληρωμένο
IRS	-	Ναι
Πρότυπα	5G/NR ⁶⁹	-
Κεντρικό δίκτυο	IoT	IoE

⁶⁹ Η 5G NR (Νέα Ραδιοεπικοινωνία - New Radio) είναι νέα τεχνολογία ραδιοπρόσβασης που αναπτύχθηκε από τον φορέα 3GPP για το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας πέμπτης γενιάς (5G). Σχεδιάστηκε για να είναι το παγκόσμιο πρότυπο ραδιοδιεπαφής των δικτύων 5G (https://el.wikipedia.org/wiki/5G_NR).

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

HetNets	Ευέλικτο	Εξαιρετικά ευέλικτο
Σενάρια χρήσης	eMBB, URLLC και mMTC	uMUB, uHSLLC και uHDD
Κύριες τεχνολογίες	mmWave, mMIMO, UDN ⁷⁰ (Ultra-Dense Network - Εξαιρετικά Πυκνό Δίκτυο), SDN	THz, SM-MIMO ⁷¹ , Laser και VLC, Quantum, Blockchain, AI/ML
Εφαρμογές	Βίντεο VR/AR/360°, Βίντεο UHD (Ultra High Definition - Υπερυψηλής Ευκρίνειας), V2X, IoT, Έξυπνη πόλη/εργοστάσιο/σπίτι, τηλεϊατρική και φορητές συσκευές	Ολογραφικό, τακτικό/απτικό Διαδίκτυο, πλήρης αισθητηριακή και πραγματικότητα, πλήρως αυτοματοποιημένη οδήγηση, βιομηχανικό διαδίκτυο, διαστημικά ταξίδια, αξιοθέατα σε βαθιά θάλασσα και Διαδίκτυο των βιο-νανο-πραγμάτων
Ευέλικτο φάσμα	Αμφίδρομη ευελιξία	Αμφίδρομη ελευθερία

Πίνακας 4: Σύγκριση των χαρακτηριστικών επικοινωνίας 5G και 6G [45]

4.2 Προκλήσεις 6G

Οι ερευνητές και οι προγραμματιστές θα πρέπει να αναλογιστούν καταστάσεις πέρα από το 5G, καθώς η προσαρμογή της ανθρώπινης κοινωνίας στο 5G θα οδηγήσει σε νέες απαιτητικές προκλήσεις. Υπάρχει μείζων ανάγκη για ανάπτυξη πέρα από το 5G, καθώς τίθενται ισχυρές απαιτήσεις για έξυπνη διαχείριση του δικτύου, με πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Επομένως, για την ικανοποίηση των αναγκών της επόμενης εποχής και των αναδυόμενων προκλήσεων στην ανθρώπινη κοινωνία και οικονομία, απαιτείται η εισαγωγή νέου δικτύου με νέα οράματα και προοπτικές. Επιπλέον, ένας από τους βασικούς στόχους του δικτύου 6G είναι η επίτευξη παγκόσμιας διείσδυσης και κάλυψης [63]. Εντούτοις, υπάρχουν μερικά τεχνικά ζητήματα ως προς την εφαρμογή του δικτύου 6G κινητής τηλεφωνίας και τα οποία θα πρέπει να τύχουν επαρκούς αντιμετώπισης για να ικανοποιήσουν τις παγκόσμιες τεχνολογικές απαιτήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες τέτοιους είδους βασικές προκλήσεις που θέτει το 6G [45].

⁷⁰ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.:

https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech_Focus_Articles/PDFs/Ultra-Dense_networksFINAL.pdf

⁷¹ Η χωρική διαμόρφωση MIMO ((Spatial Modulation MIMO – SM-MIMO) είναι μια τεχνική που επιτρέπει τη διαμόρφωση στο χώρο, σε διαφορετικές κεραιές (ραδιοεπικοινωνία) σε έναν πομπό. Σε αντίθεση με την ασύρματη επικοινωνία MIMO (όπου όλες οι κεραιές εκπομπής είναι ενεργές και εκπέμπουν ψηφιακά διαμορφωμένα σήματα όπως π.χ. διαμόρφωση μετατόπισης φάσης με ορθογωνισμό και διαμορφωση πλάτους με ορθογωνισμό φάσης), στη χωρική διαμόρφωση μια μόνο κεραία (από το σύνολο των κεραιών εκπομπής) είναι ενεργή και εκπέμπει, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν άεργες. Βλέπε, π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Spatial_modulation.

4.2.1 Δυνατότητα Συσκευής

Το σύστημα 6G θα παρέχει πολλά νέα χαρακτηριστικά. Οι συσκευές (π.χ. τα smart-phones) θα πρέπει να έχουν την ικανότητα αντιμετώπισης-πλήρωσης των νέων δυνατοτήτων. Ιδίως, είναι δύσκολη η υποστήριξη απόδοσης 1 Tbps, XR, AI και της ενσωματωμένης επαίσθησης (sensing) με λειτουργίες επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας μεμονωμένες και συγκεκριμένες τερματικές συσκευές [19]. Η βελτίωση των τεχνικών δυνατοτήτων των κινητών συσκευών για το 6G μπορεί να κοστίζει πολύ περισσότερο, εάν οι κινητές τερματικές συσκευές που υποστηρίζουν 5G δεν είναι καταλλήλως συμβατές με ορισμένες από τις νέες δυνατότητες που διαφαίνεται ότι θα εισάγει το 6G [45]. Ο αριθμός των συσκευών για το 5G αναμένεται να είναι της τάξης των δισεκατομμυρίων. Όταν λοιπόν η υποδομή επικοινωνίας «μετατεθεί» από το 5G στο 6G, η συμβατότητα των συσκευών 5G στο νέο περιβάλλον αναφοράς 6G συνιστά κρίσιμο ζήτημα. Χωρίς αμφιβολία, μια τέτοια συμβατότητα εξοικονομεί πολλά χρήματα και διευκολύνει την πραγματική χρήση. Έτσι, το 6G θα πρέπει να δώσει προτεραιότητα στη βελτίωση της απόδοσης των υπολογιστών, στις ενσωματωμένες συσκευές επικοινωνίας υπολογιστών κ.ο.κ., έχοντας ως κύριο γνώμονα μια μορφή «εύλογης» τεχνολογικής συμβατότητας με το 5G [19].

Αναμένεται μια μεγάλη επανάσταση στη μορφή των συσκευών των τελικών χρηστών στην εποχή του 6G. Υπό αυτή την έννοια, εισάγονται μερικά χαρακτηριστικά σε μια κατηγορία συσκευών ώστε να επισημανθούν σημαντικές αναμενόμενες μεταβάσεις. Πρώτον θεωρείται ότι η συσκευή θα εξελιχθεί υπό τη θεώρηση πολλών σεναρίων ώστε να νοείται ένα δίκτυο – ή ένα υποδίκτυο – συσκευών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα θα μπορούσαν να είναι ένα δίκτυο περιοχής μηχανών ή ένα δίκτυο περιοχής ρομπότ, το οποίο συμπεριλαμβάνει τη σύνδεση πολλαπλών τμημάτων μιας μηχανής (όπως είναι π.χ. ένας ελεγκτήρας (controller) και οι αντίστοιχοι μηχανισμοί οδήγησής του). Ένα άλλο χαρακτηριστικό της συσκευής στο χρονικό πλαίσιο έλευσης του 6G είναι ότι θα υπάρχουν πολύ πιο διαισθητικές επαφές, για παράδειγμα με πρόσβαση μέσω χειρονομιών και όχι μέσω πληκτρολόγησης. Τέλος μια άλλη δυνατότητα μιας συγκεκριμένης κατηγορίας συσκευών θα είναι εκείνη που θα έχει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση και ενδεχομένως χωρίς μπαταρία, βασισμένη στο δίκτυο για την τροφοδοσία της συσκευής [8].

Οι προκλήσεις ικανότητας συσκευών για την ανάπτυξη του 6G επεκτείνονται και σε αρκετά άλλα σημαντικά σημεία, όπως [45] παρατίθενται στη συνέχεια:

- Το υλισμικό για την έρευνα και την ανάπτυξη του 6G δεν είναι ακόμα έτοιμο: Στους προγραμματιστές και στους σχεδιαστές συσκευών παρέχεται συνδρομή από την ύπαρξη σύγχρονων εργαστηρίων και εξοπλισμού, με σκοπό τη δοκιμή και την ανάπτυξη συσκευών συμβατών με την τεχνολογία 6G.
- Το βιομηχανικό πρότυπο δεν έχει ακόμα οριστικοποιηθεί: Τα πράγματα περιπλέκονται για τον κατασκευαστή της συσκευής καθώς δεν υπάρχουν ακόμα πρότυπα για συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν με 6G. Επίσης, οι αρμόδιοι οργανισμοί/φορείς όπως το 3GPP, που παρέχει τυποποίηση κινητής τεχνολογίας, δεν έχουν καθορίσει ακόμα τα πρότυπα τεχνολογίας 6G.
- Ο σχεδιασμός κυκλώματος για συσκευή 6G στα THz απαιτεί πολλές εργασίες επικύρωσης στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης⁷² (Research and Development -

⁷² Η έρευνα και ανάπτυξη (R&D-Research and Development - E&A) περιλαμβάνει δραστηριότητες στις οποίες οι εταιρείες αναλαμβάνουν να επιδείξουν δράσεις καινοτομίας για να εισαγάγουν νέες υπηρεσίες και προϊόντα. Βλέπε, π.χ.: <https://www.investopedia.com/terms/r/randd.asp>.

R&D): Στο τρέχον στάδιο πολλές ερευνητικές εργασίες επικεντρώνονται σε χαρακτηρισμούς και μοντελοποίηση στο επίπεδο THz (ειδικά στην πρώτη εργασία για το THz [70] και σε εκείνες που έχουν προταθεί από το NYU Wireless⁷³ [71]).

4.2.2 Ζώνη Terahertz

Για να αντιμετωπιστεί η ζήτηση για μελλοντικές εφαρμογές, όπως επίσης και η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και για χαμηλότερο λανθάνοντα χρόνο, κάθε γενιά κυψελοειδούς συστήματος πρέπει να «ανοίγει» την πρόσβαση σε νέες ζώνες συχνοτήτων και στη χρήση τους. Αν και με τις υψηλές συχνότητες επιτρέπονται ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων υψηλής ταχύτητας, το μειονέκτημα είναι ότι όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα τόσο μικρότερη είναι η εμβέλεια επικοινωνίας και τόσο μεγαλύτερη η εξασθένηση του σήματος. Έτσι, στο 6G είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση της απόστασης επικοινωνίας, του ρυθμού δεδομένων και των στοχευμένων περιπτώσεων χρήσης/εφαρμογών [45].

Η ζώνη THz δεν είναι μια νέα ζώνη συχνοτήτων καθώς έχει ήδη χρησιμοποιηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες (π.χ. σε δορυφορικές ραδιοεπικοινωνίες και σε ιατρικές συσκευές). Ωστόσο, η ενδεχόμενη μεταφορά του εύρους THz στην κυψελοειδή επικοινωνία είναι κάτι το νέο. Συνεπώς, για την «προσαρμογή» αυτής της ζώνης συχνοτήτων σε νέες περιπτώσεις χρήσης, θα πρέπει να εκληφθούν διαφορετικά είδη αντισταθμίσεων [45].

Η χρήση ζωνών υψηλότερων συχνοτήτων περιορίζεται από την ταχύτητα των υπερσύγχρονων τεχνολογιών και ακόμη δεν υπάρχει οικονομικός εξοπλισμός για ευρείες εμπορικές χρήσεις. Στο πλαίσιο αυτό, καθώς έχει ήδη γίνει χρήση της ζώνης THz για διαφορετικές εφαρμογές, οι τεχνολογίες τρανζίστορ έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν ενισχυτές μέχρι και 1 THz. Εντούτοις, ο συνδυασμός (combining) και η συσκευασία μαζί με το κύριο CMOS⁷⁴ (Complementary Metal-Oxide Semiconductor - Συμπληρωματικός Ημιαγωγός Μεταλλικού Οξειδίου) για την επεξεργασία ψηφιακών σημάτων, απαιτεί πολλά προηγμένα τεχνολογικά βήματα⁷⁵. Έτσι τίθενται απαιτήσεις για νέα στοιχεία όπως π.χ. δειγματοληψία, ενίσχυση ισχύος και επεξεργασία [45].

Οι υψηλές συχνότητες THz παρέχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, οι ζώνες THz θα πρέπει να αντιμετωπίσουν μια σημαντική πρόκληση ως προς τη μεταφορά των δεδομένων σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις, εξαιτίας των χαρακτηριστικών ατμοσφαιρικής απορρόφησης και της υψηλής απώλειας διάδοσης [19]. Για τη μεμονωμένη αντιμετώπιση των ατμοσφαιρικών απωλειών απαιτείται ο προσδιορισμός των πρώτων χαρακτηριστικών διάδοσης στην περιοχή συχνοτήτων THz, όπου στη συνέχεια απαιτείται η ανάλογη σχεδίαση των πομποδεκτών, ώστε να υποστηρίξουν ζώνη υψηλής συχνότητας, ένα εκτενές εύρος ζώνης, ισχύ, επαίσθηση και χαρακτηριστικά χαμηλού θορύβου [45]. Μια άλλη πρόκληση της επικοινωνίας THz αποτελεί το ελάχιστο κέρδος και μια αποτελεσματική περιοχή των διακριτών κεραιών ζώνης THz [19]. Τέλος για την αντιμετώπιση της διασποράς

⁷³ Το NYU WIRELESS είναι ένα καινοτόμο ακαδημαϊκό ερευνητικό κέντρο με εστίαση στο 6G και στην εποχή πέρα από αυτό, και από το mmWave έως το Terahertz. Βλέπε σχετικά: <https://engineering.nyu.edu/research-innovation/centers/nyu-wireless>.

⁷⁴ Το CMOS είναι η τεχνολογία ημιαγωγών που χρησιμοποιείται στα τρανζίστορ που κατασκευάζονται στα περισσότερα από τα σημερινά μικροσίπ υπολογιστών. Βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: <https://whatis.techtarget.com/definition/CMOS-complementary-metal-oxide-semiconductor>.

⁷⁵ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: University of Surrey (2021, December): **6G Wireless: A New Strategic Vision**. Available at: https://www.surrey.ac.uk/sites/default/files/2020-1_1/6g-wireless-a-new-strategic-vision-paper.pdf.

συχνότητας, έχοντας υπόψη το εκτενές φάσμα του εύρους ζώνης, θα πρέπει να δημιουργηθούν νέα μοντέλα καναλιών πολλαπλών διαδρομών [45].

Οι διαθέσιμες μέθοδοι κωδίκευσης και διαμόρφωσης είναι εξίσου ανεπαρκείς για την υποστήριξη της ζώνης THz, ενώ καθίσταται πολύπλοκη η ανάπτυξη νέας μεθόδου. Το ζήτημα των παρεμβολών θα περιοριστεί σε μικρότερο εύρος λόγω της υψηλής απώλειας διείσδυσης της ζώνης THz και κατά συνέπεια της επικοινωνίας μικρής εμβέλειας. Έτσι η παρεμβολή πρέπει να μετριαστεί σε τοπική κλίμακα σε σχέση με τις τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών που εφαρμόζονται στο 4G και/ή στο 5G. Ωστόσο, το πρόβλημα της παρεμβολής με άλλες συνυπάρχουσες τεχνολογίες (περιπτώσεις χρήσης THz) προβλέπεται να είναι κρίσιμο, εξαιτίας της τάσης ενοποίησης προσαρμοστικού εύρους συχνοτήτων και εκτενέστερου ζωνικού εύρους [45]. Αυτό συνιστά μια πρόκληση που σαφώς θα πρέπει να τύχει κατάλληλης αντιμετώπισης πριν την υλοποίηση του 6G.

Επιπλέον, υπό την προοπτική ανάπτυξης του υλισμικού, συνιστά αξιοσημείωτη πρόκληση το ενδεχόμενο της διάθεσης επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας (π.χ. terabit/sec), καθώς σε αυτό το εύρος συχνοτήτων θα πρέπει το ηλεκτρονικό κύκλωμα να μετακινείται σε περισσότερη οπτική κυκλωμάτωση και έτσι θα απαιτείται ένα σχετικά μεγάλο εύρος ζώνης [45]. Επιπλέον, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν θέματα για την υγεία και την ασφάλεια, που έχουν άμεση σχέση με τις επικοινωνίες της ζώνης THz [19].

4.2.3 Δίκτυο

Η τεχνητή νοημοσύνη και τα εργαλεία μηχανικής μάθησης θα αποτελέσουν σημαντικό μέρος των συνδεδεμένων ολοκληρωμένων συστημάτων. Με την πάροδο του χρόνου οι εφαρμογές AI και ML σε λειτουργίες μηδενικής αφής, ρύθμισης πολλαπλής συνδεσιμότητας, ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, κινητικότητας, κτλ., θα «καταλαμβάνουν» μεγαλύτερους χώρους στα συνδεδεμένα ολοκληρωμένα συστήματα του δικτύου 6G [63]. Το δίκτυο του μέλλοντος αναμένεται ότι θα κατασκευαστεί με κατανεμημένες τεχνικές AI/ML, οι οποίες θα είναι ενσωματωμένες σε διάφορους κόμβους, ενώ ένα σημαντικό μέτρο αξιολόγησης θα είναι το κατά πόσο γρήγορα θα υφίσταται η αναμενόμενη προσαρμογή σε τυχόν νέες συνθήκες. Ο αυτοματισμός του δικτύου καθίσταται πλέον «κανόνας» και συνεπώς ένα επιπλέον κριτήριο αποτελεί το κατά πόσο θα βρίσκεται ένα δίκτυο πλησίον της ολοκλήρωσης επαρκών διαδικασιών αυτοματισμού, χωρίς να χρειάζεται χειροκίνητη παρέμβαση [8].

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει ήδη εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς, όπως είναι η αναγνώριση φωνής, η αναγνώριση εικόνων AI, η αυτοματοποιημένη μετάφραση, κτλ. Με την ανάπτυξη των υπηρεσιών του δικτύου απαιτούνται υψηλότερες απαιτήσεις αξιοπιστίας, μικρότερης δικτυακής καθυστέρησης δικτύου και εκτενέστερης εμπειρίας των χρηστών. Όσο πολυπλοκότερο είναι ένα δίκτυο τόσο πιο δύσκολη καθίσταται η διαδικασία διατήρησης και βελτίωσης των KPIs του δικτύου, υπό τη θεώρηση μιας κατάστασης «παραδοσιακής» λειτουργίας. Συνεπώς, για να μπορέσουν να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις στο δίκτυο, επιχειρείται εισαγωγή/ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης, για τη διευκόλυνση δράσεων έξυπνου δικτυακού μετασχηματισμού και αυτοματισμού [64]. Ειδικότερα, για την υποστήριξη της «τεχνητής νοημοσύνης μέσω σχεδίασης» (“AI by design”) θα πρέπει να αναπτυχθεί μια ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική δομή, η οποία θα είναι εξαιρετικά κλιμακοθετήσιμη, ευέλικτη και φορητή, επιτρέποντας την αφαίρεση και κατανομή πολυπλοκοτήτων, την ανάπτυξη αναπαράστασης ψηφιακού διδύμου (digital twin) και την ενσωμάτωση ευφύιας. Τέλος, θα πρέπει να προσδιοριστούν τα κατάλληλα πλαίσια που να

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη, στοχεύοντας μεταξύ άλλων στην υποστήριξη της δημιουργίας και της διανομής, της βελτιστοποίησης κατανομής πόρων και της βιώσιμης ανάπτυξης και λειτουργίας [12].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ 6G

Το μέλλον μετά την πανδημία θα προσφέρει πολλές ευκαιρίες και προκλήσεις από τον μετασχηματισμό της ανθρώπινης εμπειρίας, συνδέοντας τον φυσικό, τον βιολογικό και τον ψηφιακό κόσμο. Επομένως, το 6G θα πρέπει να βασίζεται σε μια νέα αρχιτεκτονική προκειμένου να υλοποιείται η σύνδεση των παραπάνω διαφορετικών κόσμων. Χρειαζόμαστε ένα φιλόδοξο όραμα 6G για την μελλοντική αρχιτεκτονική των επικοινωνιών, το οποίο θα επιτρέπει ταυτόχρονα την ανάπτυξη, τη διατηρησιμότητα και την πλήρη ψηφιακή ένταξη [5].

Η αρχιτεκτονική δικτύου του 5G επιδιώκει την ικανοποίηση απαιτήσεων για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, για υψηλή χωρητικότητα, για χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία στην επικοινωνία και για μαζική συνδετικότητα καθώς επίσης και για την υποστήριξη ενός ευρέος φάσματος υπηρεσιών και εφαρμογών στην αγορά. Έτσι, για την επίτευξη των παραπάνω έχουν εισαχθεί νέες έννοιες και τεχνολογίες στο 5G, όπως είναι η τεχνολογία εικονικοποίησης (virtualization), ο τεμαχισμός του δικτύου σε φέτες (network slicing), η τεχνολογία εικονικοποίησης και η υπηρεσιοπαγής αρχιτεκτονική⁷⁶ (Service Based Architecture - SBA) τόσο στο δίκτυο πυρήνα (core network) όσο και στο δίκτυο ασυρματικής πρόσβασης (wireless access network). Σε κάθε περίπτωση, είναι αναγκαίο για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική το να τυγχάνει εξέτασης αλλά και δυναμικής αξιολόγησης σύμφωνα με τις εκάστοτε διαφαινόμενες τάσεις της αγοράς και ιδίως υπό τη θεώρηση των εξελίξεων για την ανάπτυξη του 6G [9].

Επιγραμματικά, οι βασικές απαιτήσεις για την αρχιτεκτονική του 6G περιλαμβάνουν [5]:

- (α) Ικανότητα προγραμματισμού του δικτύου (network programmability),
- (β) Ευελιξία σε όρους ανάπτυξης/εξάπλωσης του δικτύου (deployment flexibility),
- (γ) Απλότητα λειτουργιών (simplicity) και δικτυακή απόδοση (efficiency),
- (δ) Ασφάλεια (security), στιβαρότητα (robustness) και αξιοπιστία (reliability) του δικτύου,
- (ε) Δυνατότητες αυτοματισμού (automation).

Η αρχιτεκτονική 6G θα πρέπει να είναι ευέλικτη και αποτελεσματική ώστε να επιτρέπεται μια μορφή εύκολης «ενοποίησης των πάντων», δηλαδή η δημιουργία ενός «δικτύου αποτελούμενου ουσιαστικά από επιμέρους δίκτυα», περιλαμβανομένων επιπλέον των κόμβων που χρησιμοποιούν συχνότητες άνω των 100 GHz [78], μιας κοινής επικοινωνίας

⁷⁶ Ο φορέας 3GPP ορίζει μια «Υπηρεσιοπαγή Αρχιτεκτονική» – ή Αρχιτεκτονική Βασισμένη σε Υπηρεσίες – (SBA), όπου η λειτουργικότητα του επιπέδου ελέγχου (control plane) και τα κοινά αποθετήρια δεδομένων (data repositories) ενός δικτύου 5G παρέχονται μέσω ενός συνόλου διασυνδεδεμένων Λειτουργιών Δικτύου (Network Functions - NFs), καθεμία με εξουσιοδότηση για την απόκτηση πρόσβασης στις υπηρεσίες της άλλης. Η SBA τελικά παρέχει ένα δομοστοιχειωτό πλαίσιο αναφοράς (modular framework) από το οποίο κοινές εφαρμογές μπορούν να αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας στοιχεία από μεταβαλλόμενους πηγές και προμηθευτές. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-the-5g-service-based-architecture-sba>.

και επαίσθησης (sensing), των NTN⁷⁷ (Non Terrestrial Networks - Μη Επίγεια Δίκτυα) και επίγειας επικοινωνίας, καθώς επίσης και καινοτόμων ενεργοποιητών (enablers) υποστηριζόμενων από την τεχνητή νοημοσύνη όπως και τοπικών και καταναμημένων υπολογιστικών ικανοτήτων.

Πιο συγκεκριμένα, η ενοποίηση στοιχείων των NTN (π.χ. των LEOs, GEOs⁷⁸, MEOs⁷⁹ και συνολικά του αερομεταφερόμενου/διαστημικού ενεργητικού, πιθανόν διασυνδεδεμένων) παρέχει εκτεταμένη και συμπληρωματική κάλυψη για υπηρεσίες συνδεδετικότητας όπως επίσης και για καταναμημένες υπηρεσίες αποθήκευσης και υπολογισμών. Για να γίνει πραγματοποιήσιμη μια τέτοιου είδους πλατφόρμα νέων έξυπνων υπηρεσιών και συνδεδετικότητας σε κάθετες και συσχετισμένες αλυσίδες αξιών⁸⁰, θα πρέπει η αρχιτεκτονική να έχει τη δυνατότητα ενοποίησης δικτύων κρίσιμης αποστολής με αξιοπιστία, διαθεσιμότητα και επανατακτικότητα πέρα από τις URLLC στο 5G, το οποίο χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη για την ευέλικτη παροχή υποδομής για εγγυήσεις υπηρεσιών από άκρο σε άκρο (end-to-end service guarantees) [75].

Το σύστημα 6G διαφαίνεται ότι τείνει να υιοθετήσει μια τεχνική αρχιτεκτονικής στενής ενοποίησης πολλαπλών συχνοτήτων και ενός δικτύου επικοινωνίας χωρίς κυψέλες, στο έδαφος, στον αέρα και στον ουρανό. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών επικοινωνίας θα δημιουργήσει μια νέα δικτυακή αρχιτεκτονική 6G, ενώ ενδέχεται να χρειαστεί αναθεώρηση και του τρέχοντος σχεδιασμού του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η ευρεία χρήση διαφόρων τεχνολογιών επικοινωνίας θα οδηγήσει σε αύξηση της ετερογένειας του δικτύου, το οποίο τελικά θα πρέπει να είναι διαχειρίσιμο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες πλαισιακές καινοτομίες που αναμένεται να εισαχθούν στο 6G [6].

5.1 Αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες (Cell Free - CF)

Τα κυψελοειδή δίκτυα αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, από τότε που εισήχθησαν για πρώτη φορά με το πέρας της δεκαετίας του 1970. Τα κυψελοειδή δίκτυα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με πρακτικές εφαρμογές

⁷⁷ Το NTN έχει γίνει ένας όρος «ομπρέλα» για κάθε δίκτυο που περιλαμβάνει μη επίγεια ιπτάμενα αντικείμενα. Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: X. Lin, S. Rommer, S. Euler, A. Yavuz and R.S. Karlsson (2021, December): **5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks**. *IEEE Communications Standards Magazine*, vol.5, no.4, pp.147-153, doi: 10.1109/MCOMSTD.011.2100038.

(Επίσης διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2103/2103.09156.pdf>).

⁷⁸ Μια γεωστατική γήινη τροχιά (Geostationary Earth Orbit - GEO) είναι μια κυκλική γεωσύγχρονη τροχιά στο επίπεδο του ισημερινού της Γης με ακτίνα περίπου 42.164 km (26.199 μίλια) (μετρούμενη από το κέντρο της Γης). Για περισσότερα στοιχεία βλέπε σχετικά, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Geosynchronous_orbit.

⁷⁹ MEO (Medium Earth Orbit - Μεσαία Γήινη Τροχιά) είναι ένα δορυφορικό σύστημα που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες. Οι δορυφόροι MEO περιφέρονται γύρω από τη γη μεταξύ 1.000 και 22.300 μιλίων πάνω από την επιφάνεια της γης. Οι δορυφόροι MEOs χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα γεωγραφικού εντοπισμού θέσης και δεν είναι στατικοί σε σχέση με την περιστροφή της γης. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.webopedia.com/definitions/meo/>.

⁸⁰ Μια αλυσίδα αξιών είναι ένα επιχειρηματικό μοντέλο που περιγράφει το πλήρες εύρος των δραστηριοτήτων που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων, την προτεινόμενη περιγραφή στον ιστότοπο: <https://www.investopedia.com/terms/v/valuechain.asp>.

όπως και σε σχέση με τη χρήση ραδιοπύργων. Ωστόσο ο κύριος ενδογενής περιορισμός των κυψελοειδών δικτύων είναι το «συνοριακό φαινόμενο» (“boundary effect”), στο οποίο οι χρήστες στο σύνορο μιας κυψέλης λαμβάνουν ασθενές επιθυμητό σήμα (εξαιτίας της απώλειας διαδρομής) και ισχυρές παρεμβολές από τις άλλες κυψέλες.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την κακή απόδοση αυτών των χρηστών στο άκρο κυψέλης (cell-edge users). Το συνοριακό φαινόμενο δεν αποτέλεσε πρόβλημα στα προηγούμενα ούτε και στα υφιστάμενα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Αυτός είναι ουσιαστικά και ο λόγος για τον οποίο η «κυψελοπαγής» (“cellular-based”) τοπολογία εξακολουθεί να παραμένει βασική επιλογή για τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, εδώ και αρκετές δεκαετίες. Εντούτοις, για τα συστήματα επικοινωνίας πέρα από το 5G καθώς και για τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνίας 6G, η υψηλή ζήτηση για ρυθμούς δεδομένων θα προκαλέσει εξαιρετικά πυκνή και ετερογενή ανάπτυξη των BSs (Base Stations – Σταθμοί Βάσης) και των APs (Access Points - Σημείων Πρόσβασης). Επιπλέον, με την αύξηση της πυκνότητας των BSs/APs η κάλυψη της κυψέλης καθίσταται μικρότερη. Στα δίκτυα 5G η απόσταση μεταξύ των BSs/APs έχει μειωθεί στην τάξη των δεκάδων μέτρων. Μια τέτοιου είδους πυκνή ανάπτυξη των μελλοντικών ασύρματων δικτύων οδηγεί σε περισσότερες παρεμβολές και τούτο καθιστά το συνοριακό φαινόμενο ως ένα κύριο σημείο συμφόρησης των κυψελοειδών συστημάτων [29].

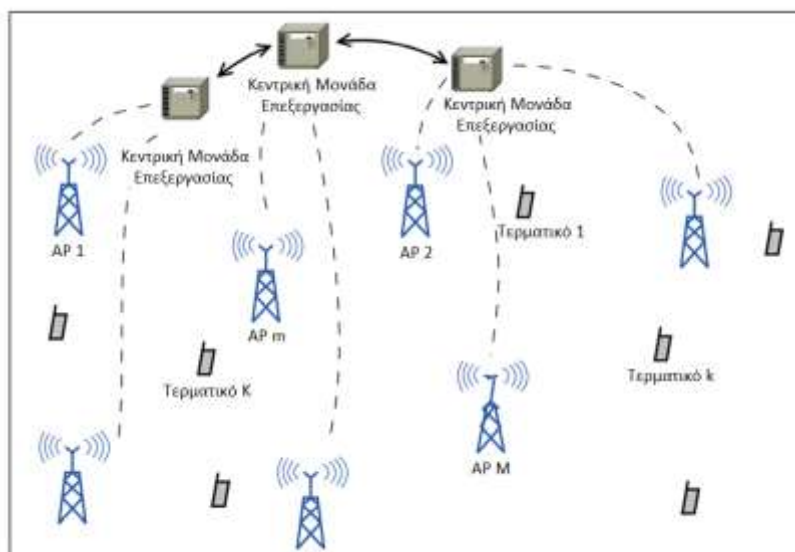
Η αρχιτεκτονική επικοινωνίας χωρίς κυψέλες (cell free) έχει προταθεί για αντιμετώπιση της υποβάθμισης επίδοσης (performance degradation) από τη διεργασία μεταπομπής (handover) των κυψελοειδών δικτύων [79]. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, ένας συγκεκριμένος UE (User Equipment - Εξοπλισμός Χρήστη) μπορεί να επικοινωνεί με συνεργατικούς BS (ή με συνεργατικά APs) μέσω συντονισμένων πολυσημειακών τεχνικών μετάδοσης και λήψης πολλαπλών σημείων αντί για σύνδεση σε έναν μεμονωμένο BS. Η υλοποίηση επικοινωνιών χωρίς κυψέλες μπορεί να βελτιώσει τη συνδετικότητα και να μειώσει τη λανθάνουσα καθυστέρηση που επάγεται από τη διαδικασία μεταπομπής. Στην εποχή του 6G, οι επικοινωνίες χωρίς κυψέλες θα είναι αναπόφευκτες εξαιτίας της ταχείας ανάπτυξης ετερογενών συστημάτων επικοινωνίας και της χρήσης διαφορετικών ζωνών συχνοτήτων, όπου οι UEs θα μεταφέρονται από το ένα δίκτυο στο άλλο δίχως να απαιτείται υλοποίηση διεργασιών μεταπομπής. Εν συνεχεία οι UEs θα επιλέγουν με αυτοματοποιημένο τρόπο τη βέλτιστη ζεύξη από τις διαθέσιμες ετερογενείς ζεύξεις (όπως π.χ. THz, mmWave και VLC). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την «άμβλυση» παραδοσιακών ζητημάτων αναφορικά με τις διεργασίες μεταπομπής (όπως π.χ. απώλεια δεδομένων και καθυστερήσεις/αστοχίες μεταπομπής) και τη διασφάλιση καλύτερης QoS. Εν κατακλείδι, οι επικοινωνίες χωρίς κυψέλες θα εξασφαλίσουν την αρραγή (seamless) κινητικότητα των UEs και χωρίς επιβάρυνση λόγω της διεργασίας μεταπομπής ([19], [77]).

Παρά το γεγονός ότι στις τελευταίες δεκαετίες έχουν προταθεί πολλές τεχνικές, όπως είναι το δίκτυο MIMO, η CoMP⁸¹ (Coordinated Multi-Point - Συντονισμένη Πολυσημειακή) εκπομπή και λήψη με κοινή εκπομπή και τα συστήματα κατανεμημένων κεραιών, η ικανότητά τους ώστε να ξεπεράσουν αυτό το σημείο συμφόρησης είναι περιορισμένη. Αυτό συμβαίνει διότι οι τεχνικές βασίζονται ακόμα σε κυψελοειδείς δομές ή/και απαιτούν

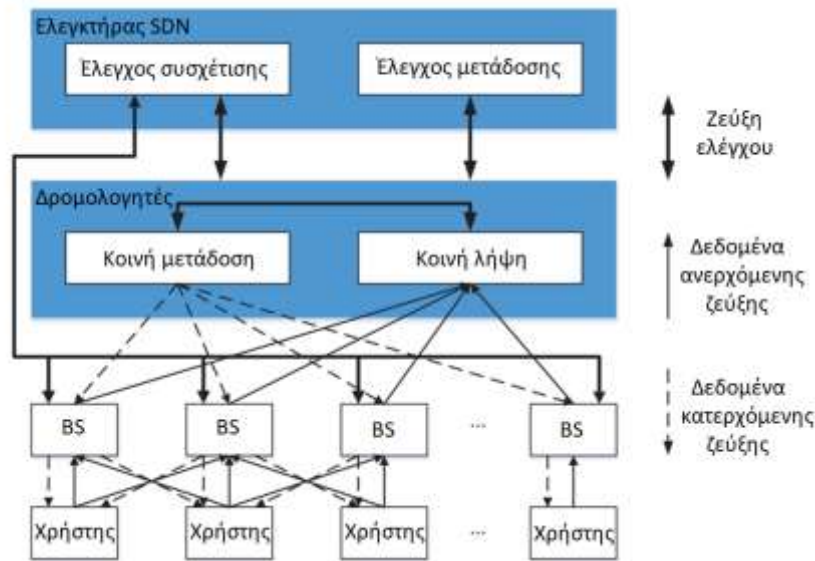
⁸¹ Η συντονισμένη πολυσημειακή εκπομπή και λήψη (CoMP) αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τεχνικών που έχουν κοινό παρονομαστή το δυναμικό συντονισμό εκπομπής ή/και λήψης σε πολλαπλούς γεωγραφικά διαχωρισμένους σταθμότοπους (sites), στοχεύοντας στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και της ποιότητας των υπηρεσιών του τελικού χρήστη. Βλέπε επίσης: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/coordinated-multi-point>.

υψηλό κόστος εξάπλωσης και εξαιρετικά περίπλοκη από κοινού επεξεργασία. Πέρα από το ζήτημα της σύγκλισης του δικτύου εξαιτίας του συνωριακού φαινομένου, τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα αντιμετωπίζουν πολλά επιπλέον ζητήματα, όπως είναι, μεταξύ άλλων, η εξισορρόπηση φορτίου, το επίβαρο μεταπομπής και η διαχείριση παρεμβολών. Για παράδειγμα, τα ετερογενή δίκτυα επικοινωνίας χρειάζεται να διασυνδέονται, με αποτέλεσμα να εγείρονται πολλά ζητήματα σχετικά με τη δρομολόγηση, το πρωτόκολλο και τη διαχείριση του δικτύου [29].

Προς επίλυση των παραπάνω προβλημάτων έχουν προταθεί τα CF μαζικά MIMO δίκτυα, ως μια πρακτική και κλιμακοθετήσιμη έκδοση του δικτύου MIMO [80]. Η Εικόνα 12 δείχνει ένα γενικό μοντέλο συστήματος του CF μαζικού MIMO, όπου πολλά (δηλαδή χιλιάδες ή και περισσότερα) APs εξυπηρετούν από κοινού πολλά τερματικά χρηστών σε ίδιους πόρους χρόνου/συχνότητας. Όλα τα APs είναι κατανεμημένα σε μια μεγάλη περιοχή (όπως π.χ. σε ολόκληρη πόλη) και είναι συνδεδεμένα σε μια ή περισσότερες Κεντρικές Μονάδες Επεξεργασίας (Central Processing Units - CPUs). Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται ένας συγκεκριμένος σχεδιασμός αρχιτεκτονικής τύπου CF, όπου χρησιμοποιούνται SDN ελεγκτήρες (controllers) για έξυπνη πόλη υψηλής πυκνότητας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα και σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα όπου ένα (κινητό) τερματικό χρειάζεται εξαρχής να συσχετίζεται με έναν BS/AP, το τερματικό έχει πλέον την επιλογή πρόσβασης σε πολλούς BSs/APs μέσω διαφορετικών ανερχόμενων ζεύξεων (uplinks) και κατερχόμενων ζεύξεων (downlinks), ανάλογα με τις απαιτήσεις και την κατάσταση του ασύρματου καναλιού. Κατά συνέπεια, οι BSs/APs δεν χρειάζεται να διατηρούν κατάλογο με τα συσχετισμένα τερματικά. Αντίθετα, στον ελεγκτήρα SDN το συσχετισμένο στοιχείο ελέγχου θα αποφασίσει σχετικά με το ποιοι από τους BSs/APs θα πρέπει να συσχετιστούν με τα τερματικά μέσω της ζεύξης ελέγχου. Επιπλέον, ο έλεγχος μετάδοσης στον ελεγκτήρα SDN θα δημιουργήσει δυναμικές ανερχόμενες/κατερχόμενες ζεύξεις και ζεύξεις οπισθόζευξης (backhaul), για τη υποστήριξη της από κοινού μετάδοσης ή λήψης μεταξύ τερματικών και των BSs/APs. Αυτό σημαίνει ότι οι BSs/APs στην ίδια ομάδα μπορούν να συνεργάζονται για την πραγματοποίηση κοινής μετάδοσης και λήψης για ένα συγκεκριμένο τερματικό ([29], [81]).



Εικόνα 12: Μοντέλο CF μαζικού MIMO συστήματος [29]



Εικόνα 13: Αρχιτεκτονική CF που βασίζεται σε SDN [81]

Το CF μαζικό MIMO έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον και έχει καταστεί ως ένας πολλά υποσχόμενος υποψήφιος για την υλοποίηση των συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας πέρα από το 5G και/ή 6G. Τα κύρια οφέλη του CF μαζικού MIMO παρατίθενται ως εξής [29]:

- i. **Υψηλή συνδετικότητα δικτύου** (πιθανότητα κάλυψης). Καθώς δεν υπάρχουν καθόλου κυψέλες στο CF μαζικό MIMO, κατά συνέπεια δεν υφίστανται συντοριακά φαινόμενα. Επιπλέον, λόγω της κατανομής των APs σε ολόκληρη την περιοχή κάλυψης, υπάρχει δυνατότητα επίτευξης κέρδους μακρο-ποικιλότητας (macro-diversity). Ως αποτέλεσμα, το CF μαζικό MIMO μπορεί να παρέχει πολύ υψηλή συνδετικότητα δικτύου και τα δίκτυα να μπορούν να προσφέρουν σε όλους τους χρήστες πολύ καλές υπηρεσίες.
- ii. **Τεράστια ενεργειακή και φασματική απόδοση.** Το CF μαζικό MIMO, ομοίως με το συντοπισμένο (colocated) μαζικό MIMO, προσφέρει πολλούς βαθμούς ελευθερίας, υψηλή κεραιοσυστοιχία και κέρδη πολυπλεξίας καθώς χρησιμοποιεί πολλές κεραιές υπηρεσιών (APs) για να εξυπηρετήσει έναν πολύ μικρότερο αριθμό τερματικών των χρηστών. Επομένως, το CF μαζικό MIMO μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλή ενεργειακή και φασματική απόδοση.
- iii. **Απλή γραμμική επεξεργασία σήματος και συσκευές χαμηλού κόστους.** Καθώς ο αριθμός των APs είναι μεγάλος, σύμφωνα με τον νόμο των μεγάλων αριθμών⁸², σε πολλά περιβάλλοντα διάδοσης, το CF μαζικό MIMO μπορεί να έχει τις ευνοϊκές ιδιότητες διάδοσης και «σκλήρυνσης/ενίσχυσης καναλιού»⁸³ (“channel hardening”).

