



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΚΙΝΗΤΩΝ 5<sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ

ΛΙΟΛΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Δρ. Παναγιώτης Βαρζάκας  
Μέλος ΔΕΠ, Καθηγητής Α Βαθμίδας

Λαμία 26/07/2021





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ  
ΚΙΝΗΤΩΝ 5<sup>ΗΣ</sup> ΓΕΝΙΑΣ

ΔΙΟΛΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Δρ. Παναγιώτης Βαρζάκας  
Μέλος ΔΕΠ, Καθηγητής Α Βαθμίδας

Λαμία 26/07/2021





UNIVERSITY OF  
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

FUNDAMENTALS 5<sup>TH</sup> GENERATION  
MOBILE COMMUNICATIONS NETWORKS

LIOLIOU PANAGIOTA

FINAL THESIS

ADVISOR

Dr P.Varzakas  
Grade A Professor

Lamia 26/07/2021



«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις <sup>(1)</sup>, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.

2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.

3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια

4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: ...../...../20.....

Ο – Η Δηλ.

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»







## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Μία νέα εποχή στα δίκτυα επικοινωνιών φέρνει τεχνολογία 5<sup>ns</sup> γενιάς που έκανε την εμφάνιση της το 2020. Μελέτες έχουν δείξει ότι αναμένεται να προσφέρει 100 φορές μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από τα LTE δίκτυα. Ως εκ τούτου, νέες τεχνολογίες εισήχθησαν οι οποίες δημιούργησαν νέες προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση του μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, μεγάλου όγκου δεδομένων, τη χωρητικότητα του δικτύου, την ενεργειακή απόδοση, τους μηχανισμούς καθυστέρησης την ετερογένεια του δικτύου κ.λπ.

Η τεχνολογία massiveMIMO υπόσχεται κάλυψη ευρύτερου φάσματος λόγω του μεγάλου αριθμού κεραιών που είναι πλέον περισσότερες από τους ενεργούς χρήστες. Σε συνδυασμό με τα χιλιοστομετρικά κύματα τα οποία κυμαίνονται σε υψηλή ανάλυση και καλύπτουν τα αυξημένα ποσοστά δεδομένων, εξυπηρετούνται ακόμα και πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Τα mmWave ακολουθεί η τεχνική Beamforming για τον έλεγχο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και της σωστής κατεύθυνσης του σήματος. Λόγω των πυκνών δικτύων αυτών δικτύων, χρειάζεται μια τεχνική που να διαχωρίζει τους πολυσύνδετους χρήστες και προχωρά σε διαδοχική ακύρωση παρεμβολών. Επομένως, η ανάγκη ενός συστήματος NOMA είναι απαραίτητη.

Επιπροσθέτως, οι τεράστιες δυνατότητες των συστημάτων 5<sup>ns</sup> γενιάς απαιτούν υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων για επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα και γενικότερα για καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών. Τα συστήματα αυτά, έχουν εφαρμογές στον κλάδο της ιατρικής, της εκπαίδευσης, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ψυχαγωγίας και της ενημέρωσης καθώς συνδέουν δισεκατομμύρια συσκευές και αισθητήρες.

Επομένως, ο σχεδιασμός νέων αρχιτεκτονικών θα μπορούσαν να υποστηρίξουν πλήρως τις παραπάνω απαιτήσεις είναι αναγκαίος. Η Εικονοποίηση είναι μια από τις αρχιτεκτονικές που στοχεύει στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των υλικών πόρων και στην ευκολότερη διευθέτηση των λειτουργιών που επιτελούν. Άλλη μια αρχιτεκτονική που θα εξετάσουμε είναι η SDN, η οποία έχει στόχο τον προγραμματισμό του δικτύου. Αναφορά επίσης θα γίνει στο πρωτόκολλο Openflow, ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία επικοινωνίας σε ένα SDN περιβάλλον. Τέλος, θα δούμε πως το δίκτυο χωρίζεται σε φέτες με κοινά χαρακτηριστικά για να επιτευχθεί η καλύτερη διαχείριση του και να ικανοποιηθούν οι πολυάριθμες απαιτήσεις των χρηστών διαφορετικών τομέων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία συνοψίζει, μέσα από μία γκάμα βιβλιογραφικού υλικού, τις τεχνικές μετάδοσης, τις βασικές αρχιτεκτονικές που προτείνονται, τις απαιτήσεις ασφάλειας που είναι εξίσου σημαντικές για την ακεραιότητα του δικτύου, τις εφαρμογές και τις δυνατότητες αυτής της νέας τεχνολογίας, καθώς επίσης και μία ανάλυση της τεχνοοικονομικής της ανάπτυξης.



## ABSTRACT

---

A new era has arrived in the telecommunications network bringing with it a 5<sup>th</sup> generation technology which made its debut in 2020. Surveys have showed that it is expected to provide with 100 times faster data transmission rhythm compared to LTE networks. Thus, new technologies were introduced which created new challenges regarding the management of the big number of connected devices, the large data volume, the capacity of the network, the energy performance, the mechanisms used for the heterogeneity of the network etc.

Massive MIMO technology promises to cover a wider range due to the large number of antennas that are more than active users. In combination with the millimeter waves which range in high resolution and cover the increased percentages of data, even densely populated urban areas are served. MmWave follows the Beamforming technique to control the emitted radiation and the correct direction of the signal. Due to these dense networks, a technique that needed is one that separates the multi-connected users and proceeds to successive cancellation of interference. Therefore, the need for a NOMA system is essential.

In addition, the great capability of the 5<sup>th</sup> generation systems demand high data transfer speeds for virtual reality and for better quality of services. These systems have applications in medicine, education, automotive industry, entertainment and the word of information as they connect billions of devices and sensors.

Therefore, the design of new architectures that could support entirely the aforementioned demands is necessary. Virtualization is one of the architectures that aims at the more efficient utilization of material resources and the easier arrangement of the functions they perform. Another architecture we will look at is SDN, which aims at network programming. Reference will also be made to the Openflow protocol, one of the most important communication tools in the SDN environment. Finally, we will see how the network is divided into slices with common features to achieve better management and meet the numerous requirements of users in different sectors.

This thesis through a range of bibliographic material sums up the transmitting techniques, the basic architectures that are suggested, the security requirements that are equally important for the network's integrity, the appliances and potential of this new technology, as well as an analysis of its techno-economic development.





## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	I
ABSTRACT .....	III

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ . 4**

<b>1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Η ΜΗΛΕΝΙΚΗ ΓΕΝΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ(0G) .....	4
1.2.2 Η ΠΡΩΤΗ ΓΕΝΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ (1G) .....	5
1.2.3 Η ΔΕΥΤΕΡΗ ΓΕΝΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ (2G).....	5
1.2.4 Η ΤΡΙΤΗ ΓΕΝΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ (3G).....	6
1.2.5 Η ΤΕΤΑΡΤΗ ΓΕΝΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ (4G).....	6

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5G..... 8**

<b>2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ 5G .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΩΝ 5G.....</b>	<b>8</b>
2.2.1 ΠΥΚΝΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΔΙΚΤΥΑ (UDN) .....	8
2.2.2 ΠΛΗΡΩΣ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (FD).....	9
2.2.3 ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΡΑΔΙΟΣΗΜΑΤΑ (RF-EH) .....	10
2.2.4 ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ FD .....	12
2.2.5 ΔΙΚΤΥΟ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟ CLOUD (C-RAN).....	12
2.2.6 ΕΙΚΟΝΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (WNV).....	14
<b>2.3 ΤΟ 5G ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ .....</b>	<b>14</b>

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ 5G ..... 16**

<b>3.1 MASSIVE MIMO .....</b>	<b>16</b>
3.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	16
3.1.2 SINGLE USER MIMO .....	17
3.1.3 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ WATER-FILLING.....	18
3.1.4 MULTI-USER MIMO .....	19
<b>3.2 MILLIMETER-WAVE .....</b>	<b>20</b>
3.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ .....	20
3.2.2 ΔΙΚΤΥΟ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΟΠΙΣΘΟΖΕΥΣΗΣ (UAB) .....	22
<b>3.3 NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS (NOMA) .....</b>	<b>26</b>
3.3.1 ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	26
<b>3.4 ΠΛΗΡΩΣ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ (FD).....</b>	<b>29</b>
3.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	29
3.4.2 FD ΜΟΝΟΥ ΔΡΟΜΟΥ .....	30
3.4.3 FD ΔΙΠΛΟΥ ΔΡΟΜΟΥ .....	31
<b>3.5 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ (D2D).....</b>	<b>32</b>
3.5.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	32
<b>3.6 3D BEAMFORMING.....</b>	<b>35</b>

3.6.1 2DBEAMFORMING.....	36
3.6.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ 3DBEAMFORMING .....	36
3.6.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ 3D ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ .....	37
3.6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ 3DBF.....	41

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ..... 42**

<b>4.1 NETWORKFUNCTIONVIRTUALIZATION (NFV) .....</b>	<b>42</b>
4.1.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ NFV .....	42
4.1.2 ΕΙΚΟΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΒΑΣΗΣ .....	46
4.1.3 ΕΙΚΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	46
<b>4.2 SOFTWAREDEFINEDNETWORKING (SDN) .....</b>	<b>47</b>
4.2.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SDN.....	47
4.2.2 ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ OPENFLOW.....	49
<b>4.3 NETWORKSLICING .....</b>	<b>51</b>
4.3.1 ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ.....	52
4.3.2 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ NETWORKSLICING.....	54
<b>4.4 ULTRADENSENETWORK (UDN).....</b>	<b>55</b>
4.4.1 UDN ΜΟΝΗΣ ΠΥΛΗΣ.....	56
4.4.2 UDN ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΥΛΩΝ .....	56
4.4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΥΚΝΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	58

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ 5G ..... 61**

<b>5.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ 5G .....</b>	<b>61</b>
5.1.1 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	63
5.1.2 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	64
5.1.3 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΥΠΟΔΟΜΗΣ .....	65
<b>5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ 5G.....</b>	<b>67</b>
5.2.1 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ .....	67
5.2.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΑΥΤΟΤΗΤΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ.....	68
<b>5.3 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ SDN ΚΑΙ NFV .....</b>	<b>69</b>
<b>5.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ NETWORKSLICING.....</b>	<b>70</b>

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ 5G ..... 72**

<b>6.1 ΚΛΑΔΟΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ.....</b>	<b>72</b>
6.1.1 ΤΗΛΕΪΑΤΡΙΚΗ .....	72
6.1.2 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΓΕΙΑΣ .....	73
6.1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	75
<b>6.2 ΚΛΑΔΟΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ.....</b>	<b>76</b>
6.2.1 ΕΠΑΓΓΕΛΜΕΝΗ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ .....	76
6.2.2 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΣΤΗΝ ΜΟΥΣΙΚΗ .....	78
<b>6.3 ΚΛΑΔΟΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ.....</b>	<b>79</b>
6.3.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΟΔΗΓΗΣΗ .....	79
6.3.2 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΕΝ ΚΙΝΗΣΕΙ.....	80
<b>6.3 ΚΛΑΔΟΣ ΨΥΧΑΓΩΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΗΜΕΡΩΣΗΣ .....</b>	<b>81</b>



<b>6.4 ΚΛΑΔΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ.....</b>	<b>81</b>
<b>6.5 ΚΛΑΔΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>82</b>
6.5.1 ΈΞΥΠΝΟ ΔΙΚΤΥΟ (SMARTGRID).....	82
6.5.2 ΈΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ .....	83
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....</u></b>	<b>84</b>
<b>7.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ.....</b>	<b>84</b>
7.1.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	84
7.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	84
7.1.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	87
<b>7.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ 5G.....</b>	<b>89</b>
7.2.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 5G ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ .....	89
7.2.2 CAPEX .....	90
7.2.3 OPEX.....	90
7.2.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ.....	91
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ .....</b>	<b>94</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>97</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Ιστορική Αναδρομή Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

---

## 1.1 Γενικά

---

Οι ασύρματες κινητές επικοινωνίες είναι κυρίαρχες καθώς αποτελούν το κύριο μέσο επικοινωνίας στον κόσμο. Η ασύρματη κινητή βιομηχανία έχει αρχίσει την τεχνολογική της εξέλιξη της από τις αρχές του 1970. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 η βιομηχανία κινητών επικοινωνιών έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη. Ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έχουν γίνει πολύ πιο διαχυτικά από ότι μπορούσε κανείς να φανταστεί όταν η ιδέα των κινητών ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 1960 και το 1970. Οι συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας αυξάνονται κατά 40% ετησίως, και μέχρι το τέλος του 2010 θα είναι 4 φορές περισσότεροι από τις σταθερές τηλεφωνικές γραμμές. Ο συνεχώς αυξανόμενος ρυθμός παγκόσμιων συνδρομητών έχει αποδείξει ότι οι ασύρματες επικοινωνίες αποτελούν έναν ικανότατο μηχανισμό μεταφοράς δεδομένων και φωνής. Η ευρεία επιτυχία των κινητών επικοινωνιών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη του νεώτερου ασύρματου συστήματος. [2]

## 1.2 Η εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών

---

Εξαιτίας της τεράστιας αύξησης του αριθμού συσκευών και η απαίτηση για περισσότερες υπηρεσίες οδήγησαν στην ανάγκη για έναν αποτελεσματικό σχεδιασμό δικτύου. Η μετάβαση από τη σταθερή στην κινητή τηλεφωνία είχε ως αποτέλεσμα τον καλύτερο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του δικτύου. Η ασύρματη τεχνολογία έχει διαμορφώσει εξελικτική πορεία σε σχέση με την αποδοτικότητα της. Με βάση τον τύπο των υπηρεσιών και τις ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, οι ασύρματες κινητές επικοινωνίες έχουν ταξινομηθεί ανάλογα με τις γενιές τους. Η Πρώτη γενιά(1G) έχει εκπληρώσει τη λειτουργία της φωνής, ενώ η Δεύτερη γενιά(2G) έχει ασχοληθεί με τη χωρητικότητα και την κάλυψη. Η Τρίτη γενιά(3G) επικεντρώθηκε στον υψηλότερο αριθμό δεδομένων, την υποστήριξη πολυμέσων και το φάσμα διάδοσης σε συνδυασμό αργότερα με την Τέταρτη γενιά(4G) που παρέχει πρόσβαση σε ευρύ φάσμα τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων, υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, καθώς και υποστήριξη για εφαρμογές χαμηλής έως υψηλής κινητικότητας. Στη συνέχεια το 5G έρχεται με περισσότερες υπηρεσίες, δεδομένα και οφέλη από την 4G. Το 5G είναι πλέον η εξυπνότερη τεχνολογία που θα διασυνδέει ολόκληρο τον κόσμο χωρίς όρια με την αδιάλειπτη πρόσβαση σε πληροφορίες.

Ακολουθεί μια ιστορική αναδρομή στην πορεία της εξέλιξης του 5G:

### 1.2.1 Η Μηδενική Γενιά Δικτύων(0G)

---

Η μηδενική γενιά δικτύων τέθηκε σε λειτουργία μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940, τα πρώτα ραδιοφωνικά τηλέφωνα εισήχθησαν και σχεδιάστηκαν για χρήστες αυτοκινήτων στο δημόσιο σταθερό τηλεφωνικό δίκτυο πριν την έλευση των κινητών τηλεφώνων[2]. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν τη βασική υπηρεσία φωνής. Στη δεκαετία του 1960, ένα σύστημα που ξεκίνησε από την BellSystems,

το οποίο ονομάζεται Improved Mobile Telephone Service (IMTS), έφερε αρκετές βελτιώσεις, όπως άμεση κλήση και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Τα πρώτα αναλογικά συστήματα βασίστηκαν στο IMTS και δημιουργήθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του '60 και στις αρχές της δεκαετίας του '70.[1]

### 1.2.2 Η Πρώτη Γενιά Δικτύων (1G)

Η πρώτη γενιά κινητών τηλεφώνων εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και ολοκληρώθηκε το 1990. Το πρώτο κινητό σύστημα τέθηκε σε λειτουργία το 1978 από την Nippon Telephone and Telegraph (NTT) στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Κάποια από τα πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας ήταν τα Nordic Mobile Telephones (NMT), Total Access Communication Systems (TACS) και Advanced Mobile Phone System (AMPS). Το τελευταίο ξεκίνησε για πρώτη φορά από τις ΗΠΑ σε ένα 1G κινητό σύστημα, το 1982. Το AMPS και το TACS χρησιμοποιούν τεχνική διαμόρφωσης συχνότητας για τη μετάδοση μεταξύ πύργων ραδιοφώνου. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Frequency-Division Multiple Access (FDMA). Όμως αυτή η τεχνική αποτυγχάνει όσον αφορά τη συνολική ποιότητα σύνδεσης και κάνει αυτή τη γενιά κινητών συστημάτων να φέρει σημαντικά μειονεκτήματα. Έχει χαμηλή χωρητικότητα, αναξιόπιστο handoff, κακή ποιότητα φωνής και καθόλου ασφάλεια, εφόσον οι φωνητικές κλήσεις αναπαράγονται σε πύργους ραδιοφώνου, καθιστώντας αυτές τις κλήσεις ευαίσθητες σε ανεπιθύμητες υποκλοπές από τρίτους. Επιπλέον, παρόλο που τα συστήματα αυτά παρείχαν δυνατότητες περιαγωγής, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας δεν ήταν σε θέση να συνεργάζονται μεταξύ των χωρών. [1,2]

### 1.2.3 Η Δεύτερη Γενιά Δικτύων (2G)

Τα κινητά συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) εισήχθησαν στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και ολοκληρώθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Σχεδιάστηκαν κυρίως για μετάδοση φωνής με ψηφιακό σήμα και ταχύτητες έως 64kbps. Τα 2G παρείχαν υπηρεσίες όπως μηνύματα κειμένου και εικόνας (MMS) καθώς και μεγαλύτερη ασφάλεια όσο για τον αποστολέα τόσο και για τον παραλήπτη. Όλα τα μηνύματα κειμένου ήταν ψηφιακά κρυπτογραφημένα, επιτρέποντας τη μεταφορά δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο ο δέκτης που επιλέχθηκε να μπορεί να τα λάβει και να τα διαβάσει. Τα 2G συστήματα χρησιμοποιούν ψηφιακές τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης, όπως TDMA (Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου) και CDMA (Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα). Κατά συνέπεια, σε σύγκριση με τα συστήματα πρώτης γενιάς, έχουν υψηλότερη απόδοση φάσματος, καλύτερες υπηρεσίες δεδομένων και πιο προηγμένη περιαγωγή. Το πρώτο σύστημα 2G ήταν το GSM το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε περισσότερες από 212 χώρες στον κόσμο. Κάνει χρήση της τεχνολογίας TDMA για πολυπλεξία έως 8 κλήσεις ανά κανάλι σε εύρος ζώνης 900 και 1800 MHz. Εκτός από φωνή παρέχει και δεδομένα με ταχύτητα έως 14,4kbps επιτρέποντας στους χρήστες να συνδεθούν στο Διαδίκτυο όμως με πολύ υψηλό κόστος. Η τεχνολογία GSM τείνει να βελτιώνεται συνεχώς για να προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες στην αγορά. Έτσι νέες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν με βάση το αρχικό σύστημα GSM, δημιουργώντας αργότερα 2,5 G συστήματα. [1,2,3]

Οι βασικές βελτιώσεις της GSM είναι οι εξής[5]:

- Υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων για υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος μέσω της μεθόδου TDMA, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται την ίδια συχνότητα καναλιού διαιρώντας το σήμα σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα όπου ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί τη δική του χρονοσχημική[6].

- Παροχή ραδιοεπικοινωνίας μέσω δικτύου GPRS για υποστήριξη μεταφοράς των πακέτων σε πραγματικό χρόνο με μέγιστο ποσοστό δεδομένων έως 140 Kbps.
- Το δίκτυο GPRS εξελίχθηκε σε EDGE δίκτυα με ρυθμό δεδομένων ακόμα πιο υψηλό (έως 384 Kbps) και εύρος ζώνης φέροντος 200 kHz.

#### 1.2.4 Η Τρίτη Γενιά Δικτύων (3G)

Η τρίτη γενιά δικτύων αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και ολοκληρώθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 2000. Τα δίκτυα αυτά υποστηρίζουν υπηρεσίες που παρέχουν ρυθμό μεταφοράς πληροφοριών τουλάχιστον 2Mbps καθώς και πολλές άλλες υπηρεσίες όπως παγκόσμια περιαγωγή, ανώτερη ποιότητα φωνής και μέγιστος ρυθμός δεδομένων. Το 3G, αποτελεί μια παραγωγή των προτύπων για τα κινητά τηλέφωνα αλλά και τις κινητές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που εκπληρώνουν το Διεθνές Κινητό Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο 2000 (IMT-2000) που αναπτύσσεται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών. Τα πρότυπα είναι τα παρακάτω: [4]

- Το σύστημα UMTS εισήχθη το 2001, τυποποιημένο από 3GPP, που αρχικά χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη, την Ιαπωνία, την Κίνα αλλά και σε άλλες περιοχές οι οποίες λόγω της συγκεκριμένης εφαρμογής υπερίσχυσαν από την υποδομή συστημάτων GSM 2G άλλων χωρών. Τα κινητά τηλέφωνα είναι χαρακτηριστικά υβρίδια UMTS και GSM.
- Η πρωτότυπη και πιο διαδεδομένη ραδιοδιεπαφή ονομάζεται W-CDMA . Έχει σχεδιαστεί για παρέχει βελτιωμένη κάλυψη υψηλής χωρητικότητας για 384 kbit /s και περιορισμένη κάλυψη έως και 2 Mbit /s (σε εσωτερικούς χώρους).
- Η διεπαφή TD-SCDMAradio, εμπορευματοποιήθηκε το 2009 και προσφέρεται μόνο στην Κίνα.
- Το 2006 εισήχθη το HSPA+, ως επέκταση του 3G, το οποίο μπορεί να παρέχει ως μέγιστη ταχύτητα δεδομένων 56 Mbit/s και ελάχιστη τα 28 Mbit/s στις υπάρχουσες υπηρεσίες και 22 Mbit/s στη ανερχόμενη ζεύξη.

Οι τεχνολογίες 3G προσφέρουν στους χρήστες ένα ευρύτερο φάσμα πιο προηγμένων υπηρεσιών και πολυμέσων (π.χ ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, φαξ, σελιδοποίηση, σερφάρισμα στο διαδίκτυο, ψηφιακά δεδομένα και φωνή, σύστημα τηλεχειρισμού κ.λπ) , ενώ επιτυγχάνετε μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου μέσω της βελτιωμένης φασματικής απόδοσης τους. Οι υπηρεσίες περιλαμβάνουν, επίσης, ασύρματη φωνή ευρείας περιοχής, βιντεοκλήσεις και ασύρματα ευρυζωνικά δεδομένα, τηλεόραση μέσω Διαδικτύου (IPTV) , GPS και δυνατότητα τηλεδιάσκεψης με βελτιωμένη ροή ήχου και βίντεο.[2]

#### 1.2.5 Η Τέταρτη Γενιά Δικτύων (4G)

Ξεκίνησε τα τέλη του 2000. Στόχος ήταν να τεθεί το σύστημα 4G σε δοκιμαστική εμπορική χρήση μεταξύ 2006 και 2010, έτσι τον Ιανουάριο του 2007, η Κίνα ξεκίνησε τις πρώτες δοκιμές ενός εγχώριου δικτύου κινητών επικοινωνιών 4G σε μια περιοχή της Σαγκάης.[7] Μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς δεδομένων από 100 Mb/s (όταν κινείσαι) έως 1 Gbit/s (όταν είσαι ακίνητος).[8]

Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς χρησιμοποιούν IP για δεδομένα και φωνή σε συνδυασμό με τεχνικές πολυπλεξίας. Το 4G εφαρμόζει την τεχνολογία OFDM η οποία λόγω του ότι

εκτείνεται στο πεδίο του χρόνου, του χώρου και των συχνοτήτων βελτιστοποιεί τη χρήση των ραδιοφωνικών καναλιών. Η διαμόρφωση OFDM μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA) με σκοπό την μετάδοση πληροφοριών από και προς πολλούς χρήστες χρησιμοποιώντας ένα σύνολο καναλιών. Η αποτελεσματικότερη λειτουργία όταν λαμβάνονται πολλά σήματα πολλαπλών διαδρομών είναι η μέθοδος MIMO (Multiple-input Multiple-output), η οποία χρησιμοποιεί πολυπλεξία σήματος μεταξύ πολλαπλών κεραιών μετάδοσης και χρόνου ή συχνότητας.

Άλλη μια τεχνολογία των 4G δικτύων είναι το SDR, ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνίας, που επιτρέπει την αυξημένη χωρητικότητα του δικτύου σε ώρες αιχμής αναδιαμορφώνοντας το δίκτυο προσθέτοντας αρκετά μόντεμ στον σταθμό βάσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Τα Δίκτυα 5G

---

### 2.1 Εισαγωγή στο 5G

---

Μια νέα ψηφιακή εποχή έρχεται για τον κόσμο των επικοινωνιών με λειτουργίες που είναι αδιανόητο να εκπληρώσουν τα μέχρι τώρα δίκτυα επικοινωνίας. Οι κινητές ασύρματες επικοινωνίες 5G ενσωματώνουν μεγάλο αριθμό προηγμένων τεχνολογιών προκειμένου να αυξήσουν το εύρος ζώνης μέσω ενός συνόλου ποιοτικών υπηρεσιών (QoS), με βελτιωμένη χρηστικότητα και της ασφάλεια και με μείωση των καθυστερήσεων και του κόστους. Μερικές από αυτές τις υπηρεσίες που μπορούν να έχουν πρόσβαση οι χρήστες είναι φορητές συσκευές, ροή βίντεο UltraHighDisplay, έξυπνη πλοήγηση (smartnavigation), mobilecloud, διαδραστικά παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο. Εκτιμάται ότι το 5G, θα χειρίζεται πλέον δισεκατομμύρια συσκευές και μυριάδες τύπους κυκλοφορίας. Θα προσφέρει βελτιωμένη λήψη και λιγότερη συμφόρηση δικτύου σε συνδυασμό με καλύτερη συνδεσιμότητα και ομαλότερη λειτουργία περιαγωγής.[11]

Η Πέμπτη γενιά δικτύων κάνει την εμφάνιση της το 2020 ως μια νέα γενιά ασύρματων συστημάτων που συνδέει τους χρήστες γρηγορότερα και πιο αξιόπιστα από οποιαδήποτε προηγούμενη γενιά. Τα κινητά τηλέφωνα 5G θα έχουν ταυτόχρονα πρόσβαση σε διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες και το τερματικό θα να μπορεί να συνδυάζει διαφορετικές ροές από διαφορετικές τεχνολογίες.[9] Το MIMO προσφέρει απόδοση έως και δέκα φορές γρηγορότερο δίκτυο από τα 4G.

Τα συστήματα χιλιοστομετρικών κυμάτων έχουν σχεδιαστεί για λήψεις σε ώρες αιχμής 20 gigabits με μέσο εύρος ζώνης τους τα 3,5 gigabits, ενώ με πρόσθετες κεραίες MIMO φτάνει τα 490 megabits. Στις συχνότητες μεσαίας ζώνης, η ταχύτητα 5G με προσομοίωση είναι παρόμοια με την ταχύτητα 4GLTE, υποθέτοντας την ίδια διαμόρφωση εύρους ζώνης και κεραίας.[10]

### 2.2 Τεχνολογίες των 5G

---

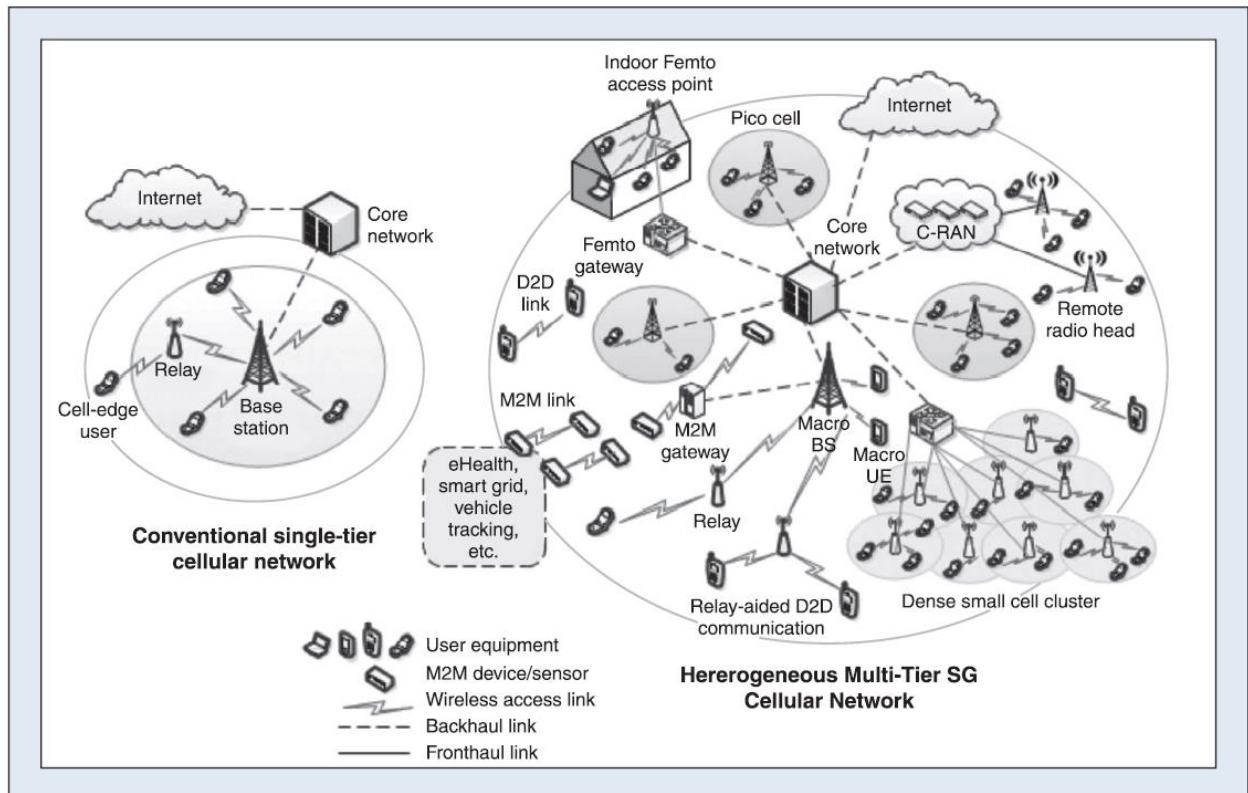
Παρακάτω θα παραθέσουμε οριστικά κάποιες από τις βασικότερες τεχνολογίες που μπορούν να παρέχουν τα συστήματα κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς.

#### 2.2.1 Πυκνά ετερογενή δίκτυα (UDN)

---

Το 5G δίκτυο κινητών είναι ένα ετερογενές δίκτυο πολλαπλών επιπέδων που αποτελείται από μικροκυψέλες συνυπάρχοντας με πολλούς κόμβους χαμηλής ισχύος (όπως smallcells, relay σταθμών βάσης) και με την παροχή P2P επικοινωνίας (όπως D2D και M2M). Η ανάπτυξη ετερογενών κόμβων σε συστήματα 5G έχει υψηλότερη πυκνότητα της κυκλοφορίας στο δίκτυο από τα σημερινά συμβατικά τηλεφωνικά δίκτυα. Η ετερογένεια διαφορετικών κατηγοριών σταθμών βάσης BS (π.χ. macrocells, picocells) στα κινητά δίκτυα παρέχει ευέλικτη περιοχή κάλυψης και βελτιώνει τη φασματική απόδοση. Πιο αναλυτικά, όσον αφορά την κάλυψη, μπορεί να βελτιωθεί με την ανάπτυξη μικρών σταθμών βάσης (smallcells) σε εσωτερικούς χώρους (όπως σπίτια, γραφεία, οχήματα κλπ). Επιπλέον, μειώνοντας το μέγεθος της κυψέλης και επαναχρησιμοποιώντας το φάσμα σε υψηλότερο βαθμό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της φασματικής απόδοσης. Συμπερασματικά, η ύπαρξη πολλαπλών επιπέδων στην αρχιτεκτονική ενός κυψελοειδούς δικτύου προσφέρει

καλύτερες επιδόσεις στην κάλυψη, την χωρητικότητα, τη φασματική απόδοση και την κατανάλωση ισχύος. [13]



Εικόνα 2.1: Μια απεικόνιση του συμβατικού και ενός κυψελοειδούς ασύρματου δικτύου 5G.[12]

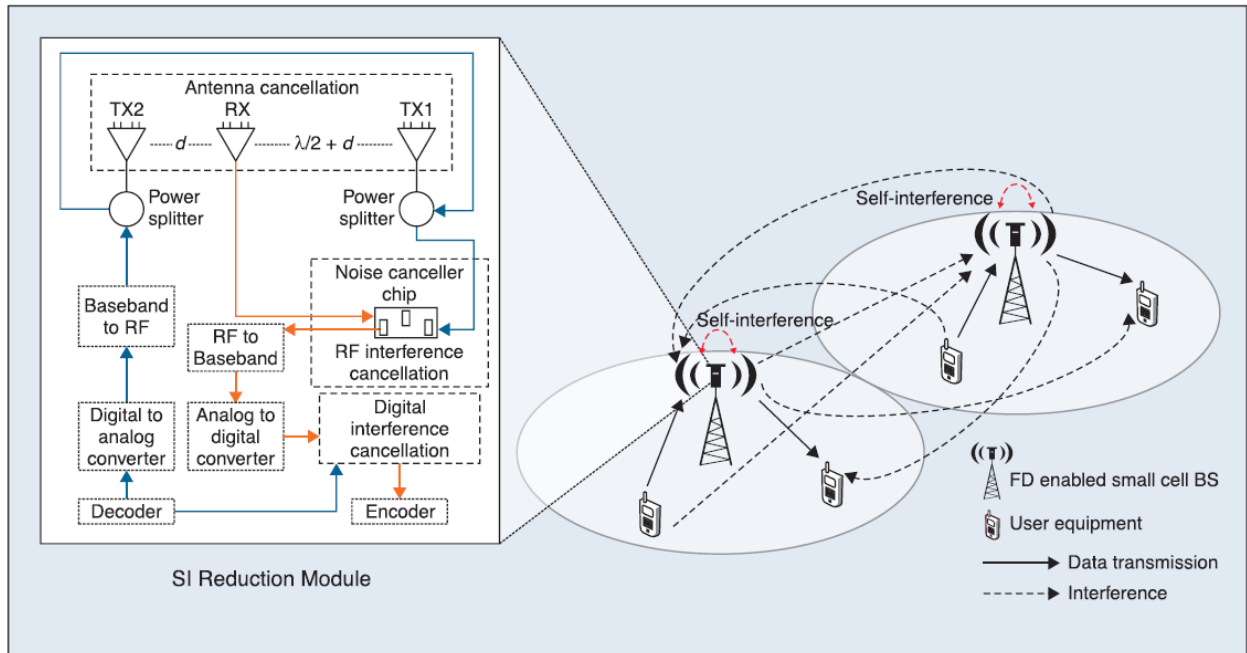
### 2.2.2 Πλήρως αμφίδρομη λειτουργία (FD)

Το Full-Duplex (FD) επιτρέπει σε μια ασύρματη συσκευή να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Υποθετικά ένας κόμβος (π.χ. BS, UE, κ.λπ.) δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει ένα ληφθέν σήμα ενώ μεταδίδει ταυτόχρονα σε μια ίδια ζώνη συχνοτήτων λόγω εσωτερικών παρεμβολών μεταξύ των κυκλωμάτων πομπού και δέκτη (self-interference, SI). Ωστόσο, με τις πρόσφατες εξελίξεις, η επικοινωνία FD έχει τη δυνατότητα να διπλασιάσει την φασματική απόδοση στο φυσικό στρώμα μέσω της αφαίρεσης μιας ξεχωριστής ζώνης συχνοτήτων/χρόνου για μετάδοση και για uplink και για downlink. Αναλυτικότερα, το σήμα που λαμβάνει μια ασύρματη συσκευή καταστρέφεται από άμεσες παρεμβολές από μεταδιδόμενο σήμα στον ίδιο κόμβο. Ως εκ τούτου, η ισχύς της αυτο-παρεμβολής είναι πολύ μεγαλύτερη από το ληφθέν σήμα. Για την πραγματοποίηση ενός full duplex συστήματος, λοιπόν, θα πρέπει να βρεθούν τρόποι ακύρωσης αυτών των παρεμβολών. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές ακύρωσης RF, αναλογικής και ψηφιακής που μπορούν να παρέχουν ακύρωση 120 dB αυτο-παρεμβολών, επιτρέποντας πλήρη επικοινωνία διπλής όψης μέσω συσκευών femto-cell και Wi-Fi.