⁸² Στη θεωρία πιθανοτήτων, ο νόμος των μεγάλων αριθμών (Law of Large Numbers - LLN) είναι ένα θεώρημα που περιγράφει το αποτέλεσμα της εκτέλεσης του ίδιου πειράματος πολλές φορές. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_large_numbers.

⁸³ Με τη «σκλήρυνση» του καναλιού, μειώνεται η γρήγορη διάλειαση και το κανάλι αρχίζει να συμπεριφέρεται σχεδόν αιτιοκρατικά. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: S. Gunnarsson, J. Flordelis, L. Van der Perre & F. Tufvesson (2018): **Channel Hardening in Massive MIMO - A Measurement Based Analysis**. In: *Proceedings of the 2018 IEEE 19th*

Όσον αφορά στην ευνοϊκή διάδοση μπορεί να γίνεται χρήση διατάξεων γραμμικής επεξεργασίας όπως π.χ. MR⁸⁴ (Maximum Ratio - Μέγιστος Λόγος), MMSE⁸⁵ (Minimum Mean Squared Error - Ελάχιστο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα), ZF⁸⁶ (Zero Forcing - Μηδενικός Εξαναγκασμός), διότι αυτές είναι σχεδόν βέλτιστες. Όσον αφορά στην περίπτωση “channel hardening”, ο έλεγχος ισχύος, ο έλεγχος σηματοδοσίας και οι ανιχνεύσεις σήματος μπορούν να γίνονται μόνο σύμφωνα με τις στατιστικές γνώσεις του καναλιού (διάλειψη μεγάλης κλίμακας). Τούτο επιφέρει σημαντική απλοποίηση στην επεξεργασία του σήματος του συστήματος. Επιπλέον, στην περίπτωση CF μαζικού MIMO, κάθε AP έχει λίγες κεραίες, με αποτέλεσμα να αναμένεται η κατασκευή του να γίνει με χαμηλό κόστος, με εξαρτήματα χαμηλής ισχύος και με APs απλής επεξεργασίας σήματος.

5.2 Αρχιτεκτονική Δικτύου με Υποστήριξη AI

Τα τελευταία χρόνια η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και πιο συγκεκριμένα η μηχανική μάθηση (ML) έχουν προσελκύσει ιδιαίτερα την προσοχή της βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής κοινότητας και η AI έχει εφαρμοστεί σε πολλές ετόψεις των κυψελοειδών δικτύων 5G, από εφαρμογές φυσικού στρώματος (π.χ. καναλική κωδίκευση και καναλική εκτίμηση), μέχρι σε εφαρμογές στρώματος MAC (όπως π.χ. πολλαπλή πρόσβαση), σε εφαρμογές στρώματος δικτύου (όπως π.χ. κατανομή πόρων και διόρθωση σφαλμάτων) και σε διάφορες άλλες περιπτώσεις [24]. Επιπλέον, ο συνδυασμός τεχνητής νοημοσύνης και υπολογιστικής στο άκρο του δικτύου οδηγεί σε βελτίωση της Ποιότητας της Εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) και σε μείωση του κόστους [91]. Η μάθηση στα άκρα του δικτύου παρέχει νέες δυνατότητες για την υλοποίηση πολλών εφαρμογών, όπως π.χ. στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης [92].

Εντούτοις η εφαρμογή AI στα δίκτυα 5G περιορίζεται σε σχέση με τη βελτιστοποίηση της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής δικτύου και είναι δύσκολη η πλήρης υλοποίηση του δυναμικού της τεχνητής νοημοσύνης στην εποχή του 5G, καθώς το δίκτυο 5G δεν την έχει λάβει υπόψη του στον αρχικό σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής. Έτσι, για εκπλήρωση του οράματος προς ένα ευφυές δίκτυο, κατά τον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής 6G θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης στο δίκτυο με κατανοητό τρόπο ενώ θα πρέπει επίσης να ακολουθηθεί μια προσέγγιση οδηγούμενη από την AI, όπου η ευφυΐα θα αποτελεί ενδογενές χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής του συστήματος 6G [24].

Η ανάγκη για δυναμική επαναδιαρθρωσιμότητα (dynamic reconfigurability) αποτελεί έναν κοινό παρανομαστή για βασικές πτυχές της αρχιτεκτονικής 6G, δηλαδή αλλαγή της τοποθέτησης και της διάθεσης πόρων των υπηρεσιών και των λειτουργιών, με το σύστημα να είναι σε κατάσταση λειτουργίας. Αυτό το είδος ευελιξίας θα διέπεται και θα

International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018, pp.1-5, doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445925.

(Επίσης διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://arxiv.org/pdf/1804.01690.pdf>).

⁸⁴ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων:

<https://www.lawinsider.com/dictionary/maximum-ratio>

⁸⁵ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων:

https://en.wikipedia.org/wiki/Minimum_mean_square_error

⁸⁶ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων:

https://en.wikipedia.org/wiki/Zero-forcing_precoding

ενορχηστρώνεται από αυτόνομες μονάδες εκτέλεσης και λήψης αποφάσεων που βασίζονται σε AI/ML, οι οποίες θα εμφανίζονται σε όλα τα στρώματα αφαίρεσης και θα καλύπτουν όλα τα τμήματα των δικτύων. Καθώς ταυτόχρονα θα υφίσταται σημαντική αύξηση της διεκπεραιωτικότητας των δεδομένων, της λανθάνουσας καθυστέρησης και του αριθμού των συνδεδεμένων συσκευών και υποδικτύων, αναμένεται αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των αναφερόμενων συμβάντων εντός των δικτύων, με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου των δεδομένων που παράγονται και μεταφέρονται εντός του δικτύου. Λόγω αυτών των εξελίξεων τίθενται απαιτήσεις ως προς την αρχιτεκτονική δεδομένων και πληροφοριών 6G (Data and Information - D&I). Για την υποστήριξη μιας τέτοιας ανάπτυξης, θα πρέπει να διασφαλίζεται και να βελτιώνεται η διαθεσιμότητα D&I εντός του δικτύου [5].

Το δίκτυο που καθοδηγείται από τη μηχανική μάθηση (ML) αναμένεται να καταστεί βασικό στοιχείο ενός πολύπλοκου συστήματος 6G, αν και ακόμα βρίσκεται σε αρχικό στάδιο. Στο σύστημα 6G προβλέπεται η χρήση κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης για την ενσωμάτωση μιας δικτυακής αρχιτεκτονικής, πλήρως επικεντρωμένης στον χρήστη. Έτσι το τερματικό θα έχει την δυνατότητα λήψης ανεξάρτητων αποφάσεων σχετικά με το δίκτυο, βάσει των προηγούμενων αποτελεσμάτων λειτουργίας και χωρίς την επιβάρυνση της επικοινωνίας μεταξύ του κεντροκοποιημένου ελεγκτήρα και του τερματικού. Επίσης με την κατανεμημένη μέθοδο η επεξεργασία του υπολογισμού ML μπορεί να γίνεται σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή έχει καθυστέρηση χαμηλότερη από τη στάθμη μερικών ms και μπορούν να πληρούνται οι απαιτήσεις πολλών υπηρεσιών 6G, βελτιώνοντας έτσι την ικανότητα απόκρισης της δικτυακής διαχείρισης [6].

Η τελική προσδοκία των ευφυών δικτύων είναι η αυτόνομη εξέλιξη των δικτύων. Παρακάτω επισημαίνονται τρεις βασικοί παράγοντες ενεργοποίησης για έξυπνο δίκτυο [24].

1. Νοήμων Άκρη σε Πραγματικό Χρόνο (Real-Time Intelligent Edge - RTIE)

Το δίκτυο της επόμενης γενιάς θα απαιτεί την υποστήριξη των διαδραστικών υπηρεσιών με τεχνητή νοημοσύνη, όσο και ορισμένων υπηρεσιών (όπως π.χ. τα αυτόνομα οχήματα) που παρουσιάζουν ευαισθησία σε σχέση με τον λανθάνοντα χρόνο απόκρισης, που πρέπει να έχουν έξυπνη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους σε πραγματικό χρόνο. Η κεντροκοποιημένη AI νέφους (centralized cloud AI) που ασχολείται με στατικά δεδομένα, δεν έχει την ικανότητα να επιτύχει τέτοιου είδους υπηρεσίες και έτσι υπάρχει επείγουσα ανάγκη για RTIE, στο οποίο λαμβάνονται έξυπνες προβλέψεις, αποφάσεις και συμπεράσματα επί τη βάση «ζωντανών δεδομένα» [24]. Αρκετοί φορείς της ακαδημαϊκής κοινότητας και της βιομηχανίας έχουν ξεκινήσει την ανάπτυξη τεχνολογιών και στοιχείων λογισμικού προς ικανοποίηση των απαιτήσεων σε πραγματικό χρόνο, σε συνεργατικά ερευνητικά εργαστήρια (π.χ. Berkeley RISELab⁸⁷) [82]. Τέλος, άλλος ένας κινητήριος παράγοντας είναι το υλισμικό υψηλής απόδοσης για το RTE (Runtime Environment - Περιβάλλον Χρόνου Εκτέλεσης) και έχει σχεδιαστεί ένας εξειδικευμένος επεξεργαστής AI σε πραγματικό χρόνο [83].

2. Έξυπνη Ραδιοεπικοινωνία (Intelligent Radio - IR)

Οι αναδυόμενες επαναστατικές εξελίξεις υλισμικού (π.χ. στα κυκλώματα και στα συστήματα ραδιοσυχνότητας), θα παράσχουν στο 6G τη δυνατότητα παρακολούθησης και πλήρους εκμετάλλευσης της ταχέως αναβάθμισης του υλισμικού σε επίπεδο

⁸⁷ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε σχετικά: <https://rise.cs.berkeley.edu/>

συσκευής και σε επίπεδο σταθμού βάσης. Υπάρχει εκτίμηση για μια αρχιτεκτονική στο 6G όπου θα είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός αλγορίθμου-υλισμικού [76]. Η περίπτωση IR είναι μια ευρύτερη και σε βάθος θεώρηση, στην οποία διαχωρίζονται οι αλγόριθμοι υλισμικού και πομποδέκτη. Συγκεκριμένα, λειτουργεί ως ένα ενοποιημένο πλαίσιο, στο οποίο εκτιμώνται οι ικανότητες του υλισμικού και όπου οι αλγόριθμοι πομποδέκτη μπορούν να διαμορφωθούν δυναμικά σύμφωνα με την πληροφορίες του υλισμικού [24].

Για αντιμετώπιση του μειονεκτήματος του από κοινού σχεδιασμού αλγορίθμου – υλισμικού και για να υπάρξει όφελος από την αρχιτεκτονική διαχωρισμού υλισμικού - αλγορίθμου, προτείνεται ένα λειτουργικό σύστημα (Operating System - OS) μεταξύ του υλισμικού της συσκευής και των αλγορίθμων του πομποδέκτη, όπου θεωρείται πως ο αλγόριθμος του πομποδέκτη εκτελείται ως λογισμικό πάνω από το λειτουργικό σύστημα. Το λειτουργικό σύστημα έχει την ικανότητα όχι μόνο να εκτιμά τις δυνατότητες των τοπικών αλυσίδων ραδιοσυχνότητας (RF chains), των μετατοπιστών φάσης (phase shifters), των κεραιών και των ADCs (Analog-to-Digital Converters - Μετατροπείς Αναλογικού σε Ψηφιακό) κτλ., αλλά επίσης και να μετράει με αυτόματο τρόπο τις αναλογικές τους παραμέτρους. Το εν λόγω OS, με βάση τις πληροφορίες του υλισμικού και τις μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης θα έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει τους δικούς του αλγόριθμους πομποδέκτη, μέσω μιας γλώσσας διεπαφής. Επίσης το IR λαμβάνει υπόψη πρωτόκολλα πάνω από το στρώμα 3 (στρώμα δικτύου), τα οποία είναι αυτο-αναβαθμιζόμενα ώστε να παρέχουν υποστήριξη σε διάφορες εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης [76].

Το IR, από την προοπτική του στρώματος PHY, έχει τη δυνατότητα πρόσβασης στο διαθέσιμο φάσμα, ελέγχου της ισχύος μετάδοσης και προσαρμογής των πρωτοκόλλων μετάδοσης με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης [84]. Με την αποσύνδεση των αλγορίθμων του πομποδέκτη από το υλισμικό, το νέο παράδειγμα σχεδίασης επιτρέπει την ευέλικτη προσαρμογή σε διαφοροποιημένο και αναβαθμίσιμο υλισμικό [24].

3. Κατανεμημένη AI

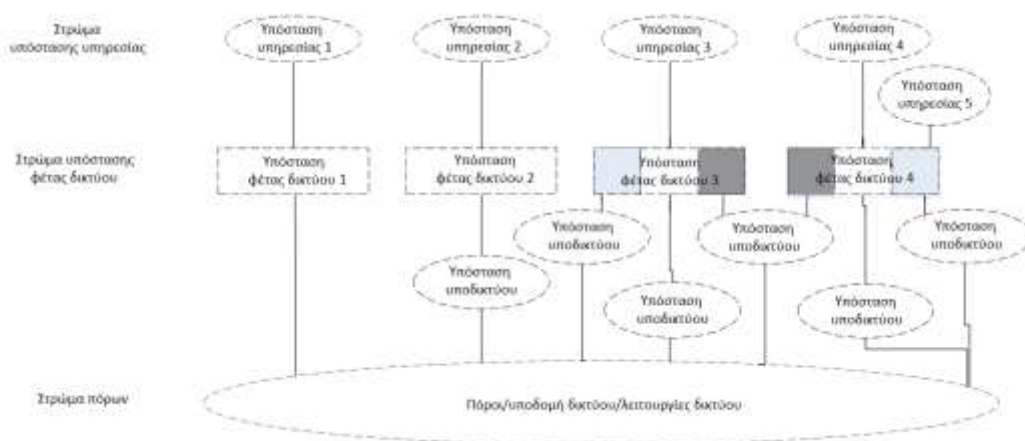
Το μελλοντικό δίκτυο αναμένεται να είναι ένα μεγάλο αποκεντρωμένο σύστημα, στο οποίο λαμβάνονται έξυπνες αποφάσεις σε διαφορετικά επίπεδα κοκκιότητας (granular levels). Για την επιτάχυνση της μάθησης και για τη βελτίωση της συμπερασματικής αξιοπιστίας, η κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη αξιοποιεί στο δίκτυο κατανεμημένους πόρους υπολογισμού, επικοινωνίας, προσωρινής απόκρυψης και ελέγχου (Computation, Communication, Caching and Control - C4) [85], μέσω παράλληλης διεργασίας κατάρτισης, όπου απαιτείται ο κατάλληλος διαχωρισμός του μοντέλου και των δεδομένων.

Ένα παράδειγμα κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης που έχει αναπτυχθεί πρόσφατα είναι η Ομοσπονδιακή Μάθηση (Federated Learning), όπου μοντέλα υπόκεινται σε εκπαίδευση στην άκρη του δικτύου σύμφωνα με σχηματομορφές τοπικών δειγμάτων (local sample patterns) και τα οποία αποστέλλονται στο κεντρικοποιημένο νέφος για το υπολογισμό του μέσου όρου των μοντέλων, με αποτέλεσμα να αποκτηθεί ένα μεριζόμενο παγκόσμιο μοντέλο. Διατηρώντας τα δεδομένα στο άκρο του δικτύου ενισχύεται επίσης το απόρρητο και η ασφάλεια [24].

5.3 Φετοτεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing)

Ο φετοτεμαχισμός του δικτύου είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου στην οποία επιτρέπεται η πολυπλεξία εικονικοποιημένων και ανεξάρτητων λογικών δικτύων, στην ίδια φυσική υποδομή δικτύου [86]. Μια «φέτα δικτύου» (“network slice”) είναι ένα από άκρο σε άκρο λογικά απομονωμένο δίκτυο, εξατομικευμένο για έναν συγκεκριμένο τύπο υπηρεσίας με συμφωνημένο SLA⁸⁸ (Service-Level Agreement - Συμφωνία Στάθμης Υπηρεσίας). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εγγύηση βελτιωμένης απόδοσης, καλύτερης κλιμακοθετησιμότητας, βελτιωμένης αξιοπιστίας και ασφάλειας, κτλ. [29].

Η έννοια του δικτυακού τεμαχισμού σε φέτες εισήχθη για πρώτη φορά στο πεδίο της δικτύωσης στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Στη συνέχεια, το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας επόμενης γενιάς⁸⁹ (NGMN - Next-Generation Mobile Network) όρισε τον τεμαχισμό του δικτύου στο πλαίσιο αναφοράς του 5G [87]. Στην παρακάτω Εικόνα 14 απεικονίζεται η έννοια του φετοτεμαχισμού, η οποία αποτελείται από τα εξής τρία στρώματα: το στρώμα υπόστασης υπηρεσίας (service instance layer), το στρώμα υπόστασης φέτας δικτύου (network slice instance layer) και το στρώμα πόρων (resource layer). Κάθε υπόσταση υπηρεσίας αντιπροσωπεύει μια υπηρεσία που παρέχεται από τον πάροχο του δικτύου ή από κάποιο τρίτο μέρος. Η υπόσταση της φέτας του δικτύου παρέχει στην υπόσταση υπηρεσίας τα απαιτούμενα δικτυακά χαρακτηριστικά, δηλαδή μια υπόσταση υπηρεσίας πραγματοποιείται από μια δικτυακή φέτα. Μια δικτυακή φέτα μπορεί να είναι εν μέρει ή πλήρως, φυσικά ή/και λογικά, απομονωμένη από μια άλλη υπόσταση φέτας δικτύου. Κάθε δικτυακή φέτα μπορεί να περιέχει από μηδέν έως και πολλές υποστάσεις υποδικτύου, τις οποίες ενδεχομένως να μοιράζονται δύο ή περισσότερες φέτες δικτύου. Μια υπόσταση υποδικτύου θα μπορούσε να είναι μια λειτουργία δικτύου που εκτελείται πάνω από φυσικούς/λογικούς πόρους [29].



Εικόνα 14: Εννοιολογικό περίγραμμα φετοτεμαχισμού δικτύου[29]

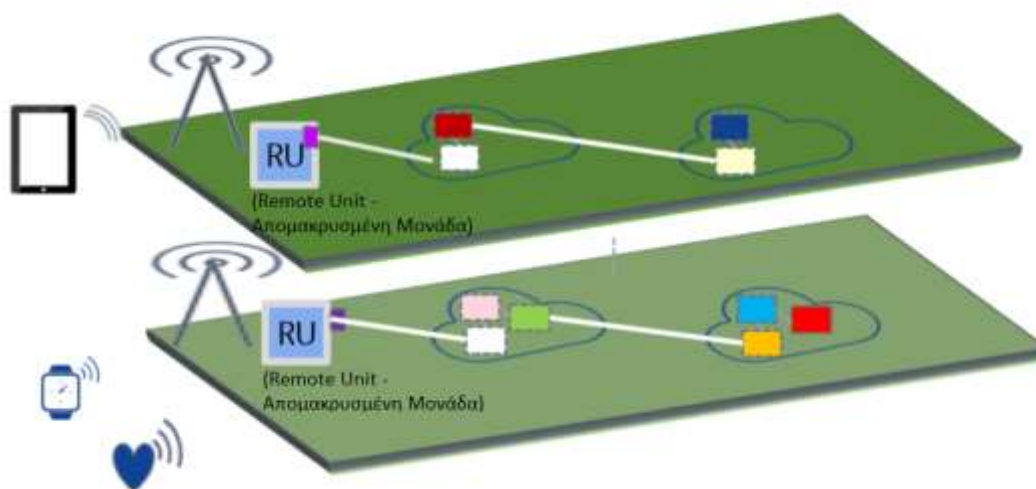
⁸⁸ Μια συμφωνία σε επίπεδο στάθμης υπηρεσίας (SLA) είναι μια δέσμευση μεταξύ ενός παρόχου υπηρεσιών και ενός πελάτη. Ιδιαίτερες πτυχές της υπηρεσίας – όπως π.χ. ποιότητα, διαθεσιμότητα, αρμοδιότητες – συμφωνούνται μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών και του χρήστη της υπηρεσίας.

Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Service-level_agreement.

⁸⁹ Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες, βλέπε π.χ.:

https://en.wikipedia.org/wiki/Next_Generation_Mobile_Networks

Σύμφωνα με την Εικόνα 15, οι φέτες μπορούν να αποκτήσουν εξαιρετική εξειδίκευση, πιθανόν με ξεχωριστές στοίβες (stacks) λογισμικού σε κάθε τεμάχιο-φέτα για διαφορετική λειτουργική επεξεργασία των ροών. Σύμφωνα με την τρέχουσα τάση που επικρατεί στην εικονικοποίηση των υψηλότερων στρωμάτων του RAN⁹⁰ (Radio Access Network - Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης), θα υπάρξει επιπλέον αποσυνάθροιση (disaggregation) των λειτουργιών RAN σε αρθρωτές μικροϋπηρεσίες, δυνάμενες να συντίθενται με ευελιξία σε υλοποιήσεις RAN ειδικές για κάθε φέτα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σχετικά με τις εξειδικεύσεις φετών (slices) θα μπορούσε να είναι μια φέτα υπηρεσίας βίντεο, που ενσωματώνει συγκεκριμένες μικροϋπηρεσίες βελτιστοποίησης βίντεο, περιλαμβάνοντάς τες στη συγκεκριμένη φέτα RAN, χωρίς να είναι απαραίτητες σε άλλες φέτες. Παρομοίως, οι φέτες IoT χαμηλής διεκπεραιωτικότητας μπορούν να ενσωματώσουν λειτουργίες, στις οποίες επιτρέπεται η πρόσβαση χωρίς σύνδεση, ενώ άλλες φέτες έχουν ως βάση την παραδοσιακή προσέγγιση πρόσβασης [93]. Επίσης αναμένεται ευέλικτη τοποθέτηση λειτουργιών για συγκεκριμένη φέτα σε συσκευές πύλης, σε αναμεταδότες, σε σταθμότοπους κυψελών, σε μακρινές άκρες του δικτύου, σε άκρες και περιοχικά νέφη σε μια ποικιλία διαφορετικών πλατφορμών υλισμικού σύμφωνα με τις ανάγκες της φέτας. Απαιτούνται νέες καινοτομίες στην ενορχήστρωση και στην διαχείριση υπηρεσιών, για τη δημιουργία και τη διαχείριση τέτοιων εξαιρετικά εξειδικευμένων φετών [8].



Εικόνα 15: Τεμαχισμός με βελτιστοποίηση λογισμικού για συγκεκριμένες φέτες [8]

Ο φετοτεμαχισμός του δικτύου είναι βασισμένος σε SDN και NFV, με αποτέλεσμα να «κληρονομούνται» τα περισσότερα προβλήματα και οι προκλήσεις από αυτά, δηλαδή η φέτα M&O (Management and Orchestration - Διαχείριση και Ενορχήστρωση) σε όρους πολυπλοκότητας, αξιοπιστίας, ασφάλειας και πολλαπλών μισθώσεων [29].

⁹⁰ Ένα δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας (RAN) αποτελεί μέρος ενός κινητού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Εννοιολογικά, βρίσκεται μεταξύ μιας συσκευής όπως ένα κινητό τηλέφωνο, ένας υπολογιστής ή οποιοδήποτε τηλεχειριζόμενο μηχάνημα και παρέχει σύνδεση με το κεντρικό του δίκτυο. Βλέπε, π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_access_network.

Πέρα από τις προκλήσεις που έχουν προκύψει από τα SDN και NFV, ο φετοτεμαχισμός δικτύου έχει επιπλέον ζητήματα που χρήζουν αντιμετώπισης στο μελλοντικό 6G και είναι τα εξής [29]:

- i. **Απομόνωση φέτας.** Η απομόνωση πέρα από το ότι είναι η σημαντικότερη ιδιότητα του τεμαχισμού του δικτύου, αποτελεί ωστόσο και κύρια πρόκληση για την υλοποίησή του. Για διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας κάθε φέτας, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν διάφορες περιοχές απομόνωσης, συμπεριλαμβάνοντας την κίνηση, το εύρος ζώνης, την επεξεργασία και την αποθήκευση. Σε μια τέτοια περίπτωση η κύρια πρόκληση είναι ο έλεγχος και η ενορχήστρωση που θα απαιτείται να εφαρμοστούν ώστε να υπάρχει εναρμόνιση στις διαφορετικές τεχνικές απομόνωσης στους διαφορετικούς τομείς, ενώ δεν υπάρχει προς το παρόν μια ολιστική και τελική τυποποιημένη αρχιτεκτονική φετών δικτύου για κάτι τέτοιο. Επιπλέον, οι τεχνικές απομόνωσης βασίζονται κυρίως στις τεχνολογίες SDN και NFV, οι οποίες εξακολουθούν να τελούν υπό διαμόρφωση/εξέλιξη.
- ii. **Δυναμικής δημιουργία και διαχείριση φετών.** Για την ικανοποίηση διαφορετικών απαιτήσεων και για την εξυπηρέτηση διαφορετικών υπηρεσιών, είναι απαραίτητη η δυναμική δημιουργία αλλά και η διαγραφή φετών. Εντούτοις, η δημιουργία ή η διαγραφή φετών συνιστά πρόκληση, καθώς χρειάζεται η παροχή εγγυήσεων σχετικά με το πώς οι λειτουργίες αυτές δεν θα επηρεάσουν τις τρέχουσες φέτες, συμπεριλαμβάνοντας έτσι ζητήματα απομόνωσης και ασφάλειας. Επίσης οι φέτες δικτύου θα πρέπει να έχουν την ικανότητα δυναμικής κλιμάκωσής τους σε σχέση με το μεταβαλλόμενο φορτίο. Έτσι, απαιτείται αποτελεσματική κοινή χρήση, που επίσης θα προκαλέσει ορισμένα ζητήματα όπως σχετικά με απομόνωση και ασφάλεια.

5.4 Υποδίκτυα (Sub-Networks)

Στις προηγούμενες γενιές η αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου έχει σχεδιαστεί κυρίως για την επέκταση των δεδομένων Διαδικτύου και φωνής σε κινητά μεμονωμένα ακροσημεία (end-points). Το 5G είναι το πρώτο σύστημα που σχεδιάστηκε για να «εισβάλει» στο βιομηχανικό περιβάλλον, ανταποκρινόμενο έτσι μέσω των νέων αρχιτεκτονικών εξελίξεων, σε πολύπλοκες απαιτήσεις, όπως π.χ. υποστήριξη λειτουργικότητας γεφύρωσης με Δικτύωση Ευαίσθητη ως προς το Χρόνο (Time-Sensitive Networking - TSN). Για να συνεχίσει το έργο του 5G ώστε να εδραιωθεί πραγματικά στο βιομηχανικό περιβάλλον και να αντικαταστήσει παντού την ενσύρματη συνδετικότητα, θα πρέπει το 6G να παρέχει αιτιοκρατική αξιοπιστία σε διαβάθμιση καλωδίου (wire-grade) για μια ποικιλία σεναρίων συνδετικότητας από στατικές, απομονωμένες συσκευές σε αλληλένδετες συσκευές τοπικής αλληλεπίδρασης μέχρι σε ταχέως κινούμενα σμήνη drones και ρομπότ που πρέπει τόσο να διασυνδέονται όσο και να συνδέονται απευθείας στο δίκτυο μόλις διαχωρίζονται από το σμήνος [8]. Παρόλο που τα δίκτυα εντός του σώματος θα απαιτούν εξαιρετική αξιοπιστία και λανθάνουσα καθυστέρηση σε συνδυασμό με αισθητήρες υψηλής πυκνότητας, τα σμήνη drones θα θέτουν πιθανόν περαιτέρω απαιτήσεις σχετικά με μη επίγεια δίκτυα (NTN), όπως βελτιστοποίηση του προϋπολογισμού ζεύξης και συνεργασία ειδικού σκοπού (ad-hoc) μεταξύ των ιπτάμενων αντικειμένων [5]. Για εξασφάλιση αξιοπιστίας και αιτιοκρατίας, τόσο στον χρονικό τομέα όσο και στον χωρικό τομέα, υπάρχει ανάγκη για ημι-αυτόνομα υποδίκτυα 6G, όπου παρά την κακή ή καθόλου

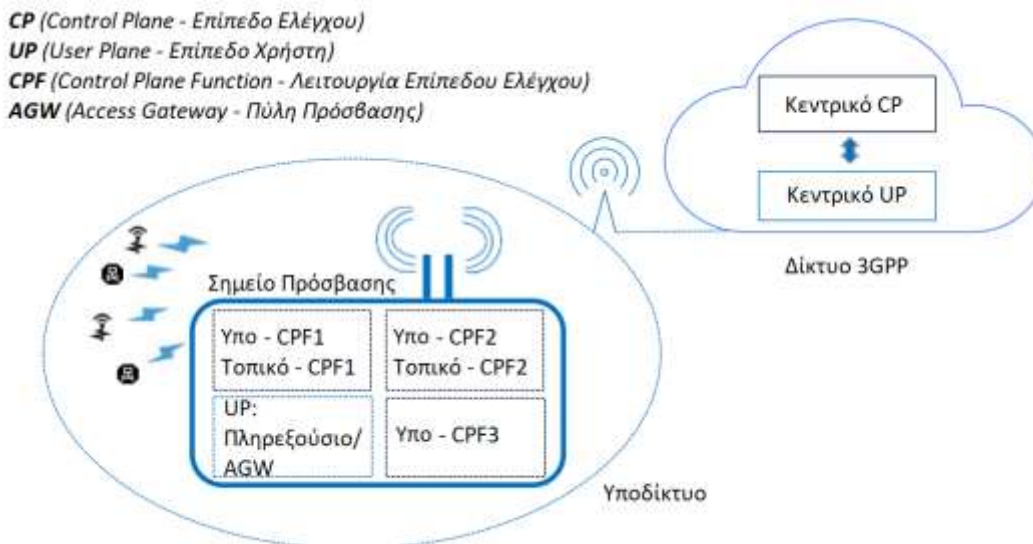
συνδετικότητα με το ευρύτερο δίκτυο, θα συνεχίζονται αδιαλείπτως οι πλέον κρίσιμες υπηρεσίες στο υποδίκτυο [8].

Λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη εξαιρετικά υψηλή ετερογένεια, ένα βασικό χαρακτηριστικό του 6G θα είναι η ικανότητά του να εκμεταλλεύεται μια ευέλικτη εξέλιξη σε επίπεδο υποδικτύου ώστε να προσαρμόζεται αποτελεσματικά, τόσο στα τοπικά περιβάλλοντα όσο και στις απαιτήσεις των χρηστών, με αποτέλεσμα να καταλήγει σε ένα «δίκτυο υποδικτύων». Ειδικότερα, τα τοπικά υποδίκτυα στο 6G, για να αναβαθμιστούν πιθανόν να έχουν μεμονωμένη εξέλιξη, η οποία μπορεί να συμβεί σε λίγες γειτονικές κυψέλες ή ενδεχομένως σε μια απλή κυψέλη, ώστε να υπάρξει ευέλικτη εφαρμογή των εξελίξεων αιχμής σε νέες κυματομορφές, κωδίκευση και πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης στα υποδίκτυα, χωρίς εκτεταμένες χρονοβόρες δοκιμές. Το κόστος εξέλιξης μπορεί να μειωθεί σημαντικά καθώς δεν υπάρχει ανάγκη εξολοκλήρου ανακατασκευής του συστήματος [76].

Τα υποδίκτυα έχουν οριστεί να λειτουργούν σε αυτόνομο τρόπο λειτουργίας (stand-alone mode) όσο και να συνδέονται σε ένα 3GPP δίκτυο συνδετικότητας ευρείας περιοχής. Έτσι με την προσέγγιση αυτή θα επιτραπεί η εκφόρτωση σε τρόπο εκτός λειτουργίας (offloading) προς τις δύο κατευθύνσεις όπως και βελτιωμένες διατάξεις ανακάλυψης. Ταυτόχρονα, το πλαίσιο της λειτουργικότητας και η πολυπλοκότητα της στοίβας πρωτοκόλλων μπορούν να υπόκεινται σε προσαρμογή, κατά σύμφωνο τρόπο ([94], [96]). Επίσης μπορεί να «τεθεί υπόσχεση» για εξαιρετικά γρήγορη ανακάλυψη σε συνδυασμό με εμπερικλειόμενα (nested networks), ειδικά για λόγους έκτακτης ανάγκης και προσωπικής προστασίας: για παράδειγμα, ένα έξυπνο τηλέφωνο (smartphone) της εποχής 6G θα μπορούσε να αναλάβει απρόσκοπτα τη λειτουργία καθοδήγησης και ελέγχου ενός αυτόνομου αυτοκινήτου, σε περίπτωση βλάβης της μονάδας επί του οχήματος [5].

Υπό μια προοπτική που αφορά στην αρχιτεκτονική, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16, αναμένεται ότι λειτουργίες CP (Control Plane - Επίπεδο Ελέγχου) υποδικτύου και κεντρικού CP θα διευκολύνουν τη διασύνδεση των εμπερικλειόμενων δικτύων ([94], [95], [96]). Η λειτουργία τοπικού επιπέδου ελέγχου θα παρέχεται από το αντίστοιχο υποδίκτυο. Παρόλο που το τοπικό CP θα πρέπει να λειτουργεί εντός του υποδικτύου και ανεξάρτητα από κεντρικό CP στην περίπτωση απουσίας δικτυακής συνδετικότητας, τα δύο CPs θα λειτουργούν κατά τρόπο αρραγή και θα διατηρούν την απαραίτητη κατάσταση με διαφάνεια σε σχέση με τη συσκευή οποτεδήποτε είναι διαθέσιμη η συνδετικότητα του δικτύου. Η συνδετικότητα είναι αδιάκοπη, καθώς η συσκευή μετακινείται από το υποδίκτυο στο δίκτυο (π.χ. όταν ένα drone φεύγει από το αντίστοιχό του σμήνος). Επιπλέον, η ορατότητα του επιπέδου ελέγχου ευρείας περιοχής θα επιτρέπει βελτιστοποίηση των υπηρεσιών που παρέχονται στις συσκευές εντός του υποδικτύου ([94], [95]). Αξίζει να σημειωθεί το ότι τα χαμηλότερα στρώματα της ασύρματης διεπαφής πιθανόν να διαφέρουν από εκείνα του δικτύου 6G. Κατά περίπτωση, τα τοπικά πρωτόκολλα μπορούν να μετατραπούν από εσωτερικά σε εξωτερικά πρωτόκολλα, μέσω πρωτοκόλλου πληρεξουσίου (proxy) ή πύλης πρόσβασης [5].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G



Εικόνα 16: Αρχιτεκτονική διασύνδεσης υποδικτύου [5]

Η ενσωμάτωση αυτών των υποδικτύων στο 6G ως μια μορφή ολιστικής αρχιτεκτονικής έχει κάποια πλεονεκτήματα:

- Το υποδίκτυο 6G θα εξασφαλίζει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση, αξιοπιστία (reliability) και προσαρμοστικότητα/επανατακτικότητα (resilience) [8].
- Οι λειτουργίες ασφάλειας και προσαρμοστικότητας/επανατακτικότητας επιβάλλονται στο χαμηλότερο επίπεδο συσκευών στο υποδίκτυο [8].
- Η εκτέλεση της υπηρεσίας 6G μπορεί δυναμικά να διαχωριστεί μεταξύ εκτέλεσης στο νέφος τα άκρα του δικτύου (edge cloud) ή στη συσκευή που αποτελεί μέρος του υποδικτύου [8].
- Τα βελτιστοποιημένα ενεργειακά υποδίκτυα μικρής εμβέλειας με ασύρματες συσκευές μηδενικής ενέργειας (όπως π.χ. τα αναρτήματα ραδιοσυχνικής αναγνώρισης), θα επιτρέψουν μια διάρκεια ζωής της μπαταρίας μέχρι και για δέκα χρόνια. Ταυτόχρονα, οι εξειδικευμένες περιπτώσεις χρήσης ευρείας περιοχής (π.χ. για παρακολούθηση περιβάλλοντος) πιθανόν να έχουν απαίτηση για συσκευές αισθητήρων με μπαταρία πολύ μεγάλης διάρκειας ζωής [5].

Για να επιτευχθεί ο στόχος των υποδικτύων θα πρέπει να αντιμετωπιστούν οι παρακάτω τρεις προκλήσεις [76]:

- i. Κάθε υποδίκτυο θα πρέπει να συλλέγει και να αναλύει τα τοπικά του δεδομένα, περιλαμβάνοντας αιτήματα χρηστών, ασύρματα περιβάλλοντα, μοτίβα κινητικότητας κτλ., και εν συνεχεία να εκμεταλλεύεται μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης ώστε να αναβαθμιστεί τοπικά και με δυναμικό τρόπο.
- ii. Προβλέπεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των υποδικτύων να διατηρήσει νέο συντονισμό μεταξύ των υποδικτύων, όταν μεταβάλλονται τα τοπικά πρωτόκολλα MAC ή PHY. Μια ενδεχόμενη λύση είναι η υιοθέτηση προσεγγίσεων μάθησης και παιχνιδιών στο 6G, εξασφαλίζοντας έτσι τη σύγκλιση των αναβαθμίσεων των υποδικτύων.

- iii. Η τοπική εξέλιξη του 6G απαιτεί ένα σχετικά σταθερό επίπεδο ελέγχου για υποστήριξη της εξέλιξης στο επίπεδο ενός «δικτύου υποδικτύων». Το επίπεδο ελέγχου του 6G θα πρέπει να αξιολογεί κάθε αναβάθμιση των υποδικτύων και εν συνεχεία σε επίπεδο δικτύου να εφαρμόζει μια διεργασία μάθησης, ώστε να προσδιορίζεται η καλύτερη στρατηγική για το κάθε υποδίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά περιβάλλοντά του και τις συμπεριφορές των χρηστών του.

Τέλος η τοπική εξέλιξη των υποδικτύων ουσιαστικά επιταχύνει την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων στρώματος MAC και φυσικού στρώματος και μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα στα χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενα ραδιοπεριβάλλοντα και στις απαιτήσεις των χρηστών. Οραματιζόμαστε μια ομαλή εξέλιξη από 5G προς το 6G, με τις αναβαθμίσεις σε επίπεδο υποδικτύου [76].

5.5 3D Αρχιτεκτονική δικτύου

Ένας στόχος της αρχιτεκτονικής δικτύου της επόμενης γενιάς είναι η επέκταση του εύρους και του βάθους της επικοινωνιακής κάλυψης. Η τρέχουσα αρχιτεκτονική δικτύου που έχει ως βάση τις παλαιού τύπου επίγειες κυψελοειδείς υποδομές, έχει τα εξής δύο μειονεκτήματα:

- (α) Αδυναμία ανταπόκρισης στα σενάρια επικοινωνίας σε βαθιά θάλασσα και σε μεγάλο υψόμετρο, κάτι που αποτελεί αναπόφευκτη απαίτηση για τις μελλοντικές υπηρεσίες.
- (β) Το κόστος παροχής για τα πυκνά κυψελοειδή δίκτυα είναι «απαγορευτικά ακριβό» για την παροχή συνδετικότητας σε παγκόσμια κλίμακα.

Το 6G αναμένεται να ενσωματώσει μη επίγεια δίκτυα ώστε να παρέχει πλήρη ασύρματη κάλυψη, καλύπτοντας έτσι τα παραπάνω μειονεκτήματα [24].