Συμπερασματικά, είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για ασύρματα συστήματα 5G καθώς αυξάνει τη χωρητικότητα του φυσικού στρώματος κατά δύο, βελτιώνει τους μηχανισμούς καθυστέρησης (latency) της ανατροφοδότησης (feedback) και παρέχει ασφάλεια στο φυσικό επίπεδο. Επιπλέον, μελέτες έχουν δείξει ότι τα συστήματα FD μπορούν να παρέχουν υψηλότερα ποσοστά δεδομένων από τα συμβατικά συστήματα επικοινωνίας Half-Duplex (HD). Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι κατά τη λήψη ενός καθορισμένου



πακέτου, ένας κόμβος μπορεί να μεταδώσει ένα άλλο πακέτο στην αντίθετη κατεύθυνση κάνοντας χρήση της ικανότητας FD. Αυτό όχι μόνο διπλασιάζει την απόδοση, αλλά επιτρέπει επίσης σε άλλους κόμβους να εντοπίζουν καλύτερα τους ενεργούς γειτονικούς κόμβους τους εγκαίρως. Από την άλλη πλευρά, όταν ο κόμβος δεν έχει πακέτο προς αποστολή, μπορεί να μεταδώσει κάποιο feedback message έτσι ώστε οποιοσδήποτε μυστικός κόμβος να μπορεί να ανιχνεύσει τη δραστηριότητα των γειτόνων του και να συνειδητοποιήσει ότι το κανάλι χρησιμοποιείται. [12,13]



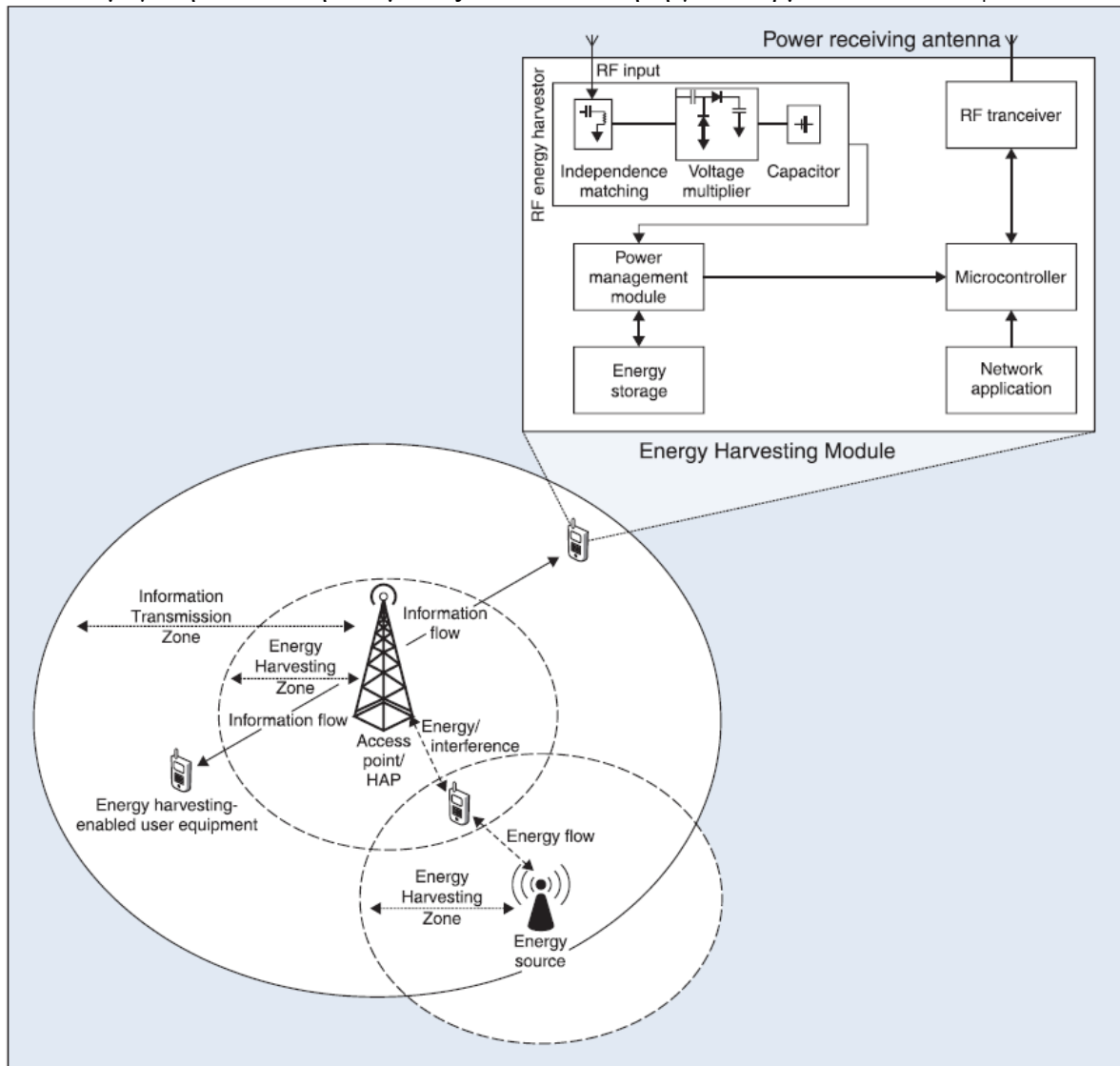
Εικόνα 2.2: Ένα FD δίκτυο κινητών.[12]

Ας δούμε ένα παράδειγμα ακύρωσης παρεμβολών κοιτώντας την Εικόνα 2.2 Για ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $\lambda$  τοποθετούνται δύο κεραίες μετάδοσης σε μήκη  $d$  και  $\lambda/2+d$  από την κεραία λήψης. Αντισταθμίζοντας τους δύο πομπούς κατά μισό μήκος κύματος, μπορούμε να αφήσουμε τα σήματα να προστεθούν. Ως αποτέλεσμα, η κεραία του δέκτη λαμβάνει ένα πολύ ασθενέστερο σήμα με λιγότερη αυτο-παρεμβολή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα τοπικά σήματα μετάδοσης. Μετά την εκτέλεση της ακύρωσης της κεραίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών RF και ψηφιακών παρεμβολών για την περαιτέρω μείωση του SI. Στην τεχνική ακύρωσης παρεμβολών RF, ένα τσιπ ακύρωσης θορύβου μπορεί να αφαιρέσει ένα γνωστό αναλογικό σήμα παρεμβολής από ένα ληφθέν σήμα. Δεδομένου ότι τα μεταδιδόμενα σύμβολα είναι ήδη γνωστά, ένας συνεκτικός μηχανισμός ανίχνευσης χρησιμοποιείται στη φάση ακύρωσης ψηφιακών παρεμβολών για την ανακατασκευή του σήματος.[12]

### 2.2.3 Συλλογή ενέργειας από ραδιοσήματα (RF-EH)

Πρόκληση των 5G δικτύων είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μέσω τον περιορισμό των ασύρματων συσκευών που χρησιμοποιούν μπαταρίες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση εναλλακτικών πηγής ενέργειας που αντλούνται από το περιβάλλον (π.χ ηλιακή και αιολική ενέργεια. Εξαιτίας της μεταβαλλόμενης φύσης των ανανεώσιμων πηγών τα επίπεδα ενέργειας διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή και ως εκ τούτου η παροχή ασύρματων υπηρεσιών να μην είναι αξιόπιστη. Εναλλακτικά, η ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί από ραδιοσήματα περιβάλλοντος που ονομάζονται RadioFrequency (RF)

EnergyHarvestingNetworks (RF-EHN). Σε αυτά τα δίκτυα οι κόμβοι μετατρέπουν το ληφθέν ηλεκτρομαγνητικό σήμα σε ενέργεια. Η μεταφορά ενέργειας RF είναι χαμηλής ισχύος και καλύπτει μεγάλη απόσταση, επομένως είναι κατάλληλη για ασύρματα δίκτυα κυψελών.



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση ενός RFenergy-harvesting δικτύου.[12]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3, ένα RF-EHN αποτελείται από πηγές ενέργειας με σημεία πρόσβασης κόμβους δικτύου (π.χ σταθμοί βάσης, κινητές συσκευές κλπ). Όλα τα σημεία πρόσβασης έχουν μια ζώνη συλλογής ενέργειας και μια ζώνη μετάδοσης πληροφοριών. Η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη γίνεται μέσω ραδιοσημάτων.. Ένας κόμβος RF-EH αποτελείται από έναν πομποδέκτη χαμηλής ισχύος για μετάδοση και λήψη, έναν συλλέκτη ενέργειας (energyharvester) για να παίρνει και να μετατρέπει τα ραδιοσήματα σε ηλεκτρική ενέργεια και έναν αποθηκευτικό χώρο (π.χ μια μπαταρία) ο οποίος αποθηκεύει την περίσσεια ενέργεια για μελλοντική χρήση.

Δεδομένου ότι ποσότητα της συλλεγόμενης ενέργειας εξαρτάται από την απόσταση από την πηγή, οι κόμβοι του δικτύου ,στις διάφορες τοποθεσίες τις οποίες βρίσκονται, συλλέγουν διαφορετικές ποσότητες ενέργειας RF. Για παράδειγμα, όταν ο συλλέκτης ενέργειας βρίσκεται σε απόσταση  $d$  από τον πομπό με την μονάδα εκπομπής ισχύος, η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί από το ληφθέν σήμα δίνεται από τον τύπο:

$$E_h(d) = ef(d, a) \quad (2.1)$$

Όπου  $f(d, a)$  είναι η ισχύς που λαμβάνεται και  $e$  είναι η ενεργειακή απόδοση (energy conversion efficiency). Η προκύπτουσα ενέργεια εξαρτάται από την απόδοση της κεραίας, την αντίσταση σε συνδυασμό με την κεραία και τον πολλαπλασιαστή τάσης και την απόδοση ισχύος του πολλαπλασιαστή τάσης (που μετατρέπει τα ληφθέντα σήματα από χαμηλότερη σε υψηλότερη τάση DC). Η συνάρτηση λήψης  $f(d, a)$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f(d, a) = P_r^{det}(d) \times 10^L \times |r|^2 \quad (2.2)$$

Όπου η  $P_r^{det}(d)$  χρησιμοποιεί οποιοδήποτε ντετερμινιστικό μοντέλο εξασθένησης (μείωσης πυκνότητας ισχύος),  $L$  ο συντελεστής απώλειας-εξασθένησης ο οποίος είναι  $L = -\log_{10}(d/d_0)$  με εκθέτη  $a$ , απόσταση  $d_0$  και  $r$  ένας τυχαίος αριθμός που ακολουθεί την κατανομή Gauss. [12]

#### 2.2.4 Ταυτόχρονη ενεργειακή συγκομιδή με δυνατότητα FD

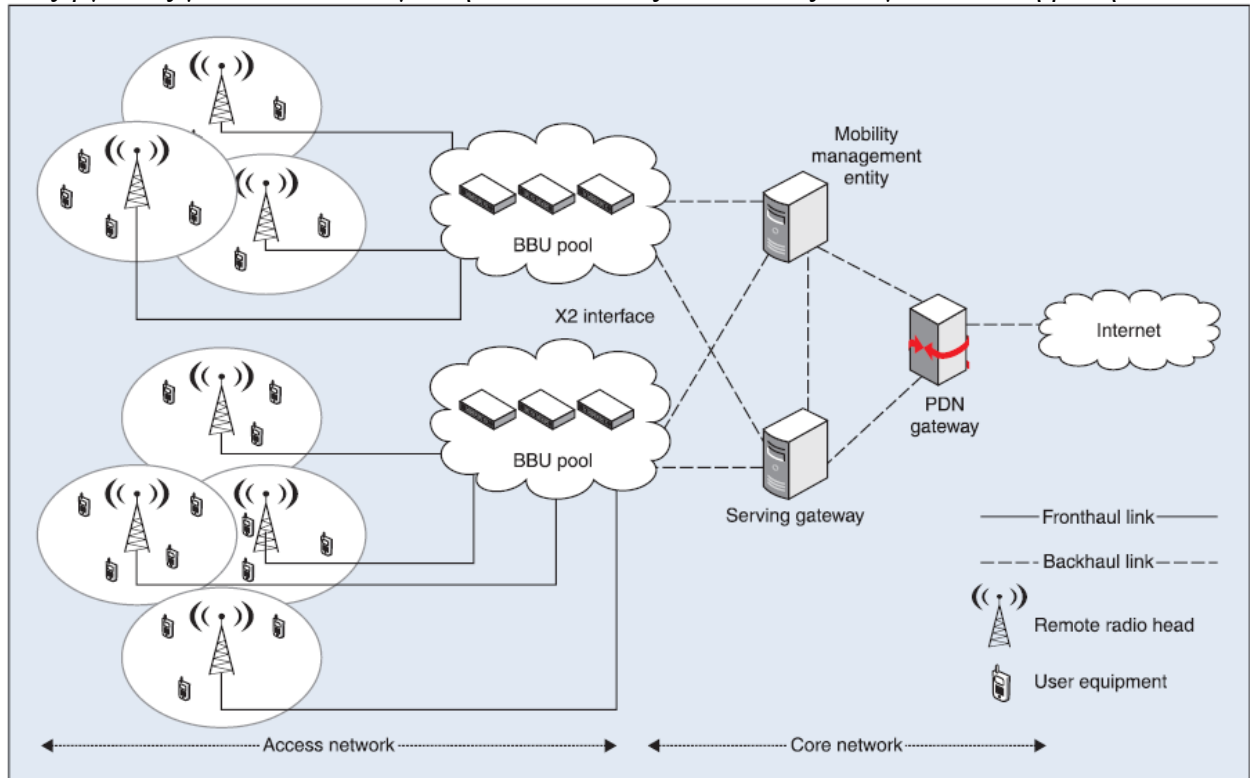
Εφόσον τα σήματα RF μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια και πληροφορίες, η δυνατότητα συλλογής ενέργειας και η FD μετάδοση και λήψη πληροφοριών μπορούν να πραγματοποιηθούν από το ίδιο σήμα εισόδου. Αυτή η λειτουργία αναφέρεται ως simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT), δηλαδή ταυτόχρονη ασύρματη μετάδοση πληροφοριών και μεταφορά ενέργειας [12]. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στα κινητά τερματικά να συλλέγουν ενέργεια από ραδιοσήματα, ανιχνεύοντας ραδιοσυχνότητες που στέλλονται από τους σταθμούς βάσης. Επιπλέον, το σύστημα SWIPT μπορεί να εγγραφεί ότι τα κινητά τερματικά εκτελούν αποκωδικοποίηση πληροφοριών (ID) και συλλογή ενέργειας (EH) ταυτόχρονα χωρίς διακοπή της μετάδοσης δεδομένων μέσω διαχωριστών ισχύος [14]. Στα κυψελοειδή RF-EHNs, οι λειτουργίες FD υποστηρίζονται συνήθως με τη χρήση HAPs διπλής κεραίας. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση είναι διαφορετική από τα συμβατικά συστήματα επικοινωνίας FD, δεδομένου ότι μια από τις κεραίες εκτελεί μεταφορά ενέργειας στο downlink και η άλλη χρησιμοποιείται για μετάδοση πληροφοριών στο uplink [12]. Παρ'όλα αυτά, στα πυκνά κυψελοειδή δίκτυα 5G αυτή η κοινή χρήση φάσματος μεταξύ μικροκυψελών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές παρεμβολές στο δίκτυο.

#### 2.2.5 Δίκτυο ασύρματης πρόσβασης βασισμένο στο cloud (C-RAN)

Η αρχιτεκτονική RAN των παραδοσιακών κυψελωτών δικτύων συνήθως αποτελείται από σταθμούς βάσης, οι οποίοι επεξεργάζονται και μεταδίδουν τα σήματα των κινητών τηλεφώνων, διαβιβάζοντας τα δεδομένα τους στον πυρήνα του δικτύου μέσω του backhaul. Με την πάροδο των ετών, η αρχιτεκτονική RAN έχει εξελιχθεί χρησιμοποιώντας κατανομημένους σταθμούς βάσης, οι οποίοι διαχωρίζουν τη μονάδα φασματικής λειτουργίας (RRH) από αυτήν της ψηφιακής λειτουργίας (BBU). Ο στόχος της εικονοποίησης είναι η ύπαρξη ενός συνόλου από μονάδες ψηφιακής λειτουργίας (BBU) που λειτουργούν συνήθως σε κέντρα δεδομένων.

Το Cloud-based Radio Access Network (C-RAN), λοιπόν, εξελίχθηκε από μια αρχιτεκτονική κατανομημένου σταθμού βάσης όπου ένας διακομιστής BS είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία της ζώνης βάσης (baseband). Οι μονάδες επεξεργασίας ζώνης βάσης (Baseband Processing Units- BBUs) των κυψελών διαχωρίζονται από τις μονάδες αναλογικής ραδιοπρόσβασης, που αναφέρονται ως απομακρυσμένες ασύρματες κεφαλές

(remoteradioheads-RRHs) , και μετακινούνται στο cloud για την κεντρική επεξεργασία και διαχείριση του σήματος. Ο χώρος συγκέντρωσης BBU, ο οποίος λειτουργεί ως cloud ή ως κέντρο δεδομένων, εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη περιοχή με έναν αριθμό RRHmacrocells και smallcells, οι οποίες με βάση τα σήματα που λαμβάνουν από το cloud μεταδίδουν ραδιοσήματα στους χρήστες. Επιπλέον, ο χώρος συγκέντρωσης μπορεί να αποτελείται από επεξεργαστές γενικού σκοπού για την εκτελέσει τις διαδικασίες που γίνονται στη βάση.



Εικόνα 2.4: Βελτιωμένο σύστημα ραδιοπρόσβασης LTE-A βασισμένο στο cloud.[12]

Στην αρχιτεκτονική 4G (π.χ. κυψελοειδή δίκτυα με βάση LTE-A), η λειτουργία επεξεργασίας ραδιοφώνου και ζώνης βάσης ενσωματώνεται μέσα στον BS και μεταξύ αυτού ο συντονισμός εκτελείται μέσω μιας διεπαφής X2 (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4). Στο C-RAN, οι λειτουργίες της ζώνης βάσης (όπως κωδικοποίηση, διαμόρφωση, γρήγορος μετασχηματισμός Fourier, κ.λπ.) πραγματοποιείται στο σύννεφο (π.χ. BBU pool).

Σε μια απομακρυσμένη τοποθεσία, η μονάδα ραδιοφώνου (π.χ. RRH) συνυπάρχει με τις κεραιές και εκτελεί ψηφιακή επεξεργασία, μετατροπή από ψηφιακή σε αναλογική και το αντίθετο, ενίσχυση ισχύος και φιλτράρισμα. Το backhaul<sup>1</sup> συνδέει το cloud με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Το fronthaul (γενικά οπτικός σύνδεσμος μεταφοράς) εκτείνεται από το RRHs στο cloud για τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων.[12]

Πρόκληση στα δίκτυα 5G είναι ο επανασχεδιασμός των backhaul links έτσι ώστε να μπορούν να κρατήσουν τον τεράστιο όγκο των χρηστών που χρησιμοποιούν το δίκτυο. Αλλιώς, θα γίνουν σημεία συμφόρησης με αποτέλεσμα τη μη σωστή λειτουργία του συστήματος. Το πρόβλημα επεκτείνεται με την ύπαρξη περισσότερων μικροκυψελών και για

<sup>1</sup>**Backhaul:** Οπισθόζευξη. Σε ένα ιεραρχικό δίκτυο τηλεπικοινωνιών, το τμήμα backhaul του δικτύου περιλαμβάνει τους ενδιάμεσους συνδέσμους μεταξύ του δικτύου κορμού και τα μικρά υποδίκτυα στην άκρη του δικτύου.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Backhaul\\_\(telecommunications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Backhaul_(telecommunications))

την επίλυση του προτείνονται διαφορετικά μέσα επικοινωνίας συμπεριλαμβανομένων οπτικών ινών και μικροκυμάτων όπως τα mmWave, που θα εξετάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.[15]

Να σημειωθεί ότι το C-RAN πραγματοποιώντας εξισορρόπηση φορτίου και συνεργατική επεξεργασία σημάτων, σε σχέση με άλλους σταθμούς βάσης, ελαττώνει το κόστος επεξεργασίας της ζώνης βάσης και μειώνει την κατανάλωση ισχύος. Ο αριθμός των BS μπορεί να μειωθεί σημαντικά μέσω της συγκέντρωσης BBU στο cloud, με αποτέλεσμα πολύ χαμηλότερο κόστος λειτουργίας.[12]

### 2.2.6 Εικονοποίηση ασύρματου δικτύου (WNV)

Ο μηχανισμός εικονοποίησης ασύρματου δικτύου (WirelessNetworkVirtualization) δικτύου επιτρέπει τη δημιουργία μιας εικονικής υποδομής κατά την οποία οι φυσικοί πόροι του εξοπλισμού (π.χ μνήμη, CPU, αποθηκευτικός χώρος) μπορούν να μοιραστούν σε επιμέρους εικονικές μηχανές που θα τρέχουν κάτω από το ίδιο φυσικό μηχάνημα[16]. Η εικονοποίηση αποτελεί βασικό στοιχείο του υπολογιστικού νέφους (cloudcomputing). Ως εκ τούτου, μαζί με την C-RAN αρχιτεκτονική διευκολύνεται η κοινή χρήση πόρων μεταξύ πολλών χειριστών. Αυτοί οι πόροι μπορεί να είναι η δικτυακή υποδομή, το backhaul, το RAN κλπ. Τα εικονικά ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από έναν πάροχο υποδομής (InP) και έναν πάροχο εικονικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MVNO). Ο InP κατέχει τις φυσικές κυψελοειδείς υποδομές και τους πόρους ραδιοφώνου. Ο MVNO δεσμεύει τους πόρους από το InP, δημιουργεί και λειτουργεί εικονικούς πόρους και τους εκχωρεί στους συνδρομητές. Οι πόροι του δικτύου ανήκουν σε ένα ή περισσότερα InP, εικονοποιούνται και μεταφέρονται σε κομμάτια. Το MVNO χρησιμοποιεί τα κομμάτια αυτά του InP και παρέχει υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες χωρίς να γνωρίζουν την αμετάβλητη φυσική αρχιτεκτονική του δικτύου.[12]

Τα κύρια πλεονεκτήματα του WNV περιλαμβάνουν: υψηλή χρήση πόρων, βελτιωμένη απόδοση του συστήματος, μειωμένες κεφαλαιουχικές και επιχειρησιακές δαπάνες (CAPEX&OPEX), καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών για τους τελικούς χρήστες και ευκολότερη μετεγκατάσταση σε νεότερες τεχνολογίες.

## 2.3 Το 5G στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη παρατηρείται μεγάλη πρόοδος στις κινητές επικοινωνίες έως και τις μέρες μας. Κάποια παραδείγματα είναι το πρότυπο GSM των συστημάτων 2G που χρησιμοποιείται σήμερα από το 80% των δικτύων κινητών παγκοσμίως, τα UMTS συστήματα των 3G και τα πρότυπα LTE των 4G δικτύων. Η έγκαιρη ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G είναι πλέον πρωταρχικής σημασίας για την Ευρώπη ιδιαίτερα στον τομέα της οικονομίας, ενισχύει την ανταγωνιστικότητα των βιομηχανιών και δημιουργεί νέες ευκαιρίες απασχόλησης. Η ανάπτυξη αυτή αντιπροσωπεύει συνολικά στον τομέα ΤΠΕ περίπου το 5% του ΑΕΠ της ΕΕ, με ετήσια αξία 660 δισ ευρώ. Παράγει το 25% των συνολικών επιχειρηματικών δαπανών στην έρευνα και ανάπτυξη και στις επενδύσεις το ΤΠΕ αντιπροσωπεύει το 50% της συνολικής ευρωπαϊκής αύξησης της παραγωγικότητας.[15]

Επιπρόσθετα, το 5G θα διαδραματίσει βασικό ρόλο στην εξασφάλιση μιας ηγετικής θέσης της Ευρώπης στην παγκόσμια βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας. Άλλωστε, η ιστορία έχει δείξει ότι η ευρωπαϊκή βιομηχανία τηλεπικοινωνιών ήταν στην πρώτη γραμμή του

παγκόσμιου ανταγωνισμού από τις πρώτες μέρες ανάπτυξης των τεχνολογιών GSM, UMTS και LTE. Το 2012, αντιπροσώπευε περίπου το 40% (200 δισ ευρώ) της παγκόσμια αγοράς στον τομέα των τηλεπικοινωνιών όσον αφορά την προσφορά στο δίκτυο υποδομής. Ωστόσο, η Ευρώπη υστερεί τώρα σε σχέση με τους ανταγωνιστές της και θέλει να καλύψει τη διαφορά με την ηγεσία της στην τεχνολογία 5G. Έτσι η ΕΕ προχώρησε στην ανάπτυξη ενός έργου το οποίο θα οδηγήσει στην ανάπτυξη μελλοντικών συστημάτων κινητής και ασύρματης επικοινωνίας σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Αυτό το ερευνητικό έργο φέρει το όνομα METIS (Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-twenty Information Society) και στοχεύει στην ανάπτυξη ενός συστήματος που παρέχει την απαραίτητη αποτελεσματικότητα, ευελιξία, επεκτασιμότητα, διερεύνηση βασικών τεχνολογικών στοιχείων για την υποστήριξη του συστήματος, αξιολόγηση και επίδειξη βασικών λειτουργιών. Πιο αναλυτικά το METIS θέτει θεμέλια για το 5G παρέχοντας μια ιδέα συστήματος που μπορεί να υποστηρίξει [15]:

- 1000 φορές υψηλότερη χωρητικότητα ανα περιοχή
- 10-100 φορές υψηλότερο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών
- 10-100 φορές υψηλότερο ρυθμό δεδομένων ανά χρήστη
- 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας για συσκευές χαμηλής ισχύος
- 5 φορές μικρότερη καθυστέρηση από άκρη σε άκρη, σε σύγκριση με LTE - A τεχνολογίες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Τεχνικές Μετάδοσης και Σχεδιασμού των 5G

## 3.1 Massive MIMO

Βασικές απαιτήσεις των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς, όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι η υποστήριξη 1000 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα ανά περιοχή, ευρύτερο φάσμα, μεγαλύτερος αριθμός σταθμών βάσης ανά περιοχή και αυξημένη φασματική απόδοση ανά κυψέλη. Τα συστήματα Massive MIMO είναι απαραίτητα ιδιαίτερα για τον τελευταίο παράγοντα καθώς υπόσχονται να παρέχουν ουσιαστική αυξημένη φασματική απόδοση ανά κυψέλη. Ένα τέτοιο δίκτυο MIMO ορίζεται ως ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό μεμονωμένων ελεγχόμενων κεραιών (οι οποίες είναι πολύ περισσότερες από τον αριθμό των ενεργών χρηστών), 100 ή περισσότερες, συνδεδεμένες συνήθως στην πλευρά του σταθμού βάσης (BS). Αυτή η λειτουργία έχει σκοπό την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών τερματικών.

### 3.1.1 Μοντέλο συστήματος

Έστω ένα σύστημα MIMO με  $M$  κεραιές στον πομπό και  $N$  κεραιές στον δέκτη. Ο δίαυλος κάθε κεραιάς δέκτη με κάθε κεραιά του πομπού θα έχει κρουστική απόκριση  $\mathbf{h}_{mn}(\boldsymbol{\tau}; t)$ . Όπου  $\boldsymbol{\tau}$  δηλώνεται το πεδίο της καθυστέρησης και  $t$  ο χρόνος. Συνεπώς, ο πίνακας  $\mathbf{H}(\boldsymbol{\tau}; t)$  που χαρακτηρίζει το τυχαίο χρονομεταβλητό δίαυλο έχει την εξής μορφή [19]:

$$\mathbf{H}(\boldsymbol{\tau}; t) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11}(\boldsymbol{\tau}; t) & \mathbf{h}_{12}(\boldsymbol{\tau}; t) & \cdots & \mathbf{h}_{1M}(\boldsymbol{\tau}; t) \\ \mathbf{h}_{21}(\boldsymbol{\tau}; t) & \mathbf{h}_{22}(\boldsymbol{\tau}; t) & \cdots & \mathbf{h}_{2M}(\boldsymbol{\tau}; t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{N1}(\boldsymbol{\tau}; t) & \mathbf{h}_{N2}(\boldsymbol{\tau}; t) & \cdots & \mathbf{h}_{NM}(\boldsymbol{\tau}; t) \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$h_{ij}$  το επίπεδο εξασθένισης του καναλιού από την κεραιά εκπομπής  $j$  μέχρι την κεραιά λήψης  $i$ . Συνήθως το κανάλι θεωρείται χωρικά λευκό, με μηδενική μέση τιμή (δηλαδή τα στοιχεία του πίνακα θεωρούνται μιγαδικές τυχαίες μεταβλητές, κυκλικά συμμετρικές, ανεξάρτητες και ομοιόμορφα κατανομημένες (i.i.d.) με μηδενική μέση τιμή, διακύμανση  $N_0$ , που ακολουθούν κατανομή Gauss.

Εάν το εκπεμπόμενο σύμβολο από την  $m$ -οστή κεραιά πομπού είναι  $s_m(t)$ , στην  $n$ -οστή κεραιά δέκτη το λαμβανόμενο  $r_n(t)$  θα ήταν της μορφής:

$$\mathbf{r}_n(t) = \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}_{m,n}(\boldsymbol{\tau}; t) \mathbf{s}_m(t - \boldsymbol{\tau}) d\boldsymbol{\tau} = \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}_{m,n}(\boldsymbol{\tau}; t) * \mathbf{s}_m(\boldsymbol{\tau}) d\boldsymbol{\tau} \quad (3.2)$$

Με  $*$  συμβολίζεται η διαδικασία της συνέλιξης.

Για κανάλια, στα οποία η κρουστική απόκριση του καναλιού μεταβάλετε πολύ αργά σε σχέση με ένα χρονικό διάστημα  $0 < t < T$ , όπου  $T$  ο χρόνος συνοχής, το χρονικό διάστημα δηλαδή όπου το κανάλι θεωρείται σχεδόν σταθερό για την μετάδοση ενός frame:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11} & \mathbf{h}_{12} & \cdots & \mathbf{h}_{1M} \\ \mathbf{h}_{21} & \mathbf{h}_{22} & \cdots & \mathbf{h}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{N1} & \mathbf{h}_{N2} & \cdots & \mathbf{h}_{NM} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Οπότε σε αυτήν την περίπτωση το διάνυσμα του λαμβανόμενου σήματος  $r$  έχει την εξής αλγεβρική μορφή:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} \quad (3.4)$$

Όπου το λαμβανόμενο  $r$  είναι διάστασης  $N \times 1$  το εκπεμπόμενο  $s$  είναι διάστασης  $M \times 1$  και ο πίνακας του καναλιού  $\mathbf{H}$  είναι  $N \times M$ . Βέβαια η παραπάνω θεώρηση δεν είναι ολοκληρωμένη καθώς δεν έχει συνυπολογιστεί ο θόρυβος. Έστω  $n$  το διάνυσμα λευκού προσθετικού Γκαουσιανού θορύβου (AWGN) με μηδενική μέση τιμή, το οποίο έχει διάσταση ίση με το λαμβανόμενο δηλαδή  $N \times 1$ . Το μοντέλο συστήματος για μη συγχρονισμένο δίαυλο είναι:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Singleuser MIMO

Έστω ένα κανάλι στενής ζώνης και ένα χρονικά αμετάβλητο σύστημα MIMO με κεραία μετάδοσης (Tx)  $\mathbf{n}_t (M)$  και κεραία λήψης (Rx)  $\mathbf{n}_r (N)$ , το λαμβανόμενο σήμα, παραλείποντας τον δείκτη χρόνου  $m$  για την απλή απλοποίηση, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3.6)$$

Όπου  $x \in \mathbb{C}^M$  είναι το σήμα Tx που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης και έχει περιορισμό μετάδοσης ισχύος  $\text{Tr}(E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]) \leq P$ ,  $E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H]$  ο πίνακας συνδιακύμανσης εισόδου,  $y \in \mathbb{C}^N$  το σήμα λήψης Rx,  $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, N_0\mathbf{I})$  ο προσθετικός λευκός θόρυβος Gauss (AWGN) με διακύμανση  $N_0$  και  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times N}$  ο πίνακας καναλιού του οποίου τα στοιχεία περιέχουν πληροφορίες πλάτους και φάσης.