Το σύστημα 6G στοχεύει στην ενοποίηση επίγειων και εναέριων δικτύων, ώστε να παρέχει επικοινωνιακή υποστήριξη σε κάθετα διευρυμένους χρήστες. Η υλοποίηση του τρισδιάστατου σταθμού βάσης θα γίνεται από δορυφόρους LEOs και από UAVs. Οι 3D συνδέσεις διαφέρουν κατά πολύ από τα παραδοσιακά δίκτυα 2D λόγω της προσθήκης νέων διαστάσεων ως προς το ύψος και τους σχετικούς βαθμούς ελευθερίας. Το σύστημα 6G δύναται να παρέχει οποιαδήποτε απαιτούμενη απόδοση στο έδαφος, στον αέρα, στον ουρανό και σε άλλες περιοχές, να παρέχει εξαιρετικά υψηλό ρυθμό και χαμηλή καθυστέρηση και τέλος να πληροί τις απαιτήσεις ως προς την πυκνότητα των δεδομένων και την υψηλή αξιοπιστία [6].

Επίσης το δίκτυο 6G θα σχεδιάζεται και θα είναι αποκεντρωμένο σύμφωνα με την ενοποίηση των δορυφορικών συστημάτων, των εναέριων δικτύων και των επίγειων επικοινωνιών τόσο για να φιλοξενήσει στο μέλλον επειγόντως απαραίτητες και αναδυόμενες υπηρεσίες (π.χ. πρόβλεψη καταστροφών), όσο και να επιτύχει παγκόσμια κάλυψη και αρραγή πρόσβαση, ακόμα και για την περίπτωση ορεινών και ωκεάνιων περιοχών. Αναμένεται να προκύψουν οφέλη ιδιαίτερα για τη μελλοντική ασύρματη επικοινωνία 6G από το πολυδιάστατο αυτό δίκτυο, καθώς θα αξιοποιούνται πλήρως τα πλεονεκτήματα του δορυφορικού συστήματος, του εναέριου δικτύου και του συστήματος επίγειας επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του αριθμού και των τύπων των αεροσκαφών, των αερόπλοιων και των UAVs, δύναται με τη βοήθεια του σταθμού βάσης

πτήσης⁹¹ (Flight Base Station- FBS) να δημιουργηθεί το δυναμικό δίκτυο για τη βελτίωση της παραδοσιακής στατικής δομής [6].

Στην πανταχού παρούσα κάλυψη των δικτύων 6G υπάρχουν 4 επίπεδα, που είναι τα εξής [63]:

- 1. Επίπεδο διαστημικού δικτύου:** Το επίπεδο διαστημικού δικτύου για την υποστήριξη των ασύρματων διαστημικών υπηρεσιών Διαδικτύου, θα χρησιμοποιεί δορυφόρους πυκνής ανάπτυξης χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO), μέσης τροχιάς (Medium Earth Orbit - MEO) και γεωστατικής τροχιάς (Geostationary Earth Orbit - GEO) [88]. Λόγω του ότι οι δορυφόροι που βρίσκονται σε γεωστατική τροχιά (GEO) βρίσκονται σε υψόμετρο 35.786 km, τούτο έχει σαν αποτέλεσμα την καθυστέρηση μετάδοσης σήματος εφόσον οι κόμβοι έχουν τεράστιες αποστάσεις μεταξύ τους και είναι αδύνατη η ενσωμάτωσή τους με το επίγειο δίκτυο [24]. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη για μη γεωστατικές δορυφορικές τροχιές (non-geostationary satellite - NGSO), που προβλέπεται να παρέχουν υψηλούς δυφιακούς ρυθμούς και παγκόσμια συνδετικότητα χαμηλής λανθάνουσας καθυστέρησης στο Διαδίκτυο [89]. Λαμβάνοντας υπόψη το ότι θα χρειαστεί ακόμα πολύς χρόνος για την ανάπτυξη δορυφόρων NGSO, οι δορυφόροι LEO μπορούν να επιλεγούν ως πιθανή λύση. Το δορυφορικό δίκτυο LEOs με μηχανισμό συνδρομολόγησης λέιζερ και ραδιοσυχνοτήτων θα έχει την δυνατότητα παροχής επικοινωνιών χαμηλότερης λανθάνουσας καθυστέρησης, στις οποίες οι αποστάσεις επικοινωνίας είναι άνω των 3.000 km [63].
- 2. Επίπεδο εναέριου δικτύου:** Το εναέριο δίκτυο μπορεί να χωριστεί στις εξής δύο κατηγορίες. Πλατφόρμα Μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platform - HAP) και Πλατφόρμα Χαμηλού Υψομέτρου (Low Altitude Platform - LAP). Η HAP γενικά λειτουργεί στη στρατόσφαιρα και η LAP λειτουργεί σε ένα υψόμετρο της τάξης μερικών χιλιομέτρων. Η HAP έχει δυνατότητες ευρύτερης κάλυψης και μεγαλύτερη αντοχή, ωστόσο Η HAP επικαλύπτεται με τα δορυφορικά δίκτυα LEOs [63]. Από την άλλη μεριά, τα δίκτυα LAP που βασίζονται σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs), μπορούν να αναπτυχθούν πιο γρήγορα, να αναδιαμορφωθούν με ευελιξία για να ταιριάζουν καλύτερα στο περιβάλλον επικοινωνίας και να παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση σε επικοινωνία μικρής εμβέλειας [24]. Επιπλέον, οι ιπτάμενοι σταθμοί βάσης, όπως είναι τα UAVs, μπορούν να λειτουργήσουν ως κόμβοι αναμετάδοσης για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, προωθώντας έτσι την ενοποίηση επίγειων και διαστημικών δικτύων [63]. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το ασύρματο δίκτυο που είναι βασισμένο σε UAV ως ένα αναπόσπαστο στοιχείο του συστήματος κινητής επικοινωνίας επόμενης γενιάς [24]. Το πιο χρήσιμο και ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των ασύρματων δικτύων UAVs είναι το ότι μπορούν να διευκολύνουν τις κινητές επικοινωνίες σε περιοχές που δεν υπάρχουν οι κατάλληλες υποδομές. Έτσι, ένα πλήρως ενοποιημένο δίκτυο 6G προβλέπεται να έχει πολυστρωματικές αρχιτεκτονικές, συμπεριλαμβάνοντας

⁹¹ Ο σταθμός βάσης πτήσης (FBS) χρησιμοποιείται ως σημειογραφία δήλωσης όλων των τύπων σταθμών βάσης που είτε είναι τοποθετημένοι σε drones/UAVs είτε σε πλατφόρμες που έχουν την ικανότητα να πετούν ή να επιπλέουν ενώ χρησιμεύουν ως ασύρματος σταθμός βάσης. Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: C.T. Cicek, H. Gultekin, B. Tavli, H. Yanikomeroğlu (2018, December): **UAV Base Station Location Optimization for Next Generation Wireless Networks: Overview and Future Research Directions**, *EEE International Conference on Unmanned Vehicle Systems At: Muscat, Oman*, doi: 10.1109/UVS.2019.8658363.

- LAPs που βασίζονται σε UAVs, δορυφόρους GEOs, δορυφόρους LEOs και ετερογενή επίγεια δίκτυα ([63], [90]).
- 3. Επίγαιο Δίκτυο:** Τα επίγεια δίκτυα θα είναι ένα εξαιρετικά πυκνό ετερογενές δίκτυο απαιτώντας την ανάπτυξη X-haul⁹² υψηλής χωρητικότητας, όπου για να αποφευχθεί η απώλεια διαδρομής χρειάζεται να αναπτυχθεί ένα μεγάλος αριθμός από μικρούς BSs. Τα επίγεια δίκτυα θα υποστηρίζουν τη ζώνη μικροκυμάτων, τη ζώνη mmWave, τη ζώνη χαμηλής συχνότητας, και τη ζώνη Terahertz [63].
 - 4. Το υποθαλάσσιο δίκτυο:** Το υποθαλάσσιο δίκτυο έχει ως στόχο την παροχή ευκολιών Διαδικτύου κάτω από ωκεανούς και θάλασσες. Ωστόσο παραμένει ένα πολύ αμφιλεγόμενο θέμα το κατά πόσο θα μπορούσε – ή όχι – να καταστεί μέρος των δικτύων 6G. Το συγκεκριμένο σύστημα δικτύου περιλαμβάνει οπτική και ακουστική επικοινωνία και επικοινωνία ραδιοσυχνότητας. Εντούτοις, η δυσκολία οφείλεται στη μη προβλεψιμότητα του υποβρύχιου περιβάλλοντος, στις προκλήσεις που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν και στους παράγοντες διακινδύνευσης, καθώς οι ιδιότητες διάδοσης του νερού διαφέρουν από αυτές των επίγειων ή εναέριων εδαφών. Επομένως, πολλά ζητήματα δεν έχουν επιλυθεί ακόμα για τα δίκτυα 6G κάτω από το νερό [63].

⁹² Το xHaul αναφέρεται σε δίκτυα μεταφοράς fronthaul, midhaul και οπισθόζευξης (backhaul) που διασυνδέουν τοποθεσίες κυψελών μεταξύ τους, με το κεντρικό δίκτυο και, τελικά, σε κέντρα δεδομένων, όπου φιλοξενείται περιεχόμενο στο οποίο έχει πρόσβαση. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://www.ciena.com/insights/articles/spotlight-on-4G5G-fronthaul-networks.html>.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ 6G

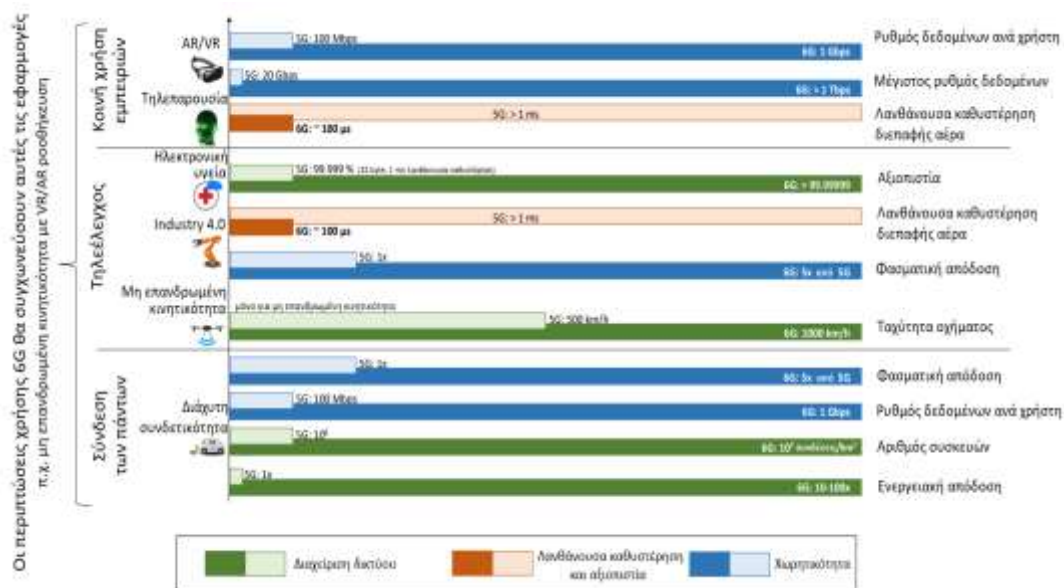
Με την έλευση των προηγμένων τεχνολογιών (όπως π.χ. AI, THz και αστερισμός δορυφόρων μεγάλης κλίμακας), το δίκτυο επικοινωνίας δύναται να εξελιχθεί προς ένα ισχυρότερο και αποτελεσματικότερο σύστημα, ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις των τρεχουσών υπηρεσιών και ενδεχομένως για να προσφέρονται νέες καινοτόμες υπηρεσίες. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τόσο ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης όσο και προτεινόμενα νέα σενάρια χρήσης, σύμφωνα με την τρέχουσα διεθνή βιβλιογραφία [13].

6.1 Περιπτώσεις Χρήσης

Τα διδάγματα που αντλήθηκαν από τη συνεχή εξέλιξη των συστημάτων 5G, μπορούν να χρησιμεύσουν ως μια ενδεικτική «βάση αναφοράς» για τις περιπτώσεις χρήσης που θα εξυπηρετηθούν καλύτερα από το 6G [16]. Το 5G παρουσιάζει διάφορες μορφές εξισορροπήσεων-αντισταθμισμάτων (trade-offs) ως προς την ενέργεια, την πολυπλοκότητα, τη λανθάνουσα καθυστέρηση, το υλισμικό, το κόστος, τη διεκπεραιωτικότητα και την αξιοπιστία από άκρο σε άκρο. Για παράδειγμα, οι απαιτήσεις της ευρυζωνικής κινητής πρόσβασης και των εξαιρετικά αξιόπιστων, χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνιών αντιμετωπίζονται με διαφορετικές διαρθρώσεις των συναφών δικτύων 5G. Αντιθέτως, το 6G θα αναπτυχθεί για την από κοινού ανταπόκρισή του σε «αυστηρές» δικτυακές απαιτήσεις (π.χ. χαμηλή καθυστέρηση, εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, απόδοση, χωρητικότητα) με «ολιστικό» τρόπο, ιδίως ενόψει του προβλεπόμενου κοινωνικού, οικονομικού, τεχνολογικού και περιβαλλοντικού πλαισίου της εποχής του 2030 [4]. Έτσι το όραμα των περιπτώσεων χρήσης 5G «διαταράσσεται» από αρκετές νέες εφαρμογές, με αποτέλεσμα να χρειαζόμαστε νέες περιπτώσεις χρήσης [20]. Γενικά οι περιπτώσεις χρήσης αναφέρονται στα βασικά χαρακτηριστικά του 5G, ήτοι eMBB, mMTC και URLLC. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται επισκόπηση των επιμέρους χαρακτηριστικών ορισμένων βασικών περιπτώσεων χρήσης, οι οποίες σήμερα θεωρείται ότι πως αντιπροσωπεύουν τις μελλοντικά επερχόμενες υπηρεσίες 6G εξαιτίας της συμπληρωματικότητάς τους και της γενικότητάς τους [4].

Η Εικόνα 17 παρέχει μια ολοκληρωμένη άποψη για ορισμένες βασικές περιπτώσεις χρήσης (AR/VR, τηλεπαρουσία, ηλεκτρονική υγεία, Industry 4.0, μη επανδρωμένη κινητικότητα και διάχυτη συνδετικότητα) όσον αφορά στους διαφορετικούς Βασικούς Δείκτες Απόδοσης (KPIs) [4].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G



Εικόνα 17: Αναπαράσταση πολλαπλών KPI περιπτώσεων χρήσης 6G, μαζί με τις βελτιώσεις σε σχέση με τα δίκτυα 5G [4]

6.1.1 Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR) και Εικονική Πραγματικότητα (VR)

Τα συστήματα 4G παρείχαν την δυνατότητα του βίντεο μέσω ασύρματης σύνδεσης που ήταν μια από τις πιο απαιτητικές, για τα δεδομένα, εφαρμογές της εποχής εκείνης. Η αυξανόμενη χρήση υπηρεσιών ροοθήκευσης (streaming) και πολυμέσων (multimedia) δικαιολογεί την υιοθέτηση νέου φάσματος συχνοτήτων (δηλαδή mmWave) ώστε να παρέχονται εγγυήσεις μεγαλύτερης χωρητικότητας στο 5G. Το 5G θα «ενεργοποιήσει» την πρώιμη υιοθέτηση AR/VR, καθώς η ευκαιρία για τη διάθεση πολλαπλών Gbps θα προσελκύσει νέες εφαρμογές οι οποίες με τη σειρά τους θέτουν απαιτήσεις για διάθεση/χρήση περισσότερων δεδομένων σε σχέση με το διδιάστατο πολυμεσικό περιεχόμενο. Εν συνεχεία, εκτιμάται ότι ο πολλαπλασιασμός των εφαρμογών AR/VR θα εξαντλήσει το φάσμα 5G απαιτώντας χωρητικότητα συστήματος μεγαλύτερη του 1 Tbps, σε αντίθεση με τον καθορισμένο στόχο των 20 Gbps για το 5G. Επιπλέον το AR/VR δεν μπορεί να συμπιεστεί (καθώς η κωδικοποίηση και η αποκωδικοποίηση είναι μια χρονοβόρα διαδικασία) ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις λανθάνουσας καθυστέρησης που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση του χρήστη σε πραγματικό χρόνο σε ένα «καθηλωτικό περιβάλλον»⁹³ (“immersive environment”) και επομένως ο ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη χρειάζεται να «αγγίζει» την τάξη των Gbps, σε αντίθεση με το 5G που θέτει πιο χαλαρό στόχο (της τάξης των 100 Mbps) [4].

Οι τεχνολογίες AR/VR επηρεάζουν σημαντικά πολλούς ερευνητικούς τομείς και παρέχουν νέες περιπτώσεις χρήσης όπως χειρουργική από απόσταση, MMI (Man-Machine Interface -

⁹³ Τα «καθηλωτικά περιβάλλοντα» είναι προσομοιώσεις που γεμίζουν το οπτικό πεδίο του χρήστη, δίνοντας την αίσθηση της φυσικής παρουσίας. Η εικονική πραγματικότητα προσφέρει εμβάπτιση από την άποψη του ατόμου, ενώ τα «καθηλωτικά δωμάτια» φέρνουν πολλούς θεατές στην ίδια προσομοίωση. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://teecom.com/what-are-immersive-environments/>

Διεπαφή Ανθρώπου-Μηχανής), απτική τεχνολογία και τεχνολογία παιχνιδιών [107]. Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης θα χρειαστούν διαφορετικό επίπεδο λανθάνουσας καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Παρά το γεγονός πως ορισμένες από τις κατηγορίες υπηρεσιών 5G (όπως π.χ. URLLC) παρέχουν επικοινωνίες με υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση, ορισμένες εξαιρετικά ευαίσθητες περιπτώσεις χρήσης (όπως π.χ. η εξ αποστάσεως χειρουργική επέμβαση) θα χρειαστούν λανθάνουσα καθυστέρηση μικρότερη από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου (millisecond), κάτι που δεν είναι ακόμα εφικτό στο δίκτυο 5G. Ως εκ τούτου, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων λανθάνουσας καθυστέρησης από άκρο σε άκρο θα χρειαστεί το σύστημα 6G [77].

6.1.2 Ολογραφική Επικοινωνία

Αυτή η περίπτωση χρήσης βασίζεται σε μια απομακρυσμένη σύνδεση με εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια [20]. Η ολογραφική τηλεπαρουσία θα αποτελέσει μια από τις πιο κρίσιμες εφαρμογές του 6G τόσο για την κοινωνική όσο και για την επαγγελματική επικοινωνία [100]. Η ολογραφική επικοινωνία είναι μια εντατική, από πλευράς δεδομένων, εφαρμογή και δεν είναι αναμενόμενο για το 5G το πως θα μπορέσει να αντιμετωπίσει πολλές ολογραφικές επικοινωνίες με απόλυτη αξιοπιστία [77].

Αν και η εικονική πραγματικότητα (VR) και η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) έχουν ωφεληθεί ιδιαίτερα από τις περιπτώσεις των eMBB και το URLLC (που αμφότερα εισήχθησαν ως μέρος του 5G), εντούτοις υπάρχουν πολλές εφαρμογές που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν επαρκώς ακόμα και με συνδυασμό των VR και AR. Τέτοιες είναι η προηγμένη υγειονομική περίθαλψη (με απομακρυσμένη διάγνωση και χειρουργική επέμβαση), η επαίσθηση υψηλής ανάλυσης για εξ αποστάσεως εξερεύνηση και η σχεδόν πραγματική (near-real) βιντεοδιάσκεψη ατόμου. Έτσι η ολογραφική τηλεμεταφορά αναγνωρίστηκε ως ο φυσικός διάδοχος των λύσεων που βασίζονται σε VR και AR. Η ολογραφική τηλεμεταφορά προσφέρει μια πραγματικά καθηλωτική εμπειρία λειτουργώντας σε έναν πραγματικό τρισδιάστατο χώρο και αξιοποιώντας και τις πέντε αισθήσεις (όραση, ακοή, όσφρηση και γεύση) [16].

Η διαδραστική ολογραφική ικανότητα στο δίκτυο θα απαιτήσει έναν συνδυασμό υψηλότερων ρυθμών δεδομένων terabit (έως 4 Tb/s) και εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (της τάξης των submilliseconds) ([23], [77]). Το πρώτο προκύπτει λόγω του ότι ένα ολόγραμμα αποτελείται από πολλές τρισδιάστατες εικόνες, ενώ το δεύτερο λόγω του γεγονότος ότι προστίθεται παράλλαξη για να μπορεί ο χρήστης να αλληλεπιδρά με την εικόνα, η οποία επίσης αλλάζει με τη θέση του θεατή. Αυτό είναι κρίσιμο ώστε να παρέχεται μια τρισδιάστατη εμπειρία⁹⁴ στον χρήστη [23]. Τα αληθινά ολογράμματα μπορούν να ικανοποιήσουν με «γυμνό» μάτι και όσο το δυνατόν πιο φυσικά όλες τις οπτικές ενδείξεις παρατήρησης τρισδιάστατων αντικειμένων, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά τρισδιάστατα βίντεο που χρησιμοποιούν διόφθαλμη παράλλαξη [13].

6.1.3 Ηλεκτρονική Υγεία

Το 6G θα φέρει την επανάσταση στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, εξαλείφοντας τα χρονικά και χωρικά εμπόδια μέσω εξ αποστάσεως χειρουργικής επέμβασης και διασφαλίζοντας βελτιστοποιήσεις ροής εργασίας υγειονομικής περίθαλψης [4]. Η εγγύηση

⁹⁴ Συγκεκριμένα, ένα ανεπεξέργαστο ολόγραμμα χωρίς καμία συμπίεση, με χρώματα, πλήρη παράλλαξη και 30 fps θα απαιτούσε ρυθμό δεδομένων 4,32 Tbps σε μια τρισδιάστατη ολογραφική οθόνη [4].

των υπηρεσιών ηλεκτρονικής υγείας θα αξιώσει ικανοποιητικές απαιτήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS), όπως π.χ. αξιόπιστη επικοινωνία (99,99999%), εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (<1 ms) και ευρωστία κινητικότητας [77].

Η επιτυχία των λύσεων απομακρυσμένης υγειονομικής περίθαλψης εξαρτάται πρωτίστως, τόσο από την ποιότητα, όσο και από τη διαθεσιμότητα της συνδετικότητας. Όσον αφορά στην ποιότητα συνδετικότητας, το 6G θα οδηγήσει στην υψηλότερη δυνατή ποιότητα ασύρματων επικοινωνιών μέσω της χρήσης βασικών τεχνολογιών ενεργοποίησης (π.χ. επικοινωνίες THz και λύσεις αυτοματισμού δικτύου), εστιάζοντας σε πολύ υψηλή απόδοση με εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση. Όσον αφορά στη διαθεσιμότητα συνδετικότητας, το Διαδίκτυο Διαστημικών Πραγμάτων⁹⁵ (Internet of Space Things - IoST), θα διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στην παροχή διάχυτης συνδετικότητας, ενισχύοντας έτσι την διαθεσιμότητα λύσεων για απομακρυσμένη υγειονομική περίθαλψη. Επιπλέον, προβλέπεται ότι στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, η πρόοδος προς το 6G και πέραν αυτού δεν θα χρησιμεύσει μόνο ως λύση συνδετικότητας, αλλά θα διαδραματίσει επίσης ζωτικό ρόλο στη διάγνωση και θεραπεία ασθενειών [16].

6.1.4 Industry 4.0 και Ρομποτική

Η εποχή του 6G θα περατώσει τον μετασχηματισμό του Industry 4.0, δηλαδή τον ψηφιακό μετασχηματισμό των παραδοσιακών παραγωγικών και βιομηχανικών διαδικασιών, μέσω κυβερνητικών-φυσικών συστημάτων και συστημάτων IoT [77]. Με την υπέρβαση των ορίων μεταξύ πραγματικού εργοστασίου και κυβερνητικού υπολογιστικού χώρου, θα καταστεί δυνατή η διάγνωση, η συντήρηση, η λειτουργία και οι άμεσες επικοινωνίες μηχανών με βάση το Διαδίκτυο κατά τρόπο οικονομικά τελέσφορο, ευέλικτο και αποδοτικό. Ο αυτοματισμός θέτει τις δικές του απαιτήσεις αναφορικά με όρους αξιόπιστης και ισόχρονης επικοινωνίας, με εντασσόμενο το 6G για να προταθούν κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης. Για παράδειγμα, ο βιομηχανικός έλεγχος απαιτεί λειτουργίες πραγματικού χρόνου με εγγυημένο τρόπο φάσης καθυστέρησης (delay jitter) τάξης μs και με μέγιστους ρυθμούς δεδομένων τάξης Gbps για βιομηχανικές εφαρμογές AR/VR (π.χ. εκπαίδευση, έλεγχος) [4].

Ο κεντρικός στόχος του Industry 4.0 θα είναι να μειωθεί η ζήτηση για άμεση ανθρώπινη παρέμβαση στις κατασκευαστικές πρακτικές, μέσω αυτόματων συστημάτων ελέγχου και δικτύων και επικοινωνιακών συστημάτων. Έτσι το 6G επιδιώκεται να πληροί αυστηρούς δείκτες απόδοσης (KPIs) και απαιτήσεις, όπως είναι η αξιοπιστία (δηλαδή αρκετά πάνω από $1-10^{-9}$), η πολύ χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (δηλαδή κάτω από 1 ms) και οι πολλαπλές συνδεδεμένες ζεύξεις ([77], [101]).

Επιπλέον αναμένεται πως το δίκτυο 6G μπορεί να παρέχει εξαιρετική βοήθεια για συνδεδεμένα ρομποτικά και αυτόνομα συστήματα, όπως είναι οι υπηρεσίες παράδοσης UAV, τα αυτο-διοικούμενα (self-governing) σμήνη drones, το ενοποιημένο δίκτυο οχημάτων αέρος-εδάφους (Air-Ground Integrated Vehicular Network - AGVN) και τα αυτόνομα αυτοκίνητα. Το 6G θα παράσχει τη δυνατότητα σε αυτόματα οχήματα να έχουν πιο ενεργή

⁹⁵ Το Διαδίκτυο των Διαστημικών Πραγμάτων /CubeSats (IoST) είναι ένα καινοτόμο κυβερνο-φυσικό σύστημα που εκτείνεται στο έδαφος, τον αέρα και το διάστημα. Το IoST επεκτείνει τις λειτουργίες του παραδοσιακού IoT, παρέχοντας όχι μόνο ένα πάντα διαθέσιμο δορυφορικό δίκτυο οπισθόζευξης (backhaul), αλλά και συνεισφέροντας σε πραγματικό χρόνο δορυφορικές πληροφορίες, εκτελώντας ενσωμάτωση επίγειων δεδομένων και δορυφορικών πληροφοριών για την ενεργοποίηση νέων εφαρμογών. Για περισσότερες σχετικές πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://ianakyildiz.com/bwn/projects/iost/index.html>

συμμετοχή στην καθημερινή ζωή, στη βιομηχανία και τις μεταφορές. Ειδικότερα, το 6G θα συμβάλλει στην ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας και σε υπηρεσίες των αυτόνομων οχημάτων [77].

6.1.5 Μη Επανδρωμένη Κινητικότητα

Αυτή η περίπτωση χρήσης αφορά στα πλήρως αυτόνομα συνδεδεμένα οχήματα που προσφέρουν πλήρη μη επανδρωμένη κινητικότητα, ασφαλή οδήγηση, έξυπνη ηλεκτρονική ψυχαγωγία και βελτιωμένη διαχείριση της κίνησης [20].

Τα αυτόνομα οχήματα και τα UAVs είναι μερικά από τα πολλά υποσχόμενα κυβερνο-φυσικά συστήματα που υπάρχουν σήμερα. Η λειτουργία αυτών των αυτόνομων συστημάτων χαρακτηρίζεται από την ανταλλαγή μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων μεταξύ των επιμέρους κόμβων (δηλαδή οχημάτων και UAVs), που σχετίζονται με χαρτογράφηση εδάφους υψηλής ανάλυσης και σε πραγματικό χρόνο, με βελτιστοποίηση διαδρομής και με πληροφορίες κίνησης και ασφάλειας. Οι μεγάλοι όγκοι δεδομένων που προκύπτουν, πρέπει να παραδίδονται εντός αυστηρών προθεσμιών και χωρίς σφάλματα, ενώ αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι εν λόγω κόμβοι συνήθως λειτουργούν με ταχύτητες άνω των 100 km/h [16].

Η σύνδεση αυτόνομων οχημάτων απαιτεί υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας (πάνω από 99,99999%) και χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (κάτω από 1 ms) ακόμα και σε σενάρια εξαιρετικά υψηλής κινητικότητας (μέχρι 1000 km/h), ώστε να παρέχονται εγγυήσεις για την ασφάλεια των επιβατών, μια απαίτηση που είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί με τις υπάρχουσες τεχνολογίες των συστημάτων 5G [4].

Επιπλέον ο αυξανόμενος αριθμός αισθητήρων ανά όχημα θα απαιτήσει αυξανόμενους ρυθμούς δεδομένων (με Terabytes που παράγονται ανά ώρα οδήγησης [102]) πέρα από την τρέχουσα χωρητικότητα του δικτύου. Επίσης τα σμήνη drones θα χρειαστούν βελτιωμένη χωρητικότητα για την επέκταση της Διαδικτυακής συνδετικότητας. Έτσι το 6G θα «ανοίξει το δρόμο» για τα συνδεδεμένα οχήματα μέσω της εξέλιξης στο υλισμικό, στο λογισμικό και στις νέες λύσεις συνδετικότητας [4].

6.1.6 Διάχυτη Συνδετικότητα (Pervasive Connectivity)

Η κίνηση των κινητών συσκευών έχει προβλεφθεί να αυξηθεί 3 φορές από το 2016 έως το 2021 [4]. Το 6G θα συνδέσει προσωπικές συσκευές, οχήματα, αισθητήρες (για την υλοποίηση του παραδείγματος της έξυπνης πόλης) κτλ. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την καταπόνηση των ήδη συμφορημένων δικτύων, τα οποία δεν θα παρέχουν πλέον συνδετικότητα σε κάθε συσκευή (μολονότι πληρούνται οι απαιτήσεις της Εικόνας 17). Επιπλέον τα δίκτυα 6G θα απαιτούν πολύ υψηλότερη ενεργειακή απόδοση (10-100 φορές σε σχέση με το 5G) για να είναι εφικτή η ανάπτυξη κλιμακοθετήσιμων και χαμηλούς κόστους λύσεων, με χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και καλύτερη κάλυψη [4].

Ενώ το 80% της κίνησης κινητής τηλεφωνίας δημιουργείται συνήθως σε εσωτερικούς χώρους, τα κυψελοειδή δίκτυα 5G που αναπτύσσονται κυρίως σε εξωτερικούς χώρους και ενδεχομένως να λειτουργούν σε φάσμα mmWave, δύσκολα θα παρέχουν συνδετικότητα σε εσωτερικούς χώρους (λόγω του ότι τα ραδιοσήματα είναι δύσκολο να διεισδύσουν σε διηλεκτρικά υλικά (π.χ. σκυρόδεμα)). Αντιθέτως, τα δίκτυα 6G θα παρέχουν αρραγή (seamless) και διάχυτη συνδετικότητα μια ποικιλία διαφορετικών πλαισίων τα οποία

προσαρμόζονται στις αυστηρές απαιτήσεις QoS σε σενάρια εσωτερικού και εξωτερικού χώρου και με μια επανατακτική υποδομή, ενήμερη και ως το κόστος [4].

Ενώ η συνδετικότητα, τόσο κοντά στη Γη, όσο και στο απώτερο διάστημα είναι ακόμα «εκκολλαπτόμενη» (nascent) στο 5G, υπάρχει μια ευρεία ποικιλία από περιπτώσεις χρήσης οι οποίες κυμαίνονται από ραδιοαστρονομία και τηλε-επαίσθηση έως πλοήγηση και οπισθόζευξη (backhauling) που θα έχουν όφελος από τη διάχυτη συνδεσιμότητα την οποία προσφέρει το 6G. Συγκεκριμένα, τέτοιου είδους εφαρμογές περιλαμβάνουν την ιχνηλάτηση εμπορευμάτων, την επίγεια κυψελοειδή εκφόρτωση, την περιβαλλοντική παρακολούθηση και τον συντονισμό UAVs μεγάλης εμβέλειας. Έτσι η βασική τεχνολογία ενεργοποίησης που θα χρησιμεύσει για συνδετικότητα πέρα από τη Γη είναι το Διαδίκτυο των Διαστημικών Πραγμάτων (IoST), προωθώντας την εμβέλεια των συστημάτων 6G [16].

6.2 Σενάρια Χρήσης

Το σύστημα 5G έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανταποκρίνεται σε μεγαλύτερου εύρους απαιτήσεις QoS, οι οποίες προκύπτουν από μια ευρεία ποικιλία κάθετων εφαρμογών και υπηρεσιών που δεν είχαν αντιμετωπίσει ποτέ οι συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας στις προηγούμενες γενιές. Σημειώνεται ότι για τον καθορισμό του 5G προτάθηκαν αρχικά τρία σενάρια χρήσης από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R M.2083⁹⁶ το 2015 [13], ως εξής;

- Η **βελτιωμένη κινητή ευρυζωνική πρόσβαση** (enhanced Mobile Broadband - **eMBB**) απευθύνεται σε ανθρωποκεντρικές εφαρμογές για πρόσβαση υψηλού ρυθμού δεδομένων σε κινητές υπηρεσίες, πολυμεσικό περιεχόμενο και δεδομένα. Το σενάριο αυτό αναπτύσσει νέες υπηρεσίες και εφαρμογές μέσω έξυπνων συσκευών (όπως είναι π.χ. τα έξυπνα τηλέφωνα, τα γραφικά πινακίδια (tablets) και οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές). Δίνεται έμφαση στην κάλυψη ευρείας περιοχής ώστε να παρέχεται αρραγής πρόσβαση και υψηλή χωρητικότητα σε hot spots [13]. Το 5G έχει την ικανότητα εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού συσκευών, δηλαδή μπορεί να υποστηρίξει εκατομμύρια ανά σταθμότοπο, ενώ το 4G μπορεί να υποστηρίξει μόνο μερικές εκατοντάδες συσκευές ανά σταθμότοπο [98].
- Οι **εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης** (Ultra-Reliable Low-Latency Communications - **URLLC**) αποτελούν μια ανατρεπτική προώθηση σε σύγκριση με τα συστήματα της προηγούμενης γενιάς (4G/4G+) που εστιάζονται σε ανθρώπινους χρήστες [13]. Η περίπτωση URLLC αναφέρεται σε επικοινωνίες υψηλής αξιοπιστίας, χαμηλής λανθάνουσας καθυστέρησης και υψηλής διαθεσιμότητας για κρίσιμα σενάρια, όπως εξ' αποστάσεως χειρουργική επέμβαση, IIoT (Industrial IoT - βιομηχανικό IoT). Για πολλές συσκευές, οι επικοινωνίες URLLC θα συγκροτήσουν απαραίτητο σενάριο των μελλοντικών επικοινωνιακών συστημάτων και δικτύων [103]. Επίσης δίνεται η δυνατότητα για κρίσιμης σημασίας συνδετικότητα για νέες εφαρμογές, όπως π.χ. Industry 4.0, έξυπνο πλέγμα και αυτόματα οχήματα, που θέτουν αυστηρές απαιτήσεις αξιοπιστίας, λανθάνουσας καθυστέρησης και διαθεσιμότητας [13]. Συγκεκριμένα οι URLLC

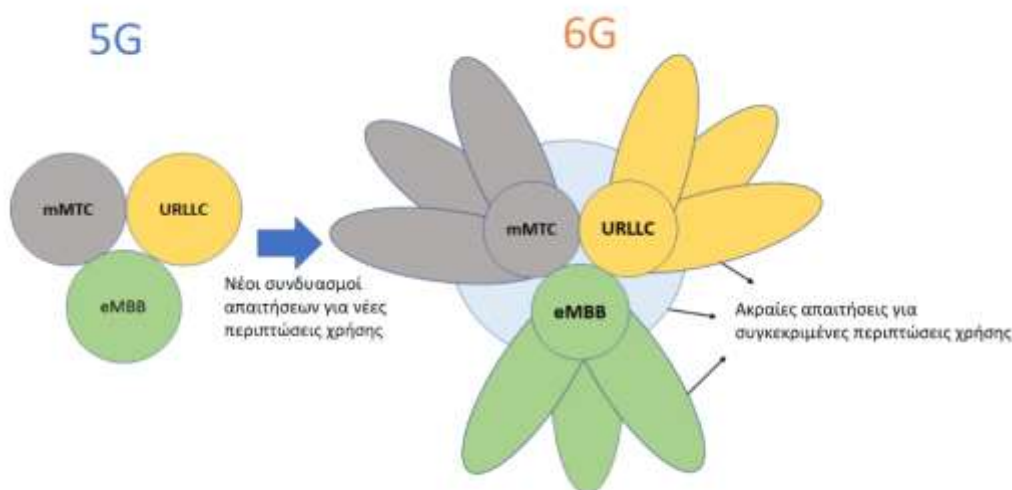
⁹⁶ Για περισσότερα στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083>

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

επιτρέπουν εξαιρετικά γρήγορη ανταλλαγή δεδομένων, όπως είναι η κοινή χρήση αισθητήρων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, καθιστώντας έτσι δυνατά τόσο τα ημιαυτόνομα όσο και τα πλήρως αυτόνομα οχήματα [98].

- **Οι μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (massive Machine Type Communications - mMTC)** υποστηρίζουν πυκνή συνδετικότητα με έναν πολύ μεγάλο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών που αναπτύσσονται συνήθως σε σενάρια IoT, που λειτουργούν με ελάχιστη ισχύ και με μπαταρίες που διαρκούν πάνω από 10 χρόνια [98]. Οι συσκευές, όπως π.χ. οι αισθητήρες, είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά συνήθως μεταδίδουν μικρό όγκο δεδομένων με ανοχή στην καθυστέρηση [13]. Τέλος το mMTC παρέχει υποστήριξη για περισσότερες από 1 εκατομμύριο συνδεδεμένες συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο [98].

Εντούτοις τα σενάρια χρήσης 5G δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις τεχνικές απαιτήσεις των προαναφερθέντων περιπτώσεων χρήσης 6G. Για παράδειγμα, ένας χρήστης που φοράει ελαφριά γυαλιά VR για να παίξει διαδραστικά – εμβυθιστικά (interactively-immersive) παιχνίδια, απαιτεί τόσο εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης όσο και χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση. Επίσης τα ιπτάμενα drones ή τα αυτόνομα αυτοκίνητα στο δρόμο χρειάζονται πανταχού παρούσα συνδετικότητα υψηλής διεκπεραιωτικότητας, υψηλής αξιοπιστίας και χαμηλής λανθάνουσας καθυστέρησης. Τα παρακάτω προτεινόμενα σενάρια αποτελούν μια βελτίωση ή επέκταση των σεναρίων 5G, ενώ επίσης προτείνεται μια ολιστική και λογική μεθοδολογία για τον καθορισμό των σεναρίων 6G, επεκτείνοντας την εμβέλεια των τρεχουσών σεναρίων χρήσης [13]. Η παρακάτω Εικόνα 18 περιγράφει τις διαστάσεις της «μετατόπισης» από το 5G προς το 6G [97].



Εικόνα 18: Υπόδειγμα «μετατόπισης» από το 5G προς το 6G [97]

Τρία είδη βασικών υπηρεσιών 6G προσδιορίζονται για βελτιωμένη απόδοση σε συνδυασμό με 5G και τα οποία είναι [99]:

- (α) Βελτιωμένο eMBB + URLLC.

(β) Βελτιωμένο URLLC + mMTC.

(γ) Βελτιωμένο eMBB + mMTC.

Έτσι προτείνονται τρία νέα σενάρια χρήσης για να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις των προαναφερθεισών περιπτώσεων χρήσης και που καλύπτουν τις επικαλυπτόμενες περιοχές των σεναρίων 5G, διαμορφώνοντας έτσι ένα πλήρες σύνολο [13].

6.2.1 Βελτιωμένο eMBB και URLLC

Από την συνύπαρξη των υπηρεσιών eMBB και URLLC μερικές από τις κατηγορίες υπηρεσιών που αναδεικνύονται και έχουν μεταξύ τους πολλά κοινά χαρακτηριστικά, είναι οι εξής:

- **ULBC** (Ultra-Reliable Low-Latency Broadband Communication - Εξαιρετικά Αξιόπιστη Χαμηλής Καθυστέρησης Ευρυζωνική Επικοινωνία) [13].
- **MBLL** (Mobile Broad Bandwidth and Low Latency - Κινητή Ευρεία Ευρυζωνική Πρόσβαση και Χαμηλή Λανθάνουσα Καθυστέρηση) [99].
- **MBRLLC** (Mobile Broadband Reliable Low Latency Communication - Κινητή Ευρυζωνική Αξιόπιστη Επικοινωνία Χαμηλής Καθυστέρησης) [3].
- Βελτιωμένη Ευρυζωνική Κινητή Πρόσβαση **URLLC** (Enhanced Mobile Broadband URLLC) [77].
- **eMBB-Plus** (enhanced Mobile Broadband Plus - Ενισχυμένη Βελτιωμένη Κινητή Ευρυζωνική Πρόσβαση) [15].