Ο εφικτός ρυθμός του καναλιού  $\mathbf{H}$  που μετράται σε bits ανά κανάλι χρήσης οριοθετείται από τις αμοιβαίες πληροφορίες  $I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}) - \mathbf{H}(\mathbf{x}|\mathbf{y})$  μεταξύ της εισόδου  $\mathbf{x}$  και της εξόδου  $\mathbf{y}$ , με  $H(\mathbf{x})$  η εντροπία της πηγής (η πληροφορία της  $\mathbf{x}$ ) και  $H(\mathbf{x}|\mathbf{y})$  η υπό συνθήκη εντροπία (η αβεβαιότητα για την  $\mathbf{x}$  αν γνωρίζουμε την τιμή της  $\mathbf{y}$ ). Εφόσον το διάνυσμα των σημάτων είναι ανεξάρτητο του θορύβου ισχύει ότι  $H(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = H(\mathbf{n})$ . Επομένως, η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της εντροπίας των σημάτων λήψης του διανύσματος  $\mathbf{y}$ . Δεδομένου του ότι ανάμεσα σε όλα τα πιθανά διανύσματα  $\mathbf{y}$  με πίνακα συνδιακύμανσης  $\mathbf{R}_{yy}$ , η εντροπία μεγιστοποιείται όταν κάθε στοιχείο του  $\mathbf{y}$  είναι μιγαδική κυκλικά συμμετρική Γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή (Zero Mean Circularly Symmetric Complex Gaussian, ZMCSCG). Το διάνυσμα εκπομπής  $\mathbf{x}$  πρέπει επίσης να ακολουθεί αυτόν τον κανόνα. Άρα, η χωρητικότητα του καναλιού μετατρέπεται τελικά στη σχέση:



$$C = \max_{\text{Tr}[E[xx^H]] \leq P} I(x; y) = \max_{Kx: \text{Tr}[Kx] \leq P} \log \det \left| I + \frac{1}{N_0} HR_{xx}H^H \right| \quad (3.7)$$

Με την υπόθεση ότι έχουμε λευκό προσθετικό Γκαουσιανό θόρυβο, τα στοιχεία του οποίου θα είναι ανεξάρτητες ομοιόμορφα κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές (iid), με διακύμανση  $N_0$ . Όπου  $I$  μοναδιαίος πίνακας  $M \times N$ . Επιπλέον ισχύει ότι  $R_{yy} = HR_{xx}H^H + N_0I$ , όπου  $R_{xx}$  ο πίνακας που περιέχει τα ιδιοδιανύσματα (πίνακας συνδιακύμανσης) του διανύσματος εισόδου  $x$  του  $H$ .

Στην περίπτωση που το κανάλι είναι γνωστό από τη μεριά του πομπό, η βέλτιστη ισχύς λαμβάνεται μέσω ενός αλγορίθμου υπερχειλίσης Water-Filling και έτσι προκύπτει η σχέση χωρητικότητας.

Σε αντίθετη περίπτωση, που ο πομπός δεν γνωρίζει το κανάλι, δηλαδή τον πίνακα καναλιού  $H$ , η εκπεμπόμενη ισχύς κατανέμεται ομοιόμορφα ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας εκπομπής, δηλαδή:

$$R_{xx} = \frac{P}{M}I \quad (3.8)$$

υπονοώντας ότι ο πομπός αναθέτει το ίδιο ποσοστό ισχύος σε όλες τις κεραίες εκπομπής.

Έτσι, η έκφραση της χωρητικότητας τροποποιείται στην :

$$C = \log \det \left| I + \frac{P}{MN_0} HH^H \right| \quad (3.9)$$

Όπου  $\frac{P}{N_0}$  είναι ο μέσος λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) στον πομπό. Η έκφραση αυτή αφαιρεί τους όποιους περιορισμούς στον γραμμικό συνδυασμό των στοιχείων της κεραίας καθώς αποτελεί μια γενικευμένη έκφραση της χωρητικότητας.

### 3.1.3 Ο Αλγόριθμος Water-Filling

Σε περίπτωση που ο πομπός γνωρίζει κάποια πληροφορία του καναλιού, τότε η χωρητικότητα μπορεί να βελτιωθεί ανακατανέμοντας την εκπεμπόμενη ισχύ στις κεραίες. Η κατανομή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε περισσότερη ισχύς να δαπανάται στα κανάλια που συνεισφέρουν περισσότερο στη συνολική χωρητικότητα. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως WaterFilling.

Η τεχνική WaterFilling, λοιπόν, λύνει το πρόβλημα της χωρητικότητας ενός καναλιού που αποτελείται από πολλά υποκανάλια με περιορισμό ισχύος στον πομπό. Η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί με την χρήση τεχνικών beamforming<sup>2</sup> αλλά και με την χρήση ανομοιόμορφης κατανομής της ισχύος ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας. Η τεχνική αυτή βέλτιστης κατανομής ισχύος είναι γνωστή και ως water-filling ή water-pouring. Σε αντίθεση

<sup>2</sup>**Beamforming**: διαμόρφωση δέσμης ή χωρικό φίλτράρισμα. Είναι μια τεχνική που εστιάζει ένα ασύρματο σήμα προς μια συγκεκριμένη συσκευή λήψης αντί να εξαπλώνεται το σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις από μια κεραία εκπομπής όπως θα γινόταν κανονικά.

<https://www.networkworld.com/article/3445039/beamforming-explained-how-it-makes-wireless-communication-faster.html>

με την τεχνική beam-forming με την οποία επιλέγονται τα τεχνητώς διαχωρισμένα υποκανάλια με το υψηλότερο κέρδος για την αποστολή της πληροφορίας, το water-filling είναι μια βέλτιστη τεχνική κατανομής ισχύος στα υποκανάλια που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας τεχνικές beam-forming, στις οποίες τα ασθενέστερα υποκανάλια δεν χρησιμοποιούνται [20].

Η βέλτιστη ανάθεση ισχύος αποτελεί μια τεχνική κατανομής της ισχύος στους διάφορους υποδιαύλους. Επομένως, η χωρητικότητα είναι το άθροισμα όλων των χωρητικότητων. Άρα, η χωρητικότητα του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$C = \max_{R'_S: Tr(R'_S) \leq P^{S,av}} \sum_{i=1}^{\min(M,N)} \log \left( 1 + \frac{p_i \lambda_i}{N_0} \right)^+ \quad (3.10)$$

Όπου  $p_i$  η ζητούμενη ισχύς σε κάθε υποκανάλι και  $\lambda_i$  οι ιδιοτιμές του πίνακα  $HH^H$ , με βέλτιστη λύση την:

$$p_i = \left( \mu - \frac{N_0}{\lambda_i} \right), \quad (3.11)$$

με μη στάθμη (waterlevel),  $\sum_i^{\min(M,N)} p_i = P^{S,av}$  η συνολική διαθέσιμη ισχύς στον πομπό,  $(E)^+ = \max(E, 0)$  και  $p_i$  η βέλτιστη εκπεμπόμενη ισχύς από το  $i$ -οστό ιδιοκανάλι.

Σε εφαρμογή της τεχνικής, αρχικά ορίζουμε τη στάθμη  $\mu = \min(n) + \frac{P}{n}$  και στη συνέχεια υπολογίζουμε το άθροισμα ισχύων των υποκαναλιών  $\sum_i^n (\mu - n_i) = P$ . Αν το άθροισμα δεν συγκλίνει με τη συνολική διαθέσιμη ισχύ  $P - p < \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  δείκτης ανεκτικότητας, τότε υπολογίζουμε ξανά το  $\mu' = \mu + \frac{P-p}{n}$ . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το  $p$  να συγκλίνει με το  $P$ . Μετά το τέλος του αλγορίθμου θα έχουμε την καταλληλότερη τιμή στάθμης  $\mu$  της χωρητικότητας του καναλιού.

### 3.1.4 Multi-user MIMO

Έστω ένα κανάλι ανερχόμενης ζεύξης αμετάβλητου χρόνου με  $K$  χρήστες που χρησιμοποιούν μια κεραία και έναν σταθμό βάσης BS. Για τις κεραίες λήψης  $n_r$  ισχύει ότι  $n_r \gg K$  το λαμβανόμενο σήμα, παραλείποντας τον δείκτη χρόνου  $m$  για την απλή απλοποίηση, περιγράφεται από τη σχέση:

$$y = \sum_{k=1}^K h_k x_k + n = Hx + n \quad (3.12)$$

$x_k = Tx$  σήμα του χρήστη  $k$  με περιορισμό ισχύος ανά χρήστη  $E[\|x_k\|^2] \leq P_k$

$y = Rx$

$n \sim CN(0, N_0 I_{n_r})$  ο προσθετικός λευκός θόρυβος Gauss

$h_k = \bar{h}_k \sqrt{a_k} \in \mathbb{C}^{n_r}$  το διανυσματικό κανάλι του χρήστη  $k$ , όπου  $a_k$  ο παράγοντας εξασθένησης και  $\bar{h}_k$  το κανονικοποιημένο κανάλι

Η συνολική έκφραση χωρητικότητας του multi-user MIMO συστήματος είναι:

$$C_{sum} = \log \left| I_{n_r} + \sum_{k=1}^K \frac{P_k}{N_0} \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \right| = \log \sum_{k=1}^K \left| I_{n_r} + \frac{1}{N_0} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H \right| \text{ bits/s/Hz} \quad (3.13)$$

όπου  $\mathbf{H} = [h_1, \dots, h_k]$  και  $\mathbf{K}_x = \text{diag}(P_1, \dots, P_K)$ .

Αν  $n_r \gg K$ , και τα στοιχεία των κανονικοποιημένων διανυσματικών καναλιών  $\bar{h}_k$  είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανομημένα και ακολουθούν τη σύνθετη κανονική κατανομή  $CN(0, 1)$  τότε :

$$\frac{\mathbf{H}^H \mathbf{H}}{n_r} \approx \mathbf{A}_K, \quad \mathbf{A}_K = \text{diag}(\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_K) \quad (3.14)$$

Τότε η ποσότητα αθροίσματος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} C_{sum} &= \log \left| I_{n_r} + \frac{1}{N_0} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H \right| = \left| I_K + \frac{1}{N_0} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H \right| \\ &\approx \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + \frac{P_k \mathbf{a}_k \|\bar{h}_k\|^2}{N_0} \right) \approx \sum_{k=1}^K \log \left( 1 + \frac{n_r P_k \mathbf{a}_k}{N_0} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Η βέλτιστη κατανομή ισχύος μπορεί να βρεθεί μέσω water-filling:

$$\mathbf{p}_k^* = \max \left( \mathbf{0}, \mu - \frac{N_0}{\mathbf{a}_k \mathbf{a}_k} \right) \quad (3.16)$$

Με τη μέγιστη στάθμη νερού  $\mu$  να ικανοποιεί τον περιορισμό ισχύος  $\sum_{k=1}^K p_k \leq P$ .

## 3.2 Millimeter-Wave

Τα χιλιοστομετρικά κύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά (ραδιο) κύματα που εκτείνονται συνήθως εντός του εύρους συχνοτήτων των 30–300 GHz. Είναι βασική τεχνολογία για τα ασύρματα συστήματα πέμπτης γενιάς (5G) λόγω της αντιμετώπισης των αυξημένων ποσών δεδομένων που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση πυκνών αστικών περιοχών. Επιπλέον, ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ο συνδυασμός υψηλού ρυθμού δεδομένων και υψηλής ανάλυσης που κυμαίνονται.

### 3.2.1 Μοντελοποίηση καναλιού

Ένα χαρακτηριστικό των επικοινωνιών mmWave είναι ότι απαιτούνται υψηλής απόδοσης δέκτες στο σταθμό βάσης (BS) και ενδεχομένως και στο τερματικό χρήστη (UE) προκειμένου να αντισταθμιστεί η μεγάλη απώλεια διάδοσης των σημάτων mmWave. Η συστοιχία κεραιών μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιείται ευρέως για το σχηματισμό δέσμεων ακτινών υψηλής απολαβής. Όμως η λειτουργία της μετάδοσης θα είναι ευαίσθητη στις αλλαγές γωνίας των ακτινών κατά την αναχώρηση και την άφιξη τους. Επομένως, χρειάζονται μοντέλα καναλιών mmWave για αυτές τις αλλαγές γωνιών.

#### Γραμμικό μοντέλο

Δίνεται ένα γραμμικό μοντέλο για τις διάφορες γωνίες της ακτίνας  $p$  του συμπλέγματος  $q$ :

$$\theta_{p,q,ZoA}(t) = \theta_{p,q,ZoA}(t_0) + S_{p,q,ZoA} \cdot (t - t_0), \quad t \in [t_0, t_0 + T_{max}] \quad (3.17)$$

$$\theta_{p,q,ZoD}(t) = \theta_{p,q,ZoD}(t_0) + S_{p,q,ZoD} \cdot (t - t_0), \quad t \in [t_0, t_0 + T_{max}] \quad (3.18)$$

$$\theta_{p,q,AoA}(t) = \theta_{p,q,AoA}(t_0) + S_{p,q,AoA} \cdot (t - t_0), \quad t \in [t_0, t_0 + T_{max}] \quad (3.19)$$

$$\theta_{p,q,AoD}(t) = \theta_{p,q,AoD}(t_0) + S_{p,q,AoD} \cdot (t - t_0), \quad t \in [t_0, t_0 + T_{max}] \quad (3.20)$$

Όπου AoDη γωνία αναχώρησης, AoAη γωνία άφιξης, ZoDη γωνία στο ζενίθ της άφιξης και ZoAη γωνία στο ζενίθ της αναχώρησης. Η διάρκεια πτώσης υποδηλώνεται από το  $T_{max}$  και,  $S_{p,q,ZoA}$ ,  $S_{p,q,ZoD}$  οι κλίσεις των γωνιών στην κάθετη διεύθυνση και  $S_{p,q,AoA}$ ,  $S_{p,q,AoD}$  οι κλίσεις των γωνιών στην οριζόντια διεύθυνση. Παρατηρήστε ότι οι τέσσερις κλίσεις είναι σταθερές σε μια περίοδο πτώσης  $T_{max}$ . Μπορούν όμως να επεκταθούν και σε συστήματα μεταβλητού χρόνου, αλλά με κόστος υψηλότερης υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Για τα τοπικά συστήματα συντονισμού (LCS) υπάρχει ένας ακριβής τύπος για τις διαφορετικές γωνίες που προκύπτουν για κανάλι απευθείας διάδοσηςLOS (Line-Of-Sight) και από την άλλη, για τις διάφορες τυχαίες γωνίες που προσεγγίζονται για το κανάλι μη απευθείας διάδοσηςNLOS(Non-Line-Of-Sight). Επισημαίνουμε ότι, ένα μπλοκ καναλιού LOS μεταδίδει σήματα από ένα σημείο στο διάστημα σε πολλά σημεία ή από πολλά σημεία προς ένα σημείο μέσω καναλιών οπτικής γωνίας.

Υποθέτοντας ότι ο δέκτης κινείται με ταχύτητα  $v$  και γωνία  $\varphi_v$ ,  $h_{BS}$  και  $h_{UE}$  είναι τα ύψη των BS και UE αντίστοιχα. Παραλείποντας τα  $p$  και  $q$  για την απλοποίηση, για το κανάλι LOS, η εκφράσεις των κλίσεων **AoD** και **ZoD** δίνονται από τους τύπους:

$$S_{ZoD} = -S_{ZoA} = \frac{v \cos(\varphi_v + \varphi_{AoD}(t_0))}{(h_{BS} - h_{UE}) / \cos(\theta_{ZoD}(t_0))} \quad (3.21)$$

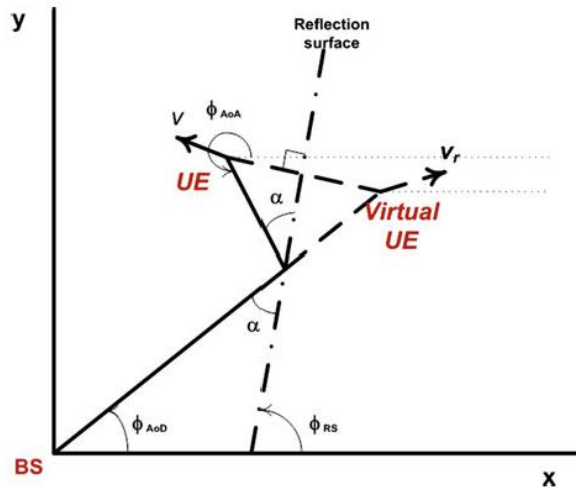
$$S_{AoD} = S_{AoA} = -\frac{v \sin(\varphi_v + \varphi_{AoD}(t_0))}{(h_{BS} - h_{UE}) \tan(\theta_{ZoD}(t_0))} \quad (3.22)$$

Για το σύμπλεγμα NLOS με μία ακτίνα ανάκλασης, το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί εισάγοντας ένα εικονικό UE που είναι η καθρεπτική εικόνα του UE με βάση την επιφάνεια ανάκλασης, όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 5. Οι απλουστευμένες κλίσεις στο κανάλι NLOS δίνονται από τους τύπους:

$$S_{ZoD} = -S_{ZoA} = \frac{v \cos(\varphi_v + \varphi_{AoD}(t_0) - \varphi_{RS})}{(h_{BS} - h_{UE}) / \cos(\theta_{ZoD}(t_0))} \quad (3.23)$$

$$S_{AoD} = S_{AoA} = -\frac{v \sin(\varphi_v + \varphi_{AoD}(t_0) - \varphi_{RS})}{(h_{BS} - h_{UE}) \tan(\theta_{ZoD}(t_0))} \quad (3.24)$$

όπου όπου το  $\varphi_{RS}$  είναι η γωνία της επιφάνειας ανάκλασης των γωνιών  $\varphi_{AoD}$  και  $\varphi_{AoA}$ .



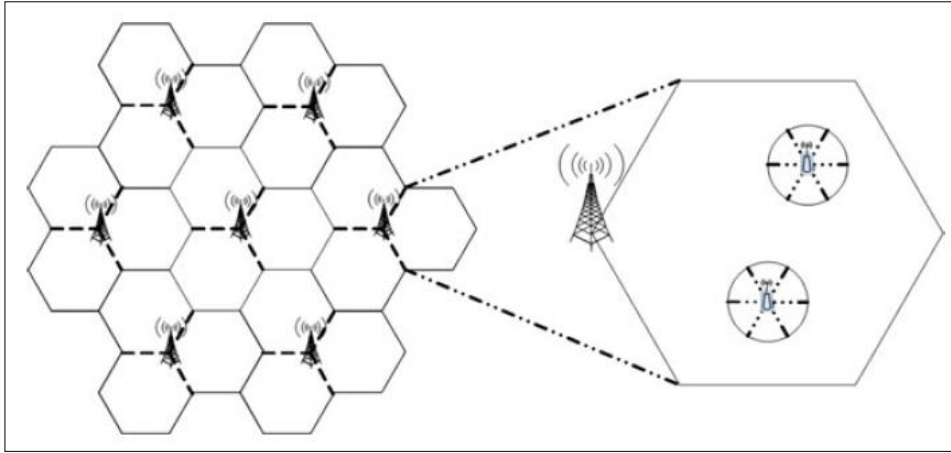
Εικόνα 3.1: Ακτίνα NLOS στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.[17]

Στα NLOS με πολλαπλές ανακλάσεις, είναι δύσκολο να βρεθεί η ακριβή θέση των ανακλαστήρων. Μια λύση είναι να ληφθούν οι πολλαπλές ανακλάσεις ως μια τάξης και να ρυθμιστεί τυχαία η επιφάνεια ανάκλασης. Οι συντελεστές καναλιών κάθε συμπλέγματος μπορούν να δημιουργηθούν ακολουθώντας το SCM μοντέλο, το οποίο λέει να ενημερώνονται οι γωνίες κάθε φορά που ο δέκτης κινείται εντός της διάρκειας ενός χρονικού διαστήματος μετάδοσης. Στο 3GPPSCM, η διάρκεια πτώσης που υποδηλώνεται από το  $T_{max}$  είναι περίπου 1000 χρονικά διαστήματα μετάδοσης (TTI) όπου ένα TTI αντιστοιχεί σε 1s.

### 3.2.2 Δίκτυο ενοποιημένης πρόσβασης και οπισθοζευξης (UAB)

Στο σχεδιασμό κυψελοειδών δικτύων 5G, η ζώνη mmWave αναμένεται να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματική της ζώνης χαμηλής συχνότητας. Η βασική δομή είναι ένα υβριδικό δίκτυο όπου συνυπάρχουν χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για τον σχηματισμό ενός πρωτότυπου δικτύου ενοποιημένης πρόσβασης και οπισθοζευξης (Unified Access and Backhaul-UAB). Το δίκτυο UAB χρησιμοποιεί διαμόρφωση διαχωρισμού C/U. Το επίπεδο ελέγχου (control-plane) διαχειρίζεται από σταθμούς βάσης με macrocells (MB) μέσω ζωνών χαμηλής συχνότητας, ενώ το επίπεδο χρήστη (user-plane) υποβάλλεται σε επεξεργασία από σταθμούς βάσης mmWave (mBs) μέσω ζωνών υψηλής συχνότητας. Με άλλα λόγια, το δίκτυο UABmmWave τόσο η ασύρματη πρόσβαση (radioaccess, RA) όσο και η οπισθοζευξη (backhaul, BH) μοιράζονται τις ίδιες ζώνες κύματος χιλιοστών, έχοντας υπόψη την ομοιόμορφη κατανομή των πόρων και από τις δυο πλευρές. Παρακάτω θα δούμε με ποιο τρόπο μπορεί να επιτευχθεί δίκαια μοιρασμένη χωρητικότητα και κατανομή πόρων μεταξύ των picocells.

Η τοπολογία ενός UAB δικτύου διαμορφώνεται από σταθμούς βάσης όπου κάθε ένας από αυτούς να καλύπτει τρεις μακροκυψέλες. Μέσα σε κάθε κυψέλη αναπτύσσονται χιλιοστομετρικά κύματα τα οποία καλύπτουν ένα σχετικά μικρότερο εύρος, λειτουργώντας ως μικροκυψέλες (smallcells). Κάθε ένας mmWave σταθμός βάσης μπορεί να υποστηρίξει έξι pico-κυψέλες  $60^\circ$  το καθένα. Μέσα σε κάθε picocell, θα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κινητών τερματικών (χρηστών) που συνδέονται με τα mBs. Όλοι αυτοί οι χρήστες θα επικοινωνούν με τα σχετικά mBs μέσω ζωνών υψηλής συχνότητας. Σε περίπτωση που κάποιος χρήστης δεν μπορεί να συνδεθεί με κάποιον σταθμό βάσης mB, μπορεί να επιλέξει να επικοινωνήσει με έναν MB σταθμό βάσης μέσω ζωνών χαμηλής συχνότητας.



Εικόνα 3.2: Τοπολογία δικτύου UAB.[17]

Στα δίκτυα mmWaveUAB, τόσο η ασύρματη πρόσβαση όσο και η οπισθόζευξη μοιράζονται ένα συνεχές εύρος ζώνης στη ζώνη συχνοτήτων mmWave. Προκειμένου να μετριαστούν οι παρεμβολές μεταξύ αυτών, είναι απαραίτητο να διαχωριστούν είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο συχνοτήτων. Όλα τα mB μοιράζονται την ίδια σχέση κατανομής πόρων, ώστε να μην παρεμβαίνουν μεταξύ τους. Οι σχέσεις αυτές προσαρμόζονται δυναμικά με την πάροδο του χρόνου.

Υποθέτοντας ότι το συνολικό εύρος ζώνης είναι  $B$ , η οπισθόζευξη (BH) όπου έχει κατανομηθεί εύρος ζώνης  $B^{BH}$  και η ραδιοπρόσβαση (RA) όπου έχει κατανομηθεί εύρος ζώνης  $B^{RA}$ . Και αφού το συνολικό εύρος ζώνης είναι μια σταθερή τιμή, ισχύει πάντα ότι  $B = B^{BH} + B^{RA}$ .

Η ταχύτητα μεταφοράς πληροφορίας ή απόδοση ή διαμεταγωγή (throughput) κατά την οπισθόζευξη για το  $n$ -οστό mB γράφεται ως συνάρτηση του  $B^{BH}$  :

$$T_n^{BH} = R_n^{BH} B^{BH} \quad (3.25)$$

και η συνάρτηση ασύρματης πρόσβασης είναι :

$$T_n^{RA} = R_n^{RA} B^{RA} = R_n^{RA} (B - B^{BH}) \quad (3.26)$$

Όπου  $R_n^{BH}$  και  $R_n^{RA}$  είναι οι ρυθμοί δεδομένων σε bits/s ή Hz. Το  $R_n^{BH}$  προσδιορίζεται από την ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ των mB και MB. Το  $R_n^{RA}$  προσδιορίζεται από τους χρήστες εντός του εύρους του mB, επομένως υπολογίζεται συνοψίζοντας την απόδοση εύρους ζώνης όλων των ενεργών χρηστών σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Και οι δυο προαναφερθείσες τιμές μπορούν να υπολογιστούν εκ των προτέρων μετρώντας τις διαμεταγωγές κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου και στη συνέχεια διαιρώντας το τρέχον εύρος ζώνης. Επιπλέον για κάθε mB πρέπει  $T_n = \min(T_n^{BH}, T_n^{RA})$ .

Με βάση τα παραπάνω, παραλείποντας τον δείκτη  $n$ , η ταχύτητα μεταφοράς πληροφορίας μπορεί να γραφεί συναρτήσει του  $B^{BH}$  ως εξής:

$$T(B^{BH}) = \begin{cases} R^{BH} B^{BH}, & B^{BH} < B_{max}^{BH} \\ \frac{R^{BH} R^{RA}}{R^{BH} + R^{RA}} B, & B^{BH} = B_{max}^{BH} \\ R^{RA} (B - B^{BH}), & B^{BH} > B_{max}^{BH} \end{cases} \quad (3.27)$$

Αν παρατηρήσουμε τη γραφική παράσταση της συνάρτησης θα δούμε ότι είναι τριγωνική. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά η τιμή του  $T_n(B^{BH})$  αυξάνεται γραμμικά με κλίση  $R^{BH}$  ( $T^{BH} < T^{RA}$ ). Η τιμή φτάνει στο μέγιστο όταν:

$$B_{max}^{BH} = \frac{R^{RA}}{R^{BH} + R^{RA}} B \quad (3.28)$$

Και η μέγιστη τιμή είναι:

$$T_{max} = \frac{R^{BH} R^{RA}}{R^{BH} + R^{RA}} B \quad (3.29)$$

Στη συνέχεια, μειώνεται γραμμικά με κλίση  $R^{RA}$  ( $T^{RA} < T^{BH}$ ).

Για πολλαπλούς mB, κάθε mB θα έχει διαφορετικές μέγιστες τιμές και αντίστοιχο εύρος ζώνης οπισθόζευξης. Υπό την προϋπόθεση ότι το εύρος ζώνης οπισθόζευξης είναι το ίδιο για κάθε mB. Προκειμένου να ικανοποιηθούν, λοιπόν, οι διαφορετικές απαιτήσεις, συστήνονται τρεις δυναμικές μέθοδοι κατανομής πόρων που θα δούμε αναλυτικά παρακάτω.

### Μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόδοσης

Σύμφωνα με τον ορισμό, η ελάχιστη ταχύτητα μεταφοράς πληροφορίας για όλους τους mB μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$T_{min}(B^{BH}) = \min(T_1, T_2, \dots, T_N) \quad (3.30)$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να βρεθεί ένα κατάλληλο εύρος ζώνης οπισθόζευξης, όπου η τιμή  $T_{min}(B^{BH})$  να είναι η μέγιστη:

$$B_{max}^{BH} = \arg \max\{T_{min}(B^{BH})\} \quad (3.31)$$

Όμως, η ελάχιστη απόδοση καθορίζεται από το ελάχιστο  $R_{min}^{RA}$  και το ελάχιστο  $R_{min}^{BH}$  όλων των mB, με:

$$R_{min}^{BH} = \min(R_1^{BH}, R_2^{BH}, \dots, R_N^{BH}) \quad (3.32)$$

$$R_{min}^{RA} = \min(R_1^{RA}, R_2^{RA}, \dots, R_N^{RA}) \quad (3.33)$$

Έτσι, προκύπτει τελικά ότι η ελάχιστη απόδοση είναι και πάλι μια τριγωνική συνάρτηση που έχει τη μορφή:

$$T_{min}(B^{BH}) = \begin{cases} R^{BH} B^{BH}, & B^{BH} < B_{max}^{BH} \\ \frac{R_{min}^{BH} R_{min}^{RA}}{R_{min}^{BH} + R_{min}^{RA}} B, & B^{BH} = B_{max}^{BH} \\ R_{min}^{RA} (B - B^{BH}), & B^{BH} > B_{max}^{BH} \end{cases} \quad (3.34)$$

Για να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή της συνάρτησης το εύρος ζώνης backhaul και το εύρος ζώνης της ασύρματης πρόσβασης για όλους τους mB θα πρέπει να είναι αντιστοίχως:

$$B_{max}^{BH} = \frac{R_{min}^{BH} R_{min}^{RA}}{R_{min}^{BH} + R_{min}^{RA}} B \quad (3.35)$$

$$B_{max}^{RA} = B - B_{max}^{BH} \quad (3.36)$$

### Μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης

Για τη μεγιστοποίηση της συνολικής απόδοσης χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος, τα βήματα του οποίου θα δούμε παρακάτω. Σκοπός αυτού του αλγορίθμου είναι να μεγιστοποιήσει το άθροισμα της απόδοσης όλων των mB ( $\sum T_n$ ). Δηλαδή να βρει το μέγιστο σημείο της συνολικής απόδοσης των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των BH και RA όλων των mB.

### Αλγόριθμος

1. Υπολόγισε τα εύρη ζώνης του backhaul (B) όταν η τιμή  $T_n$  είναι μέγιστη για κάθε mB, αναδιατάσσοντάς τα από το μικρότερο στο μεγαλύτερο  $[B_1^{BH}, B_2^{BH}, \dots, B_i^{BH}, \dots, B_N^{BH}]$ .
2. Αντίστοιχα και για τα  $[R_1^{BH}, R_2^{BH}, \dots, R_i^{BH}, \dots, R_N^{BH}]$ ,  $[R_1^{RA}, R_2^{RA}, \dots, R_i^{RA}, \dots, R_N^{RA}]$ .
3.  $\sum T_n = \sum_{i=1}^N R_i^{BH} B^{BH} + \sum_{i=1}^l R_i^{RA} (B - B^{BH})$ ,  $B^{BH} \in [B_i^{BH}, B_{i+1}^{BH}]$ .
4. Βρες τα  $[B_1^{BH}, B_{i+1}^{BH}]$  όπου  $\frac{\partial(\sum T_n)}{\partial B^{BH}}$  η ελάχιστη θετική τιμή.
5. Επέστρεψε  $B_{max}^{BH} = B_{i+1}^{BH}$  ως το συνολικό εύρος ζώνης του backhaul.

### Μεγιστοποίηση του παράγοντα ικανοποίησης των χρηστών

Οι προηγούμενες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη μόνο την κατανομή του στιγμιαίου εύρους ζώνης και όχι τις κατανομές που έχουν προηγηθεί. Έτσι, μακροπρόθεσμα οι mB με υψηλή απόδοση θα αποκτήσουν εξαιρετικά υψηλότερη, και οι mB με χαμηλή απόδοση αποκτήσουν εξαιρετικά χαμηλότερη και οι χρήστες αυτών των χαμηλής απόδοσης mB δεν θα ικανοποιηθούν. Για την ικανοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων χρηστών, η τρέχουσα κατανομή πόρων θα πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη τις συσσωρευμένες προηγούμενες μεταφορές δεδομένων. Ο παράγοντας ικανοποίησης είναι:

$$\eta_n(t) = \frac{T_{max}(t)}{T_{pre}(t)} \quad (3.37)$$

$T_{max}(t)$ : Η μέγιστη εφικτή απόδοση

$T_{pre}(t)$ : Η μέση απόδοση που καταναλώθηκε στις προηγούμενες μεταφορές

n:  $n = \arg \max(\eta_n(t))$

Τονίζουμε ότι, η μεγαλύτερη τιμή  $\eta_n(t)$  του συστήματος για το εύρος ζώνης της οπισθόζευξης είναι το μέγιστο σημείο της τριγωνικής συνάρτησης.



### 3.3 Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)

Οι τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης για τις κινητές επικοινωνίες χαρακτηρίζονται από πολλαπλά σχήματα πρόσβασης, όπως για παράδειγμα πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA), πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA), πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA) και OFDMA. Στα συστήματα 4ης γενιάς (4G) όπως το LTE υιοθετείται ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση που βασίζεται στην OFDMA. Η ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση ήταν μια λογική επιλογή για την επίτευξη μιας καλής απόδοσης σε επίπεδο συστήματος. Ωστόσο, ιδιαίτερα στα συστήματα 5G, η επίτευξη σημαντικών κερδών στην απόδοση της χωρητικότητας και του συστήματος αποτελεί υψηλή προτεραιότητα λόγω της εκθετικής αύξησης των κινητών συσκευών. Οπότε, θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα που να μπορεί να υποστηρίξει μειωμένο κόστος, υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και αντοχή έναντι καταστάσεων έκτακτης ανάγκης (π.χ φυσικές καταστροφές) και να παρέχει αυξημένη χωρητικότητα.[17]

Η κύρια ιδέα του NOMA είναι να εκμεταλλευτεί το πεδίο ισχύος προκειμένου να εξυπηρετήσει περισσότερους από έναν χρήστες με τους ίδιους πόρους και να βασιστεί σε προηγμένους δέκτες για να διαχωρίσει τους πολυσύνδετους χρήστες από την πλευρά του δέκτη [18]. Με άλλα λόγια, πολλαπλοί χρήστες πολυπλέκονται στον τομέα ισχύος και αποπολυπλέκονται στην πλευρά του δέκτη χρησιμοποιώντας ένα μια τεχνική διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (SIC) [25]. Το NOMA διαμορφώνεται με βάση την ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM). Επίσης, είναι κατάλληλο ακόμα και για μεταδόσεις MIMO.

Παρακάτω θα περιγράψουμε τη βασική αρχή του NOMA κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης και θα κάνουμε μια μικρή σύγκριση με το σύστημα OMA. Να σημειωθεί ότι, στα δίκτυα κυψελών το σύστημα NOMA έχει καλύτερη απόδοση και αποτελεσματικότητα ιδίως από την πλευρά των χρηστών.