Η ULBC υποστηρίζει εφαρμογές που απαιτούν όχι μόνο URLLC αλλά και εξαιρετικά υψηλή διεκπεραιωτικότητα, όπως π.χ. καθηλωτικό (immersive) παιχνίδι βασισμένο στο HTC [13]. Η MBLL και η MBRLLC επιτρέπουν στα συστήματα 6G να παρέχουν οποιαδήποτε απαιτούμενη απόδοση εντός του χώρου ρυθμού-αξιοπιστίας-λανθάνουσας καθυστέρησης[3].

Το όραμα των νέων αυτών κατηγοριών Βελτιωμένης Ευρυζωνικής Κινητής Τηλεφωνίας URLLC, MBLL και MBRLLC είναι να δώσουν τη δυνατότητα στο 6G ώστε να υποστηρίξει οποιαδήποτε σενάρια υπόκεινται σε απαιτήσεις υψηλού ποσοστού αξιοπιστίας λανθάνουσας καθυστέρησης. Τούτο διότι ορισμένες εφαρμογές (όπως π.χ. AR, VR, ολογραφικές συνεδριάσεις ([77], [99], [13]), ασύρματο BCI ή CRAS [3], απτικό Διαδίκτυο, πολυαισθητηριακή εμπειρία και διάχυτη νοημοσύνη [13]), θέτουν απαιτήσεις για:

- Υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (ρυθμός κορυφής κατερχόμενης ζεύξης >1 Tbps, και ρυθμός εμπειρίας χρήστη >10 Gbps) για βιντεορρεύματα υψηλής ποιότητας και μεγάλους όγκους διαδραστικών οδηγιών.
- Χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (π.χ. διαδραστικές οδηγίες πραγματικού χρόνου).
- Επικοινωνίες υψηλής αξιοπιστίας.

Επιπλέον οι απαιτήσεις αυτές πρέπει να πληρούνται σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας (>1000 Km/h), όπως είναι τα αεροπορικά και τα θαλάσσια ταξίδια ([77], [99]).

Η ενεργειακή απόδοση είναι κεντρικής σημασίας τόσο για το MBRLLC όσο και για το URLLC, όχι μόνο λόγω της επίπτωσής της στην αξιοπιστία και στην ταχύτητα, αλλά και λόγω της περιορισμένης φύσης των συσκευών 6G σε πόρους ([3], [77]).

Η eMBB-Plus στο 6G θα είναι ο διάδοχος του eMBB στο 5G, που εξυπηρετεί τις συμβατικές κινητές επικοινωνίες με πολύ υψηλότερες απαιτήσεις και πρότυπα. Επίσης θα παρέχεται στους συνδρομητές πρόσθετη και οικονομικά προσιτή λειτουργικότητα, για παράδειγμα ακριβής εντοπισμός θέσης σε εσωτερικούς χώρους και παγκόσμια συμβατή σύνδεση μεταξύ ποικίλων λειτουργικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας [15].

Σε σχέση με το eMBB και το URLLC στο 5G, οι προβλεπόμενες κατηγορίες υπηρεσιών Βελτιωμένης Κινητής Ευρυζωνικής Πρόσβασης URLLC και eMBB-plus, θα πρέπει να έχουν την ικανότητα βελτιστοποίησης των συστημάτων κινητής επικοινωνίας σχετικά με τη διαδικασία μεταπομπής, με τις παρεμβολές και με τη μετάδοση/επεξεργασία μεγάλων δεδομένων ([77], [15]).

Επιπλέον θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η ασφάλεια και το απόρρητο όσον αφορά στην βελτιωμένη ευρυζωνική υπηρεσία επικοινωνίας URLLC για κινητά και eMBB-Plus ([77], [15]).

6.2.2 Βελτιωμένο uRLLC + mMTC

Το 6G θα πρέπει να αυξήσει το μέγεθος της υπηρεσίας 5G URLLC σε μαζική κλίμακα, οδηγώντας έτσι σε νέα κατηγορία υπηρεσιών που συνδυάζει το 5G URLLC με το κλασικό mMTC [77]. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένες νέες κατηγορίες υπηρεσιών που προκύπτουν από την συγχώνευση αυτή και είναι οι εξής:

- **mULC** (massive Ultra-Reliable Low-Latency Communication - Μαζική Εξαιρετικά Αξιόπιστη Επικοινωνία Χαμηλής Καθυστέρησης) [13].
- **mURLLC** (massive URLLC - Μαζική Υπηρεσία URLLC) [20].
- **mLLMT** (massive Low Latency Machine Type - Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής Μαζικής Χαμηλής Καθυστέρησης) [99].
- **SURLLC** (Secure Ultra-Reliable Low-Latency Communications - Ασφαλείς Εξαιρετικά Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστέρησης) [15].

Η mULC θα διευκολύνει την ανάπτυξη μαζικών αισθητήρων και ενεργοποιητών κάθετων βιομηχανιών [13].

Η mURLLC δημιουργήθηκε από την ανάγκη του 6G για κλιμάκωση των κλασικών URLLC σε όλη τη διάσταση της συσκευής [3], οδηγώντας σε νέες υπηρεσίες που ουσιαστικά συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά URLLC και mMTC του 5G. Η περίπτωση mURLLC δηλώνει εφαρμογές IoE βασισμένες σε κλιμακοθέτηση (που εξαρτάται από την εφαρμογή) των κλασικών URLLC [20]. Η περίπτωση mURLLC δημιουργεί έναν ισολογισμό (tradeoff) αξιοπιστίας (reliability) - λανθάνουσας καθυστέρησης (latency) - κλιμακοθετησιμότητας (scalability), επιβάλλοντας μια μείζων εκφυγή από τη σχεδίαση δικτύου που βασίζεται σε «μέσο όρο» (όπως π.χ. μέσος όρος απόδοσης/καθυστέρησης) ([3], [20]). Αντίθετα, είναι απαραίτητο ένα πλαίσιο βασισμένο σε αρχές και κλιμακοθετησιμότητα που να λαμβάνει υπόψη την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, το μέγεθος του πακέτου, την αρχιτεκτονική, την τοπολογία (σε όλη την πρόσβαση, το άκρο και τον πυρήνα του δικτύου) και τη λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα ([3], [104]). Παραδείγματα mURLLC είναι τα έξυπνα εργοστάσια και τα έξυπνα πλέγματα, που απαιτούν επικοινωνία με εξαιρετική αξιοπιστία και χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση. Επιπλέον, αναμένεται ένας τεράστιος αριθμός κόμβων (πάνω από $10^6/\text{km}^2$) για έξυπνα εργοστάσια και έξυπνα πλέγματα με δυνατότητα κυβερνο-φυσικού συστήματος στο μέλλον [20].

Η mMTC θα προσελκύσει μεγάλη προσοχή για χρήση στο μεγάλης κλίμακας βιομηχανικό IoT (IIoT) με εφαρμογές όπως η έξυπνη κατασκευή και η αυτόματη μεταφορά. Αυτές οι εφαρμογές θα απαιτούν μαζική συνδετικότητα για επικοινωνίες μεταξύ του προσωπικού, των αισθητήρων και των ενεργοποιητών, αλλά και χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση για την αντιμετώπιση των συχνών αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των συσκευών [99].

Οι URLLC στο 6G (οι οποίες συνιστούν αναβάθμιση των χαρακτηριστικών URLLC και mMTC στο 5G) πρέπει να παρέχουν ταυτόχρονα χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση (λιγότερο από 0,1 ms [105]), υψηλή αξιοπιστία (υψηλές από 9,9999999%). Πρόσθετη απαίτηση του μαζικού URLLC είναι ο υψηλός ρυθμός δεδομένων, η μαζική συνδετικότητα και η πλήρης κινητικότητα για κάλυψη των απαιτήσεων τέτοιων εφαρμογών [77], καθώς και για το URLLC η απαίτηση ασφαλείας [15].

Οι URLLC εξυπηρετούν κυρίως τις βιομηχανικές και στρατιωτικές επικοινωνίες (π.χ. μια ποικιλία ρομπότ, εργαλειομηχανές υψηλής ακρίβειας και συστήματα μεταφοράς στην εποχή του 6G). Επιπλέον, οι επικοινωνίες οχημάτων στο 6G θα μπορούσαν επίσης να επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από τις URLLC [15].

Η αυτόνομη έξυπνη οδήγηση (Autonomous Intelligent Driving - AID) αποτελεί μια από τις προβλέψιμες εφαρμογές και για τις μαζικές URLLC, όπου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συγχρόνως πολλές σημαντικές εκτιμήσεις (όπως ο σχεδιασμός κίνησης, η αυτοματοποιημένη οδήγηση, η αυτόματη παρακολούθηση οχήματος, η ανίχνευση εμποδίων, οι λειτουργίες έκτακτης ανάγκης διάσωσης, κτλ.). Για την πραγματοποίηση μαζικών URLLC, οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, όπως είναι η OMA (Orthogonal Multiple Access - Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση), NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access - Μη Ορθογώνια Πολλαπλή Πρόσβαση) και διαμαχοπαγής (contention-based) πολλαπλή πρόσβαση, θα μπορούσαν να συνιστούν υποσχόμενες λύσεις. Συγκεκριμένα, με την εφαρμογή τεχνικών OMA οι μαζικές URLLC θα είχαν τη δυνατότητα παρουσίασης γραμμικής αύξησης του απαιτούμενου εύρους ζώνης μαζί με την αύξηση του αριθμού των συσκευών. Επιπλέον, άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης (π.χ. NOMA και διαμαχοπαγής πολλαπλή πρόσβαση) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη ενδεδειγμένων εξισορροπήσεων (δηλαδή, μεταξύ λανθάνουσας καθυστέρησης, αξιοπιστίας και κλιμακοθετησιμότητας). Οι μαζικές URLLC θέτουν απαιτήσεις για τη μετάδοση μαζικών πακέτων δεδομένων μικρής διάρκειας για να παρέχονται εγγυήσεις ευαίσθητων ως προς τον χρόνο εφαρμογών 6G, με εξαιρετική απόδοση πόρων και με χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση ([77], [106]).

6.2.3 Βελτιωμένο eMBB και mMTC

Οι νέες υπηρεσίες που προκύπτουν από την συνύπαρξη eMBB και mMTC είναι οι εξής:

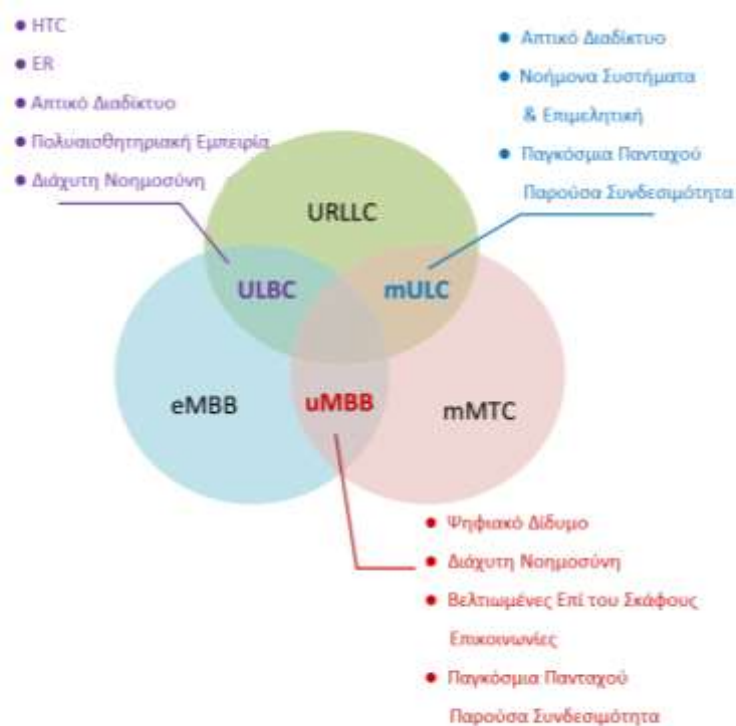
- **mBBM** (massive Broad Bandwidth Machine Type - Επικοινωνίες Τύπου Μηχανής Μαζικής Ευρείας Ευρυζωνικής Πρόσβασης) [99].
- **MBB** (Mobile Broadband - Ευρυζωνική Κινητή Πρόσβαση) ή **uMBB** (ubiquitous Mobile Broadband - Πανταχού Παρούσα Ευρυζωνική Κινητή Πρόσβαση) [13].

Για την περίπτωση mBBM, το απτικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) θα είναι ένα σημαντικό σενάριο χρήσης μέχρι τη δεκαετία του 2030, απαιτώντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, ώστε να υποστηρίζονται οι εμπειρίες που σχετίζονται με την αφή. Το IoT απαιτεί επίσης τεράστια συνδεσιμότητα για τους πυκνά αναπτυσσόμενους αισθητήρες και τις

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

συσκευές (π.χ. 100/m³), για την καταγραφή των απτικών αισθήσεων και για τη μετατροπή τους σε ψηφιακά δεδομένα [99].

Στην εποχή του 6G η υπηρεσία MBB ή uMBB, θα πρέπει να είναι διαθέσιμη σε ολόκληρη την επιφάνεια της Γης, υποστηρίζοντας υψηλής ποιότητας επί του σκάφους (on-board) επικοινωνίες και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα. Το σενάριο uMBB θα είναι η θεμελίωση του ψηφιακού διδύμου (digital twin), της διάχυτης νοημοσύνης (pervasive intelligence), της βελτιωμένης επί σκάφους επικοινωνίας (enhanced on-board communication) και της πανταχού παρούσας συνδεσιμότητας, όπως η σχέση απεικόνισης που φαίνεται στην Εικόνα 19. Επίσης, εκτός από τους KPIs που είναι προς εφαρμογή για την αξιολόγηση του eMBB (π.χ. μέγιστος ρυθμός δεδομένων και ρυθμός δεδομένων που τυγχάνει της εμπειρίας χρήστη), άλλοι KPIs έχουν εξίσου την ίδια κρισιμότητα με τους αντίστοιχους στην περίπτωση uMBB (π.χ. κινητικότητα, κάλυψη και προσδιορισμός θέσης) όπως ενδείκνυται στον Πίνακα 5 [13].



Εικόνα 19: Εκτός από τα τυπικά σενάρια χρήσης 5G (eMBB, URLLC και mMTC), προτείνονται για το σύστημα 6G τρία βελτιωμένα σενάρια που ονομάζονται uMBB, ULBC και mULC προκειμένου να υποστηριχθούν νέες περιπτώσεις και εφαρμογές χρήσης [13]

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Γενιά	Σενάριο Χρήσης	KPI														
		Μέγιστος ρυθμός δεδομένων	Ρυθμός δεδομένων που τυχάνει της εμπειρίας χρήστη	Λοιψόμειρα επένδυση	Κινητικότητα	Πυκνότητα σύνδεσης	Ενεργειακή απόδοση	Μέγιστη φασματική απόδοση	Χωρητικότητα κίνησης περιοχής	Αξιοπιστία	Εύρος ζώνης σήματος	Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης	Κάλυψη	Εγκυρότητα	Ασφάλεια και απόρρητο	CAPEX και OPEX
5G	eMBB	☆	☆	✓	✓		✓	☆	☆		☆		✓		✓	☆
	URLLC			☆			✓			☆	✓	✓	☆	☆	✓	
	mMTC					☆	☆									
6G	uMBB	☆	☆	✓	☆		✓	☆	☆	✓	☆	✓	☆		✓	☆
	mULC			☆		☆	☆			☆	✓	✓	☆	☆	☆	
	ULBC	☆	☆	☆	✓		✓	☆	☆	☆	☆	✓	☆	☆	☆	
Υπόμνημα	✓: Γένιο/ασθενές αντίκτυπο ☆: Εξειδικευμένο/κρίσιμο αντίκτυπο															

Πίνακας 5: Απαιτήσεις απόδοσης (KPI) για την υποστήριξη της υλοποίησης σεναρίων χρήσης [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑ

Τον Οκτώβριο του 2018, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ξεκίνησε την χρηματοδότηση ερευνητικών «δραστηριοτήτων πέραν του 5G» ανοίγοντας την πρόσκληση ICT-20-2019⁹⁷ (“5G Long Term Evolution - “5G LTE”) στο πλαίσιο του όγδοου Προγράμματος - Πλαισίου⁹⁸ για Έρευνα και Τεχνολογική Ανάπτυξη (Framework Programme - FP8) που ονομάζεται Horizon 2020 [13]. Στην πρόσφατη πρόσκληση με θεματικό αντικείμενο ICT-52-2020 «Έξυπνη Συνδετικότητα πέραν του 5G», τα αποδεκτά έργα επιλέχθηκαν μέσα από μια διαδικασία αξιολόγησης υψηλού ανταγωνισμού, δείχνοντας ρητά πως η φιλοδοξία τους είναι να παράσχουν τις πρώιμες ερευνητικές προσπάθειες στο 6G [13]. Στο επερχόμενο πρόγραμμα πλαίσιο για την έρευνα και την καινοτομία που ονομάζεται “Horizon Europe” ή “FP9”, ένας μεγάλος αριθμός προσπαθειών και χρηματοδότησης επιδιώκει να επικεντρωθεί στην έρευνα και ανάπτυξη του 6G και να οργανωθεί στο πλαίσιο της Σύμπραξης Δημοσίου και Ιδιωτικού Τομέα (Public Private Partnership - PPP) «Έξυπνο Δίκτυο & Υπηρεσίες», ακολουθώντας την επιτυχημένη στρατηγική της υποδομής 5G-PPP στο πλαίσιο του προηγούμενου θεματικού πλαισίου “Horizon 2020”. Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε τον Φεβρουάριο του 2020 τη στρατηγική για την επιτάχυνση των επενδύσεων στην «Συνδετικότητα Gigabit» της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένων των 5G και 6G για τη διαμόρφωση του ψηφιακού μέλλοντος της Ευρώπης ([110], [13]).

Το πλαίσιο ICT-52-2020 αποδίδει ιδιαίτερη έμφαση στην προοπτική “B5G” (“Beyond fifth-generation” - «Πέρα από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς») και ορισμένες κατά το ICT-52-2020 ΤΑΣ (Targeted Actions - Στοχευμένες Ενέργειες) θα αποτελέσουν στόχο της μετάβασης από το πλαίσιο “Horizon 2020” (“H2020”) προς το επικείμενο πλαίσιο «Ορίζων Ευρώπη» (“Horizon Europe” - “HE”) [109]. Συγκεκριμένα, η πρόκληση για το πλαίσιο δράσεων ICT-52-2020 είναι η μετάβαση πολύ πέρα από τις δυνατότητες 5G που αναπτύχθηκαν στην Έκδοση 16⁹⁹ της 3GPP, διαθέσιμη στις αρχές του 2020. Επίσης, φαίνεται πέρα από το 5G να γίνεται προετοιμασία υλοποίησης συστημάτων «Έξυπνης Συνδετικότητας» (“Smart Connectivity”) ως πλατφόρμα για ένα επόμενη γενιάς Διαδίκτυο, όπου επιδιώκεται η υποστήριξη μιας εξαιρετικά ευέλικτης υποδομής συνδετικότητας που θα έχει τη δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις καινοτόμων εφαρμογών, ενώ θα διευκολύνεται ο έλεγχος των δεδομένων των χρηστών και η φιλική, ως προς την καινοτομία, υλοποίηση της σχετικής νομοθεσίας. Έτσι, απαιτείται μια προσέγγιση πλήρους αλυσίδας αξιών για απρόσκοπτη και ασφαλή διασυνεργασία από άκρο σε άκρο με υπολογιστικούς πόρους (π.χ. καταναμημένα κέντρα δεδομένων, υπολογιστές αιχμής) όπως και με μια σειρά καινοτόμων συσκευών [111].

Το ICT-52-2020 «Έξυπνη συνδετικότητα πέραν του 5G», που δημιουργήθηκε στις 19.11.2019 είχε ως πεδίο εφαρμογής τα εξής [108]:

⁹⁷ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: <https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020 ICT-20-2019-2020>

⁹⁸ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/Framework_Programmes_for_Research_and_Technological_Development

⁹⁹ Βλέπε: <https://www.3gpp.org/release-16>

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

- Απεριόριστη χωρητικότητα δικτύου, καινοτόμα χρήση και διαχείριση του φάσματος, δυνατότητα χρήσης νέων ζωνών, ραδιοτεχνολογιών και αρχιτεκτονικών, συμπεριλαμβάνοντας τις οπτικές ικανότητες.
- Ανεπαισθητες λανθάνουσες καθυστερήσεις μέσω ευέλικτων τεχνολογιών σύνδεσης και υπολογισμού.
- Έξυπνη συνδετικότητα μαζικών ποσοτήτων πραγμάτων και συστημάτων, επίπτωση της κινητής υπολογιστικής στα άκρα (Mobile edge computing) και ενεργειακή απόδοση.
- Πρωτόκολλα και τεχνολογίες καινοφανών (novel) αρχιτεκτονικών (όπως π.χ. AI) για προσαρμοστικά δίκτυα.
- Εξατομικευμένη, πολλαπλών ενοικιαστών και διαρκής προστασία βασισμένη σε μηχανισμούς ασφαλείας, απορρήτου και εμπιστοσύνης με καινοτόμες τεχνολογίες (όπως π.χ. DLT¹⁰⁰).

Επίσης τα αναμενόμενα αντίκτυπα κατά το ICT-52-2020 ορίστηκαν ως εξής [108]:

- Τεχνολογίες έξυπνης συνδετικότητας για πλατφόρμες που ενσωματώνουν πανταχού παρόντες πόρους συνδετικότητας, αποθήκευσης και υπολογιστικής, που τίθενται σε διάθεση για νέα υπηρεσιακά και επιχειρηματικά μοντέλα.
- Πλατφόρμες έξυπνης συνδετικότητας προς μια κατάσταση αντιληπτής μηδενικής λανθάνουσας καθυστέρησης (zero latency).
- Κλιμακοθετησιμότητα δικτύου προς έναν μεγάλο αριθμό συσκευών με περιορισμούς ως προς τους πόρους (IoT).
- Χαρακτηρισμός και διαθεσιμότητα ασφαλών και αξιόπιστων περιβαλλόντων για εικονικοποιημένα δίκτυα βασισμένα σε λογισμικό, συμπεριλαμβάνοντας τους υποκείμενους περιορισμούς του υλισμικού και τη δραστηριοποίηση αξιόπιστης πολλαπλής μίσθωσης.
- Καινοτόμος χρήση του ραδιοφάσματος, νέες στρατηγικές για επέκταση κάλυψης/υπηρεσίας, υποστήριξη νέων ασύρματων τεχνολογιών και περιπτώσεων χρήσης μέσω πλατφορμών, χρηστικότητα του σημερινού ανεξερεύνητου φάσματος.
- Ετερογενή δίκτυα με δυναμικές τοπολογίες για προηγμένες λύσεις κινητικότητας.
- Δυναμική κλιμακοθετησιμότητα των δικτυακών ικανοτήτων, μέσω της διαθεσιμότητας διαχειριζόμενων και βελτιωμένων οπτικών πόρων.
- Χαρακτηρισμός της τεχνητής νοημοσύνης και των τεχνολογιών blockchain (πλοκαδικής αλύσωσης) στον τομέα της συνδετικότητας, ιδιαίτερα για τη διαχείριση δικτύου/υπηρεσιών και για την ασφάλεια.
- Σημαντική μείωση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας, βελτιώνοντας τόσο την αποδοτικότητα των λειτουργικών και κεφαλαιουχικών δαπανών όσο και της ενεργειακής κατανάλωσης.

Παρακάτω περιγράφονται τα 10 Έργα τα οποία προκρίθηκαν από τις συνολικά 81 προτάσεις που έλαβε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission - EC)

¹⁰⁰ Η τεχνολογία καταμεμημένου καθολικού (Distributed Ledger Technology - DLT) είναι ένα ψηφιακό σύστημα καταγραφής της συναλλαγής περιουσιακών στοιχείων, όπου οι συναλλαγές και τα στοιχεία τους καταγράφονται ταυτόχρονα σε πολλά σημεία. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές βάσεις δεδομένων, τα καταμεμημένα καθολικά δεν έχουν κεντρική λειτουργικότητα αποθήκευσης δεδομένων ή διαχείρισης. Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/distributed-ledger>

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

ανταποκρινόμενη στην πρόσκληση 5G-PPP ICT-52-2020. Τα περισσότερα από αυτά τα έργα ξεκίνησαν τον Ιανουάριο του 2021 και έχουν τριετή διάρκεια [112].

Καθώς τα έργα αυτά βρίσκονται σε εξέλιξη κατά τη συγγραφή της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η προτεινόμενη περιγραφή τους παραμένει σε ένα γενικότερο επίπεδο, αποσκοπώντας κυρίως στην παρουσίαση ορισμένων από τους τομείς της έρευνας προς το 6G που στηρίζει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στην παρούσα φάση.

7.1 6G BRAINS: “Bringing Reinforcement learning Into Radio Light Network for Massive Connections”

«Φέρνοντας την Ενισχυτική εκμάθηση στο Ραδιοδίκτυο Φωτισμού για Μαζικές Συνδέσεις»



Το έργο 6G BRAINS (Grant Agreement No.101017226) στοχεύει να φέρει τα DRLs (Daytime Running Lights - Φώτα Ημέρας) πολλαπλών πρακτόρων που βασίζονται σε AI για την πραγματοποίηση της κατανομής πόρων πάνω στο υψηλής δυναμικής υπερπυκνότητας D2D (device-to-device - συσκευή σε συσκευή) δίκτυο χωρίς κυψέλες με νέες ζεύξεις φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των THz και OWC για την επίτευξη του στόχου πυκνότητας δικτύου μέχρι και 100 συσκευές ανά m^3 , αξιοπιστίας έως και 99,999% και καθυστέρησης διεπαφής αέρα έως 0,1 ms για το μελλοντικό βιομηχανικό δίκτυο [114]. Το έργο 6G BRAINS είναι το πρώτο έργο που προτείνει μια καταληπτή διασπρωματική λύση κατανομής πόρων καθοδηγούμενη από την τεχνητή νοημοσύνη για την υποστήριξη μαζικών συνδέσεων πάνω σε ένα υψηλής δυναμικής υποστηριζόμενο D2D δίκτυο χωρίς κυψέλες, που ενεργοποιείται από το Sub-6 GHz / mmWave / THz / OWC και υψηλής ανάλυσης 3D SLAM (Simultaneous Localization and Mapping - Ταυτόχρονος Εντοπισμός Θέσης και Απεικόνιση) με ακρίβεια έως 1 mm ([113], [114]).

Έτσι οι τεχνολογίες ενεργοποίησης στο 6G BRAINS επικεντρώνονται σε τέσσερις κύριες πτυχές [113]:

- Μια αρχιτεκτονική δικτύου χωρίς κυψέλες D2D βασισμένη σε AI για εξαιρετικά δυναμική και εξαιρετικά πυκνή συνδετικότητα.
- Κατευθυντικός διατερματικός (E2E) τεμαχισμός δικτύου που βασίζεται σε AI, με εγγυημένη QoS σε υψηλά δυναμικό δίκτυο.
- Σύντηξη δεδομένων βάσει τεχνητής νοημοσύνης, για τον τρισδιάστατο χάρτη θέσης εσωτερικών χώρων μέσω ετερογενών μεθόδων εντοπισμού θέσης που επιτρέπουν ακρίβεια εντοπισμού θέσης της τάξης του 1 cm και ακρίβεια προσανατολισμού 1o
- Βελτιωμένες νέες φασματικές ζεύξεις: OWC και THz.

Οι αναπτυγμένες τεχνολογίες θα είναι ευρέως εφαρμόσιμες σε διάφορους κάθετους τομείς όπως η Βιομηχανία 4.0, οι έξυπνες μεταφορές, η ηλεκτρονική υγεία κτλ. Ειδικότερα, νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες που αναδύονται στο 6G BRAINS θα τύχουν αναγνώρισης για επακόλουθες δραστηριότητες εκμετάλλευσης. Τα αποτελέσματα του 6G BRAINS αναμένεται να δημιουργήσουν μια σταθερή βάση για μελλοντικά έργα και παγκόσμια τυποποίηση για τεχνολογίες 5G και 6G σε τομείς που σχετίζονται με βιομηχανικά περιβάλλοντα [114].

7.2 AI@EDGE: “A Secure and Reusable Artificial Intelligence Platform for Edge Computing in Beyond 5G Networks”

«Μια Ασφαλής και Επαναχρησιμοποιήσιμη Πλατφόρμα Τεχνητής Νοημοσύνης για Υπολογιστική στα Άκρα του δικτύου, σε Δίκτυα Πέρα από το 5G»



Το έργο AI@EDGE (Grant Agreement No.101015922) αντιμετωπίζει τις προκλήσεις αξιοποιώντας την έννοια της «επαναχρησιμοποιήσιμης, ασφαλούς και αξιόπιστης τεχνητής νοημοσύνης για σκοπούς αυτοματισμού του δικτύου». Στις ευρωπαϊκές βιομηχανίες AI@EDGE, οι ακαδημαϊκοί φορείς και οι καινοτόμες SMEs (Small- and Medium-sized Enterprises - Μικρές και Μεσαίες Επιχειρήσεις) δεσμεύονται να επιτύχουν αντίκτυπο σε ολόκληρη την ΕΕ στις σχετικές με τη βιομηχανία πτυχές των παραδειγμάτων «AI-για-δίκτυα» και «δίκτυα-για-AI» πέρα από τα συστήματα 5G. Η συνεργατική αντίληψη για δίκτυα οχημάτων, η ασφαλής τεχνητή νοημοσύνη πολλαπλών ενδιαφερομένων για IIoT, οι επιθεωρήσεις εναέριας υποδομής και η ψυχαγωγία κατά την πτήση είναι οι περιπτώσεις χρήσης που στοχεύει η AI@EDGE για τη μεγιστοποίηση των εμπορικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων [115].

Για την επίτευξη του στόχου, το έργο AI@EDGE στοχεύει σε σημαντικές ανακαλύψεις σε δύο πεδία [116]:

(i) πλαίσια γενικής χρήσης για αυτοματισμό δικτύου κλειστού βρόχου, ικανά για να υποστηρίζουν ευέλικτους και προγραμματιζόμενους αγωγούς για τη δημιουργία, χρήση και προσαρμογή ασφαλών, επαναχρησιμοποιήσιμων και αξιόπιστων μοντέλων AI/ML.

(ii) συγκλίνουσα πλατφόρμα σύνδεσης-υπολογισμού για τη δημιουργία και τη διαχείριση επανατακτικών, ελαστικών και ασφαλών τμημάτων από άκρο σε άκρο, ικανών για να υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών δικτύου με δυνατότητα AI.

Το έργο AI@EDGE θα δημιουργήσει μια πλατφόρμα και εργαλεία που θα επιτρέπουν την ασφαλή και αυτοματοποιημένη ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας υποδομών υπολογιστών αιχμής και cloud, με σχεδόν μηδενική επαφή των υποκείμενων ετερογενών πόρων MEC¹⁰¹ (πόροι δικτύου, πόροι αποθήκευσης και υπολογιστικοί πόροι). Το παράδειγμα υπολογισμού χωρίς εξυπηρετητή θα χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της ανάπτυξης καταναμημένων εφαρμογών σε κλίμακα. Αυτό θα συνδυαστεί με την επιτάχυνση εγγενούς υλισμικού (π.χ. GPU¹⁰² και FPGA¹⁰³) και διαστρωματική ραδιοπρόσβαση πολλαπλής συνδετικότητας. Για να γίνει αυτό, το έργο θα αναπτύξει μια αρχιτεκτονική

¹⁰¹ Η υπολογιστική άκρων πολλαπλών προσβάσεων (Multi-access Edge Computing - MEC), είναι μια έννοια αρχιτεκτονικής δικτύων που ορίζεται από το ETSI και επιτρέπει δυνατότητες υπολογιστικού νέφους και περιβάλλον υπηρεσιών πληροφορικής στην άκρη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και, γενικότερα, στην άκρη οποιουδήποτε δικτύου. Βλέπε χαρακτηριστικά, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-access_edge_computing.

¹⁰² Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε: https://en.wikipedia.org/wiki/Graphics_processing_unit

¹⁰³ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Field-programmable_gate_array

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

συστημάτων και τις απαραίτητες μεθόδους για την αυτόματη διαχείριση ετερογενών πόρων MEC. Το έργο περιλαμβάνει την ανάπτυξη διατάξεων επικοινωνίας με χαμηλό επίβαρο και κλιμακοθέτηση, κατάλληλων για την εκτέλεση κατανεμημένων αλγορίθμων σε μαζική κλίμακα υπό εξαιρετικά μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύωσης. Επιπλέον, θα αντιμετωπιστούν θεμελιώδεις σημαντικές πτυχές ασφάλειας, καλύπτοντας τόσο την απομόνωση της υπηρεσίας όσο και την προστασία που απαιτείται για την ασφαλή ομοσπονδιακή μάθηση και κοινή χρήση δεδομένων, καθώς και την ασφάλεια για μοντέλα AI/ML που μπορεί να είναι ευάλωτα σε επιθέσεις χειραγώγησης [115].

7.3 DAEMON: “Network intelligence for aDaptive and sElf-Learning MObile Networks”

«Δικτυακή Ευφυΐα για προσαρμοστικά και αυτόματης μάθησης κινητά δίκτυα»

(Διάρκεια 36 μήνες)

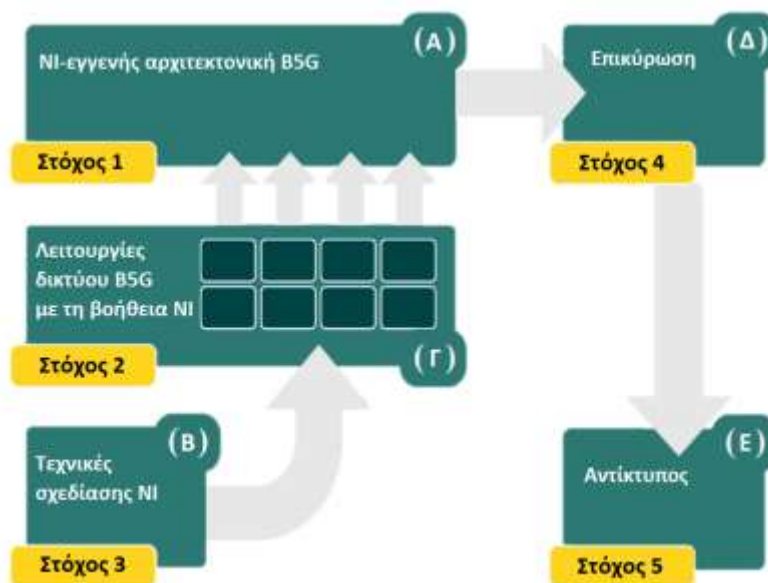


Το ευρωπαϊκό έργο DAEMON (Grant Agreement No.101017109) αναπτύσσει και εφαρμόζει καινοτόμες και ρεαλιστικές προσεγγίσεις στον σχεδιασμό Δικτυακής Νοημοσύνης (Network Intelligence - NI) που επιτρέπουν υψηλή απόδοση, βιώσιμο και εξαιρετικά αξιόπιστο σύστημα δικτύου μηδενικής επαφής [117]. Το έργο θα πραγματοποιήσει μια συστηματική ανάλυση όπου οι εργασίες NI επιλύονται κατάλληλα με μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, παρέχοντας ένα σταθερό σύνολο κατευθυντήριων γραμμών για τη χρήση της μηχανικής μάθησης στις λειτουργίες του δικτύου. Βασιζόμενο σε αυτά τα μοντέλα, το έργο DAEMON θα σχεδιάσει μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική εγγενή ως NI (NI-native) για την προοπτική 5G που θα συντονίζει πλήρως τις λειτουργίες που υποστηρίζονται από NI [118].

Οι πρόοδοι στην NI που επινοήθηκαν από το έργο DAEMON θα εφαρμοστούν σε πρακτικές ρυθμίσεις δικτύου για [117]:

- (i) Να προσφέρουν εξαιρετικά υψηλή απόδοση, ενώ παράλληλα προβαίνουν σε αποτελεσματική χρήση των υποκείμενων ραδιοπórων και των υπολογιστικών πόρων.
- (ii) Μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.
- (iii) Τη διάθεση εξαιρετικά υψηλής αξιοπιστίας πέρα από αυτή των συστημάτων 5G.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, το έργο DAEMON θα σχεδιάσει πρακτικούς αλγόριθμους για οκτώ συγκεκριμένες λειτουργίες υποβοηθούμενες από NI, που επιλέγονται προσεκτικά. Η απόδοση των αλγορίθμων του έργου DAEMON θα αξιολογηθεί σε πραγματικές συνθήκες μέσω τεσσάρων πειραματικών σταθμοτόπων (sites) και σε κλίμακα με προσεγγίσεις καθοδηγούμενες από τα δεδομένα που βασίζονται σε δύο σύνολα δεδομένων μέτρησης κυκλοφορίας σε εθνικό επίπεδο, έναντι εννέα φιλόδοξων αλλά εφικτών στόχων KPI [118]. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται και περιγράφονται οι στόχοι στο πλαίσιο συγκεκριμένων βημάτων μεθοδολογίας:



Εικόνα 21: Βήματα μεθοδολογίας στο έργο DAEMON [118]

(1) Σχεδιασμός «εγγενούς αρχιτεκτονικής NI» για συστήματα B5G

Ενώ οι τρέχουσες προσπάθειες για την ενσωμάτωση της NI σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στοχεύουν στην προσαρμογή των λύσεων μηχανικής εκμάθησης ώστε να ταιριάζουν σε περιβάλλοντα δικτύωσης, το έργο DAEMON αναβαθμίζει την προσέγγιση και επιδιώκει να ενημερώσει την αρχιτεκτονική δικτύου, έτσι ώστε να υποστηρίξει εγγενώς τις λειτουργίες NI [118].

- **Ξεκλείδωμα του πλήρους δυναμικού της NI μέσω συντονισμού ευφυΐας:** Το έργο θα προτείνει έναν καινοτόμο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό που θα επιτρέπει τον ολοκληρωμένο συντονισμό στις πολλές υποστάσεις NI που λειτουργούν σε όλη την υποδομή του δικτύου. Για να διασφαλιστεί η πρακτική βιωσιμότητά της και να μεγιστοποιηθεί ο αντίκτυπός της, η αρχιτεκτονική του DAEMON θα αξιοποιήσει και θα είναι πλήρως συμβατή με τις δραστηριότητες τυποποίησης αιχμής από τους φορείς τυποποίησης O-RAN (Open Radio Access Networks - Δίκτυα Ανοικτής Ραδιοεπικοινωνίας), 3GPP και ETSI (European Telecommunications Standards Institute - Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων).
- **Ενεργοποίηση NI βαθιά στο άκρο του δικτύου και στο επίπεδο χρήστη:** Το έργο DAEMON θα αναπτύξει και θα παρουσιάσει νέες συντονισμένες λύσεις NI που λειτουργούν στη στάθμη VNF¹⁰⁴ (Virtual Network Functions - Λειτουργίες Εικονικού Δικτύου) και υλοποιούνται στο επίπεδο χρήστη, καθώς και σε έναν αρχικό μικροτομέα «Πέρα από την άκρη» (Beyond Edge) που επεκτείνει την αρχιτεκτονική άποψη του B5G κοντά στο τελικό τερματικό, χωρίς συναφές προηγούμενο.

(2) Ανάπτυξη εξειδικευμένων λειτουργιών δικτύου υποστηριζόμενων από NI, για τα συστήματα B5G

¹⁰⁴ Βλέπε, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_function_virtualization

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Το έργο DAEMON καθορίζει μια συγκεκριμένη λίστα βασικών λειτουργιών δικτύου για τις οποίες θα επινοήσει και θα εφαρμόσει αλγόριθμους NI, ικανούς να εκμεταλλευτούν πλήρως την προτεινόμενη εγγενή αρχιτεκτονική NI και για να εκτείνονται σε ποικίλα επίπεδα, τομείς και χρονοδιαγράμματα λειτουργίας [118].