#### 3.3.1 Βασική αρχή συστήματος

##### Downlink

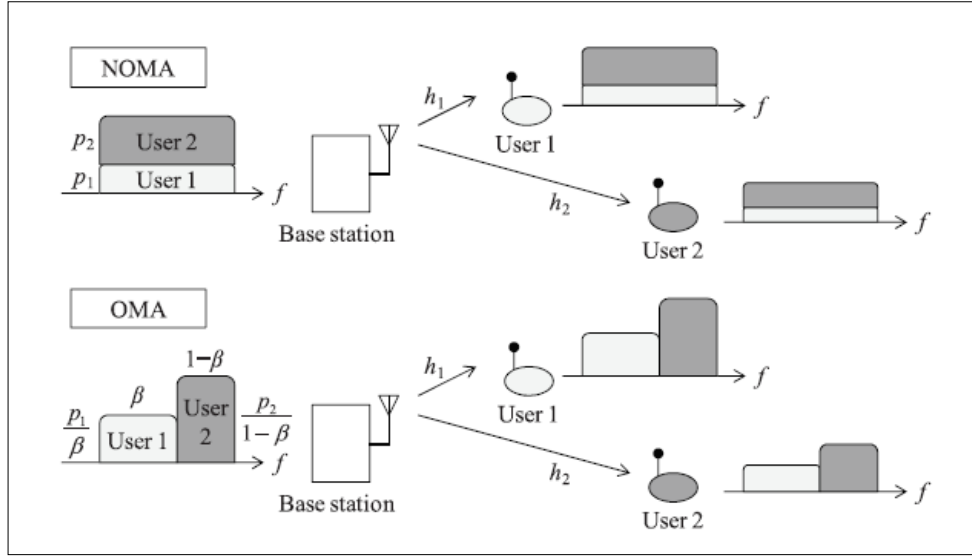
Έστω δύο χρήστες και μία κεραία πομπού και δέκτη. Στην κατερχόμενη ζεύξη ο σταθμός βάσης μεταδίδει ένα σήμα  $s_i$  για τον χρήστη  $i$  ( $i = 1,2$ ) με  $E[|s_i|^2] = 1$ . Η ισχύς εκπομπής συμβολίζεται με  $p_i$ . Στο NOMA, τα σήματα  $s_1$  και  $s_2$  κωδικοποιούνται ως:

$$\mathbf{x} = \sqrt{p_1}\mathbf{s}_1 + \sqrt{p_2}\mathbf{s}_2 \quad (3.38)$$

Το ληφθέν σήμα στον  $i$  χρήστη είναι:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{h}_i\mathbf{x} + \mathbf{w}_i \quad (3.39)$$

όπου  $h_i$  είναι ο σύνθετος συντελεστής καναλιού μεταξύ του χρήστη  $i$  και του σταθμού βάσης. Ο όρος  $w_i$  δηλώνει το θόρυβο Gauss του δέκτη, συμπεριλαμβανομένων των παρεμβολών, με φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_0$ .



Εικόνα 3.3: Σύγκριση χρήσης φάσματος στο downlink.[25]

Η διαδικασία ακύρωσης παρεμβολών(SIC) εφαρμόζεται στον δέκτη του τερματικού κατά το downlink. Η βέλτιστη σειρά αποκωδικοποίησης SIC στην κατερχόμενη ζεύξη διαφέρει από αυτήν της ανερχόμενης ζεύξης. Για την αποκωδικοποίηση στο downlink το αυξανόμενο κέρδος καναλιού κανονικοποιείται από τον θόρυβο και την ισχύ παρεμβολής. Έτσι, κάθε χρήστης μπορεί να αποκωδικοποιήσει σωστά και να αφαιρέσει παρεμβολές από τα σήματα άλλων χρηστών των οποίων η σειρά αποκωδικοποίησης έρχεται πριν από αυτόν τον χρήστη[25]. Αυτό μπορεί να συμβεί επειδή ο ρυθμός μετάδοσης του χρήστη  $j$  ελέγχεται έτσι ώστε να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί σωστά στον δέκτη του ίδιου, και μπορεί επίσης να αποκωδικοποιηθεί σε οποιονδήποτε άλλο χρήστη  $i$  για τον οποίο ισχύει :  $|h_i|^2/N_{0,i} > |h_j|^2/N_{0,j}$ .

Για συστήματα NOMA δυο χρηστών, ο χρήστης 2 δεν εκτελεί ακύρωση παρεμβολών εφόσον στη σειρά αποκωδικοποίησης έρχεται πρώτος ο χρήστης 1. Οπότε εκείνος είναι που αποκωδικοποιεί πρώτα το σήμα  $s_2$  και αφαιρεί το component από το σήμα  $y_1$  που έχει λάβει πριν αποκωδικοποιήσει το δικό του σήμα. Επομένως η απόδοση  $R_i$  δίνεται από τους τύπους :

$$\begin{cases} R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_1|h_1|^2}{N_{0,1}} \right) \\ R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_2|h_2|^2}{p_2|h_2|^2 + N_{0,2}} \right) \end{cases} \quad (3.40)$$

Για συστήματα OMA:

$$\begin{cases} R_1 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{p_1|h_1|^2}{\beta N_{0,1}} \right) \\ R_2 = (1 - \beta) \log_2 \left( 1 + \frac{p_2|h_2|^2}{(1-\beta)N_{0,2}} \right) \end{cases}, \quad 0 \leq \beta \leq 1, \quad (3.41)$$

όπου το εύρος ζώνης  $\beta$  (σε Hz) εκχωρείται στον χρήστη 1 και το  $1-\beta$  (σε Hz) εκχωρείται στον χρήστη 2.

### Uplink

Έστω δύο χρήστες και μία κεραία πομπού και δέκτη. Στην ανερχόμενη ζεύξη ο σταθμός βάσης μεταδίδει ένα σήμα  $s_i$  για τον χρήστη  $i$  ( $i = 1,2$ ) με  $E[|s_i|^2] = 1$ . Η ισχύς εκπομπής συμβολίζεται με  $p_i$ . Στο NOMA δύο χρηστών το ληφθέν σήμα αναπαρίσταται ως εξής:

$$\mathbf{y} = \sqrt{p_1}\mathbf{h}_1s_1 + \sqrt{p_2}\mathbf{h}_2s_2 + \mathbf{w} \quad (3.42)$$

όπου  $w$  ο θόρυβος Gauss του δέκτη, συμπεριλαμβανομένων των παρεμβολών, με φασματική πυκνότητα ισχύος  $N_0$ .

Κατά το uplink, η διαδοχική ακύρωση παρεμβολών (SIC) εφαρμόζεται στον δέκτη. Η διαδικασία συμβαίνει σε δύο στάδια. Στο πρώτο, ο δέκτης αποκωδικοποιεί το  $s_1$  σήμα αντιμετωπίζοντας το  $s_2$  ως Γκαουσιανή παρεμβολή. Μόλις ο δέκτης αποκωδικοποιήσει σωστά το  $s_1$  μπορεί να αφαιρεθεί από το συνολικό λαμβανόμενο σήμα  $y$ . Στη συνέχεια μπορεί να αποκωδικοποιήσει το σήμα  $s_2$ . Εφόσον πλέον υπάρχει ως δέκτης ο θόρυβος Gauss, ο δεύτερος χρήστης έχει τη μέγιστη απόδοση  $R_i$ :

$$\begin{cases} R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_1|\mathbf{h}_1|^2}{p_2|\mathbf{h}_2|^2 + N_0} \right) \\ R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_2|\mathbf{h}_2|^2}{N_0} \right) \end{cases} \quad (3.43)$$

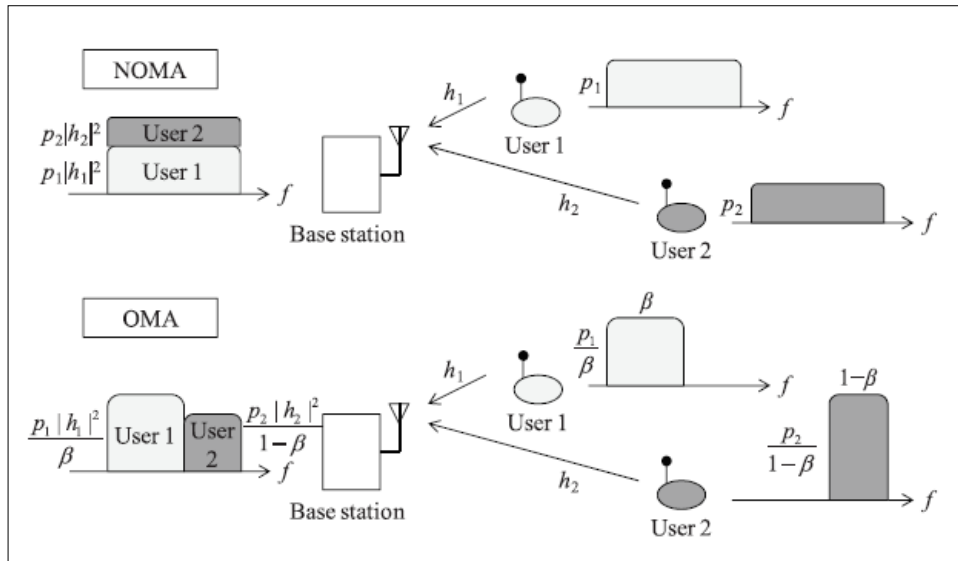
Και αντίστροφα:

$$\begin{cases} R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_1|\mathbf{h}_1|^2}{N_0} \right) \\ R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_2|\mathbf{h}_2|^2}{p_1|\mathbf{h}_1|^2 + N_0} \right) \end{cases} \quad (3.44)$$

Για συστήματα OMA:

$$\begin{cases} R_1 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{p_1|\mathbf{h}_1|^2}{\beta N_0} \right) \\ R_2 = (1 - \beta) \log_2 \left( 1 + \frac{p_2|\mathbf{h}_2|^2}{(1 - \beta)N_0} \right) \end{cases}, \quad 0 \leq \beta \leq 1, \quad (3.45)$$

όπου το εύρος ζώνης  $\beta$  (σε Hz) εκχωρείται στον χρήστη 1 και το  $1 - \beta$  (σε Hz) εκχωρείται στον χρήστη 2.



Εικόνα 3.4: Σύγκριση χρήσης φάσματος στο uplink.[25]

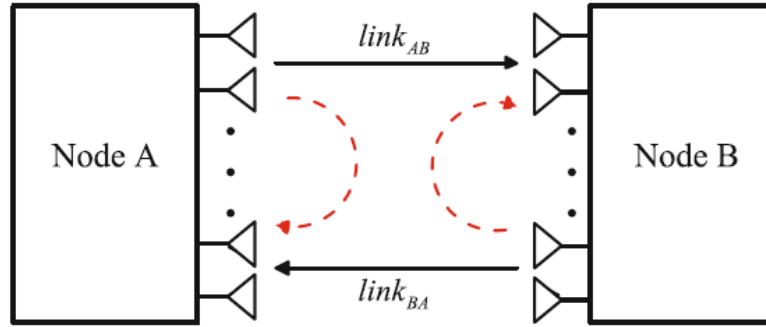
### 3.4 Πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία (FD)

Σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2.2) περιγράψαμε συνοπτικά την λειτουργία της πλήρως αμφίδρομης επικοινωνίας και αναφέραμε τα βασικότερα πλεονεκτήματα της πάνω στα 5G συστήματα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε μια αναλυτικότερη τεχνική περιγραφή της FD λειτουργίας.

Τεχνικά, υπάρχει μια διάκριση μεταξύ της πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας ένα μόνο κανάλι φυσικής επικοινωνίας και για τις δυο τις κατευθύνσεις ταυτόχρονα (FDμονού δρόμου) και, από την άλλη, η επικοινωνία διπλής όψης (FDδιπλού δρόμου) που χρησιμοποιεί δύο ξεχωριστά κανάλια, ένα για κάθε κατεύθυνση. Από την άποψη του χρήστη, η τεχνική διαφορά δεν έχει σημασία και οι δύο παραλλαγές αναφέρονται συνήθως ως FullDuplex.

#### 3.4.1 Μοντέλο συστήματος

Στην Εικόνα 3.5 απεικονίζεται αμφίδρομη επικοινωνία FD μεταξύ ενός ζεύγους πομποδεκτών FD. Οι δύο κόμβοι FD μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα μεταξύ τους μέσω της ίδιας ζώνης συχνοτήτων ταυτόχρονα. Οι δύο κόμβοι A και B είναι εξοπλισμένοι με κεραίες NA και NB, αντίστοιχα. Ας θεωρήσουμε ότι το  $\text{link}_{AB}$  δηλώνει τη σύνδεση μετάδοσης από τον κόμβο A έως B και το  $\text{link}_{BA}$  δηλώνει τη σύνδεση από το B στο A. Κάθε κόμβος λαμβάνει έναν συνδυασμό του επιθυμητού σήματος από τον άλλο κόμβο και παρεμβολές από τις δικές του κεραίες εκπομπής.

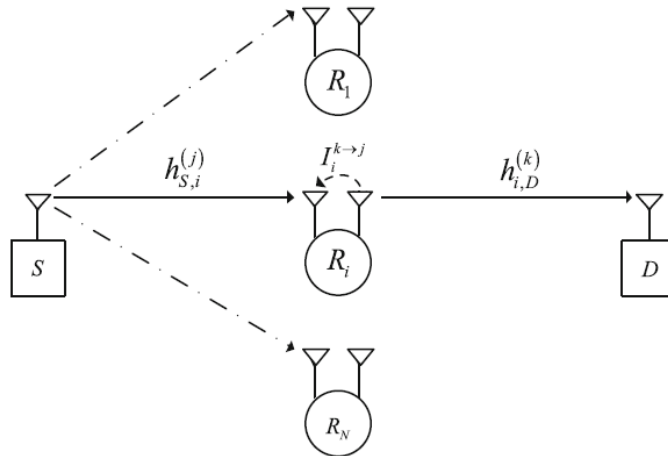


Εικόνα 3.5: FD λειτουργία.[17]

Πιο αναλυτικά για τη λειτουργία FD στις ασύρματες επικοινωνίες υπάρχουν τρεις τύποι κόμβων, ένας κόμβος πηγής, ένας κόμβος αναμετάδοσης και ένας κόμβος προορισμού. Ο κόμβος πηγής θέλει να μεταδώσει το σήμα δεδομένων του στον κόμβο προορισμού. Ο κόμβος αναμετάδοσης χρησιμοποιείται για την αύξηση της κάλυψης του κόμβου πηγής, δηλαδή λαμβάνει, ενισχύει και αναμεταδίδει το ασύρματο σήμα. Οι κόμβοι πηγής και αναμετάδοσης μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν τα σήματά τους μέσω συνδέσεων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.

### 3.4.2 FD μονού δρόμου

Στο FD μονού δρόμου υπάρχουν μια πηγή (source, S) και ένας προορισμός (destination, D). Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει άμεση σύνδεση καναλιού μεταξύ της πηγής και του προορισμού λόγω της ισχυρής απώλειας διαδρομής και εξασθένησης σε αυτή τη σύνδεση. Τόσο οι κόμβοι πηγής όσο και οι κόμβοι αναμετάδοσης (relaynodes, RNs) χρησιμοποιούν τον ίδιο χρόνο και την ίδια συχνότητα. Έτσι, οι κόμβοι αναμετάδοσης λειτουργούν πλήρως αμφίδρομα με δύο κεραίες (μία για λήψη  $T_1$  και μία για μετάδοση  $T_2$ ).[17]



Εικόνα 3.6: One-wayFD.[17]

Το σήμα που λαμβάνεται από την κεραία  $T_j$  του κόμβου  $R_i$  δίνεται παρακάτω. Σημειώνουμε ότι με  $T_j$  συμβολίζεται η κεραία λήψης και με  $T_k$  η κεραία εκπομπής ( $j, k \in \{1,2\}, j \neq k$ ).

$$\mathbf{y}_i^{(j)}[\mathbf{t}] = \mathbf{h}_{S,i}^{(j)}\sqrt{\mathbf{P}_S}\mathbf{x}[\mathbf{t}] + \mathbf{I}_i^{k \rightarrow j}\sqrt{\mathbf{P}_R}\mathbf{x}_i[\mathbf{t}] + \mathbf{n}_i^{(j)}[\mathbf{t}] \quad (3.46)$$

- $h_{S_i}^{(j)}$  : Η σύνδεση καναλιού μεταξύ πηγής και κεραίας  $T_j$  του  $R_i$  κόμβου  
 $I_i^{k \rightarrow j}$  : Η παρεμβολή από την κεραία εκπομπής  $T_k$  στην κεραία λήψης  $T_j$  του  $R_i$  κόμβου  
 $x[t]$  : Το σήμα που μεταδίδεται από την πηγή σε χρόνο  $t$   
 $x_i[t]$  : Το σήμα που μεταδίδεται από το  $R_i$  σε χρόνο  $t$   
 $P_S$  : Η ισχύς εκπομπής της πηγής  
 $P_R$  : Η ισχύς εκπομπής του  $R_i$   
 $n_i^{(j)}$  : OAWGN στην κεραία λήψης

Για το σήμα  $x_i$  ισχύει  $x_i[t] = \beta_i^{k \rightarrow j} y_i^{(j)}[t]$ , όπου  $\beta_i^{k \rightarrow j}$  είναι ο συντελεστής ενίσχυσης ισχύος.

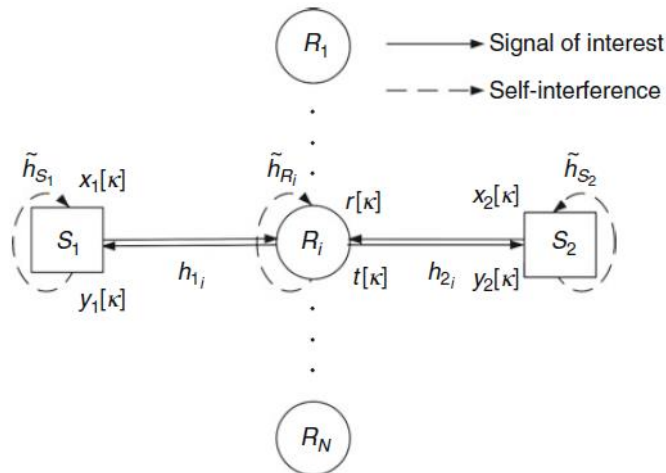
Το ληφθέν σήμα στον προορισμό δίνεται από τον τύπο:

$$\mathbf{y}_D[t] = \mathbf{h}_{i,D}^{(k)} \sqrt{P_R} x_i[t] + \mathbf{n}_D[t] \quad (3.47)$$

- $h_{i,D}^{(k)}$  : Η σύνδεση καναλιού από την κεραία εκπομπής  $T_k$  του  $R_i$  κόμβου προορισμού  
 $n_D[t]$  : OAWGN με μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση  $\sigma^2$  στον προορισμό

### 3.4.3 FD διπλού δρόμου

Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο πηγές, που υποδηλώνονται με  $S_j$  και  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  κόμβους. Οι ισχύς εκπομπής δηλώνονται με  $p_s$  και  $p_r$ , αντίστοιχα. Δεν υπάρχει άμεση σύνδεση μεταξύ τους λόγω του «φαινομένου σκίασης». Οι συνδέσεις μεταξύ των καναλιών  $h_{ij}$  με παρεμβολές  $\tilde{h}_{S_j}$  και  $\tilde{h}_{R_i}$  αντίστοιχα ακολουθούν την ανεξάρτητη κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή και κανονικοποιημένη διακύμανση.