- **Ανάπτυξη λειτουργιών υποστηριζόμενων από NI για απόδοση και αποδοτικότητα B5G:** Το έργο DAEMON θα δείξει το πώς μια σωστά σχεδιασμένη NI μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη χωρητικότητα, να μειώσει τον λανθάνοντα χρόνο και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων δικτύου κινητής τηλεφωνίας, βοηθώντας τα να επιτύχουν τους εξαιρετικούς στόχους που έχουν τεθεί για τις τεχνολογίες B5G.
- **Ανάπτυξη λειτουργιών υποστηριζόμενων από NI που επιτρέπουν τη βιώσιμη λειτουργία των συστημάτων B5G:** Η NI που αναπτύχθηκε από το έργο DAEMON θα βασίζεται στη νέα κατανόηση του ενεργειακού αποτυπώματος των λειτουργιών του δικτύου και θα υποστηρίζει την αυτόματη προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας της υποδομής, σε ισορροπία με την επιθυμητή απόδοση.
- **Ανάπτυξη λειτουργιών υποστηριζόμενων από NI για τη διασφάλιση εξαιρετικής αξιοπιστίας B5G μηδενικής επαφής:** Η NI που αναπτύχθηκε από το έργο DAEMON θα σχεδιαστεί για επαναστατικότητα, βελτιώνοντας την εξαρτησιμότητα της δικτυακής λειτουργίας.

(3) Θέσπιση θεμελιωδών κατευθυντήριων γραμμών για έναν ρεαλιστικό σχεδιασμό της NI

Το έργο DAEMON θα θέσει προκλήσεις στις τρέχουσες πρακτικές σε θέματα μηχανικής μάθησης για τον αυτοματισμό δικτύου και θα προωθήσει καινοτομίες αναφορικά με τον τρόπο που τυγχάνει αντίληψης η NI, αξιοποιώντας τις αναδυόμενες τάσεις στην τεχνητή νοημοσύνη και αναθεωρώντας τον τρόπο εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης στο περιβάλλον υποδομής του δικτύου [118].

- **Κατανόηση των ορίων της τεχνητής νοημοσύνης:** Κατά τον σχεδιασμό της NI που θα βοηθήσει στις διάφορες λειτουργίες του δικτύου, το έργο DAEMON θα αξιολογήσει προσεκτικά σε ποιες περιπτώσεις είναι κατάλληλα τα ισχυρά αλλά μη ερμηνεύσιμα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, όπως αυτά της Εκ Βαθέων Μάθησης (DL), καθώς επίσης και το πότε θα πρέπει να προτιμώνται στατιστικά, αναλυτικά ή υβριδικά μοντέλα.
- **Σχεδιασμός συναρτήσεων απώλειας που είναι προσαρμοσμένες στο πλαίσιο δικτύωσης:** Για να διασφαλιστεί ότι τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης συμμορφώνονται με τη συγκεκριμένη απαίτηση που ορίζεται από διαφορετικές λειτουργίες δικτύου, το έργο DAEMON θα αντιμετωπίσει το, όντας σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητο, πρόβλημα «αναντιστοιχίας μετρήσεων απωλειών» στη σχεδίαση της NI, επινοώντας προσαρμοσμένες ή/και υποκείμενες σε αυτόματη μάθηση, συναρτήσεις απώλειας.
- **Ανάπτυξη μοντέλων AI για προσαρμοσibile NI:** Η NI θέτει μη συμβατικές απαιτήσεις για μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, όσον αφορά στην υπολογιστική πολυπλοκότητα και στους χρόνους εκτέλεσης. Το έργο DAEMON θα πραγματοποιήσει θεμελιώδεις εργασίες για τον σχεδιασμό μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης που μπορούν να ανταλλάξουν προσαρμοστικά την ακρίβεια με τις παραπάνω εναλλακτικές μετρήσεις, καθιερώνοντας έτσι ένα νέο παράδειγμα για τεχνικές μηχανικής μάθησης που έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίξουν την NI εκ του σχεδιασμού (by design).

(4) Επίδειξη της βιωσιμότητας και της απόδοσης των B5G δικτύων με εγγενή NI

Το έργο DAEMON θα παρέχει αντικειμενικές αποδείξεις για το πλεονέκτημα μιας δομημένης, σε βάθος και ευαίσθητης ενσωμάτωσης της NI σε υποδομές δικτύου. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω ενός καταληπτού εύρους βασικών δεικτών επιδόσεων (KPIs) σχετικά με την απόδοση, την αξιοπιστία και τη διατηρησιμότητα των προτεινόμενων λύσεων, σε ρεαλιστικές πειραματικές ή μετρητικές ρυθμίσεις καθοδηγούμενες από τα δεδομένα [118].

- **KPIs του δικτύου:** Το έργο θα ανταποκριθεί στις άκρως υψηλές απαιτήσεις που επιβάλλονται σε δίκτυα B5G, καθώς θα διατίθενται πολύ μεγάλα κέρδη όσον αφορά στην αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων και στην κατανάλωση ενέργειας.
- **Πειραματική αξιολόγηση και αξιολόγηση καθοδηγούμενη από τα δεδομένα:** Το έργο DAEMON θα επικυρώσει όλες τις λύσεις NI που επινοήθηκαν μέσω πειραματικών πρωτοτύπων ή μέσω αξιολογήσεων μεγάλης κλίμακας που βασίζονται σε δεδομένα μετρήσεων.

(5) Βιομηχανικός και επιστημονικός αντίκτυπος

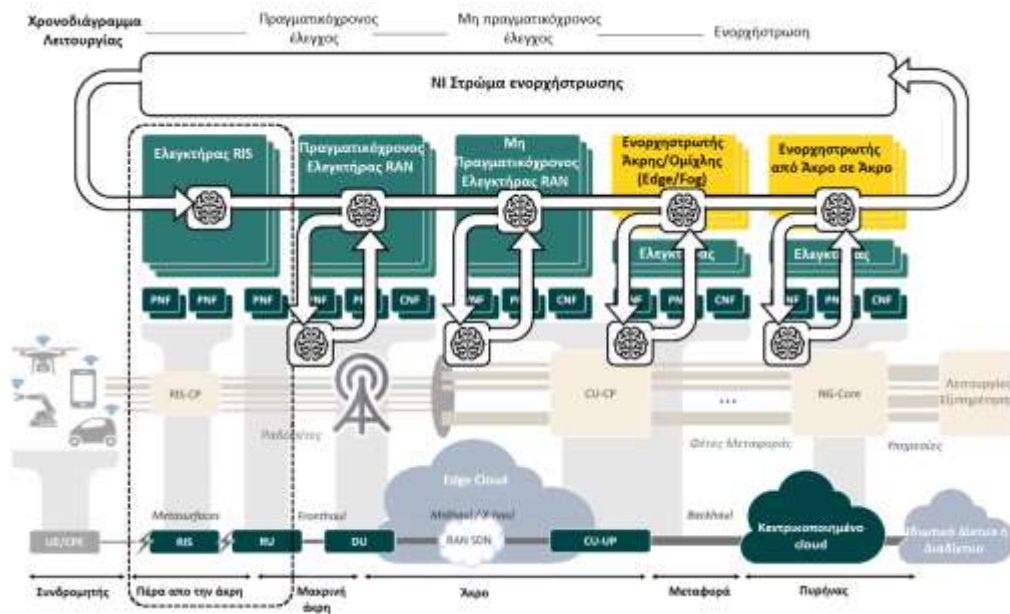
Το έργο DAEMON θα παράγει τα απαραίτητα πρότυπα, διπλώματα ευρεσιτεχνίας και τις συνεισφορές σε βιομηχανικά φόρα του κλάδου προκειμένου να καταστούν εφικτά [118]:

1. Η προσέγγιση της βιομηχανίας για χρήση της τεχνολογίας του έργου.
2. Η προώθηση της ευρείας υιοθέτησης της τεχνολογίας πέρα από τους κατασκευαστές και τους φορείς εκμετάλλευσης της κοινοπραξίας.
3. Η προστασία των ευρημάτων του έργου για την εξασφάλιση εμπορικού πλεονεκτήματος των εταίρων του έργου.

Θα παραχθούν επίσης δημοσιεύσεις υψηλής ποιότητας για τη διασφάλιση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των αποτελεσμάτων του έργου στην κοινότητα έρευνας και ανάπτυξης που επικεντρώνεται στα συστήματα B5G [118].

Μια ενδεικτική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής προσέγγισης σύμφωνα με το έργο DAEMON δίνεται παρακάτω [118].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G



Εικόνα 22: Ενδεικτική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής προσέγγισης στο έργο DAEMON [118]

7.4 DEDICAT6G: “Dynamic coverage Extension and Distributed Intelligence for human Centric Applications with assured security, privacy, and Trust: from 5G to 6G”

«Δυναμική επέκταση κάλυψης και καταναμημένη νοημοσύνη για ανθρωποκεντρικές εφαρμογές με εξασφαλισμένη ασφάλεια, ιδιωτικότητα και εμπιστοσύνη: από το 5G προς το 6G»



Το έργο DEDICAT6 στοχεύει να αναπτύξει μια έξυπνη πλατφόρμα συνδετικότητας χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και blockchain που θα επιτρέψει στα δίκτυα 6G να συνδυάσουν την υπάρχουσα υποδομή επικοινωνίας με νέα κατανομή νοημοσύνης (δεδομένα, υπολογιστική δυνατότητα και αποθήκευση) στο άκρο του δικτύου, για να καταστεί εφικτή όχι μόνο μια ευέλικτη, αλλά και μια ενεργειακά αποτελεσματική υλοποίηση της προβλεπόμενης εμπειρίας σε πραγματικό χρόνο. Το έργο DEDICAT6G εκτελεί το επόμενο ζωτικό βήμα πέρα από το 5G, αντιμετωπίζοντας τεχνικές για την επίτευξη και τη διατήρηση μιας αποτελεσματικής δυναμικής συνδετικότητας και έξυπνης τοποθέτησης υπολογισμών στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, το έργο στοχεύει στον σχεδιασμό και στην ανάπτυξη μηχανισμών για δυναμική επέκταση κάλυψης μέσω της εκμετάλλευσης νέων τερματικών και κινητών κόμβων πελατών (π.χ. έξυπνα συνδεδεμένα αυτοκίνητα, ρομπότ και drones) [119].

Το όραμα του DEDICAT6G είναι να μετατρέψει τα δίκτυα 5G σε μια έξυπνη πλατφόρμα συνδετικότητας που θα είναι εξαιρετικά προσαρμοστική, εξαιρετικά γρήγορη και εξαρτήσιμη/επανατακτική για την υποστήριξη των καινοτόμων, ανθρωποκεντρικών εφαρμογών, με ασφάλεια. Ο γενικός αυτός στόχος μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω στους ακόλουθους στόχους [119]:

- **Παροχή ανεπαίσθητου λανθάνοντος χρόνου και χρόνου απόκρισης από άκρο σε άκρο, με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και κατανάλωση πόρων (επικοινωνία, υπολογισμός, αποθήκευση) σε δίκτυα 5G για την υποστήριξη καινοτόμων εφαρμογών.** Αυτός ο στόχος θα παρέχει λύσεις για δυναμική καταναμημένη ευφυΐα στα άκρα του δικτύου για τη βελτίωση του χρόνου εκτέλεσης εργασιών και της ενεργειακής απόδοσης των συσκευών ξενιστή στα άκρα του δικτύου και, εν τέλει, για τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου από άκρο σε άκρο για ανθρωποκεντρικές εφαρμογές.
- **Δυναμική, αποτελεσματική επέκταση του περιβάλλοντος επικοινωνίας για να επιτρέπεται η πρόσβαση σε όλους τους ανθρώπους, σε πληροφορίες και σε αγαθά οπουδήποτε, οποιαδήποτε στιγμή σε μια εμπειρία σε πραγματικό χρόνο.** Αυτός ο στόχος θα επιτρέψει τη δυναμική, ευκαιριακή δημιουργία επεκτάσεων δυναμικής κάλυψης και συνδετικότητας μέσω της εκμετάλλευσης ρομπότ, drones, συνδεδεμένων αυτοκινήτων κτλ., για την κάλυψη περιοχών που δεν είναι εύκολα προσβάσιμες και όπου απαιτείται υποδομή ή πρόσθετη χωρητικότητα μόνο για μια πεπερασμένη, μικρής χρονικής διάρκειας κατάσταση ή όπου η κανονική υποδομή δικτύου έχει υποστεί ζημιά (π.χ., λόγω τρομοκρατικών ενεργειών ή φυσικών καταστροφών). Αυτά θα συνδυαστούν με μηχανισμούς για δυναμική, καταναμημένη νοημοσύνη, προσωρινή αποθήκευση και περίπλεξη δεδομένων αποθήκευση. Επιπλέον, θα λάβουν υπόψη ένα

ευρύ φάσμα παραγόντων, όπως η θέση και η τροχιά των συσκευών που μπορούν να παίξουν το ρόλο των προσωρινών Κινητών Σημείων Πρόσβασης (Mobile Access Points - MAPs), τις δυνατότητες επικοινωνίας, τις θέσεις των σταθμών σύνδεσης και φόρτισης των υποψήφιων κινητών σημείων πρόσβασης.

- **Ενίσχυση της ασφάλειας, της ιδιωτικότητας και της εμπιστοσύνης στα συστήματα 5G για την υποστήριξη προηγμένων εφαρμογών IoT.** Αυτός ο στόχος θα παρέχει μηχανισμούς για την πραγματοποίηση αξιόπιστης ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων/μερών, συσκευών και υποσυστημάτων και θα παρέχει επίσης έξυπνα στοιχεία συστήματος για αιτιολόγηση σχετικά με την αναγνώριση ταυτότητας διαγραμμάτων/σχηματομορφών που υποδεικνύουν ζητήματα ασφάλειας, ιδιωτικότητας και εμπιστοσύνης, ώστε να καταστεί δυνατή η έγκαιρη πρόληψη αυτών. Οι μηχανισμοί ανίχνευσης απειλών θα βασίζονται σε ομοσπονδιακή μάθηση, ενισχύοντας κατά συνέπεια την προστασία του απορρήτου και μεταφέροντας τη διαδικασία εκπαίδευσης μοντέλου ML στην πηγή δεδομένων αντί της μεταφοράς δεδομένων σε μια κεντρική οντότητα.
- **Ανάπτυξη ανθρωποκεντρικών εφαρμογών στο πλαίσιο των περιπτώσεων χρήσης του έργου και παρουσίαση της νέας αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπων και ψηφιακών συστημάτων.** Αυτός ο στόχος θα επιδείξει τη χρήση καινοτόμων διεπαφών και συσκευών για ανθρωποκεντρικές εφαρμογές.
- **Επίδειξη και επικύρωση των ανεπτυγμένων λύσεων με τη χρήση μιας σειράς πιλοτικών «Απόδειξη της Έννοιας¹⁰⁵» (Proof of Concept - PoC) και σε ένα ευέλικτο πλαίσιο ανάπτυξης.** Συμπεριλαμβάνεται η υλοποίηση συγκεκριμένων PoCs που αναφέρονται σε διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης και ο ορισμός μετρήσιμων βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs) και μετρήσεων για την παρακολούθηση της απόδοσης. Η ανάπτυξη, η δοκιμή και η επικύρωση των ανεπτυγμένων τεχνολογιών DEDICAT6G θα πραγματοποιηθούν μέσω προσομοιώσεων σε επίπεδο συστήματος, εργαστηριακών δοκιμών αναφορικά με την εφαρμοσμένη λειτουργικότητα καθώς και μέσω εφαρμογής σε πειράματα σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα. Ο στόχος είναι το να δημιουργηθεί και να δοκιμαστεί το υπό ανάπτυξη σύστημα και οι υπηρεσίες σε πραγματικές ρυθμίσεις, για την αντιμετώπιση υφιστάμενων ζητημάτων και για την αντιμετώπιση πιθανών απαιτήσεων διαφόρων ενδιαφερομένων φορέων. Το σύστημα που θα αναπτυχθεί θα προσαρμοστεί με ακρίβεια στην ανάδραση που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων.
- **Θέσπιση ενός πλαισίου συνεργασίας για τους σχετικούς τελικούς χρήστες/ενδιαφερόμενους, τη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο.** Στόχος είναι το να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι για τη συμμετοχή τελικών χρηστών/ενδιαφερομένων στις φάσεις σχεδιασμού και ανάπτυξης, με τον καθορισμό οργανωτικών και τεχνικών μέτρων για τη βελτιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τελικών χρηστών και ερευνητών και για την προσαρμογή των τεχνολογιών στις ανάγκες και απαιτήσεις των χρηστών/ενδιαφερομένων.
- **Συνεισφορές σε δραστηριότητες τυποποίησης. Μεγιστοποίηση της διείσδυσης των λύσεων και τεχνολογιών του έργου σε βασικούς φορείς τυποποίησης των**

¹⁰⁵ Απόδειξη της Έννοιας (POC ή PoC), επίσης γνωστή ως απόδειξη αρχής, είναι η υλοποίηση μιας συγκεκριμένης μεθόδου ή ιδέας προκειμένου να αποδειχθεί η σκοπιμότητά της ή μια επίδειξη επί της αρχής με σκοπό να επαληθευτεί το πως κάποια έννοια ή θεωρία έχει πρακτικές δυνατότητες. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_concept.

ενδιαφερόμενων μερών, όπως η 3GPP, η IETF¹⁰⁶ (Internet Engineering Task Force - Ειδική Ομάδα Εφαρμοσμένης Μηχανίκευσης Διαδικτύου) , το ETSI MEC¹⁰⁷ και το ETSI ENI¹⁰⁸ (Experiential Networked intelligence - Βιωματική Δικτυωμένη Νοημοσύνη).

¹⁰⁶ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.:

https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_Engineering_Task_Force

¹⁰⁷ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε επίσης: <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing>

¹⁰⁸ Για περισσότερα πληροφοριακά στοιχεία βλέπε επίσης: <https://www.etsi.org/committee/eni>

7.5 Hexa-X: “A flagship for B5G/6G vision and intelligent fabric of technology enablers connecting human, physical, and digital worlds”

«Μια ναυαρχίδα για την όραση B5G/6G και το ευφυές ύφασμα των ενεργοποιητών τεχνολογίας που συνδέουν τους ανθρώπινους, φυσικούς και ψηφιακούς κόσμους»



Το έργο Hexa-X (Grant Agreement No.101015956) συνιστά μια μορφή «ναυαρχίδας» για το όραμα 6G και το ευφυές πλαίσιο των ενεργοποιητών τεχνολογίας που συνδέουν τους ανθρώπινους, φυσικούς και ψηφιακούς κόσμους. Το όραμα του Hexa-X απαιτεί έναν ιστό x-enabler (x-ενεργοποιητών) συνδεδεμένης νοημοσύνης, δίκτυα δικτύων, βιωσιμότητας, παγκόσμιας κάλυψης υπηρεσιών, εξαιρετικής εμπειρίας και αξιοπιστίας. Συγκεκριμένα αυτό το όραμα συνδέει από κοινού βασικούς τεχνικούς παράγοντες, μέσω ενός «ιστού» x-enabler (αρχιτεκτονικής θεμελίωσης / αρθρωτής αρχιτεκτονικής για την ανάπτυξη του οράματος) που εξυπηρετεί τρεις συνυφασμένους κόσμους, ήτοι: α) έναν ανθρώπινο κόσμο νοημοσύνης και αξιών, β) έναν ψηφιακό κόσμο πληροφοριών, και γ) και έναν φυσικό κόσμο διεργασιών [121].

Η φιλοδοξία του έργου Hexa-X περιλαμβάνει την ανάπτυξη βασικών τεχνολογικών δυνατοτήτων στους τομείς που αφορούν σε [120]:

- Βασικές νέες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης σε υψηλές συχνότητες και σε εντοπισμό θέσης και επαίσθηση υψηλής ανάλυσης.
- Συνδεδεμένη νοημοσύνη μέσω διεπαφής αέρα που καθοδηγείται από την τεχνητή νοημοσύνη και από τη διακυβέρνηση για τα μελλοντικά δίκτυα.
- Αρχιτεκτονικούς ενεργοποιητές 6G για αποσυνάθροιση του δικτύου και για δυναμική εξαρτησιμότητα.

Το έργο Hexa-X αναγνωρίζει την αναγκαιότητα επέκτασης του θεμελιώδους παραδείγματος σχεδιασμού δικτύου από κυρίως προσανατολισμένο στην επίδοση και προσανατολισμένο από κοινού προς την επίδοση και την αξία. Εδώ, η αξία συνεπάγεται άυλες αλλά σημαντικές ανθρώπινες και κοινωνικές ανάγκες, όπως η διατηρησιμότητα, η εμπιστοσύνη και η ένταξη/συμπερίληψη. Αυτό θα οδηγήσει σε μια νέα κατηγορία κριτηρίων αξιολόγησης, δηλαδή σε Βασικούς Δείκτες Αξιών¹⁰⁹ (Key Value Indicators - KVIs) που πρέπει να γίνουν κατανοητοί, να αναπτυχθούν και να υιοθετηθούν στο σχεδιασμό του δικτύου προς το 6G. [121].

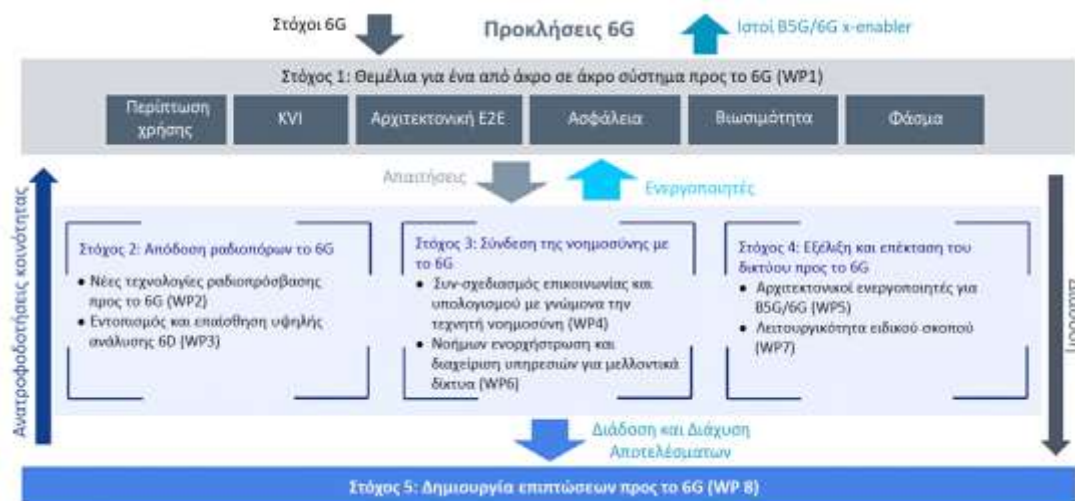
Επίσης το έργο Hexa-X κατανοεί ότι η ανάπτυξη προς το 6G απαιτεί ευρεία υποστήριξη και παγκόσμιες προσπάθειες. Θα τύχει επιδίωξης η διαφάνεια και η συνεργασία μεταξύ της ευρωπαϊκής και παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας, των φορέων τυποποίησης και των

¹⁰⁹ Το KVI είναι ο πιο σημαντικός δείκτης για την ομάδα για να ανακαλύψει εάν παράγεται αξία. Ο KVI είναι ένας αριθμός, οπτικοποιημένος σε μια γραμμή τάσης, γεγονός που καθιστά τη σχέση μεταξύ του αντίκτυπου των πελατών και της συγκεκριμένης αξίας για την εταιρεία. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://economicforall.com/library/lecture/read/170171-what-is-a-key-value-indicator>.

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

υπευθύνων χάραξης πολιτικής μέσω π.χ. διοργάνωσης δημόσιων δράσεων συνεδρίων και workshops, προετοιμασίας για την έκδοση κοινών Λευκών Βιβλίων (White Papers) και δια της ενεργού συμμετοχής σε μεγάλες εκδηλώσεις [121].

Οι στόχοι του Hexa-X περιγράφονται παρακάτω [121]:



Εικόνα 23: Στόχοι του έργου Hexa-6G [121]

Στόχος 1: Θεμέλιο για μια αρχιτεκτονική συστήματος από άκρο σε άκρο

WP1: Το Πακέτο Εργασίας 1 αναπτύσσει τον «ιστό» 6G x-enabler και τους KVIs για ένα όραμα σύνδεσης ευφυΐας, βιωσιμότητας, αξιοπιστίας, συμπερίληψης και εξαιρετικής εμπειρίας [121].

Στόχος 2: Απόδοση ραδιοεπικοινωνίας προς το 6G

Προσφέρεται εξαιρετική απόδοση αναπτύσσοντας και αξιολογώντας βασικά στοιχεία ραδιοτεχνολογίας για την επόμενη γενιά, μέσω υψηλότερων ζωνών και εντοπισμού θέσης/επαίσθησης. Ο στόχος αυτός θα αντιμετωπιστεί από δύο πακέτα εργασίας: WP2 και WP3 [121].

WP2: Το εν λόγω πακέτο θα αναπτύξει καινοτόμες ραδιοτεχνολογίες για την επίτευξη εξαιρετικά υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και χωρητικότητας λαμβάνοντας υπόψη πτυχές υλισμικού και καναλιών. Η ενεργειακή απόδοση θα είναι ένα μια από τις βασικές προτεραιότητες του σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα αναμένεται να έχουν αντίκτυπο στη διαδικασία R&I (Remove and Install - Κατάργηση και Εγκατάσταση) προς το 6G στην ΕΕ και παγκοσμίως [121].

WP3: Το εν λόγω πακέτο θα συνδέσει τον φυσικό και τον ψηφιακό κόσμο μέσω προηγμένων προσεγγίσεων εντοπισμού θέσης και επαίσθησης. Θα πραγματοποιήσει εξαιρετικά ακριβή και γρήγορη επίγνωση της κατάστασης σε 6D (θέση 3D και προσανατολισμός 3D), της χαρτογράφηση παθητικών αντικειμένων στο περιβάλλον μέσω μονοστατικών, διστατικών και πολυστατικών ρυθμίσεων, επιτρέποντας έτσι τις αντίστοιχες περιπτώσεις χρήσης του έργου Hexa-X [121].

Στόχος 3: Σύνδεση νοημοσύνης προς το 6G

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Παροχή μεθοδολογίας, αλγορίθμων και αρχιτεκτονικών απαιτήσεων για ένα εγγενές δίκτυο AI, μέσω διεπαφής αέρα που βασίζεται σε AI και σε διακυβέρνηση AI. Ο στόχος αυτός θα αντιμετωπιστεί από δύο πακέτα εργασίας, τα WP4 και WP6 [121].

WP4: Το εν λόγω πακέτο: (i) θα βελτιώσει την απόδοση της διεπαφής αέρα B5G/6G μέσω της εισαγωγής λύσεων χαμηλής πολυπλοκότητας που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη, καθώς και, (ii) θα προτείνει ιδέες σχεδίασης για μια πλατφόρμα εκμάθησης B5G/6G, ικανής ώστε να υποστηρίζει και να αντιμετωπίζει – με βέλτιστο τρόπο – τους καταναεμημένους φόρτους εργασίας στο άκρο του δικτύου καθώς και μηχανισμούς μάθησης/εξαγωγής συμπερασμάτων, σε σχέση με την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα, την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια, τη διαχειριστικότητα, την ικανότητα παροχής επεξηγήσεων και τις απαιτήσεις ανταλλαγής γνώσεων [121].

WP6: Το εν λόγω πακέτο θα ασχοληθεί με θέματα όπως η προγνωστική ενορχήστρωση και η διαχείριση υπηρεσιών, ο τεμαχισμός (slicing) χωρίς υπερβολική παροχή, η ελαστικότητα τεμαχίων/φετών σύμφωνα με τις συνθήκες κίνησης και η αυτοματοποίηση μηδενικής αφής σε πραγματικό χρόνο. Η εργασία θα καλύψει, τόσο τις φάσεις σχεδιασμού, όσο και τις φάσεις χρόνου εκτέλεσης της διαδικασίας ενορχήστρωσης, καθώς και τον τρόπο εφαρμογής μηχανισμών τεχνητής νοημοσύνης σε πολλαπλές ενέργειες για μια έξυπνη ενορχήστρωση από άκρο σε άκρο [121].

Στόχος 4: Εξέλιξη και επέκταση δικτύου προς το 6G

Παρέχονται ενεργοποιητές για ένα έξυπνο δίκτυο δικτύων, μέσω διαχωρισμού δικτύων και μέσω δυναμικής εξαρτησιμότητας. Ο στόχος αυτός θα αντιμετωπιστεί από δύο πακέτα εργασίας, ήτοι: WP5 και WP7 [121].

WP5: Το εν λόγω πακέτο θα αναπτύξει τα αρχιτεκτονικά στοιχεία που υποστηρίζουν μια νέα ευέλικτη σχεδίαση δικτύου, πλήρη ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και προγραμματισμό δικτύου και, ταυτόχρονα, θα εξορθολογίσει και θα επανασχεδιάσει την αρχιτεκτονική για ένα δίκτυο δικτύων [121].

WP7: Το πακέτο αυτό θα ενισχύσει την απόδοση του δικτύου B5G/6G σε ακραία περιβάλλοντα όπου ο ψηφιακός, ο φυσικός και ο ανθρώπινος κόσμος συγκλίνουν με λειτουργικότητα ειδικού σκοπού (π.χ. αρθρωτή ευέλικτη παραγωγή, επικοινωνίες μηδενικής ενέργειας για αισθητήρες και συνδετικότητα κατ' απαίτηση σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές) [121].

7.6 MARSAL: “Machine learning-based, networking and computing infrastructure resource management of 5G and beyond intelligent networks”

«Δικτύωση και διαχείριση πόρων υπολογιστικής υποδομής βασισμένη στη μηχανική μάθηση, για έξυπνα δίκτυα 5G και πέρα από αυτό»



Το ερευνητικό έργο MARSAL (Grant Agreement No.101017171) στοχεύει στην ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για τη διαχείριση και εννοχήστρωση των πόρων σε δίκτυα τεχνολογίας 5G και πέραν αυτής, χρησιμοποιώντας μια συγκλίνουσα οπτική-ασύρματη υποδομή δικτύου στα τμήματα πρόσβασης και fronthaul / midhaul του δικτύου [122].

Το έργο MARSAL προτείνει ένα νέο παράδειγμα ελαστικών εικονικών υποδομών που ενσωματώνουν, με διαφανή τρόπο, μια ποικιλία νέων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης, δικτύωσης, διαχείρισης και ασφάλειας, οι οποίες θα αναπτυχθούν για να παρέχουν υπηρεσίες μεταφοράς, επεξεργασίας και αποθήκευσης από άκρο σε άκρο με αποτελεσματικό και εξασφαλισμένο τρόπο. Το MARSAL εστιάζει σε τρεις πυλώνες για να επιτρέψει μια νέα γενιά εξαιρετικά πυκνών, οικονομικά αποδοτικών, ευέλικτων και ασφαλών δικτύων, ήτοι: πυλώνας σχεδιασμού δικτύου, πυλώνας εικονικής ελαστικής υποδομής και πυλώνας ασφάλειας του δικτύου [123].

Για τον πυλώνα σχεδιασμού δικτύου, το MARSAL ωθεί τη δικτύωση χωρίς κυψέλες (cell-free networking) προς την έννοια της κατανεμημένης επεξεργασίας χωρίς κυψέλες και επιτρέπει ασύρματες λύσεις mmWave, οι οποίες θα υλοποιηθούν και θα ενσωματωθούν με τα υπάρχοντα στοιχεία vRAN, ενώ θα συμβαδίζουν με την προσέγγιση κατά την O-RAN (Open-RAN) Alliance¹¹⁰. Παράλληλα, στα τμήματα fronthaul/midhaul το MARSAL στοχεύει να αυξήσει ριζικά την ευελιξία των αρχιτεκτονικών οπτικής πρόσβασης για τη συνδεσιμότητα Τόπου Κυψέλης πέρα από το 5G, μέσω διαφορετικών επιπέδων σύγκλισης σταθερής-κινητής [123].

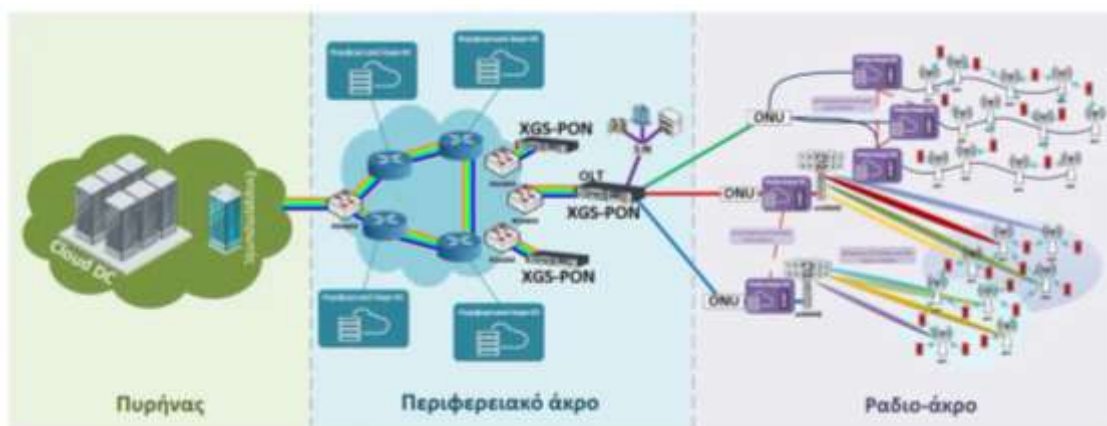
Ο δεύτερος πυλώνας του έργου βασίζεται στην έννοια της Ελαστικής Υπολογιστικής στο Άκρο του Δικτύου (Elastic Edge Computing), στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας της Κινητής Υπολογιστικής στο Άκρο του Δικτύου (Mobile Edge Computing - MEC) και των συστημάτων διαχείρισης τεμαχισμού δικτύου, μέσω μιας ιεραρχίας αναλυτικών μηχανών και μηχανών αποφάσεων. Στόχος είναι η παροχή ενός καταληπτού πλαισίου για τη διαχείριση ολόκληρου του συνόλου των πόρων επικοινωνίας και των υπολογιστικών δικτυακών πόρων [123].

Στο πλαίσιο του τρίτου πυλώνα, το MARSAL θα αναπτύξει νέους μηχανισμούς που βασίζονται σε Μηχανική Μάθηση (ML) οι οποίοι εγγυώνται την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια σε περιβάλλοντα πολλαπλών μισθωτών (multi-tenancy), με στόχο τόσο τους τελικούς χρήστες όσο και τους μισθωτές (tenants). Αυτό θα επιτρέψει στις εφαρμογές και στους χρήστες να διατηρήσουν τον έλεγχο των δεδομένων τους όταν βασίζονται στις ανεπτυγμένες κοινόχρηστες υποδομές, ενώ θα αναπτυχθούν τεχνολογίες AI (Τεχνητή

¹¹⁰ Η O-RAN Alliance είναι ένας φορέας που αποσκοπεί στο μετασχηματισμό των δικτύων ραδιοεπικοινωνίας προς ένα ανοικτό, ευφυές, εικονικοποιημένο και πλήρως διαλειτουργικό RAN (<https://www.o-ran.org/>).

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Νοημοσύνη) και Blockchain, για να παρέχονται εγγυήσεις σχετικά με ένα ασφαλές περιβάλλον τεμαχισμού δικτύου για πολλούς μισθωτές [123].



Εικόνα 24: Βασική εννοιολογική προσέγγιση του έργου MARSAL με μια πλήρη ρύθμιση συστήματος 5G από δίκτυα πρόσβασης σε δίκτυα πυρήνα [123]

7.7 REINDEER: “REsilient INteractive applications through hyper Diversity in Energy Efficient RadioWeaves technology”

“Επανατακτικές Διαδραστικές εφαρμογές μέσω της υπερ-ποικιλομορφίας στην ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία RadioWeaves”



Το έργο REINDEER (Grant Agreement No.101013425) θα αναπτύξει μια νέα έξυπνη πλατφόρμα σύνδεσης-υπολογισμών με χωρητικότητα κλιμακούμενη έως σχεδόν άπειρη και που θα προσφέρει αντιληπτή μηδενική καθυστέρηση και αλληλεπίδραση με εξαιρετικά μεγάλο αριθμό ενσωματωμένων συσκευών. Θα αναπτύξει έτσι την αποκαλούμενη τεχνολογία «RadioWeaves¹¹¹», που συνιστά μια νέα υποδομή ασύρματης πρόσβασης αποτελούμενη από έναν ιστό κατανεμημένων ραδιοπόρων, υπολογιστικών πόρων και πόρων αποθήκευσης που λειτουργούν ως μια τεράστια, κατανεμημένη συστοιχία κεραιών [125]. Τεχνολογικά, η RadioWeaves προωθεί τις ιδέες των ευφών επιφανειών μεγάλης κλίμακας και της ασύρματης πρόσβασης χωρίς κυψέλες, δύο θεωρητικές έννοιες που υπόσχονται πολλά για να προσφέρουν δυνατότητες πολύ πέρα από τα δίκτυα 5G [124].

Το έργο REINDEER θα φέρει ουσιαστική καινοτομία για την πρόοδο τόσο των αρχιτεκτονικών της πλατφόρμας όσο και των πρωτοκόλλων και των αλγορίθμων για την αξιοποίηση των μεγάλων δυνατοτήτων στις πραγματικές αναπτύξεις και τη δημιουργία μελλοντικών διαδραστικών εφαρμογών [124]. Συγκεκριμένα θα αναπτυχθούν πρωτόκολλα και αλγόριθμοι για τη δημιουργία νέων ανθεκτικών διαδραστικών εφαρμογών που απαιτούν συνεργασία σε «πραγματικό χρόνο» και «πραγματικό χώρο», για μελλοντικά ρομποτικά βιομηχανικά περιβάλλοντα και για εφαρμογές καθηλωτικής ψυχαγωγίας και διαισθητικής φροντίδας. Θα σχεδιάζονται από κοινού αλγόριθμοι εστίασης και πρωτόκολλα για βελτιωμένη αλληλεπίδραση με πολλές ενεργειακά ουδέτερες συσκευές. Το έργο θα ενισχύσει την ευρωπαϊκή τεχνολογική ηγεσία και η καινοτομία θα δημιουργήσει νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες [125].

Η λειτουργία σε αυτή την υποδομή θα γίνεται με εξαιρετικά αποδοτική χρήση ενέργειας και εύρους ζώνης. Θα προταθούν έξυπνες τεχνολογίες συνδετικότητας για διαδραστικές εμπειρίες, με αντιληπτό μηδενικό λανθάνοντα χρόνο και αδιάλειπτη διαθεσιμότητα, τόσο χρονικά, όσο και σε τοποθεσία εντός της λειτουργίας της υπηρεσίας [125].

Επομένως, το REINDEER θα επικεντρωθεί στους ακόλουθους στόχους [125]:

- Ανάλυση και προσδιορισμός τεχνικών απαιτήσεων για μελλοντικές διαδραστικές εφαρμογές σε περιπτώσεις χρήσης βιομηχανίας, φροντίδας και ψυχαγωγίας.
- Ανάπτυξη μιας μετασχηματιστικής πλατφόρμας συνδετικότητας RadioWeaves ως ενεργειακά αποδοτική, έξυπνη, κλιμακούμενη και ασφαλή υποδομή συνδετικότητας

¹¹¹ L. Van der Perre, E.G. Larsson, F. Tufvesson, L. De Strycker, E. Björnson, and O. Edfors (2020): **RadioWeaves for efficient connectivity: analysis and impact of constraints in actual deployments**, <https://arxiv.org/abs/2001.05779>.

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

και ανάπτυξη τοπολογιών για μηδενική διακοπή ρεύματος και αποτελεσματική και ασφαλή ανάπτυξη.

- Ανάπτυξη κλιμακοθετήσιμων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για λειτουργία χωρίς κυψέλες και λύσεων επεξεργασίας σημάτων για ανθεκτικές διαδραστικές εφαρμογές και για συνεργασία με συσκευές «ενεργειακά ουδέτερες», μέσω της προδραστικής ποικιλομορφίας, της μάθησης τοποθεσίας και της κατανεμημένης νοημοσύνης.
- Πειραματική επικύρωση και επίδειξη της έξυπνης πλατφόρμας συνδετικότητας RadioWeaves και των αλγορίθμων REINDEER για ισχυρές εφαρμογές και αλληλεπίδραση με ενεργειακά ουδέτερες συσκευές.
- Μερισμό των αποτελεσμάτων με μια ευρεία ομάδα ενδιαφερόμενων μερών και με την επιστημονική κοινότητα, για την προώθηση του τεχνολογικού οράματος στις δραστηριότητες προ-τυποποίησης και για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας.

7.8 RISE-6G: “Reconfigurable Intelligent Sustainable Environments for 6G Wireless Networks”

«Αναδιαρθρώσιμα ευφυή βιώσιμα περιβάλλοντα για ασύρματα δίκτυα 6G»



Το όραμα του έργου RISE-6G (Grant Agreement No.101017011) αξιοποιεί τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία αναδιαμορφώσιμων ευφυσών επιφανειών (RIS) για τον έλεγχο της διάδοσης ραδιοκυμάτων, προκειμένου να τις βελτιώσει ουσιαστικά και, για να κατανοήσει και να εφαρμόσει έξυπνα, βιώσιμα και δυναμικά προγραμματιζόμενα ασύρματα περιβάλλοντα που υπερβαίνουν κατά πολύ τις 5G δυνατότητες που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της έκδοσης 3G PPP 16 [126].

Για το σκοπό αυτό, οι στόχοι του RISE-6G είναι οι εξής [126]:

- i) Ο καθορισμός νέων αρχιτεκτονικών δικτύων και στρατηγικών λειτουργίας που θα περιλαμβάνουν πολλαπλές RIS.
- ii) Ο χαρακτηρισμός των θεμελιωδών ορίων του, μέσω της αξιοποίησης των προτεινόμενων ρεαλιστικών και επικυρωμένων μοντέλων διάδοσης ραδιοκυμάτων.
- iii) Σχεδιαστικές λύσεις για να επιτραπεί το επιγραμμικό «εμπόριο»/συναλλαγή μεταξύ συνδετικότητας υψηλής χωρητικότητας, ενεργειακής απόδοσης, έκθεσης EMF και ακρίβειας εντοπισμού θέσης βάσει δυναμικά προγραμματιζόμενων περιβαλλόντων ασύρματης διάδοσης, ενώ θα πληρούνται συγκεκριμένες νομοθετικές και κανονιστικές απαιτήσεις για τη χρήση του φάσματος, την προστασία δεδομένων και την εκπομπή EMF.
- iv) Προτεινόμενη καινοτομία πρωτότυπου-συγκριτικής αξιολόγησης μέσω δύο συμπληρωματικών δοκιμών με καθετοποιημένους τομείς της αγοράς.

Το έργο RISE-6G είναι έτοιμο να συμμετάσχει ενεργά στους φορείς τυποποίησης και να φέρει το τεχνικά προηγμένο όραμά του στη σχεδιαζόμενη βιομηχανική εκμετάλλευση. Αυτό θα εξασφαλίσει την ηγετική θέση στην ευρωπαϊκή τεχνολογία, υποστηρίζοντας τη δημιουργία νέων υπηρεσιών και επιχειρηματικών ευκαιριών που έχουν σχεδιαστεί από την Ευρώπη στον παγκόσμιο αγώνα B5G/6G [126].

7.9 TeraFlow: “Secured autonomic traffic management for a Tera of SDN flows”

«Ασφαλής αυτόνομη διαχείριση της κίνησης για ένα Tera των ροών SDN»

(Διάρκεια 30 μήνες)



Το έργο TeraFlow (Grant Agreement No.101015857) θα δημιουργήσει έναν νέο, εγγενή στο cloud, ελεγκτή SDN, για δίκτυα πέρα από 5G. Αυτός ο νέος ελεγκτής SDN θα μπορεί να ενσωματωθεί με τα τρέχοντα πλαίσια NFV και MEC καθώς και να παρέχει επαναστατικά χαρακτηριστικά για τη συγκέντρωση ροής, τη διαχείριση (στρώμα υπηρεσίας), την ενοποίηση εξοπλισμού δικτύου (στρώμα υποδομής) και την ασφάλεια που βασίζεται σε AI/ML και τις δικαστικές αποδείξεις για πολυμίσθωση [128].

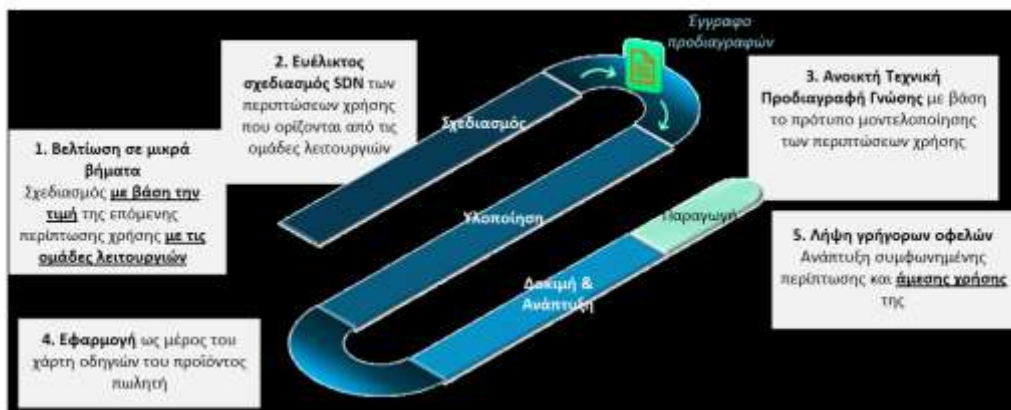
Το έργο προτείνει μια ολοκληρωμένη λύση για την αντιμετώπιση διαφόρων προκλήσεων των δικτύων B5G για την υποστήριξη των παρόχων υπηρεσιών και των τηλεπικοινωνιακών φορέων στο ταξίδι τους προς τα μελλοντικά δίκτυα, και έχει ως στόχους τα εξής [128]:

- Την παροχή ενός νέου ελεγκτή SDN για τα δίκτυα B5G που εξελίσσει τη διαχείριση ροής δικτύου σε απαιτήσεις κλίμακας νέφους, προκειμένου να υποστηρίξει 10 φορές αύξηση των υπηρεσιών συνδετικότητας.
- Την επιτάχυνση της καινοτομίας στα δίκτυα μεταφοράς και IP για την υποστήριξη των τηλεπικοινωνιακών παρόχων για την παροχή καλύτερης συνδετικότητας για τις κοινότητες σε όλο τον κόσμο.
- Την ενοποίηση του Λειτουργικού Συστήματος (OS) TeraFlow OS με κατανεμημένη υπολογιστική, συμπεριλαμβανομένης της Υπολογιστικής Πολλαπλής Πρόσβασης στο Άκρο του Δικτύου (MEC) για την ενεργοποίηση πολλαπλών μισθώσεων και συνδεσιμότητας μεταξύ τομέων μέσω Τεμαχίων/Φετών του Δικτύου Μεταφοράς.
- Αυτοματοποίηση της διαχείριση υπηρεσιών για τεμάχια/φέτες του δικτύου μεταφοράς, χαρτογραφώντας φυσικούς πόρους και διασφαλίζοντας έναν εξαιρετικά κλιμακοθετήσιμο τρόπο αντιμετώπισης τεράστιου αριθμού αιτημάτων.
- Ανάπτυξη ενός συστήματος ανίχνευσης εισβολής (Intrusion Detection System - IDS) που βασίζεται σε ML για την προστασία του δικτύου και της υποδομής TeraFlow από προηγμένες απειλές στα στρώματα L0-L4.
- Σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός κλιμακοθετήσιμου και αξιόπιστου κατανεμημένου γενικού καθολικού (ledger) με χρήση μηχανισμών blockchain και έξυπνων συμβάσεων για την απλοποίηση και την ασφαλή διαχείριση του δικτύου.

Το έργο TeraFlow στοχεύει να αναπτύξει έναν ελεγκτή SDN Grade Carrier (Βαθμού Φέρουσας) για δίκτυα B5G, με υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας, πλεονασμού και ασφάλειας [128].

Η δεξαμενή-στόχος των συμφεροντούχων επεκτείνεται πέρα από τους παραδοσιακούς τηλεπικοινωνιακούς παρόχους σε παρόχους άκρων δικτύου (edge providers) και παρόχους υπερκλίμακας νέφους. Αυτοί οι «παίκτες» φορείς θα επωφεληθούν από το έργο TeraFlow: α) εκμεταλλευόμενοι έναν νέο τύπο ασφαλούς ελεγκτή SDN που βασίζεται σε εγγενείς ως προς το νέφος, λύσεις, ενώ, β) επιτυγχάνεται σημαντική επιχειρηματική ευκινησία με νέες και εξαιρετικά δυναμικές υπηρεσίες δικτύου με δυνατότητες αυτοματισμού μηδενικής αφής [127].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G



Εικόνα 25: Προτεινόμενη μεθοδολογία του έργου TeraFlow [129]

7.10 B5G OPEN: “Beyond 5G – Optical nEtwork Continuum”

«B5G OPEN: Πέρα από το 5G - Συνέχεια του Οπτικού δικτύου»



Το έργο B5G-OPEN (Grant Agreement No.101016663) στοχεύει στη σχεδίαση, τη δημιουργία πρωτοτύπων και την επίδειξη μιας νέας από άκρο σε άκρο ενοποιημένης οπτικής αρχιτεκτονικής μεταφοράς πακέτων, που βασίζεται σε δίκτυα οπτικής μετάδοσης και μεταγωγής Πολλαπλών Ζωνών (MultiBand - MB). Η περίπτωση MB επεκτείνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα των οπτικών ινών, επιτρέποντας τη μετάδοση εντός των ζωνών S¹¹², E¹¹³ και O¹¹⁴, επιπλέον των εμπορικών ζωνών C¹¹⁵ ή/και C+L¹¹⁶, που μεταφράζεται σε πιθανή αύξηση χωρητικότητας 10 φορές και χαμηλή καθυστέρηση για υπηρεσίες πέραν του 5G [130].

Για την υλοποίηση δικτύων πολλαπλών ζωνών (MB), απαιτούνται τεχνολογικές εξελίξεις, τόσο σε επίπεδα δεδομένων, όσο και ελέγχου και διαχείρισης. Όσον αφορά στις συσκευές, αυτές περιλαμβάνουν νέους ενισχυτές, υποσυστήματα χωρίς φίλτρο, πολυπλέκτες προσθήκης/απόθεσης, κτλ. Μια τέτοιου είδους τεχνολογία καθίσταται επαναστατική καθώς προωθεί πομποδέκτες μεταβλητού εύρους ζώνης με δυνατότητα κοπής και νέα συνδεδεμένα οπτικά. Η διαθεσιμότητα μετάδοσης MB θα οδηγήσει επίσης σε έναν πλήρη επανασχεδιασμό της αρχιτεκτονικής από άκρο σε άκρο, αίροντας τα όρια μεταξύ των τομέων δικτύου και μειώνοντας τους ηλεκτρονικούς ενδιάμεσους τερματισμούς [130].

Το επίπεδο ελέγχου θα επεκταθεί για να υποστηρίξει στοιχεία πολλαπλών ζωνών και μια αρχιτεκτονική δικτύου «χωρίς τομέα». Θα βασίζεται σε αφαίρεση φυσικού στρώματος, σε νέα μοντελοποίηση βλαβών και στη συλλογή δεδομένων διάχυτης τηλεμετρίας για να τροφοδοτήσει αλγόριθμους AI/ML που θα οδηγήσουν σε ένα παράδειγμα δικτύωσης Zero-Touch (Μηδενικής Αφής), που θα περιλαμβάνει ένα λειτουργικό σύστημα κόμβου με πλήρη χαρακτηριστικά για λευκά κουτιά οπτικών πακέτων [130].

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε δύο τελικές επιδείξεις που εκθέτουν τα οφέλη του έργου από την οπτική γωνία του παρόχου και του χρήστη. Το έργο B5G-OPEN θα έχει σαφή αντίκτυπο στην κοινωνία, δείχνοντας την εξέλιξη προς έναν κόσμο με αυξημένες ανάγκες συνδετικότητας και μεγαλύτερης χωρητικότητας για την υποστήριξη νέων υπηρεσιών B5G και νέων προτύπων κίνησης [130].

¹¹² Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/S_band

¹¹³ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/E_band

¹¹⁴ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/A_Band_Called_O

¹¹⁵ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: [https://en.wikipedia.org/wiki/C_band_\(IEEE\)](https://en.wikipedia.org/wiki/C_band_(IEEE))

¹¹⁶ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.: https://en.wikipedia.org/wiki/L_band

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8. ΠΕΡΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

Οι τεχνολογίες επικοινωνίας συχνά επιτελούν κρίσιμο ρόλο σε πολλούς τομείς της ευρύτερης οικονομικής και κοινωνικής δραστηριότητας με τους οποίους συσχετίζονται [15].

Στο μέλλον, οποιαδήποτε εφαρμοσμένη τεχνολογική ανάπτυξη θα πρέπει να διαμορφώνεται και σε σχέση με το πώς θα έχει τη δυνατότητα να βοηθήσει την κοινωνία, τους τελικούς χρήστες, όπως και τη δημιουργία αξίας για τους εμπλεκόμενους ΜΝΟs (Mobile Network Operators - Πάροχοι Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας). Ιδίως, οι ΜΝΟs θα πρέπει να είναι σε θέση ώστε να παρέχουν καινοτόμες και διαφοροποιημένες υπηρεσίες στους πελάτες τους για να καλύπτουν μεγάλο εύρος απαιτήσεων, ενώ θα διαχειρίζονται και θα λειτουργούν τα δίκτυά τους με πολύ πιο αποδοτικό τρόπο [12].

Το 6G θα είναι ένα αυτόνομο οικοσύστημα τεχνητής νοημοσύνης. Θα εξελιχθεί σταδιακά από ανθρωποκεντρικό σε ανθρώπινο και μηχανοκεντρικό. Το 6G θα φέρει μια σχεδόν άμεση και απεριόριστη πλήρη ασύρματη συνδετικότητα [75]. Επίσης θα αποτελέσει ένα από τα βασικά θεμέλια των μελλοντικών ανθρώπινων κοινωνιών. Για να καταστεί ικανή μια διατηρήσιμη πρόοδος για την κοινωνία, σύμφωνα με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Sustainable Development Goals - UN SDGs), είναι κρίσιμο το 6G να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις κοινωνικές ανάγκες, με το να παρέχει νέες λειτουργίες [75].

Η σύγκλιση των νέων τεχνολογιών δημιουργεί πρωτοφανείς ευκαιρίες σε όλες τις επόψεις, από τις επιχειρήσεις έως το επιχειρηματικό εμπόριο και έως την ανθρωπιστική παρέμβαση. Η συγχώνευση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) με τις δυνατότητες μεγάλων δεδομένων – πέρα από την πραγματική εκθετική συσσώρευση των ίδιων των δεδομένων – έχει δημιουργήσει έναν συναρπαστικό κόσμο επικοινωνίας, συνεργασίας και αλληλεπίδρασης μεταξύ ανθρώπων, μεταξύ μηχανών και μεταξύ ανθρώπων και μηχανών [145].

Για την προαγωγή ενός νέου τεχνολογικού υποδείγματος και προκειμένου αυτό να καταστεί κοινωνικοοικονομικά προσοδοφόρο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ζητήματα και πέρα από την τεχνολογική διάσταση [15]. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται τα εξής κρίσιμα ζητήματα σε σχέση με το 6G, πέρα από τις τεχνολογίες επικοινωνίας [15]:

- Διατηρήσιμη ανάπτυξη του 6G
- Πιθανά θέματα υγείας και ψυχολογίας για τους χρήστες
- Προσδοκίες αγοράς
- Επιχειρηματικά μοντέλα
- Λειτουργικές ανάγκες
- Εξάρτηση από βασικές επιστήμες

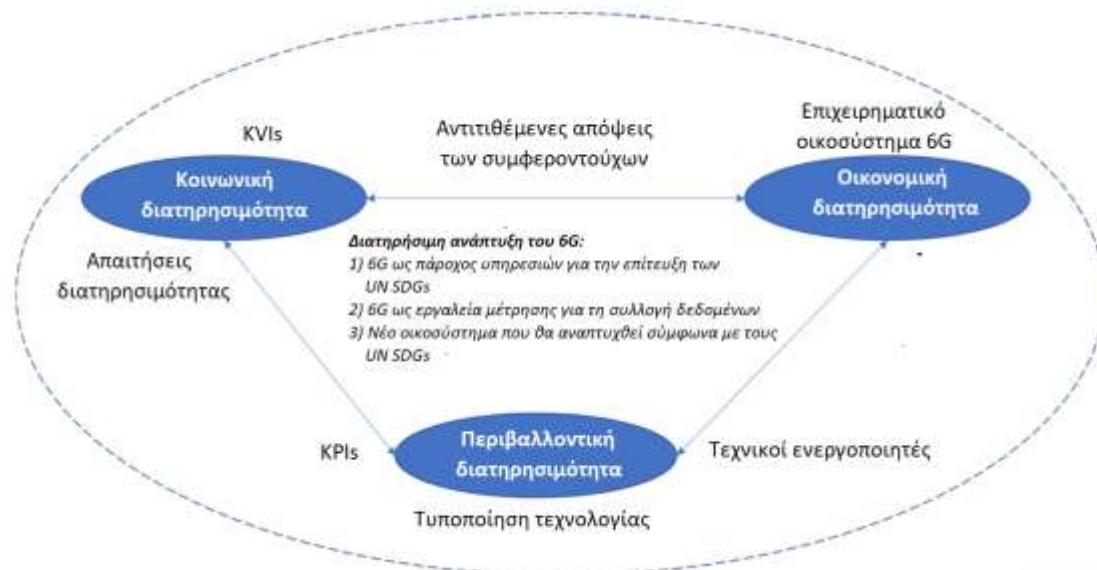
8.1 Διατηρήσιμη Ανάπτυξη του 6G

Οι κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επόψεις της διατηρησιμότητας, έχουν καταστεί ολοένα και πιο σημαντικά κριτήρια σχεδιασμού στην ανάπτυξη των μελλοντικών τεχνολογιών, μαζί με το πλαίσιο των UN SDGs που θέτει συγκεκριμένους στόχους, οι οποίοι πρέπει να επιτευχθούν έως το 2030 [142].

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

Για τη διαχείριση της αλληλεξάρτησης της οικονομικής, κοινωνικής και περιβαλλοντικής διατηρησιμότητας, οι απαιτήσεις που απορρέουν από αυτές τις προοπτικές θα πρέπει να είναι ισοσταθμισμένες και να μην διακυβούνται [143]. Εάν η οικονομική διατηρησιμότητα αποσκοπεί στη διασφάλιση της κερδοφορίας και της ρευστότητας, η κοινωνική διατηρησιμότητα έχει ως στόχο να συνεισφέρει στο ανθρώπινο και κοινωνικό κεφάλαιο και η περιβαλλοντική διατηρησιμότητα αναφέρεται στην κατανάλωση αναπαραγωγίμων πόρων [142].

Στην εικόνα 22 απεικονίζονται οι συσχετιζόμενες προοπτικές κοινωνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής διατηρησιμότητας σε ένα πλαίσιο διατηρήσιμης ανάπτυξης του 6G. Οι απαιτήσεις διατηρησιμότητας θα πρέπει να μεταφραστούν σε νέους KPIs του 6G που θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη τεχνικών «ενεργοποιητών» (“enablers”) 6G και αντίστοιχων «συστατικών» (“components”), για τα οποία όμως θα χρειαστεί να λάβουν χώρα δράσεις τυποποίησης ώστε να φτάσουν σε οικονομίες κλίμακας. Επίσης θα μπορούσε να γίνει περαιτέρω χρήση ορισμένων τέτοιων τεχνολογικών συστατικών ως εργαλεία μέτρησης για να συλλέξουν δεδομένα σε ό,τι αφορά τη διατηρησιμότητα. Η οικονομική διατηρησιμότητα θα οδηγήσει στην ανάδειξη ενός νέου επιχειρηματικού οικοσυστήματος 6G με νέους συμφεροντούχους και ρόλους και ενδεχομένως με αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με τον τρόπο διεξαγωγής των επιχειρηματικών δραστηριοτήτων. Οι δείκτες KVIs που απορρέουν από πτυχές κοινωνικής διατηρησιμότητας, θα είναι χρήσιμοι για το 6G, ιδίως για να υποδείξουν πόσο καλά το 6G μπορεί να βοηθήσει όλες τις κοινωνικές επόψεις στο να επιτύχουν τους SDGs (Sustainable Development Goals - Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης)¹¹⁷ των Ηνωμένων Εθνών [142].



Εικόνα 26: Κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές προοπτικές διατηρησιμότητας στη διατηρήσιμη ανάπτυξη του 6G [142]

¹¹⁷ Για περισσότερες πληροφορίες, βλέπε π.χ.:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

8.1.1 Κοινωνικοί Στόχοι και Διατηρησιμότητα

Είναι πολύ δύσκολη η πρόβλεψη σχετικά με το πώς η κοινωνία θα επηρεαστεί από μια συγκεκριμένη μορφή προηγμένης τεχνολογίας. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν διαπιστωθεί πολλές «καταλυτικές παρεμβάσεις», ιδίως μέσω των τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας. Παρόμοιες «παρεμβάσεις» είναι εξίσου εφικτές μέσω του επερχόμενου συστήματος 6G. Ωστόσο, είναι πιθανό το 5G να επιφέρει πολλές και σημαντικές αλλαγές στην κοινωνία, ιδίως με την ευρεία διάδοση τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης (ML), οπότε η παρεπόμενη άφιξη του 6G ενδέχεται να μην αποτελέσει έκπληξη για αρκετές από τις κοινωνικές δραστηριότητες [131]. Το θέμα βεβαίως είναι εξαιρετικά σύνθετο και δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι το 6G θα συμβάλει ιδίως στη διάδοση εφαρμογών AI, μεταβάλλοντας σημαντικά και σε βάθος χρόνου πολλές από τις παραδοσιακές κοινωνικές αντιλήψεις. Σε κάθε περίπτωση, η πρόοδος στις τεχνολογίες επικοινωνιών αναμένεται να διαδραματίσει μείζονα ρόλο ως προς την αντιμετώπιση και τον μετριασμό των παγκόσμιων κοινωνικών προκλήσεων [12].

Τα κράτη μέλη του Οργανισμού των Ηνωμένων Εθνών έχουν υιοθετήσει συγκεκριμένους SDGs. Για το σκοπό αυτό, εκτιμάται ότι οι μελλοντικές τεχνολογίες θα έχουν την δυνατότητα περαιτέρω συμβολής για την επιτυχία ορισμένων στόχων SDGs όπως π.χ. σχετικά με: Την περιβαλλοντική διατηρησιμότητα (συμπεριλαμβάνοντας τις τεχνολογίες έξυπνων πόλεων), την αποτελεσματική παροχή υγειονομικής περίθαλψης, τη μείωση της φτώχειας και της ανισότητας, βελτιώσεις στη δημόσια ασφάλεια και την ιδιωτικότητα, καθώς και στην υποστήριξη για τη γήρανση του πληθυσμού και τη διαχείριση της διευρυνόμενης αστικοποίησης [12].

Επίσης η δικτυακή υποδομή είναι απαραίτητη για τις κοινωνικές ανάγκες και προβλέπεται να γίνει κρισιμότερη καθώς ο ρόλος των δικτύων επικοινωνίας επεκτείνεται σε όλες τις εστίες της κοινωνίας. Επομένως, ορισμένοι παράγοντες θα διατελέσουν μείζονα ρόλο αναφορικά με τη θεώρηση/αξιολόγηση και αποδοχή τεχνολογιών του μέλλοντος. Τέτοιοι μπορεί να σχετίζονται με: την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, προσαρμοστικότητα (σε κλιματικά συμβάντα, κυβερνοεπιθέσεις, αστοχίες εξοπλισμού, σφάλματα λογισμικού, ανθρώπινα λάθη, κτλ.), περιβαλλοντικές επιπτώσεις από άκρο σε άκρο της βιομηχανίας ICT, ενεργειακή απόδοση και ψηφιακή ένταξη. Τα προαναφερόμενα αποτελούν απλώς κάποια παραδείγματα όπου η πρόοδος στις τεχνολογίες επικοινωνιών μπορεί να συμβάλει στην αντιμετώπιση κοινωνικών αναγκών. Ο πραγματικός αντίκτυπος των μελλοντικών τεχνολογιών επικοινωνιών θα είναι πολύ ευρύτερος στο πεδίο εφαρμογής και μεγαλύτερος σε κλίμακα, περιοριζόμενος μόνο από τη φαντασία και τη δημιουργικότητά μας σε ό,τι αφορά στην εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών προς όφελος όλων των πολιτών της κοινωνίας [12].

Όπως επισημαίνεται στο έγγραφο αναφοράς στην Ειδική Σύνοδο της Επιτροπής Ευρυζωνικών Υπηρεσιών των Ηνωμένων Εθνών και του Παγκόσμιου Οικονομικού Φόρουμ στην Ετήσια Συνάντηση του Νταβός (Ελβετία) 2017 [133], εκτός από τους τεχνολογικούς και οικονομικούς παράγοντες, κοινωνικοί παράγοντες θα μπορούσαν επίσης να εμποδίσουν την παγκόσμια συνδετικότητα στο 6G. Δηλαδή, οι άνθρωποι που ζουν σε αναπτυσσόμενες περιοχές ενδεχομένως δεν έχουν κίνητρα για να συνδεθούν, π.χ. εξαιτίας της έλλειψης συνάφειας περιεχομένου, τυχόν γλωσσικών φραγμών και μη επαρκούς εξοικείωσης με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Πρόκειται κυρίως για θέματα από την πλευρά της ζήτησης και αυτά θα ληφθούν πλήρως υπόψη κατά την ανάπτυξη των δικτύων 6G για το σκοπό της παγκόσμιας συνδετικότητας [15]. Έτσι είναι ιδιαίτερα σημαντική η συνεχής

εξέταση σχετικά με το κατά πόσο οι χρήστες έχουν πραγματική πρόσβαση στις απαιτούμενες ψηφιακές υπηρεσίες της καθημερινής ζωής, δηλαδή ότι διαθέτουν τις αναγκαίες συσκευές και έχουν τις γνώσεις να χρησιμοποιούν αυτές τις συσκευές και τις διαθέσιμες υπηρεσίες. Επίσης είναι απαραίτητο να εξεταστούν και οι μη χρήστες όπως και ο/οι λόγος/-οι που οδηγεί/-ούν σε καθεστώς αποκλεισμού τους (δηλαδή εάν πρόκειται για προσωπική τους επιλογή ή για κάποιο άλλο λόγο). Επίσης η βαθύτερη κατανόηση της τεχνολογίας υπό τη μορφή δεξιοτήτων τεχνολογικής ανάπτυξης, όπως είναι για παράδειγμα ο προγραμματισμός (programming) ή η ψηφιακή κατασκευή (digital fabrication), ενισχύει περαιτέρω τις δυνατότητες των χρηστών ώστε να αναλάβουν ενεργό ρόλο στο οικοσύστημα, δημιουργώντας και διαμορφώνοντας τεχνολογίες για την εξυπηρέτηση των προσωπικών τους αναγκών [142].

Η αίσθηση της κοινότητας που δημιουργείται από την τεχνολογία 6G και η ικανότητα συνεργασίας με άλλους δίνουν τη δυνατότητα στους ανθρώπους για να συμμετέχουν και να ενεργούν άμεσα στην κοινωνία, με έναν νέο τρόπο. Η από κοινού εξέλιξη ανθρώπων και τεχνολογιών και η από κοινού δημιουργία του ψηφιακού μέλλοντος από τους ανθρώπους είναι μέρος της καθημερινής ζωής και των πρακτικών τόσο στον εργασιακό τους χώρο όσο και τον ελεύθερο χρόνο τους [142].

Τα προγράμματα διάθεσης κινήτρων και οι εκστρατείες ενημέρωσης που χρηματοδοτούνται από τοπικές κυβερνήσεις και από ιδιωτικές εταιρείες θα ήταν επωφελείς για να πείσουν τους μη συνδεδεμένους σε απομακρυσμένες περιοχές ώστε εν τέλει να συνδεθούν και για την προώθηση της έννοιας της παγκόσμιας συνδετικότητας στην εποχή του 6G. Η προώθηση των εφαρμογών ηλεκτρονικών πληρωμών και ηλεκτρονικού ταξί στην Κίνα είναι καλά παραδείγματα σχετικά με τη σύνδεση πολύ περισσότερων ανθρώπων οι οποίοι δεν είχαν χρησιμοποιήσει ποτέ έξυπνο τηλέφωνο στο παρελθόν [15].

Τελικά, η εποχή του 6G θα οδηγήσει σε επωφελή αποτελέσματα, ιδίως μέσω των εκτενών αυτοματισμών, και χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Οι βασικοί στόχοι τόσο για την κοινωνία όσο και για τον πληθυσμό περιλαμβάνουν την πλήρη ψηφιακή ένταξη για την αντιμετώπιση του ψηφιακού χάσματος μεταξύ αστικών και απομακρυσμένων περιοχών και την ψηφιακή σύνδεση όσων εξακολουθούν να παραμένουν μακριά από τα σύγχρονα δίκτυα καθώς και για την αποσύζευξη της ανάπτυξης από το κόστος, φιλοδοξώντας τη μείωση του κόστους κοντά στο μηδέν τοις εκατό ανά bit/s. Η διατηρησιμότητα σε διαστάσεις του πρωτογενούς και του δευτερεύοντος αντίκτυπου θα είναι καίριας σημασίας: η χρήση συσκευών χωρίς μπαταρίες και η πορεία προσέγγισης προς ένα παράδειγμα μηδενικής ενέργειας/bit/s αποτελούν μέρος ενός αρκετά ελπιδοφόρου οράματος. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, οι ανθρώπινες δυνατότητες και ικανότητες αυξάνονται ουσιαστικά και διευρύνονται τόσο από την τεχνολογία όσο και από την αρχιτεκτονική του 6G [96].

8.1.2 Οικονομική Διατηρησιμότητα

Οι νέες τεχνολογίες θα πρέπει να είναι κερδοφόρες, οικονομικά προσιτές και να έχουν θετικές επιρροές και επιπτώσεις στο δίκτυο. Κατά την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών, ένας πρακτικός τρόπος σχεδιασμού της οικονομικής διατηρησιμότητας είναι η εστίαση στις ευκαιρίες, στο δυναμικό δημιουργίας αξίας και στα πλεονεκτήματα της ανεπτυγμένης τεχνολογίας και η συνεισφορά στην κλιμακοθετησιμότητα και στη δυνατότητα

αναπαραγωγής της εν λόγω τεχνολογίας. Η προσαρμοστικότητα¹¹⁸, με τη σειρά της, επηρεάζεται από την κλιμακοθετησιμότητα, τη δυνατότητα αναπαραγωγής και τη διατηρησιμότητα της τεχνολογίας [142].

Σχετικά με το 6G, τίθεται το ερώτημα κατά πόσο έχει την δυνατότητα να γίνει μια πραγματική τεχνολογία γενικής χρήσης (όπως π.χ. το Διαδίκτυο) και όχι μόνο μια σημαντική τεχνολογία ενεργοποίησης. Ενώ οι τεχνολογίες ενεργοποίησης είναι αναβαθμίσιμες και προσαρμόσιμες, έχουν δυνατότητες βελτίωσης και ευρεία εφαρμογή, οι τεχνολογίες γενικής χρήσης χαρακτηρίζονται τόσο από τη δυνατότητα διεισδυτικής χρήσης σε ευρεία περιοχή τομέων, όσο και από την αντίστοιχη τεχνολογική δυναμική. Καθώς οι τεχνολογίες γενικής χρήσης εξελίσσονται, εξαπλώνονται σε όλη την οικονομία, με αποτέλεσμα την πρόκληση και ενίσχυση της παραγωγικότητας. Εντούτοις, οι περισσότερες τεχνολογίες γενικής χρήσης εξακολουθούν να επιτρέπουν τεχνολογίες που «ανοίγουν» νέες ευκαιρίες και όχι ολοκληρωμένες, τελικές λύσεις [142].

Το 6G μπορεί να οριστεί ως αναδυόμενη τεχνολογία γενικής χρήσης, η οποία είναι πανταχού παρούσα, επιτρέποντας συνεχείς τεχνικές βελτιώσεις και ενισχύοντας την καινοτομία συμπληρωματικότητας σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς μέσω της (ανα-)διάρθρωσης της ανοικτής αξίας και του επιχειρηματικού μοντέλου που επικεντρώνεται στο οικοσύστημα [142].

8.1.3 Περιβαλλοντική Διατηρησιμότητα

Η περιβαλλοντική διατηρησιμότητα στο 6G θα υπερβεί τα παραδοσιακά ζητήματα επάρκειας των πόρων. Ωστόσο, τα συστήματα 6G πρέπει να αντιμετωπίσουν κριτικά την ενεργειακή αποτελεσματικότητα και την ενεργειακή κατανάλωση από άκρο σε άκρο, ζητήματα για τα οποία είναι αναγκαία νέα μέτρα και μέθοδοι μέτρησης. Η περιβαλλοντική διατηρησιμότητα στο 6G δύναται να εξεταστεί με τη χρήση της προσέγγισης 6R, δηλαδή μείωση (Reduce), επανάχρηση (Reuse), ανακύκλωση (Recycle), ανάκτηση (Recover), ανακατασκευή (Remanufacture) και επανασχεδιασμός (Redesign), η οποία αναπτύχθηκε αρχικά για την αξιολόγηση της διατηρησιμότητας των κατασκευαστικών αγαθών, που θα μας καθοδηγήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών 6G [142].

- Η «μείωση» παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τη μείωση της χρήσης των πόρων, της ενεργειακής κατανάλωσης, των αποβλήτων, της ακτινοβολίας και άλλων εκπομπών, που αποτελούν πιθανούς κινδύνους για την υγεία. Για τους λόγους αυτούς οι ανησυχίες των τελικών χρηστών γίνονται ολοένα και πιο σημαντικές στο πλαίσιο του 5G και του 6G.
- Η «επανάχρηση» επισημαίνει τη χρήση επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών γενικά στο επίπεδο του προϊόντος (περιλαμβάνοντας τα συστατικά του στοιχεία, τα συμπληρωματικά και τις επεκτάσεις), και στα επίπεδα διεργασιών και (οικολογικών) συστημάτων σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής μιας τεχνολογίας. Αυτό το επίπεδο οικοσυστήματος θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει τους χρήστες και ολόκληρο το κοινωνικό πλαίσιο της τεχνολογικής ανάπτυξης. Στο πλαίσιο του

¹¹⁸ Η προσαρμοστικότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός ανθρώπινου συστήματος (π.χ. μια μεμονωμένη επιχείρηση, ένας επιχειρηματικός τομέας, μια τοπική κοινότητα ή η ευρύτερη κοινωνία) να «απορροφά» τις διαταραχές και να αναδιοργανώνει τη λειτουργικότητά τους, όταν υφίσταται μια αλλαγή ή ακόμη και σοβαροί κλυδωνισμοί (shocks). Έτσι, έχει δύο πλευρές, δηλαδή την απορρόφηση και την προσαρμογή, ως προς την αλλαγή. Η προσαρμοστικότητα και η ολοκληρωμένη διατηρησιμότητα μπορούν να θεωρηθούν ως από κοινού εξελισσόμενες ή η προσαρμοστικότητα μπορεί να ερμηνευθεί ως οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα διατηρησιμότητας [142].

6G, θα είναι σημαντική, από την άποψη της διατηρησιμότητας, η μαζική επανάχρηση των υφιστάμενων φυσικών υποδομών και υποδομών υλισμικού, όπως και του λογισμικού.

- Η «ανακύκλωση» αναφέρεται στη μετατροπή των αποβλήτων και άλλων υποπροϊόντων της τεχνολογίας σε κάτι χρήσιμο μετά την αρχική χρήση. Ιδιαίτερης σημασίας, ως προς αυτήν την άποψη, είναι τα δεδομένα.
- Η «ανάκτηση» πραγματοποιεί τη συλλογή προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους και άλλων τεχνουργημάτων και αποτελεσμάτων, όπως και την ανάκτηση όσων μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για (άλλα) προϊόντα μετά τη χρήση τους. Συγκεκριμένα για το 6G, η ανάκτηση θα μπορούσε να αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο οι διαδοχικές γενιές δικτύων κινητών επικοινωνιών σε διαδοχικές φάσεις του κύκλου ζωής τους θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επιβάρυνσή τους στη διατηρησιμότητα.
- Ο «επανασχεδιασμός» προσφέρει ευελιξία στην διαδικασία ανακατασκευής, αλλά ιδιαίτερα επιτρέπει τη συμπληρωματικότητα και την επεκτασιμότητα της τεχνολογίας και της λειτουργίας της. Επίσης, αναφέρεται στην εξέταση των μεταβαλλόμενων κοινωνικών αξιών και τις απόψεις χρήσης. Στο 6G, θα πρέπει η ανάπτυξη να εστιάζεται στις ανάγκες των τελικών χρηστών.
- Τέλος, η «ανακατασκευή» αναφέρεται στην επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένων προϊόντων, διεργασιών και συστημάτων ή στην αποκατάστασή τους στην αρχική κατάσταση ή σε πιθανή νέα μορφή. Στο 6G, θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένη χρήση επιχειρηματικών μοντέλων «ως υπηρεσία» (“as a Service” – “aaS”)¹¹⁹, όπου π.χ. η υποδομή δεν αγοράζεται αλλά καταναλώνεται σαν υπηρεσία.

8.2 Πιθανά Θέματα Υγείας και Ψυχολογικές Επιπτώσεις για τους Χρήστες

Ο «μύθος του σταθμού βάσης» είναι ένα συχνό θέμα των δημόσιων μέσων ενημέρωσης και θα μπορούσε ακόμη και να προκαλέσει έντονες διαμαρτυρίες [134], κάτι που αντικατοπτρίζει τις ανησυχίες για την υγεία των χρηστών ως προς την ασφάλεια από την ακτινοβολία συνδυαστικά με περιορισμούς που αφορούν σε θέματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility - EMC). Με ένα «πυκνωμένο» δίκτυο μικρότερης κάλυψης ανά BS και χρήση υψηλότερων ζωνών συχνοτήτων, μπορεί να αναμένεται τέτοιου είδους προβληματισμοί να «επιδεινωθούν» στην εποχή του 6G. Δεδομένου πως οι επικοινωνίες 6G θα να είναι ανθρωποκεντρικές, επιδιώκεται να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα πιθανά ζητήματα υγείας που τίθενται στους χρήστες [15].

Σε αυτό το πλαίσιο εφαρμογής, η μετάδοση με επίγνωση EMF (Electromotive Force - Ηλεκτρεγερτική Δύναμη) θα μπορούσε να είναι μια νέα ιδέα που να εισαχθεί στο 6G για το μετριασμό των ανησυχιών για την υγεία, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι σε ορισμένες πόλεις έχουν επιτευχθεί τα όρια EMF. Επίσης η επέκταση του εύρους ζώνης από το καθεστώς χιλιοστομετρικών κυμάτων στο καθεστώς THz προκαλεί αβέβαιες βιολογικές επιπτώσεις σε ανθρώπους και ζώα. Έτσι, απαιτούνται προσεκτικές μελέτες για να εξεταστεί η ασφάλεια της ακτινοβολίας THz ([15], [135]).

Η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από τις Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP) ενημέρωσε πρόσφατα τις κατευθυντήριες γραμμές σχετικής έκθεσής της, με την οποία θα πρέπει να

¹¹⁹ Το “aaS” είναι ακρωνύμιο που σημαίνει «ως υπηρεσία» (π.χ. “X” ως υπηρεσία) και αναφέρεται σε κάτι που παρουσιάζεται σε έναν πελάτη, είτε εσωτερικό είτε εξωτερικό, ως υπηρεσία. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: https://en.wikipedia.org/wiki/As_a_service.

συμμορφώνονται οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας. Η νέα κατευθυντήρια γραμμή καλύπτει ζώνες υψηλότερων συχνοτήτων που προβλέπονται στα δίκτυα 5G και πέρα από αυτά [136]. Είναι σημαντική η διασφάλιση τήρησης αυτών των κατευθυντήριων γραμμών. Σε κάθε περίπτωση, διενεργούνται περαιτέρω έρευνες για την εξακρίβωση των επιπτώσεων των υψηλότερων συχνοτήτων σε ανθρώπους και σε άλλους οργανισμούς στο οικοσύστημα και σχετικά με το πώς να μετριάζονται αυτές οι επιπτώσεις [132].

Εκτός από τα θέματα υγείας, τυχόν ψυχολογικοί φραγμοί θα μπορούσαν να είναι ένας επιπλέον παράγοντας που θα παρεμπόδιζε τη μεγάλης κλίμακας υλοποίηση του 6G, υπό μια ανθρωποκεντρική θεώρηση. Όπως προβλέπεται σε ορισμένες προτάσεις, ακόμη και για τα δίκτυα 5G, οι μαζικοί αισθητήρες αναπτύσσονται σε όλο το χώρο και διαθέτουν ευφυΐα για ανίχνευση, κατανόηση, επικοινωνία και απόκριση. Στη συνέχεια, τα ερωτήματα που τίθενται αφορούν στο κατά πόσο θα απολαμβάνουν πραγματικά οι άνθρωποι και θα αισθάνονται άνετα με το να ζουν σε έναν τόσο έξυπνο χώρο, όπως και στο κατά πόσο θα είναι ευχαριστημένος ο κόσμος με το να ηχογραφείται και να παρακολουθείται από έναν τόσο τεχνοκρατικό «μεγάλο αδελφό». Έτσι χρειάζεται προσεκτική μελέτη αυτών των ψυχολογικών ζητημάτων πριν εφαρμοστεί στην πράξη το 6G, ώστε να μην προκληθούν καταστροφικές συνέπειες, αλλά και για να μην αποδομηθεί η υπάρχουσα εμπιστοσύνη στις ICTs [15].

Όταν αντιμετωπιστούν τα παραπάνω ζητήματα, οι κοινωνικές και ψυχολογικές προκλήσεις που αναμένονται στο 5G και πέρα από αυτό θα μειωθούν σημαντικά και εν συνεχεία θα εξαιρεθούν [109]. Έτσι το 6G αναμένεται να είναι όχι μόνο τεχνολογικά αξιόπιστο, αλλά και κοινωνικά αξιόπιστο [15].

8.3 Προσδοκίες της Αγοράς

Προσδοκίες της αγοράς είναι η ανάγκη για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών, προσφέροντας νέες υπηρεσίες και δυνατότητες, υποστηριζόμενες από εξελισσόμενες τεχνολογίες και με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Έτσι κρίνεται αναγκαίο για τον κλάδο της βιομηχανίας να προσδιοριστεί ένας ποσοτικοποιήσιμος και διαφοροποιημένος ρόλος για κάθε νέα τεχνολογία που δικαιολογείται από τις ανάγκες της αγοράς και τις εμπορικές ανάγκες εν γένει. Για να επιτευχθεί αυτό, οι νέες τεχνολογίες θα πρέπει να ενεργοποιήσουν σημαντικές και νέες δυνατότητες, υποστηρίζοντας καταλυτικά νέες και διαφοροποιημένες υπηρεσίες, και προσφέροντας με αυτό τον τρόπο μεγαλύτερες ευκαιρίες στην αγορά από ό,τι οι ήδη υφιστάμενες τεχνολογίες [12]. Επομένως διακρίνουμε τα ακόλουθα:

- **Νέες και διαφοροποιημένες υπηρεσίες:** Οι νέες εφαρμογές και υπηρεσίες που θα βασίζονται σε μελλοντικές τεχνολογίες, θα πρέπει να διαφοροποιούνται επαρκώς από τις υπάρχουσες υπηρεσίες ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αλληλοεπικάλυψη λειτουργιών. Αυτές οι νέες υπηρεσίες θα πρέπει να εστιάζονται στον πελάτη και να καθοδηγούνται από ειδικές νέες περιπτώσεις χρήσης, οι οποίες δεν υποστηρίζονται από τις υπάρχουσες τεχνολογίες.
- **Διευρυμένη ευκαιρία αγοράς:** Οι νέες εφαρμογές και υπηρεσίες που έχουν ως βάση τις μελλοντικές τεχνολογίες θα πρέπει να καθοδηγούνται από το πεδίο εφαρμογής και την κλίμακα εφαρμογών τους, καθώς και από τις ευκαιρίες της αγοράς. Στην ανάπτυξη νέας τεχνολογίας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο νόμος της

μείωσης των οριακών αποδόσεων¹²⁰, μεταξύ άλλων, η ποσοτικοποίηση της ζήτησης από την άποψη της αξίας αγοράς και η σύγκριση με το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υλοποίησης. Υπό μια επιχειρηματική θεώρηση, χρειάζεται η ανάδυση νέων παραδειγμάτων που θα προσδώσουν αξία στην κοινωνία και διατηρήσιμη απόδοση των επενδύσεων των ΜΝΟs και των λουιτών «παικτών» της αλυσίδας αξιών.

- **Εκ πλήρωσης των προσδοκιών της υπηρεσίας:** Οποιαδήποτε μελλοντική τεχνολογία θα πρέπει να αποφέρει πρακτικές, σημαντικές και οικονομικές απολαβές στην παροχή θεμελιωδών προσδοκιών των υπηρεσιών, όπως είναι η ευκολία προσβασιμότητας, η εμπειρία υπηρεσίας, η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικής ζωής.

Επιπλέον, κάθε νέα τεχνολογία επικοινωνίας πρέπει να έχει επαρκή ευελιξία στο σχεδιασμό της, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες που δεν αναμενόταν κατά τον χρόνο που σχεδιάστηκε, καθώς και επαρκές δυναμικό που θα επιτρέψει την καινοτομία πέρα από τη φαντασία του σήμερα [12].

8.4 Επιχειρηματικά Μοντέλα

Το 6G θα επιφέρει μια δραματική αλλαγή στην επιχειρηματική «αρένα». Το μέλλον των επιχειρηματικών δράσεων θα χαρακτηρίζεται από μια αρραγή και αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων αγοράς από τους ανθρώπους και το δυναμικό επιχειρηματικό περιβάλλον. Το 6G θα παρέχει μια φιλική προς τον χρήστη πλατφόρμα για έξυπνη ανάλυση μεγάλων δεδομένων για προϊόντα υψηλών προδιαγραφών και εξειδικευμένες υπηρεσίες. Αυτά τα προϊόντα και οι υπηρεσίες θα σχεδιαστούν με σκοπό να είναι ιδιαίτερα βιώσιμα και καλά εξατομικευμένα, ώστε να ανταποκρίνονται στις ιδιαίτερες ανάγκες των καταναλωτών σε απομακρυσμένες και σε αστικές γεωγραφίες. Επιπλέον, το 6G θα βοηθήσει τον πληθοπορισμό (crowdsourcing) και θα βελτιώσει τις προηγμένες πλατφόρμες διανομής, υποστηρίζοντας την κοινή χρήση βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων για την επιτάχυνση της δίκαιης κατανομής των πόρων [109].

Ένα επιχειρηματικό μοντέλο (business model) περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ένας οργανισμός δημιουργεί, παραδίδει και συλλέγει αξία. Η εστίαση έχει διευρυνθεί από μια εστιακή εταιρεία προς την έννοια του οικοσυστημικού επιχειρηματικού μοντέλου, όπου η αξία συνδημιουργείται, μοιράζεται και συλλέγεται από κοινού για τη μεγιστοποίηση της συνολικής αξίας που μοιράζονται και αποκτούν όλοι οι συμφεροντούχοι από τις δομές ενός οικοσυστήματος στη διακυβέρνηση δικτύου, τους βασικούς και τους συμπληρωματικούς παράγοντες, τις ανοιχτές διεπαφές και δεξαμενή καινοτόμων δυνατοτήτων και πόρων, το δομοστοιχειωτό (modular) σχεδιασμό πυρήνα και περιφέρειας [96].

Ο πελάτης βρίσκεται συχνά στο επίκεντρο κοινών πλαισίων επιχειρηματικών μοντέλων (όπως π.χ. είναι η πρόταση αξίας στον «καμβά» του επιχειρηματικού μοντέλου), εντούτοις

¹²⁰ Ο νόμος για τη μείωση των οριακών αποδόσεων είναι μια θεωρία στα οικονομικά, η οποία προβλέπει ότι μετά την επίτευξη κάποιου βέλτιστου επιπέδου παραγωγικής ικανότητας, η προσθήκη ενός πρόσθετου παράγοντα παραγωγής θα οδηγήσει στην πραγματικότητα σε μικρότερες αυξήσεις της παραγωγής. Βλέπε επίσης, μεταξύ άλλων: <https://www.investopedia.com/terms/l/lawofdiminishingmarginalreturn.asp>.

υπάρχει μικρή κατανόηση για τον τρόπο με τον οποίο τόσο οι πελάτες όσο και οι πάροχοι συμφωνούν στην από κοινού δημιουργία αξίας και την κατανομή αυτής, έτσι ώστε κάθε μέρος να λαμβάνει το μερίδιο που του αναλογεί (δηλαδή, σύλληψη αξίας) [137].

Η καινοτομία του επιχειρηματικού μοντέλου, η οποία προβαίνει σε νέες και μη τετριμμένες αλλαγές, προέρχεται από διαδικασία που έχει ως στόχο τη δημιουργία αξίας και τη διαδικασία εξασφάλισης κερδών, καθώς και την εξασφάλιση της διανομής αυτών εντός του οικοσυστήματος ([96], [137]).

Οι διαδικασίες σύλληψης αξίας περιλαμβάνουν δραστηριότητες που δίνουν την δυνατότητα στους παρόχους και στους πελάτες να προσδιορίζουν τον τρόπο κατανομής της πρόσθετης αξίας που δημιουργείται μεταξύ παρόχου και πελάτη. Επιπλέον, αναμφισβήτητα, το κρίσιμο σημείο της καινοτομίας του επιχειρηματικού μοντέλου δεν αποτελεί μόνο ο σχεδιασμός των διαδικασιών δημιουργίας και σύλληψης αξίας, αλλά όσο το να διασφαλιστεί η μεταξύ τους προσαρμογή και ευθυγράμμιση. Η ευθυγράμμιση θα εξασφάλιζε την «καταλληλότητα» των διαφόρων στοιχείων της δημιουργίας αξίας και της σύλληψης αξίας στην μεταξύ τους σχέση [137].

Ωστόσο, είναι λίγες οι μελέτες που έχουν παρουσιάσει στην πραγματικότητα συγκεκριμένες πληροφορίες σε ό,τι αφορά στον τρόπο δημιουργίας και διατήρησης της κατά την προηγούμενη παράγραφο «ευθυγράμμισης». Δεδομένου του ότι οι συνθήκες αλλάζουν, η επίτευξη ευθυγράμμισης είναι μια συνεχής πρακτική. Έτσι, σε μια συζήτηση για τη διαδικασία της ευθυγράμμισης απαιτείται τόσο ο προσδιορισμός της κατάστασης ευθυγράμμισης, όσο και η παρακολούθηση της δυναμικής της κακο-ευθυγράμμισης και της πιθανής επανευθυγράμμισης. Συνεπώς, απαιτείται η ανάπτυξη μεγαλύτερης κατανόησης του τρόπου με τον οποίο οι δραστηριότητες δημιουργίας αξίας και σύλληψης αξίας δύναται να ευθυγραμμιστούν στο πλαίσιο της καινοτομίας του επιχειρηματικού μοντέλου [137].

Τα επιχειρηματικά μοντέλα φαίνεται να συνδέονται με τρεις στρατηγικές επιλογές και σχετιζόμενες βασικές επιχειρηματικές δραστηριότητες, εντός των οικοσυστημάτων: (α) Τις ευκαιρίες για διερεύνηση και αξιοποίηση. (β) Την αξία που θα δημιουργηθεί και θα αποτυπωθεί. (γ) Τα πλεονεκτήματα που χρειάζεται να διερευνηθούν και να αξιοποιηθούν. Η διερεύνηση και η αξιοποίηση ευκαιριών και πλεονεκτημάτων μπορεί να θεωρηθεί ότι παρακινεί την οικοσυστημική αλληλεπίδραση από δυναμική άποψη ικανοτήτων, ενώ η δημιουργία αξίας, η παράδοση, η κοινή χρήση και η σύλληψη θεωρούνται τα βασικά στοιχεία ενός λειτουργικού επιχειρηματικού μοντέλου [144].

Η πρόσβαση στα δεδομένα και στην ιδιοκτησία δεδομένων είναι όλο και περισσότερο ο κύριος παράγοντας για τη δημιουργία αξίας και ο περιορισμός αυτής της πρόσβασης αποτελεί μέσο ελέγχου και περιοριστική εξουσιοδότηση. Η δημιουργία ενός συστήματος 6G που μετασχηματίζει τον τρόπο συλλογής, κοινής χρήσης, ανάλυσης και δράσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να δημιουργήσει ισχυρούς οδηγούς για τη μελλοντική αξία και να εισαγάγει καινοτόμους ρόλους συμφεροντούχων, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σοβαρές ανησυχίες ως προς το προσωπικό απόρρητο και τις ηθικές ανησυχίες σχετικά με την θέση και τη χρήση δεδομένων. Η διάχυτη επίδραση της τεχνητής νοημοσύνης δεν θα αντικατοπτρίζει απλώς το πώς μοιάζει κάτι, αλλά το πλαίσιο, τη σημασία και τη λειτουργία του, δημιουργώντας έτσι ένα Διαδίκτυο δεξιοτήτων, Διαδίκτυο αισθήσεων και ψηφιακών διδύμων, επιτρέποντας την εμπιστοσύνη και διασφαλίζοντας την ασφάλεια και το ιδιοαπόρρητο [144].

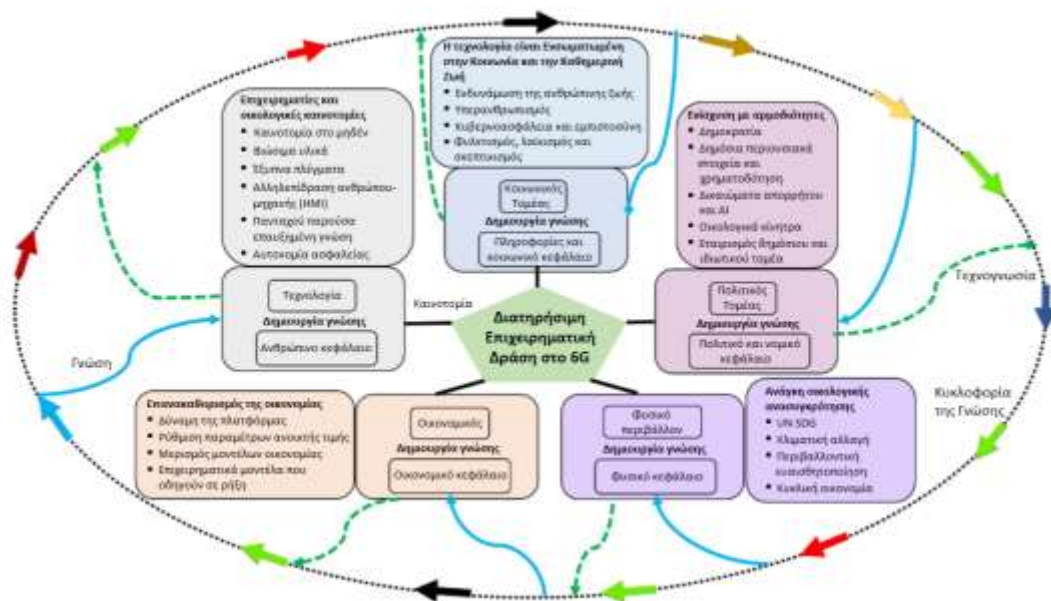
Το εγκεκριμένο πλαίσιο προβλέψεων επιχειρηματικού μοντέλου εστιάζεται στις διαστάσεις της επεκτασιμότητας, της δυνατότητας αναπαραγωγής και της διατηρησιμότητας ως μέρος των αναμενόμενων επιπτώσεων στην επίδοση του επιχειρηματικού μοντέλου [96].

Ένα κλιμακοθετήσιμο επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να ορίζεται ως «ευέλικτο και ως κατάλληλο ώστε να παρέχει εκθετικά αυξανόμενες αποδόσεις στην κλίμακα όσον αφορά σε όρους ανάπτυξης από πρόσθετους εφαρμοζόμενους πόρους» [138]. Η δυνατότητα αναπαραγωγής συζητά «την εκμάθηση της επιχείρησης σχετικά με τη βελτίωση της επιχείρησης για το (νέο) επιχειρηματικό της μοντέλο, επιλέγοντας τα απαραίτητα συστατικά στοιχεία αναπαραγωγής αυτού του μοντέλου σε κατάλληλες γεωγραφικές θέσεις, αναπτύσσοντας ικανότητες για τη μεταφορά γνώσης και διατηρώντας το μοντέλο σε λειτουργία μόλις αναπαραχθεί» [139]. Η διάσταση της διατηρησιμότητας του επιχειρηματικού μοντέλου διευρύνθηκε πέρα από τα οικονομικά ως προς τα εξής [140]: «Η διατηρησιμότητα βοηθά στην περιγραφή, ανάλυση, διαχείριση και επικοινωνία: (i) μιας πρότασης διατηρήσιμης αξίας από μια εταιρεία προς τους πελάτες της και προς όλους τους λοιπούς ενδιαφερόμενους, (ii) του τρόπου με τον οποίο δημιουργεί και παρέχει την αξία αυτή, (iii) και του τρόπου με τον οποίο αποτυπώνει/συλλέγει την οικονομική αξία διατηρώντας ή αναγεννώντας το φυσικό, κοινωνικό και οικονομικό κεφάλαιο πέρα από τα οργανωτικά της όρια» [96].

Δεδομένης της πρόσφατης παγκόσμιας χρηματοοικονομικής κρίσης, δεν υπάρχει αμφισβήτηση ως προς το γεγονός πως τα υπάρχοντα εταιρικά επιχειρηματικά μοντέλα είχαν σημαντικό αντίκτυπο στη διατηρησιμότητα της παγκόσμιας οικονομίας και κοινωνίας. Τούτο, βεβαίως, συνιστά μια μορφή «κλήσης αφύπνισης» προς όλες τις εταιρείες προκειμένου να ρυθμίσουν τις δραστηριότητές τους με στόχο την επίτευξη των UN SDGs. Τα επιχειρηματικά σενάρια για το 6G για τα επόμενα δέκα χρόνια αποτιμούνται ως έχοντα υψηλές πιθανότητες επιτυχίας [132].

Οι επιλογές¹²¹ για την ανάπτυξη πρώτης τάξεως διατηρήσιμων μελλοντικών επιχειρήσεων 6G έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας το μοντέλο της πενταπλής έλικας που φαίνεται στην Εικόνα 23. Η διατηρήσιμη επιχειρηματική δράση στο 6G είναι το κλειδί για τη δημιουργία γνώσεων, για την καθοδήγηση της ανθρώπινης ενδυνάμωσης, για την απόκτηση και μεταφορά τεχνολογίας, για την οικονομική σταθερότητα, για την επιχειρηματικότητα και την καινοτομία, για τη φυσική διατήρηση του περιβάλλοντος, για την οικολογική ανασυγκρότηση και για τον εκδημοκρατισμό των κυβερνητικών θεσμών [132].

¹²¹ Για περισσότερα σχετικά πληροφοριακά στοιχεία βλέπε, μεταξύ άλλων: S. Yrjölä, P. Ahokangas & M. Matinmikko-Blue (2020, October): **Sustainability as a Challenge and Driver for Novel Ecosystemic 6G Business Scenarios**. *Sustainability* vol.12, no.21, p.8951 <https://doi.org/10.3390/su12218951>



Εικόνα 27:Χρήσιμες επιλογές για την ανάπτυξη του προτιμώμενου διατηρήσιμου επιχειρηματικού μέλλοντος 6G [132]

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να σημειωθεί πως για τους περισσότερους απλούς χρήστες και τους υπεύθυνους χάραξης κυβερνητικών πολιτικών, το να πληρώνουν ορισμένες φορές υψηλότερα για να λάβουν ένα περιττό κέρδος απόδοσης όσον αφορά στο ρυθμό μετάδοσης ή στην λανθάνουσα καθυστέρηση, δεν θα γίνει αποδεκτό, πόσο δε μάλλον να εκτιμηθεί [15].

8.5 Λειτουργικές Ανάγκες

Με την όρο «Λειτουργικές Ανάγκες» νοείται η ανάγκη για να γίνει όλο και πιο αποτελεσματικός ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη, οι λειτουργίες, η διαχείριση και οι επιδόσεις των δικτύων της εταιρείας κινητής τηλεφωνίας. Με την εφαρμογή τεχνολογίας πολλών γενεών, την ανάπτυξη μεγαλύτερων ποσοτήτων εύρους ζώνης φάσματος και τη ζήτηση μεγαλύτερης αξιοπιστίας στις υπηρεσίες, το έργο της ανάπτυξης, λειτουργίας, παρακολούθησης και διαχείρισης των δικτύων και των υπηρεσιών γίνεται όλο και πιο περίπλοκο και αρκετά δυσκολότερο. Έτσι, η ανάγκη διαχείρισης της πολυπλοκότητας, προώθησης της αποδοτικότητας και μείωσης του κόστους, είναι πλέον ύψιστης σπουδαιότητας, στον οδικό χάρτη του 5G και στην πορεία προς το 6G [12].

Για να διασφαλιστεί το γεγονός ότι αυτά τα τεχνολογικά περίπλοκα δίκτυα και υπηρεσίες δεν ξεπερνούν την ικανότητα αποτελεσματικής ανάπτυξης, λειτουργίας, παρακολούθησης και διαχείρισης, θα πρέπει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις ακόλουθες λειτουργικές πτυχές όπως [12]:

- **Αυτοματισμός συστήματος από άκρο σε άκρο:** Για τη διαχείριση της αυξανόμενης πολυπλοκότητας του δικτύου, για τη μείωση των γενικών λειτουργικών εξόδων και

για την αύξηση της προσαρμοστικότητας του οικοσυστήματος, είναι απαραίτητη μια μορφή αρραγούς υπερ-αυτοματισμού. Ένα πλήρες πλαίσιο αυτοματισμού θα έδινε τη δυνατότητα πλήρους αυτοματοποιημένης διαχείρισης του κύκλου ζωής από τους φορείς εκμετάλλευσης, μεταξύ των υπηρεσιών, των δικτύων και των επιχειρήσεων/τομέων πολιτικής. Αυτό θα απαιτούσε ορατότητα του συστήματος από άκρο σε άκρο και θα βασιζόταν στην πλήρως ενσωματωμένη λειτουργία Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) [12].

- **Ορατότητα συστήματος από άκρο σε άκρο:** Για να καταστεί δυνατή η ορατότητα του συστήματος κατά 360°, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης δυνατότητας παρακολούθησης συστήματος από άκρο σε άκρο και συλλογής δεδομένων. Ένα πλήρες πλαίσιο θα περιλαμβάνει πλήρη ορατότητα σε υπηρεσίες, δίκτυα και τομείς επιχειρήσεων/πολιτικών με κατάλληλη ανάλυση δεδομένων (data resolution) και κοκκιότητα (granularity), διασφαλίζοντας έτσι επαρκώς ταχεία συλλογή δεδομένων και δυνατότητες απόκρισης. Οι λειτουργίες ασφάλειας δεδομένων, απορρήτου και ανωνυμίας θα είναι εγγενώς ενσωματωμένες [12].
- **Αποδοτικότητα και διαχείριση συστήματος:** Καθώς η υποδομή μεγαλώνει, είναι ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι όλες οι πτυχές της αποδοτικότητας του συστήματος (πέρα από την αυτοματοποίηση) λαμβάνονται υπόψη και αντιμετωπίζονται πλήρως [12].

8.6 Εξάρτηση από Βασικές Επιστήμες

Είναι παραδεκτό πως η πρόοδος των ασύρματων επικοινωνιών περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις βασικές επιστήμες, ιδιαίτερα τα μαθηματικά και τη φυσική. Ωστόσο τα μη κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία εμποδίζουν την εξερεύνηση της ακριβούς απόδοσης των επικοινωνιακών συστημάτων και οδηγούν σε ασαφείς καταστάσεις. Έτσι, τίθεται ένας μεγάλος αριθμός μη πρακτικών υποθέσεων προκειμένου να καταστεί η μαθηματική ανάλυση εφαρμόσιμη, η οποία δεν μπορεί πάντοτε να παράσχει πληροφορίες σε βάθος και κατευθυντήριες γραμμές για τις επικοινωνίες 6G [15]. Μια σημαντική ανακάλυψη στα μαθηματικά θα οδηγούσε συχνά σε μια νέα ερευνητική «έκρηξη» στις ασύρματες επικοινωνίες και ένα παράδειγμα είναι η στοχαστική γεωμετρία και η θεωρία γραφημάτων που εφαρμόζονται για τη μοντελοποίηση ασύρματων δικτύων [141]. Εν κατακλείδι, οι ερευνητές πρέπει να δώσουν επαρκή προσοχή στις βασικές επιστήμες και στα διεπιστημονικά πεδία προκειμένου να συμβάλλουν στην πραγματοποίηση των δικτύων 6G [15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι το να αναδειχθούν οι πολλαπλές τεχνολογικές προκλήσεις και τάσεις για τη μετάβαση προς στην επόμενη γενιά επικοινωνιών πέρα από το 5G.

Κάθε γενιά κινητής επικοινωνίας εμφανίζει νέα και εντυπωσιακά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις προηγούμενες, ενώ παράλληλα προτείνει καινοτομίες συνδυαστικά με τις απαιτήσεις της ταχέως εξελισσόμενης αγοράς. Υπό αυτή τη θεώρηση, το σύστημα της πέμπτης γενιάς 5G που κυκλοφόρησε επίσημα σε παγκόσμια κλίμακα περί το έτος 2020, αναμένεται ότι δεν θα έχει τη δυνατότητα για πλήρη υποστήριξης της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης για ασύρματη επικοινωνία σε περίπου μια δεκαετία. Ως εκ τούτου, δημιουργείται μια επιτακτική ανάγκη για τη μετάβαση προς ένα μελλοντικό δίκτυο 6G, το οποίο θα πρέπει να σχεδιαστεί κατά την τρέχουσα δεκαετία.

Στο πλαίσιο της επερχόμενης έκτης γενιάς αναμένεται ότι οι άνθρωποι θα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες και αγαθά οπουδήποτε και χωρίς περιορισμούς ως προς το χώρο και τον χρόνο εργασίας. Έτσι, στο εγγύς μέλλον η κοινωνία αλλά και η οικονομία θα είναι καθοδηγούμενες από τα δεδομένα, θα παρέχονται δυνατότητες παγκόσμιας συνδετικότητας καθώς επίσης και αρραγής διάδραση μεταξύ ανθρώπων και μηχανών, για να σχηματίζεται ένα πλήρως συνδεδεμένο ψηφιακό «έξυπνο περιβάλλον αναφοράς» όπου θα υφίσταται μια διαδραστική σύνδεση μεταξύ του φυσικού και του εικονικού κόσμου. Η διάδοση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και η ταχεία εξέλιξη της μηχανικής μάθησης (ML) θα αποτελέσουν άλλο ένα σημαντικό μέρος του 6G, καθώς θα επιδράσουν καταλυτικά στην ευρεία διάδοση της Κοινωνίας της Πληροφορίας και επίσης στη δημιουργία ευφυέστερων δικτύων με επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο, φέρνοντας στο προσκήνιο νέες ανθρώπινες αισθητηριακές εμπειρίες και καινοτόμες εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, η μηχανική μάθηση θα επιτύχει μια σαφώς καλύτερη προοπτική προς την πλήρη αυτοματοποίηση των λειτουργιών του δικτύου, ενώ η ομοσπονδιακή μάθηση (FL) θα συγκροτήσει μια «βέλτιστη λύση για κατανομημένη τεχνητή νοημοσύνη», επιτρέποντας στις επικοινωνίες 6G την επίτευξη μιας «πανταχού παρούσας AI». Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των μελλοντικών συστημάτων επικοινωνίας 6G θα είναι ο υψηλός ρυθμός δεδομένων, η εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, η χαμηλή λανθάνουσα καθυστέρηση, η υψηλή χωρητικότητα, η υψηλή ενεργειακή και φασματική απόδοση. Κύρια «κλειδιά» του οράματος για την απρόσκοπτη μετάβαση προς το 6G αποτελούν επίσης τα υψηλά επίπεδα ασφάλειας και απορρήτου που θα χαρακτηρίζουν τις συναφείς εφαρμογές/υπηρεσίες.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται μια εκτενής επισκόπηση της κινητής επικοινωνίας 6G. Παρουσιάζονται διάφορες νέες εφαρμογές οι οποίες απαιτούν από τα δίκτυα 6G την παροχή των σχετικών κύριων χαρακτηριστικών (όπως π.χ. υψηλό ρυθμό δεδομένων, αξιοπιστία, χαμηλές καθυστερήσεις, κινητικότητα, κτλ.). Οι περισσότερες από τις εν λόγω εφαρμογές έχουν ως κύριο στόχο την πλήρη έξυπνη συνδετικότητα, ώστε να εξασφαλισθεί μια «πανταχού παρούσα» επικοινωνία, σε παγκόσμια κλίμακα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνιστούν τα κάτωθι:

1. Το **Υπερ-Ευφυές IoT** που θα (δια-)συνδέει έναν εξαιρετικά μεγάλο αριθμό τερματικών συσκευών και αισθητήρων και το οποίο έχει ως στόχο να παρέχει ανά πάσα στιγμή

τόσο διαθέσιμες ασύρματες συνδέσεις (π.χ. σε δυσπρόσιτες τοποθεσίες και/ή ορεινές περιοχές καθώς και σε εφαρμογές IoT σε εναέρια και θαλάσσια περιβάλλοντα) όσο και έξυπνες υπηρεσίες (π.χ. ψηφιακοί βοηθοί, ρομποτικές συσκευές και UAVs).

2. Το **Διαδίκτυο των Πάντων (IoT)**, που θα ενσωματώνει και θα συντονίζει διάφορες «οντότητες» (όπως π.χ. ανθρώπους, φυσικά αντικείμενα, αισθητήρες, δεδομένα και διαδικασίες) και θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε «έξυπνες» κοινωνίες (π.χ. σε εφαρμογές έξυπνων βιομηχανιών, έξυπνων οχημάτων και έξυπνης υγειονομικής περίθαλψης).
3. Η **Ολογραφική Τηλεπαρουσία** που θα προβάλλει σε πραγματικό χρόνο τρισδιάστατες και πλήρους κίνησης εικόνες μακρινών αντικειμένων και ανθρώπων, και η οποία θα τυγχάνει χρήση σε τηλεδιασκέψεις, τηλε-εκπαίδευση, ρομποτική τηλε-χειρουργική κ.α.
4. Η **Κινητικότητα με Βάση τη Χρήση UAVs** που θα λαμβάνει χώρα τόσο σε αμυντικές εφαρμογές (π.χ. αυτόνομα drones, τηλεκατευθυνόμενα αεροσκάφη κ.ο.κ.) όσο και στο πολιτικό πεδίο εφαρμογών (π.χ. σε περιβαλλοντική ανίχνευση, γεωργία, διαχείριση καταστροφών, παρακολούθηση κυκλοφορίας, κτλ.).
5. Τα **Συνδεδεμένα και Αυτόνομα Οχήματα (CADs)** τα οποία θα προσφέρουν ριζικές αλλαγές στις αστικές μεταφορές (όπως είναι π.χ. τα δημόσια μέσα μεταφοράς και τα ταξί χωρίς οδηγό), καθιστώντας πιο άνετη την καθημερινή ζωή σε περισσότερο «πράσινες» και βιώσιμες πόλεις.
6. Οι **Ρομποτικοί και Βιομηχανικοί Αυτοματισμοί** που εκτιμάται ότι θα μειώσουν το εργασιακό κόστος και θα βελτιώσουν σημαντικά την παραγωγικότητα στις βιομηχανίες, χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο δίκτυο ενεργοποιητών και αισθητήρων για τον έλεγχο των διαδικασιών και για τη χρήση έξυπνων μηχανών και ρομπότ.
7. Η **Ευφυής Περίθαλψη** η οποία έχει ως στόχο τη βελτίωση της πρόσβασης και της ποιότητας της υγειονομικής περίθαλψης. Η τηλε-χειρουργική, η τηλε-διάγνωση και η τηλε-αποκατάσταση είναι πιθανές εφαρμογές στον ευρύτερο τομέα της υγειονομικής περίθαλψης.
8. Τα **Εξατομικευμένα Σωματικά Δίκτυα** τα οποία θα διαχειρίζονται θέματα παρακολούθησης της υγείας, χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες. Αυτά αναμένεται ότι θα τύχουν εφαρμογής τόσο σε ιατρικούς τομείς (π.χ. αποφυγή καλωδίων σε πολυ-υπνογραφικές εξετάσεις) όσο και σε μη ιατρικούς τομείς (π.χ. εφαρμογές ασφαλούς ελέγχου ταυτότητας, ανίχνευση συναισθημάτων και δράσεις ψυχαγωγίας).
9. Το **Έξυπνο Πλέγμα 2.0** το οποίο θα δώσει τη δυνατότητα σε έναν μεγάλο αριθμό συσκευών να συνδέονται από απόσταση για να παρακολουθούν και για να ελέγχουν τον ηλεκτρικό ενεργειακό εξοπλισμό. Άλλες εκφάνσεις του έξυπνου δικτύου είναι η Υπερ-Έξυπνη Κοινωνία (π.χ. περιβαλλοντική παρακολούθηση, υπτάμενα ταξί, κτλ.), η Υπερ-Έξυπνη Πόλη (π.χ. αυτόνομη οδήγηση, drones, κτλ.) και οι Έξυπνες Κατοικίες (π.χ. παρακολούθηση κίνησης, ανίχνευση καπνού, μετρήσεις υγρασίας, έλεγχος φωτισμού, κτλ.).
10. Η **Εκτεταμένη Πραγματικότητα (XR)** στην οποία δημιουργούνται πολλαπλών ειδών αλληλεπιδράσεις μεταξύ ανθρώπου και μηχανής, «συγχωνεύοντας» εικονικούς και πραγματικούς κόσμους, με εφαρμογές από την εκπαίδευση και την ιατρική έως την προσωπική διασκέδαση και ψυχαγωγία.
11. Οι **Ασύρματες Αλληλεπιδράσεις Εγκεφάλου-Υπολογιστή** που εκτιμάται ότι θα μπορέσουν να οδηγήσουν σε έλεγχο των καθημερινών συσκευών στις έξυπνες κοινωνίες, κυρίως σε οικιακές και ιατρικές συσκευές.

12. Οι **Υπηρεσίες και Επικοινωνίες 5D** σε συνδυασμό με φορητές συσκευές προηγμένων δυνατοτήτων οι οποίες θα είναι σε θέση ώστε να παρέχουν ψυχαγωγικές επιχειρηματικές υπηρεσίες (όπως π.χ. αθλήματα και παιχνίδια, χωρίς τοπικούς ή χρονικούς περιορισμούς).
13. Οι **Εφαρμογές Time Sensitive (χρονικής επαίσθησης) / Time Engineered** (χρονικής μηχανίκευσης) θα έχουν σημαντικές επιδράσεις στα μελλοντικά δίκτυα, ιδίως όταν τα δεδομένα δεν υπόκεινται σε χειρισμό από ανθρώπους αλλά μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών. (Τέτοιες εφαρμογές είναι π.χ. τα αυτόνομα συστήματα και ο βιομηχανικός αυτοματισμός).
14. Οι ειδικές **Αναπτύξεις Hot Spot**, για συστήματα που θα εξυπηρετούν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων τόσο σε εξωτερικούς όσο και σε εσωτερικούς χώρους.
15. Οι **Μετα-Επιφάνειες για Ασύρματες Επικοινωνίες**, οι οποίες θα έχουν την ικανότητα παροχής κατεύθυνσης και συγκέντρωσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, επιτρέποντας την επιτυχή μεταφορά και συλλογή ενέργειας. Έτσι τα μελλοντικά δίκτυα θα έχουν την δυνατότητα μέσω των μετα-επιφανειών να παρέχουν, ειδικά σε συσκευές/αισθητήρες χαμηλής ισχύος, διαρκή αναπλήρωση ενέργειας.

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές τεχνολογίες που χρειάζεται να αναπτυχθούν και οι οποίες θα έχουν κυρίαρχο ρόλο στην επιτυχή υλοποίηση των μελλοντικών υποδομών 6G υπό μια ευρύτερη θεώρηση σύγκλισης σε επίπεδο δικτύων, εφαρμογών-υπηρεσιών-ευκολιών, εξοπλισμών-συσκευών και μορφών δεδομένων. Οι τεχνολογίες που έχουν παρουσιαστεί και έχουν τύχει αξιολόγησης είναι οι εξής:

1. **Επικοινωνίες Terahertz**, οι οποίες θα χρησιμεύσουν σε επικοινωνίες μικρών αποστάσεων και κυρίως θα τύχουν χρήσης για την υλοποίηση εσωτερικών δικτύων (όπως π.χ. υψηλής ευκρίνειας τηλεδιάσκεψη σε μικρές κυψέλες μεταξύ κινητών συσκευών).
2. **Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες**, που θα επιτρέπουν μετάδοση δεδομένων μεγάλης εμβέλειας μέσω υψηλής ταχύτητας ασύρματων συνδέσεων στο εύρος υπέρυθρων συχνοτήτων (π.χ. οπισθοζευκτικά ασύρματα δίκτυα).
3. Η **Τεχνητή Νοημοσύνη** που θα αποτελέσει κρίσιμο παράγοντα για να επιτύχει το 6G την υλοποίηση ενός πραγματικά ευφυούς γνωστικού ασύρματου συστήματος. Η ενσωμάτωση της AI παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στη βιομηχανία και στην εκπαιδευτική κοινότητα, καθώς επίσης και σε άλλους τομείς όπως είναι, *μεταξύ άλλων*, η ρομποτική, η επεξεργασία φυσικής γλώσσας και η όραση στον υπολογιστή.
4. Στην **Κωδίκευση Καναλιού** θα είναι χρήσιμο να γίνεται η κατάλληλη επιλογή μηχανισμού σύμφωνα με τυχόν περιορισμούς μηχανίκευσης κατά την εφαρμογή αλλά και σύμφωνα με το θεωρητικό όριο απόδοσης.
5. Τα **Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs)** που θα προσφέρουν προσωρινά ασύρματες υπηρεσίες σε «δύσβατες» περιοχές (π.χ. σήραγγες, σπήλαια, ερειπωμένα κτίρια, απομακρυσμένες δασικές περιοχές) και που θα συνιστούν μια αποτελεσματική λύση σε έκτακτες καταστάσεις (π.χ. διάσωση και περίθαλψη από καταστροφές). Επίσης ένα UAV εξοπλισμένο με διάφορους αισθητήρες θα μπορεί να επιτελέσει σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές επιγραμμικής ρευμάτωσης βίντεο (online video streaming).
6. **Οι Τεχνολογίες Συλλογής και Μεταφοράς Ενέργειας** δια των οποίων θα παρέχεται βασική μεταφορά ισχύος από σταθμούς βάσης 6G για τις δικτυακές συσκευές (κυρίως για αισθητήρες και εμφυτεύματα), αξιοποιώντας την ενέργεια από το περιβάλλον και

αντικαθιστώντας τους συμβατικούς τρόπους τροφοδοσίας (αντικαταστάσιμες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες) των αισθητήρων και των συσκευών.

7. Η **Ενσωμάτωση Επαίσθησης και Επικοινωνίας** θα επιτρέψει η διάδραση με τον φυσικό κόσμο να γίνεται με ένα πολύ πιο διαισθητικό τρόπο, καθώς η πλατφόρμα 6G θα μπορεί δυναμικά να αναλύσει προτιμήσεις, συμπεριφορές και ανθρώπινα συναισθήματα.
8. Οι **Τεχνολογίες MIMO** θα χρησιμοποιηθούν για βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η τεχνολογία mMIMO μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα πολλούς χρήστες σε δίκτυα υψηλής πυκνότητας, τούτο την καθιστά κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές IoT στις οποίες υπάρχουν συγκεντρωμένες πολλές συσκευές/εξοπλισμοί.
9. Οι **Έξυπνες Αντανακλαστικές Επιφάνειες (IRS)** οι οποίες λειτουργούν σε εξαιρετικά ευρύ φάσμα, θα ελαχιστοποιήσουν τη μετάδοση ισχύος ενώ θα μεγιστοποιήσουν τον ρυθμό δεδομένων.
10. Οι **Κβαντικές Επικοινωνίες** αποτελούν νέες μορφές επικοινωνίας στις οποίες η ανταλλαγή πληροφοριών θα γίνεται σύμφωνα με τους νόμους της κβαντικής μηχανικής. Ο κβαντικός υπολογισμός έχει τη δυνατότητα να υλοποιήσει πολύπλοκα υπολογιστικά συστήματα, επιτυγχάνοντας βέλτιστες λύσεις με παράλληλη μείωση της πολυπλοκότητας.
11. Η **Πλοκαδική Συναλύσωση (Blockchain)** είναι μια βασική τεχνολογία διαχείρισης μαζικών δεδομένων, η οποία εγγυάται για όλη την επικοινωνία ισχυρότερα χαρακτηριστικά ασφάλειας και επιπλέον προσφέρει πλεονεκτήματα σχετικά με την εννοχήστρωση των πόρων και τη δικτυακή πρόσβαση. Η ρεαλιστική χρήση και η αποτελεσματικότητά της έχει ήδη αναγνωρισθεί από πολλούς επιχειρηματικούς τομείς (π.χ., χρηματοοικονομικά, τραπεζικές εργασίες, ναυτιλία και μεταφορές, βιομηχανική αλυσίδα εφοδιασμού, κατασκευαστικός τομέας, εκπαιδευτικές διαδικασίες και διαδικασίες πιστοποίησης, ιατρική υγειονομική περίθαλψη και διαχείριση αρχείων ασθενών, κινητές επικοινωνίες, κ.α.).
12. Στις **Τεχνολογίες Δικτύωσης 6G** παρουσιάζεται η νανοδικτύωση (IoNT) που χρησιμοποιείται για επικοινωνία με εξαιρετικά μικρό μήκος, η βιοδικτύωση (IoBNT) που συνδυάζει επικοινωνίες με ιατρικές λύσεις και η τρισδιάστατη δικτύωση που περιλαμβάνει ενοποίηση επίγειων και αερομεταφερόμενων δικτύων (προκειμένου η κάλυψη του 6G να επεκταθεί από το έδαφος προς τον αέρα και το διάστημα). Οι Τεχνολογίες Δικτύωσης 6G θέτουν πολλά υποσχόμενες προοπτικές αν και ακόμα βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και αναμένεται ότι θα οδηγήσουν σε επαναστατικές λύσεις σε ό,τι αφορά στον τρόπο αντίληψης των μελλοντικών επικοινωνιών δεδομένων.

Αναλύονται επίσης, τόσο οι βασικές τεχνικές απαιτήσεις όσο και οι Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs) που προτείνονται για την αξιολόγηση της ανάπτυξης των μελλοντικών επικοινωνιών 6G, με ιδιαίτερη έμφαση στην προοπτική για έξυπνη διαχείριση του δικτύου. Ιδίως, παρέχεται σύγκριση μεταξύ 5G και 6G σε σχέση με τους αντίστοιχους KPIs και κατά συνέπεια, με τον τρόπο αυτό αναδεικνύονται οι σημαντικές αλλαγές/καινοτομίες που θα επιφέρει η επόμενη γενιά 6G στις κινητές επικοινωνίες. Πέρα από τις βασικές τεχνικές απαιτήσεις, το 6G θα πρέπει επίσης να παρέχει αξιοπιστία, ασφάλεια, ευελιξία και επανατακτικότητα, εγκαιρότητα σε δεδομένα και υπηρεσίες, πλήρη γεωγραφική κάλυψη, ακρίβεια γεωγραφικής θέσης και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, οι

κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες θα αποτελέσουν κρίσιμο παράγοντα για τη μέτρηση της προσιτότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Στο πλαίσιο της μελέτης έχουν παράλληλα διερευνηθεί νέες αρχιτεκτονικές δικτύου, ώστε να επιτευχθεί εύκολα και αποτελεσματικά η προβλεπόμενη, για το εγγύς μέλλον, «ενοποίηση των πάντων» (δηλαδή των φυσικών, βιολογικών και ψηφιακών κόσμων). Συγκεκριμένα οι τεχνικές αρχιτεκτονικής που περιγράφονται είναι οι εξής:

(α) **Αρχιτεκτονική χωρίς κυψέλες:** Έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει την υποβάθμιση επίδοσης από τη διεργασία μεταπομπής των κυψελοειδών δικτύων και αυτό συνεπάγεται βελτίωση της συνδετικότητας, μείωση της λανθάνουσας καθυστέρησης και εξασφάλιση της αρραγούς κινητικότητας των εξοπλισμών χρήστη.

(β) **Αρχιτεκτονική δικτύου με υποστήριξη AI:** Κύρια προσδοκία της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής στο σύστημα 6G είναι η επίτευξη ευφυΐας στα δίκτυα και αυτόνομης διαχείρισης και εξέλιξης αυτών. Συγκεκριμένα, τα δίκτυα 6G θα ενορχηστρώνονται από αυτόνομες μονάδες εκτέλεσης και λήψης αποφάσεων που θα βασίζονται σε AI/ML, καλύπτοντας όλα τα τμήματα/πόρους του δικτύου.

(γ) **Φετοτεμαχισμός δικτύου (network slicing):** Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική όπου επιτρέπεται η πολυπλεξία εικονικοποιημένων και λογικών δικτύων στην ίδια φυσική υποδομή. Μια «δικτυακή φέτα» (network slice) μπορεί να αποκτήσει εξαιρετική εξειδίκευση και να είναι εν μέρει ή πλήρως απομονωμένη (φυσικά ή/και λογικά) από μια άλλη υπόσταση φέτας δικτύου. Ουσιαστικά τα διάφορα τμήματα του δικτύου αποκτούν υπόσταση που προσομοιάζει σε πόρους λογισμικού, με αποτέλεσμα η χρήση τους να είναι ευκολότερη και με επιλεκτικό τρόπο για την εξυπηρέτηση συγκεκριμένων και δυναμικά μεταβαλλόμενων αναγκών.

(δ) **Υποδίκτυα:** Για εξασφάλιση της αξιοπιστίας και αιτιοκρατίας (σε χρονικό και χωρικό τομέα), δημιουργείται η ανάγκη για ημι-αυτόνομα υποδίκτυα 6G, που θα έχουν τη δυνατότητα να συνεχίσουν αδιαλείπτως τις κρίσιμες υπηρεσίες στο υποδίκτυο ακόμα και όταν δεν υπάρχει ή όταν θα είναι κακή η συνδεσιμότητα με το ευρύτερο δίκτυο.

(ε) **3D αρχιτεκτονική δικτύου:** Η αρχιτεκτονική του δικτύου 6G έχει ως στόχο να επεκτείνει το εύρος και το βάθος της επικοινωνιακής κάλυψης, ώστε να παρέχει πανταχού παρούσα ασύρματη κάλυψη, ενσωματώνοντας και μη επίγεια δίκτυα. Έτσι το 6G στοχεύει στην ενοποίηση επίγειων και εναέριων δικτύων, παρέχοντας επικοινωνιακή υποστήριξη σε κάθετα διευρυμένους χρήστες.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές περιπτώσεις χρήσης που θα φιλοξενήσει το 6G, όπως AR/VR, ολογραφική επικοινωνία, ηλεκτρονική υγεία, Industry 4.0 και ρομποτική, μη επανδρωμένη κινητικότητα και διάχυτη συνδετικότητα. Κύριος στόχος της καθεμίας από τις περιπτώσεις χρήσης είναι η προοπτική της ανταπόκρισης του 6G είτε σε «αυστηρές» δικτυακές απαιτήσεις είτε σε απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας (QoS). Επίσης προτείνονται τρία σενάρια χρήσης τα οποία συνιστούν αποτέλεσμα βελτίωσης και επέκτασης της εμβέλειας των τρεχουσών σεναρίων χρήσης του 5G (δηλαδή των περιπτώσεων eMBB, URLLC και mMTC). Συγκεκριμένα, περιγράφονται και τίθενται οι απαιτήσεις απόδοσης για την υλοποίηση των εξής περιπτώσεων: (α) Βελτιωμένο eMBB + URLLC, (β) Βελτιωμένο eMBB + mMTC και (γ) Βελτιωμένο URLLC + mMTC.

Εξετάζονται εν συντομία τα υφιστάμενα, έως σήμερα, 10 ερευνητικά προγράμματα που ενέκρινε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανταποκρινόμενη στην πρόσκληση 5G-PPP ICT-52-2020, επισημαίνοντας κυρίως τους βασικούς στόχους στους οποίους αυτά επικεντρώνονται για την ανάπτυξη του 6G. Τα έργα αυτά συνιστούν μια πρώτη εφαρμοσμένη απόπειρα για τη

Τεχνολογικές Προκλήσεις και Τάσεις για τη Μετάβαση Πέρα από το 5G

μελέτη και την αξιολόγηση προοπτικών μετάβασης προς το 6G στο ευρωπαϊκό περιβάλλον αναφοράς.

Τέλος, περιγράφονται και άλλα κρίσιμα ζητήματα πέρα από τις τεχνολογίες επικοινωνίας που θα πρέπει να εξεταστούν σε ό,τι αφορά στο 6G, συμπεριλαμβάνοντας ιδίως τη διατηρήσιμη ανάπτυξη του 6G, πιθανά θέματα υγείας και ψυχολογίας για τους χρήστες, προσδοκίες της αγοράς, συναφή επιχειρηματικά μοντέλα, λειτουργικές ανάγκες και την εξάρτηση των ασύρματων επικοινωνιών από τις βασικές επιστήμες.

Η εργασία βασίζεται σε μελέτες, αναλύσεις και έρευνες συγγραφέων και έχει ως στόχο να αποτελέσει τόσο πηγή έμπνευσης σε τρέχουσες και μελλοντικές έρευνες σχετικά με το 6G, όσο και πηγή ενθάρρυνσης στους αναγνώστες ώστε να λάβουν ενεργά μέρος στην υλοποίηση του συγκεκριμένου οράματος που θέτει το 6G. Αναμφίβολα, το 6G θα έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά, δίνοντας μοναδικές δυνατότητες στην ασύρματη επικοινωνία για την σύνδεση ολόκληρου του κόσμου. Το 1926, ο μηχανικός και εφευρέτης Nikola Tesla δήλωσε ότι *«όταν η ασύρματη επικοινωνία εφαρμοστεί με τέλειο τρόπο, τότε ολόκληρη η Γη θα μετατραπεί σε έναν τεράστιο εγκέφαλο»*. Αυτή η προφητεία θα καταστεί ενεργή πραγματικότητα όταν επέλθει το 6G! [13].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Y. Zhao, G. Yu, & H. Xu (2019, May): **6G Mobile Communication Network: Vision, Challenges and Key Technologies**, doi: [10.1360/N112019-00033](https://doi.org/10.1360/N112019-00033). Available at: <https://www.researchgate.net/publication/333077530>
2. H. Elgala, R. Mesleh, & H. Haas (2011, September): **Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art**. *IEEE Communications Magazine*, vol.49, issue 9, pp.56-62, doi: 10.1109/MCOM.2011.6011734.
3. W. Saad, M. Bennis, & M. Chen (2020, May/June): **A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems**. *IEEE Network*, vol.34, no.3, pp.134-142, doi: 10.1109/MNET.001.1900287.
4. M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, & M. Zorzi (2020, March): **Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies**. *IEEE Communications Magazine*, vol.58, no.3, pp.55-61, doi: 10.1109/MCOM.001.1900411.
5. V. Ziegler, H. Viswanathan, H. Flinck, M. Hoffmann, V. Raisänen, & K. Hätönen (2020, August): **6G Architecture to Connect the Worlds**. *IEEE Access*, vol.8, pp.173508-173520.
6. G. Xu (2020): **Research on 6G mobile communication system**. *Journal of Physics: Conference Series*, vol.1693, issue 1, doi: 10.1088/1742-6596/1693/1/012101.
7. Y.L. Lee, D. Qin, L.-C. Wang, & G.H. Sim (2021): **6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges**. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol.2, pp.54-66, 2021, doi: 10.1109/OJVT.2020.3044569.
8. H. Viswanathan, & P.E. Mogensen (2020): **Communications in the 6G Era**. *IEEE Access*, vol.8, pp.57063-57074, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981745.
9. NTT DOCOMO, INC (February 2021): **White Paper “5G Evolution and 6G” (version3.0)**, Available at: https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_20200124.pdf
10. DrFidelis ONAH (3-4 February 2020): **Seventh SG13 Regional Workshop on “Standardization of Future Networks towards Building a Better Connected Africa”**, Abuja, Nigeria. Available at: <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/standardization/20200203/Pages/default.aspx>
11. B. Barakat, A. Taha, R. Samson, A. Steponenaite, S. Ansari, P.M. Langdon, I.J. Wassell, Q.H. Abbasi, M.A. Imran, & S. Keates (2021, June): **6G Opportunities Arising from Internet of Things Use Cases: A Review Paper**. *Future Internet (2021)*, vol.13, no.6, 159, MDPI. <https://doi.org/10.3390/fi13060159>
12. J. Erfanian (2021, April): **6G Drivers and Vision**, NGMN Alliance. Available at: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/NGMN-6G-Drivers-and-Vision-V1.0_final.pdf

13. W. Jiang, B. Han, M.A. Habibi, & H.D. Schotten (2021): **The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey**. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol.2, pp.334-366, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
14. W. Hong, Z.H. Jiang, C. Yu, D. Hou, H. Wang, C. Guo, Y. Hu, L. Kuai, Y. Yu, Z. Jiang, Z. Chen, J. Chen, Z. Yu, J. Zhai, N. Zhanng, L. Tian, F. Wu, G. Yang, Z.-C. Hao, & J.Y. Zhou (2021, January): **The Role of Millimeter-Wave Technologies in 5G/6G Wireless**. *IEEE Journal of Microwaves*, vol.1, no.1, pp.101-122, doi: 10.1109/JMW.2020.3035541.
15. S. Dang, O. Amin, B. Shihada, & M.-S. Alouini (2019, November): **What should 6G be?**, doi: 10.36227/techrxiv.10247726.
16. I.F. Akyildiz, A. Kak, & S. Nie (2020): **6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems**. *IEEE Access*, vol.8, pp.133995-134030, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010896.
17. C. De Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. Noll Barreto, M.R.K. Aziz, J. Saloranta, T. Sanguanpuak, H. Sameddeen, G. Seco-Granados, J. Suutala, T. Svensson, M. Valkama, B. van Liempd, & H. Wymeersch (2021, February): **Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges**. *IEEE Access*, vol.9, pp.26902-26925, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3053486.
18. L. Bariah, L. Mohjazi, S. Muhaidat, P.C. Sofotasios, G.K. Kurt, H. Yanikomeroğlu, & O.A. Dobre (2020, October): **A Prospective Look: Key Enabling Technologies, Applications and Open Research Topics in 6G Networks**. *IEEE Access*, vol.8, pp.174792-174820, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019590.
19. M.Z. Chowdhury, Md. Shahjalal, S. Ahmed, & Y.M. Jang (2020, August): **6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions**. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol.1, pp.957-975, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3010270.
20. L.U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, & C.S. Hong (2020, August): **6G Wireless Systems: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions**. *IEEE Access*, vol.8, pp.147029-147044, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015289.
21. M.A. Khalighi, & M. Uysal (2014, June): **Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.16, issue 4, pp.2231-2258, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.
22. C. De Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, & M. Liyanage (2021, April): **Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research**. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol.2, pp.836-886, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
23. H. Tataria, M. Shafi, A.F. Molisch, M. Dohler, H. Sjoland, & F. Tufvesson (2021, July): **6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities**. Available at: <https://arxiv.org/abs/2008.03213>

24. T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, & D. Zhang (2019, December): **A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies**. *IEEE Access*, vol.7, pp.175758-175768, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957648.
25. A. Dogra, R.K. Jha, & S. Jainn (2021, May): **A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies**. *IEEE Access*, vol.9, pp.67512-675457, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031234.
26. Y. Zhou, L. Liu, L. Wang, N. Hui, X. Cui, J. Wu, Y. Peng, Y. Qi, & C. Xing (2020, June): **Service-aware 6G: An intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching**. *Digital Communications and Networks*, vol.6, issue 3, pp.253-260. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.05.003>
27. Y. Chen, W. Liu, Z. Niu, Z. Feng, Q. Hu, & T. Jiang (2020, July): **Pervasive intelligent endogenous 6G wireless systems: Prospects, theories and key technologies**. *Digital Communications and Networks*, vol.6, issue 3, pp.312-320. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.07.002>
28. F. Qamar, M.U.A. Siddiqui, M. Hindia, R. Hassan, & Q. Nguyen (2020): **Issues, challenges, and research trends in spectrum management: A comprehensive overview and new vision for designing 6g networks**. *Electronics (MDPI)* vol.9, no.9, p.1416, <https://doi.org/10.3390/electronics9091416>
29. X. You, C.-X. Wang, J. Huang, X. Gao, Z. Zhang, M. Wang, Y. Huang, C. Zhang, Y. Jiang, J. Wang, M. Zhu, B. Sheng, D. Wang, Z. Pan, P. Zhu, Y. Yang, Z. Liu, P. Zhang, X. Tao, S. Li, Z. Chen, X. Ma, C.L. I, S. Han, K. Li, C. Pan, Z. Zheng, L. Hanzo, X. (S.) Shen, Y.J. Guo, Z. Ding, H. Haas, W. Tong, P. Zhu, G. Yang, J. Wang, E.G. Larsson, H.Q. Ngo, W. Hong, H. Wang, D. Hou, J. Chne, Z. Chen, Z. Hao, G.Y. Li, R. Tafazolli, Y. Gao, H.V. Poor, G.P. Fettweis, & Y.-C. Liang (2020, November): **Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts**. *Science China Information Services*, vol.64, Springer. Article number: 110301 (2021)
30. International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector (ITU-T), FG NET-2030 Sub-G2 (10/2019): **New Services and Capabilities for Network 2030: Description, Technical Gap and Performance Target Analysis**. Available at: <https://www.itu.int/pub/T-FG-NET2030-2019-SUB.G2>
31. 6G (2019). [Online]. Available at: <http://mmwave.dei.unipd.it/research/6g/>
32. Internet of Everything (IoE), Internet of Everything, Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο, 2019. [Διαδικτυακό]. Διαθέσιμο: <https://ioe.org/>
33. S. Nayak, & R. Patgiri (2020, April): **“6G communication technology: A Vision on Intelligent Healthcare”**. In: *Health Informatics: A Computational Perspective in Healthcare*, pp.1-18, Springer. <https://arxiv.org/abs/2005.07532>
34. K.A. Demir, G. Döven, & B. Sezen (2019): **Industry 5.0 and Human–Robot Co-working**. *Procedia Computer Science* vol.158, pp.688-695. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.104>.

35. K. David, & H. Berndt (2018, September): **6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G?** *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.13, no.3, pp.72-80, doi: 10.1109/MVT.2018.2848498.
36. E. Peltonen, M. Bennis, M. Capobianco, M. Debbah, A. Ding, F. Gil-Castineira, M. Jurmu, T. Karvonen, M. Kelanti, A. Klicks, T. Leppänen, I. Lovén, T. Mikkonen, A. Rao, S. Samarakoon, K. Seppänen, P. Sroka, S. Tarkoma, & T. Yang (2020): **6G white paper on edge intelligence** [Online]. Available at: arXiv:2004.14850.
37. J. He, K. Yang, & H.-H. Chen (2020): **6G cellular networks and connected autonomous vehicles**. [Online]. Available at: arXiv:2010.00972.
38. M. Gharibi, R. Boutaba, & S.L. Waslander (2016, March): **Internet of Drones**. *IEEE Access*, vol.4, pp.1148-1162, doi: 10.1109/ACCESS.20162537208.
39. I.F. Akyildiz, C. Han, & S. Nie (2018, June): **Combating the distance problem in the millimeter wave and terahertz frequency bands**. *IEEE Communications Magazine*, vol.56, no.6, pp.102-108, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700928. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8387211>
40. H.P. Baviskar, & U.P. Shah (2021, February): **A Review on Future Generation Technology: 6G Networks**. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol.8, no.2. Available at: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2102186>.
41. https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_radio_telephone
42. <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>
43. <https://en.wikipedia.org/wiki/2G>
44. <https://en.wikipedia.org/wiki/3G>
45. S. Alraih, I. Shaya, M. Behjati, R. Nordin, N.F. Abdullah, A. Abu-Samah, & D. Nandi (2022, January): **Revolution or Evolution? Technical Requirements and Considerations towards 6G Mobile Communications**. *Sensors (MDPI) 2022*, vol.22, no3, p.762, doi: 10.3390/s22030762. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/762>
46. M.G. Kibria, K. Nguyen, G.P. Villardi, O. Zhao, K. Ishuizu, & F. Kojima (2018, May): **Big data analytics, machine learning, and artificial intelligence in next-generation wireless networks**. *IEEE Access*, vol.6, pp. 32328-32338, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2837692.
47. A.A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, & R.A. Kennedy (2013, June): **Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.12, issue 7, pp.3622-3636, doi: 10.1109/TWC.2013.062413.122042.
48. M.A. Hossain, R.M. Noor, K.-L.A. Yau, I. Ahmedy, & S.S. Anjum (2019, January): **A survey on simultaneous wireless information and power transfer with cooperative relay and future challenges**. *IEEE Access*, vol.7, pp.19166–19198, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895645.

49. C. Liu, W. Feng, Y. Chen, C.X. Wang, & N. Ge (2021, April): **Cell-Free Satellite-UAV Networks for 6G Wide-Area Internet of Things**. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.39, issue 4, pp.1116-1131, doi: 10.1109/JSAC.2020.3018837.
50. W. Feng, J. Tang, Y. Yu, J. Song, N. Zhao, G. Chen, K.K. Wong, & J. Chambers (2020, October): **UAV-enabled SWIPT in IoT networks for emergency communications**. *IEEE Wireless Communications*, vol.27, issue 5, pp.140-147, doi: 10.1109/MWC.001.1900656.
51. The Third Generation Partnership Project (3GPP) (2019, November): **Unmanned Aerial Systems Over 5G**. [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/technologies/keywordsacronyms/2090-unmanned-aerial-systems-over-5g>
52. M. Arnold, J. Hoydis, & S. Brink (2019, February): **Novel Massive MIMO Channel Sounding Data Applied to Deep Learning-based Indoor Positioning**, arXiv: 1810.04126.
53. Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) (2017, July): **Terahertz Communication for Vehicular Networks**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.66, issue 7, pp.5617-5625, doi: 10.1109/TVT.2017.2712878.
54. H. Sameddeen, M.S. Alouini, & T. Naffouri (2021, August): **An Overview of Signal Processing Techniques for Terahertz Communications**. [Online]. Available at: arXiv:2005.13176
55. S. Pirandola, R. Laurenza, C. Ottaviani, & L. Banchi (2017, April): **Fundamental limits of repeaterless quantum communications**. *Nature Communications*, vol.8, no.1, p.15043, doi: 10.1038/ncomms15043.
56. I. Ahmad, S. Shahabuddin, T. Kumar, J. Okwuibe, A. Gurtov, & M. Ylianttila (2019): **Security for 5G and beyond**. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol.21, no.4, pp. 3682-3722, doi: 10.1109/COMST.2019.2916180.
57. N.H. Mahmood, H. Alves, O.A. Lopez, M. Shehab, D.M. Osorio, & M. Latva-aho (2020, March): **Six Key Features of Machine Type Communication in 6G**. In: *Proceedings of the 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp.1-5, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083794.
58. D. Korpi, P. Yli-Opas, M.R. Jaramillo, & M. Uusitalo (2020, March): **Visual detection-based blockage prediction for beyond 5G wireless systems**. In: *Proceedings of the 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp.1-5, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083804.
59. S. Wang, T. Tuor, T. Salonidis, K.K. Leung, C. Makaya, T. He, & K. Chan (2018, April): **When edge meets learning: Adaptive control for resource-constrained distributed machine learning**. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2018)*, pp.63-71, doi: 10.1109/INFOCOM.20.
60. M.S. Islim, R.X. Ferreira, X. He, E. Xie, S. Videv, S. Viola, S. Watson, N. Bamiedakis, R.V. Penty, I.H. White, A.E. Kelly, E. Gu, H. Haas, & M.D. Dawson (2017, April): **Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet microLED**. *Photonics Research*, vol.5, no.2, pp.A35-A43, doi: 10.17863/CAM.9193.

61. P.H. Pathak, X. Feng, P. Hu, & P. Mohapatra (2015, September): **Visible light communication, networking, and sensing: A survey, potential and challenges**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.17, issue 4, pp.2047-2077, doi: 10.1109/COMST.2015.2476474.
62. R.A. Stoica, & G.T.F. Abreu (2019, April): **6G: The wireless communications network for collaborative and AI applications**, Available at: arXiv:1904.03413.
63. P. Mitra, R. Bhattacharjee, T. Chatterjee, S. De, R. Karmakar, A. Ghosh, & T. Adhikari (2022, January): **Towards 6G Communications: Architecture, Challenges, and Future Directions**. In: *Proceedings of the 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, doi: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9580084.
64. <https://www.iplook.com/info/top-10-challenges-for-6g-i00096i1.html>
65. W.X. Long, R. Chen, M. Moretti, W. Zhang, & J. Li (2021, March): **A Promising Technology for 6G Wireless Networks: Intelligent Reflecting Surface**. *Journal of Communications and Information Networks*, vol.6, issue 1, pp.1-16, doi: 10.23919/JCIN.2021.9387701.
66. A-A.A. Boulogeorgos, A. Alexiou, T. Merkle, et al. (2018, June): **Terahertz Technologies to Deliver Optical Network Quality of Experience in Wireless Systems Beyond 5G**. *IEEE Communications Magazine*, vol.56, no.6, pp.144-151, doi: 10.1109/MCOM.2018.1700890.
67. C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X. You, & Y. Hao (2020, December): **6G Wireless Channel Measurements and Models: Trends and Challenges**. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol.15, issue 4, pp.22-32, doi: 10.1109/MVT.2020.3018436.
68. F. Fang, Y. Xu, Q.-V. Pham, & Z. Ding (2020, November): **Energy-efficient design of IRS-NOMA networks**. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.69, issue 11, pp.14088-14092, doi: 10.1109/TVT.2020.3024005.
69. M.A. Siddiqi, H. Yu, & J. Joung (2019, September): **5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices**. *Electronics (MDPI)*, vol.8, no.9, p.981, doi: 10.3390/electronics8090981.
70. S. Ju, S. Shah, M. Javed, J. Li, G. Palteru, J. Robin, Y. Xing, O. Kanhere, & T.S. Rappaport (2019, March): **Scattering Mechanisms and Modeling for Terahertz Wireless Communications**. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp.1-7. Available at: arXiv:1903.02657.
71. NYU WIRELESS, **Terahertz (THz) Communications & Sensing** [Online]. Available at: <https://wireless.engineering.nyu.edu/terahertz-thz-communications-and-sensing/>
72. H. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao, & K. Wu (2020, November/December): **Artificial intelligence-enabled intelligent 6G networks**. *IEEE Network*, vol.34, issue 6, pp.272-280, doi: 10.1109/MNET.011.2000195.

73. S. Cakaj, B. Kamo, A. Lala, & A. Rakipi (2014): **The Coverage Analysis for Low Earth Orbiting Satellites at Low Elevation**. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol.5, no.6, pp.6-10, doi: 10.14569/IJACSA.2014.050602.
74. International Telecommunication Union - Radiocommunications Sector (ITU-R) (2015, September): *Recommendation M2083.0: "IMT Vision- Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond"*. Available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-!!PDF-E.pdf
75. C.J. Bernardos, M.A. Uusitalo, C. Anton, D. Artunedo (2021, June): **European Vision for the 6G Network Ecosystem**, *The 5G Infrastructure Association*, doi: 10.13140/RG.2.2.19993.95849.
76. K.B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, & Y-J.A. Zhang (2019, August): **The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks**. *IEEE Communications Magazine*, vol.57, issue 8, pp.84-90, doi: 10.1109/MCOM.2019.1900271.
77. A. Shahraki, M. Abbasi, Md.J. Piran & A. Taherkordi (2021, June): **A Comprehensive Survey on 6G Networks: Applications, Core Services, Enabling Technologies, and Future Challenges**. [Online]. Available at: arXiv:2101.12475.
78. T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb & G.C. Trichopoulos (2019, June): **Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond**. *IEEE Access*, vol.7, pp.78729-78757, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522.
79. L. Wang, T. Han, Q. Li, J. Yan, X. Liu & D. Deng (2017, December): **Cell-less communications in 5G vehicular networks based on vehicle-installed access points**. *IEEE Wireless Communications*, vol.24, no.6, pp.64-71, doi: 10.1109/MWC.2017.1600401.
80. H.Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E.G. Larsson & T.L. Marzetta (2020, May): **Correction to "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells"**. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, issue 5, pp.3623-3624, doi: 10.1109/TWC.2020.2974209.
81. T. Han, X. Ge, L. Wang, K.S. Kwak, Y. Han & X. Liu (2017, March): **5G Converged Cell-less Communications in Smart Cities**. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, no.3, pp.44-50, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600256CM.
82. RISELAB. **Real-Time Intelligent Secure Explainable Systems**. [Online]. Available at: <https://rise.cs.berkeley.edu>.
83. J. Fowers, K. Ovtcharov, M. Papamichael, T. Massengill, M. Liu, D. Lo, S. Alkalay, M. Haselman, L. Adams, M. Ghandi, S. Heil, P. Patel, A. Sapek, G. Weisz, L. Woods, S. Lanka, S.K. Reinhardt, A.M. Caulfield, E.S. Chung & D. Burger (2018, June): **A configurable cloud-scale DNN processor for real-time AI**. In: *Proceedings of the ACM/IEEE 45th Annual International Symposium on Computer Architecture*, doi: 10.1109/ISCA.2018.00012. Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2018/06/ISCA18-Brainwave-CameraReady.pdf>

84. C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, Z. Han, K.-C. Chen & L. Hanzo (2017, April): **Machine learning paradigms for next-generation wireless networks**. *IEEE Wireless Communications*, vol.24, issue 2, pp.98-105, doi: 10.1109/MWC.2016.1500356WC.
85. A. Ndikumana, N.H. Tran, T.M. Ho, Z. Han, W. Saad, D. Niyato & C.S. Hong (2020, June): **Joint Communication, Computation, Caching, and Control in Big Data Multi-Access Edge Computing**. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.19, no.6, pp.1359-1374, doi: 10.1109/TMC.2019.2908403.
86. P. Rost, C. Mannweiler, D.S. Michalopoulos, C. Sartori, V. Sciancalepore, N. Sastry, O. Holland, S. Tayade, B. Han, D. Bega, D. Aziz & H. Bakker (2017, May): **Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks**. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, issue 5, pp.72-79, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600920.
87. I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini & H. Flinck (2018, March): **Network Slicing and Softwarization: A Survey on Principles, Enabling Technologies, and Solutions**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.20, issue 3, pp.2429-2453, doi: 10.1109/COMST.2018.2815638.
88. S. Yan, X. Cao, Z. Liu & X. Liu (2020, December): **Interference Management in 6G Space and Terrestrial Integrated Networks: Challenges and Approaches**. *Intelligent and Converged Networks*, vol.1, issue 3, pp.271-280, doi: 10.23919/ICN.2020.0022.
89. X. Fang, T. Wei, W. Feng, H. Wei, Y. Chen, N. Ge & C.-X. Wang (2021, September): **5G Embraces Satellites for 6G Ubiquitous IoT: Basic Models for Integrated Satellite Terrestrial Network**. *IEEE Internet of Things Journal*, vol.8, no.18, pp.14399-14417, doi: 10.1109/JIOT.2021.3068596.
90. L. Gupta, R. Jain & G. Vaszkun (2015, November): **Survey Of Important Issues in UAV Communication Networks**. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.18, issue 2, pp.1123-1152, doi: 10.1109/COMST.2015.2495297.
91. Z. Zhou, H. Liao, G. Gu, K. M. S. Huq, S. Mumtaz & J. Rodriguez (2018, July/August): **Robust Mobile Crowd Sensing: When Deep Learning Meets Edge Computing**. *IEEE Network*, vol. 32, issue 4, pp. 54–60, doi: 10.1109/MNET.2018.1700442.
92. G. Li, G. Xu, A. K. Sangaiah, J. Wu & J. Li (2019, November/December): **EdgeLaaS: Edge Learning as a Service for Knowledge-Centric Connected Healthcare**. *IEEE Network*, vol.33, issue 6, pp.37-43, doi: 10.1109/MNET.001.1900019.
93. C. Kahn & H. Viswanathan (2015, September): **Connectionless access for mobile cellular networks**. *IEEE Communications Magazine*, vol.53, issue 9, pp.26-31, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263369.
94. V. Ziegler, P. Schneider, H. Viswanathan, M. Montag, S. Kanuvogi & A. Rezaki (2021, October): **Security and Trust in the 6G Era**. *IEEE Access*, vol.9, pp.142314-142327, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120143
95. Y. Siriwardhana, P. Porambage, M. Liyanage and M. Ylianttila (2021): **AI and 6G Security: Opportunities and Challenges**. In: *Proceedings of the 2021 Joint European*

Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), pp.616-621, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482503.

96. V. Ziegler & S. Yrjölä (2021): **How To Make 6G a General Purpose Technology: Prerequisites and value creation paradigm shift**. In: *Proceedings of the 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, pp.586-591, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit51104.2021.9482431.
97. A. Bajpai & A. Balodi (2020, October): **Role of 6G Networks: Use Cases and Research Directions**. In: *Proceedings of the 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC)*, pp.1-5, doi: 10.1109/B-HTC50970.2020.9298017.
98. D. Witkowski (2019, December): **Bridging the Gap - 21st Century Wireless Telecommunications Handbook (2nd Edition, 2019)**. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338149616_Bridging_the_Gap_-_21st_Century_Wireless_Telecommunications_Handbook_2nd_Edition_2019
99. G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato & F. Adachi (2020, October): **6G: Opening New Horizons for Integration of Comfort, Security, and Intelligence**. *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, issue 5, pp.126-132, doi: 10.1109/MWC.001.1900516.
100. A. Clemm, M.T. Vega, H.K. Ravuri, T. Wauters & F. De Turck (2020, January): **Toward Truly Immersive Holographic-Type Communication: Challenges and Solutions**. *IEEE Communications Magazine*, vol.58, issue 1, pp.93-99, doi: 10.1109/MCOM.001.1900272.
101. G. Berardinelli, N.H. Mahmood, I. Rodriguez & P. Mogensen (2018, December): **Beyond 5G Wireless IRT for Industry 4.0: Design Principles and Spectrum Aspects**. In: *Proceedings of the 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp.1-6, doi: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644245.
102. J. Choi, V. Va, N. Gonzalez-Prelcic, R. Daniels, C.R. Bhat & R.W. Heath (2016, December): **Millimeter-Wave Vehicular Communication to Support Massive Automotive Sensing**. *IEEE Communications Magazine*, vol.54, issue 12, pp.160-167, doi: 10.1109/MCOM.2016.1600071CM.
103. H.S. Dhillon, H. Huang, & H. Viswanathan (2017, February): **Wide-area Wireless Communication Challenges for the Internet of Things**. *IEEE Communications Magazine*, vol.55, issue 2, pp.168-174, doi: 10.1109/MCOM.2017.1500269CM.
104. M. Bennis, M. Debbah, & H.V. Poor (2018, October): **Ultrareliable and Low-Latency Wireless Communication: Tail, Risk, and Scale**. *Proceedings of the IEEE*, vol.106, issue 10, pp.1834-1853, doi: 10.1109/JPROC.2018.2867029.
105. N.H. Mahmood, H. Alves, O.A. Lopez, M. Shehab, D.P. Moya Osorio & M. Latva-Aho (2019, March): **Six Key Enablers for Machine Type Communication in 6G**. In: *Proceedings of the 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, pp.1-5, doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083794.

106. B. Singh, O. Tirkkonen, Z. Li & M.A. Uusitalo (2017, October): **Contention-Based Access for Ultra-Reliable Low Latency Uplink Transmissions**. *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.7, issue 2, pp.182-185, doi: 10.1109/LWC.2017.2763594.
107. D. Van Den Berg, R. Glans, D. De Koning, F.A. Kuipers, J. Lugtenburg, K. Polachan, P.T. Venkata, C. Singh, B. Turkovic, & B. Van Wijk (2017, October): **Challenges in haptic communications over the tactile internet**. *IEEE Access*, vol.5, pp.23502-23518, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2764181.
108. R. Bayou (2020): **ICT-52-2020 Smart Connectivity Beyond 5G**. Future Connectivity Systems, European Commission, DG CONNECT: Available at: <https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/ZNANOST/Obzorje-2020/Dokumenti/H2020-ICT-2020/5G.pdf>
109. D. Bourse (2018): **The 5G Infrastructure – 5G Pan-European Trials Roadmap**. [Presentation in the Global 5G Event (G5GE) (28-30.11.2018) and the 5G IEEE Summit (30.11.2018). Rio Brasil]. Available at: http://www.5gsummit.org/Rio/slides/3-%20181130_5GInfraPPP_TrialsRoadmapVersion4.0_Rio-Didier.pdf
110. European Union (2020, February): **Shaping Europe’s Digital Future**. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Available at: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_4.pdf
111. **Horizon 2020: Work Programme 2018-2020, 5.i. Information and Communication Technologies** (European Commission Decision C(2020)4029 of 17 June 2020). Available at: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-leit-ict_en.pdf
112. <https://5g-ppp.eu/5g-ppp-phase-3-6-projects/>
113. <https://5g-ppp.eu/6g-brains/>
114. <https://6g-brains.eu/>
115. <https://5g-ppp.eu/aiatedge/>
116. <https://aiatedge.eu/>
117. <https://5g-ppp.eu/daemon/>
118. <https://h2020daemon.eu/about/>
119. <https://5g-ppp.eu/dedicat-6g/>
120. <https://5g-ppp.eu/hexa-x/>
121. <https://hexa-x.eu/vision/>
122. <https://5g-ppp.eu/marsal/>
123. <https://www.marsalproject.eu/>

124. <https://5g-ppp.eu/Reindeer/>
125. <https://reindeer-project.eu/>
126. <https://5g-ppp.eu/rise-6g/>
127. <https://5g-ppp.eu/teraflow/>
128. <https://www.teraflow-h2020.eu/>
129. Teraflow project (2021, December): **Deliverable 2.1: “Preliminary requirements, architecture design, techno-economic studies and data models”**. Available at: <https://www.teraflow-h2020.eu/>
130. <https://www.b5g-open.eu>
131. S. Routray & S. Mohanty (2019, March): **Why 6G**; [Online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/331700779>
132. A. Lucky Imoize, O. Adedeji, N. Tandiya, & S. Shetty (2021, March): **6G Enabled Smart Infrastructure for Sustainable Society: Opportunities, Challenges, and Research Roadmap**. *Sensors*, vol.21, no.5, p.1709, <https://doi.org/10.3390/s21051709>
133. I. Philbeck (2017): **Connecting the Unconnected: Working Together to Achieve Connect 2020 Agenda Targets**. In: *Special session of the Broadband Commission and the World Economic Forum at Davos Annual Meeting 2017*. International Telecommunication Union (ITU). Available at: <https://www.broadbandcommission.org/publication/connecting-the-unconnected-davos-2017/>
134. F. Drake (2006, October): **Mobile Phone Masts: Protesting the Scientific Evidence**. *Public Understanding of Science*, vol.15, no.4, doi:10.1177/0963662506057246.
135. T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb & G. Trichopoulos (2019, June): **Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond**. *IEEE Access*, vol.7, pp.78729-78757, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522.
136. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (2020, May): **Principles for Non-Ionizing Radiation Protection**. *Health Physics*, vol.118, issue 5, pp. 477-482, doi: 10.1097/HP.0000000000001252.
137. D. Sjödin, V. Parida, M. Jovanovic & I. Visnjic (2019, December): **Value Creation and Value Capture Alignment in Business Model Innovation: A Process View on Outcome-Based Business Models**. *Journal of Product Innovation Management*, vol.37, issue 2, pp.158-183, doi: 10.1111/jpim.12516.
138. C. Nielsen & M. Lund (2018): **The Concept of Business Model Scalability**. *Journal of Business Models*, vol.6, no.1, pp.1-18, doi: 10.5278/ojs.jbm.v6i1.2235.

139. J. Aspara, J. Hietanen, & H. Tikkanen (2009, July): **Business Model Innovation vs Replication: Financial Performance Implications of Strategic Emphases**. *Journal of Strategic Marketing*, vol.18, no.1, pp.39-56, doi: 10.1080/09652540903511290.
140. S. Schaltegger, E.G. Hansen, & F. Lüdeke-Freund (2016): **Business Models for Sustainability: Origins, Present Research, and Future Avenues**. *Organization & Environment*, vol.29, no.1, pp.3-10, doi: 10.1177/1086026615599806.
141. M. Haenggi, J.G. Andrews, F. Baccelli, O. Dousse & M. Franceschetti (2009, September): **Stochastic Geometry and Random Graphs for the Analysis and Design of Wireless Networks**. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.27, issue 7, pp.1029-1046, doi: 10.1109/JSAC.2009.090902.
142. M. Matinmikko-Blue, S. Yrjölä, P. Ahokangas, K. Ojutkangas, & E. Rossi (2021, August): **6G and the UN SDGs: Where is the Connection?** *Wireless Personal Communications*, vol.121, pp.1339-1360, doi: 10.1007/s11277-021-09058-y
143. A. Miceli, B. Hagen, M.P. Riccardi, F. Sotti & D. Settembre-Blundo (2021, February): **Thriving, Not Just Surviving in Changing Times: How Sustainability, Agility and Digitalization Intertwine with Organizational Resilience**, *Sustainability*, vol.13, no.4, p.2052, doi: 10.3390/su13042052.
144. S. Yrjola, P. Ahokangas, M. Matinmikko-Blue, R. Jurva, V. Kant, P. Karppinen, M. Kinnula, H. Koumaras, M. Rantakokko, V. Ziegler, A. Thakur, H.-J. Zepernick (2020, June): **White Paper on Business of 6G**. [Online]. Available at: <https://arxiv.org/abs/2005.06400>
145. Davos - Klosters (2017, January): **World Economic Forum Annual Meeting 2017 Responsive and Responsible Leadership**, *World Economic Forum*. [Online]. Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_AM17_Report.pdf