Εικόνα 3.7: Two-wayFD.[17]

Το λαμβανόμενο σήμα του  $R_i$  είναι :

$$\mathbf{r}_i[\mathbf{k}] = \sqrt{P_S} x_1[\mathbf{k}] \mathbf{h}_{1i} + \sqrt{P_S} x_2[\mathbf{k}] \mathbf{h}_{2i} + \tilde{\mathbf{h}}_{R_i} t_i[\mathbf{k}] + \mathbf{n}_{r_i}[\mathbf{k}] \quad (3.48)$$

$x_j[\mathbf{k}]$  : Τα σήματα που μεταδίδονται από τις πηγές  $S_j$  στο  $R_i$  σε χρόνο  $\mathbf{k}$

$t_i[\kappa]$  : Τα σήματα που μεταδίδονται από το  $R_i$  στις πηγές  $S_j$  σε χρόνο  $\kappa$   
 $n_{r_i}[\kappa]$  : OAWGN στον  $R_i$  με μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση  $\sigma^2$   
 $P_S$  : Η ισχύς εκπομπής της πηγής

Για το σήμα  $t_i$  ισχύει  $\mathbf{t}_i[\kappa] = P_r \beta_{r_i} r_i[\kappa - 1]$ , όπου  $\beta_{r_i}$  είναι ο συντελεστής ενίσχυσης ισχύος.

Το ληφθέν σήμα στο  $S_j$  δίνεται από τον τύπο :

$$\mathbf{y}_j[\kappa] = \mathbf{h}_{j_i} \mathbf{t}_i[\kappa] + \mathbf{n}_j[\kappa] + \tilde{\mathbf{h}}_{S_j} \sqrt{P_S} \mathbf{x}_j[\kappa] \quad (3.49)$$

$n_j[\kappa]$  : OAWGN με μέση τιμή ίση με το μηδέν και διακύμανση  $\sigma^2$  στις πηγές  $S_j$

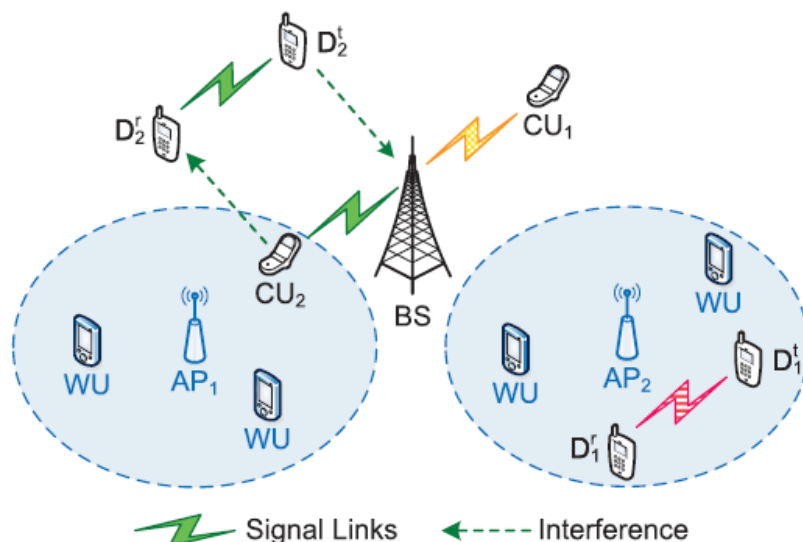
### 3.5 Επικοινωνία συσκευή με συσκευή (D2D)

Ο όρος Device-to-Device (D2D) αναφέρεται σε έναν τύπο τεχνολογίας που επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς υποδομές επικοινωνίας όπως σημεία πρόσβασης (AP) ή σταθμούς βάσης (BS) [26]. Το Bluetooth και το WiFi είναι οι δύο από τις πιο δημοφιλείς τεχνικές D2D. Τα κυψελοειδή δίκτυα, όμως, κυρίως υποστηρίζουν Machine-to-Machine (M2M) επικοινωνίες, που επίσης ανήκουν στις τεχνολογίες MTC, οι οποίες είναι βασισμένες στην D2D τεχνολογία. Σε συνδυασμό με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες των 5G, η επικοινωνία D2D καθιστά ακόμα πιο βελτιωμένα τα δίκτυα επικοινωνιών 5G. Ένα βασικό πλεονέκτημα της είναι ότι διευκολύνει την ανακάλυψη γεωγραφικά κοντινών συσκευών και επιτρέπει άμεσες επικοινωνίες μεταξύ αυτών, γεγονός που βελτιώνει την επικοινωνία και μειώνει την καθυστέρηση και την κατανάλωση ενέργειας.

#### 3.5.1 Μοντέλο συστήματος

Για να περιγράψουμε το μοντέλο του συστήματος θεωρούμε ένα σενάριο ανερχόμενης ζεύξης σε ένα δίκτυο LTE με έναν σταθμό βάσης (BS) σημείο πρόσβασης (AP) Wi-Fi που συμβολίζεται με  $Q = \{1, \dots, Q\}$ . Σε αυτό το δίκτυο υπάρχουν  $N$  χρήστες LTE που συμβολίζονται με  $CU_n$  ( $n \in N = \{1, \dots, N\}$ ) και  $M$  χρήστες D2D οι οποίοι δίνονται από  $D_m^t, D_m^r$  (όπου  $t$  για τον πομπό και  $r$  για τον δέκτη). Επιπλέον, το σύστημα διαθέτει υποκανάλια  $K = \{1, \dots, K\}$  με ίδιο εύρος ζώνης  $B_l$  τα οποία μεταδίδουν με OFDMA [27]. Για το σύστημα Wi-Fi θεωρούμε  $WU$  χρήστες.

Έστω ότι υπάρχουν  $L$  μη αδειοδοτημένα κανάλια για την υποστήριξη των διάφορων



σημείων πρόσβασης (AP). Να σημειωθεί ότι το LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι μια προτεινόμενη επέκταση του ασύρματου προτύπου Long-TermEvolution που έχει σκοπό να επιτρέψει στους παρόχους δικτύου κινητής τηλεφωνίας να εκφορτώσουν μέρος της κίνησης δεδομένων τους μέσω της πρόσβασης στη ζώνη συχνοτήτων των 5 GHz [28]. Ως εκ τούτου, ένα κανάλι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και να διαιρεθεί σε υπο-κανάλια. Έτσι πολλοί χρήστες του δικτύου θα μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι χωρίς άδεια.

Σε αυτό το μοντέλο θα υποθέσουμε ότι όλοι οι χρήστες μεταδίδουν με σταθερή ισχύ ( $P^c$ : ισχύς πομπού χρήστη LTE,  $P^d$ : ισχύς πομπού χρήστη D2D). Και  $P^w$  η ισχύς μετάδοσης των σημείων πρόσβασης και των χρηστών Wi-Fi στο κανάλι. Η ληφθείσα ισχύς της σύνδεσης δυο χρηστών  $i$  και  $j$  μπορεί να εκφραστεί ως [27]:

$$p_{i,j}^r = p_i^t |h_{i,j}|^2 \xi_{i,j} = p_i^t G d_{i,j}^{-a} |h_0|^2 \xi_{i,j} \quad (3.50)$$

$p_i^t$ : Η ισχύς εκπομπής του χρήστη  $i$

$p_{i,j}^r$ : Η ισχύς λήψης των χρηστών  $i,j$

$d_{i,j}$ : Η απόσταση μεταξύ των χρηστών  $i,j$

$a$ : Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής

$G$ : Ο σταθερός παράγοντας κέρδους ισχύος, εισάγεται από τον ενισχυτή και την κεραία

$h_0$ : Μια Γκαουσιανή σταθερά που βασισμένη στο μοντέλο εξασθένισης Rayleigh<sup>3</sup>

$\xi_{i,j}$ : Ακολουθεί την κανονική κατανομή που αντιπροσωπεύει την εξασθένιση.

Επιπλέον, υποθέτουμε ότι ο θερμικός θόρυβος σε κάθε χρήστη ακολουθεί την ανεξάρτητη κατανομή Gauss με μηδενική μέση τιμή και την ίδια διακύμανση  $\sigma^2$ .

Όταν οι χρήστες καταλαμβάνουν το κανάλι χωρίς άδεια, οι κοντινοί χρήστες Wi-Fi δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση, και έτσι η απόδοση του συστήματος Wi-Fi υποβαθμίζεται. Αυτή η υποβάθμιση της απόδοσης ορίζεται ως εύρος παρεμβολών στο δίκτυο Wi-Fi, μέσα από το οποίο κάθε χρήστης μπορεί να εντοπίσει το κανάλι που δεν είναι διαθέσιμο και να αναστείλει την μετάδοση. Το εύρος παρεμβολών των χρηστών ορίζεται ως η περιοχή όπου η ληφθείσα ισχύς που αναμένουμε για τον χρήστη υπερβαίνει το όριο ισχύος. Επομένως το εύρος παρεμβολών στο δίκτυο Wi-Fi είναι ένας κύκλος που επικεντρώνεται στον πομπό, του οποίου η ακτίνα σχετίζεται με την ισχύ εκπομπής. Όταν πολλοί χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα σε άδειο φάσμα, οι κύκλοι παρεμβολής τους ενδέχεται να αλληλοεπικαλύπτονται. Μια προτεινόμενη λύση για μικρότερο εύρος παρεμβολών είναι εάν ο σταθμός βάσης (BS) διαθέσει τα μη αδειοδοτημένα υπο-κανάλια σε γειτονικούς χρήστες αντί σε χρήστες που τα εύρη παρεμβολών τους δεν επικαλύπτονται. [27]

Για την αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ των χρηστών LTE και D2D, υποθέτουμε ότι ένα υπο-κανάλι μπορεί να καταναμηθεί σε ένα χρήστη LTE το πολύ. Επιπλέον, ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερα από ένα υπο-κανάλια, συμπεριλαμβανομένων αδειοδοτημένων και μη αδειοδοτημένων. Παρακάτω θα ορίσουμε κάποιους βασικούς συμβολισμούς και τύπους για την ανάλυση των παρεμβολών σε αδειοδοτημένο και μη αδειοδοτημένο φάσμα.

<sup>3</sup>**Rayleigh**: Στατιστικό μοντέλο για την επίδραση ενός περιβάλλοντος διάδοσης σε ένα ασύρματο σήμα, όπως αυτό που χρησιμοποιείται από ασύρματες συσκευές.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh\\_fading](https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_fading)



Ο πίνακας κατανομής των υπο-καναλιών για τους χρήστες LTE και D2D αντίστοιχα δίνεται ως:

$$\mathbf{A}_{(N+M) \times (K+K^u)} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Phi}_{N \times (K+K^u)} = [\boldsymbol{\varphi}_{n,k}] \\ \boldsymbol{\Theta}_{M \times (K+K^u)} = [\boldsymbol{\theta}_{m,k}] \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

Όπου

$$\boldsymbol{\varphi}_{n,k} = \begin{cases} \mathbf{1}, & \text{όταν το υποκανάλι } SC_k \text{ διατίθεται σε χρήστες LTE } (CU_n) \\ \mathbf{0}, & \text{σε διαφορετική περίπτωση} \end{cases} \quad (3.52)$$

και

$$\boldsymbol{\theta}_{m,k} = \begin{cases} \mathbf{1}, & \text{όταν του υποκανάλι } SC_k \text{ διατίθεται σε χρήστες D2D } (D_m) \\ \mathbf{0}, & \text{σε διαφορετική περίπτωση} \end{cases} \quad (3.53)$$

Δηλαδή, ορίζουμε δείκτες πρόσβασης ώστε να αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τους χρήστες αυτούς που μπορούν να έχουν πρόσβαση στο κανάλι. Όταν ο δείκτης γίνεται 1 ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στο κανάλι. Σε διαφορετική περίπτωση ο δείκτης γίνεται 0.

#### Ανάλυση παρεμβολών σε αδειοδοτημένο φάσμα

Στα υπο-κανάλια με άδεια, δεδομένου του ότι ένα δευτερεύον κανάλι μπορεί να καταναμηθεί το πολύ σε έναν χρήστη LTE, οι χρήστες αυτοί μπορούν να δεχτούν παρεμβολή από τους επικαλυπτόμενους D2D χρήστες και το αντίστροφο. Ο λόγος σήματος προς παρεμβολές θορύβου στο δέκτη του σταθμού βάσης δίνεται από τους τύπους [27]:

$$SINR_{n,k}^c = \frac{\boldsymbol{\varphi}_{n,k} P^c |h_{n,B}^c|^2}{\sigma^2 + \sum_m \boldsymbol{\theta}_{m,k} P^d |h_{m,B}^d|^2} \quad (3.54)$$

$$SINR_{m,k}^d = \frac{\boldsymbol{\theta}_{m,k} P^d |h_{m',m}^d|^2}{\sigma^2 + \sum_{m' \neq m} \boldsymbol{\theta}_{m',k} P^d |h_{m',m}^d|^2 + \sum_n \boldsymbol{\varphi}_{n,k} P^c |h_{n,m}^c|^2} \quad (3.55)$$

$h_{n,B}^c, h_{m,B}^d$ : Τα κέρδη του καναλιού από τους LTE και D2D χρήστες προς το σταθμό βάσης, αντίστοιχα

$h_{m',m}^d, h_{n,m}^c$ : Τα κέρδη του καναλιού από τους D2D και LTE χρήστες προς τους D2D χρήστες, αντίστοιχα

Και οι ρυθμοί μετάδοσης των δεδομένων των χρηστών σε αδειοδοτημένο κανάλι δίνονται, αντίστοιχα, από τους τύπους:

$$R_{n,k}^c = B_l \log_2(1 + SINR_{n,k}^c) \quad (3.56)$$

$$R_{m,k}^d = B_l \log_2(1 + SINR_{m,k}^d) \quad (3.57)$$

#### Ανάλυση παρεμβολών σε μη αδειοδοτημένο φάσμα

Στα υπο-κανάλια χωρίς άδεια, οι χρήστες δε λαμβάνουν μόνο παρεμβολή από τους ίδιους όπως στο αδειοδοτημένο φάσμα, αλλά δέχονται παρεμβολή και από τους χρήστες Wi-Fi. Ο λόγος σήματος προς παρεμβολές θορύβου στο δέκτη του σταθμού βάσης δίνεται από τους τύπους [27]:

$$SINR_{n,k}^c = \frac{\varphi_{n,k} P^c |h_{n,B}^c|^2}{\sigma^2 + \sum_m \theta_{m,k} P^d |h_{m,B}^d|^2 + I_w^c} \quad (3.58)$$

όπου η παρεμβολή από το σύστημα Wi-Fi στο σταθμό βάσης εκφράζεται ως  $I_w^c = \sum_{q \in Q} \frac{P^w}{K^u} |h_{f,B}^q|^2$ , όπου  $h_{f,B}^q$  το κέρδος του καναλιού από τη μετάδοση ενός χρήστη Wi-Fi προς το σταθμό βάσης. Και,

$$SINR_{m,k}^d = \frac{\theta_{m,k} P^d |h_{m',m}^d|^2}{\sigma^2 + \sum_{m' \neq m} \theta_{m',k} P^d |h_{m',m}^d|^2 + \sum_n \varphi_{n,k} P^c |h_{n,m}^c|^2 + I_w^d} \quad (3.59)$$

όπου η παρεμβολή από το σύστημα Wi-Fi στους χρήστες D2D εκφράζεται ως  $I_w^d = \sum_{q \in Q} \frac{P^w}{K^u} |h_{f,m}^q|^2$ , όπου  $h_{f,m}^q$  το κέρδος του καναλιού από τη μετάδοση ενός χρήστη Wi-Fi προς τους χρήστες D2D.

Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων των χρηστών σε μη αδειοδοτημένο κανάλι δίνονται, αντίστοιχα, από τους τύπους:

$$R_{n,k}^c = B_u \log_2(1 + SINR_{n,k}^c) \quad (3.60)$$

$$R_{m,k}^d = B_u \log_2(1 + SINR_{m,k}^d) \quad (3.61)$$

### 3.6 3D Beamforming

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις λόγω του συχνοτικού φάσματος είναι απαραίτητη η χρήση της τεχνολογίας μορφοποίησης δέσμης (beamforming). Το Beamforming είναι μια μέθοδος επεξεργασίας σήματος που εφαρμόζεται σε συστοιχίες κεραιών ώστε να ελεγχθεί η κατεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Είναι δυνατόν, λοιπόν, να κατευθυνθεί το μεταδιδόμενο σήμα προς μια επιθυμητή κατεύθυνση και, ταυτόχρονα, να αποφευχθεί η λήψη του ανεπιθύμητου σήματος από μια ανεπιθύμητη κατεύθυνση. Τα περισσότερα σχήματα διαμόρφωσης δέσμης που χρησιμοποιούνται σε ασύρματα κυψελοειδή δίκτυα προηγούμενων γενεών ελέγχουν την ακτινοβολία δέσμης φωτός στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτός ο τύπος διαμόρφωσης δέσμης ονομάζεται 2DB και συχνά συνδυάζεται με την κατάταξη των κυψελών για την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, τη μείωση παρεμβολών μεταξύ των χρηστών και την αύξηση της χωρητικότητας των κυψελών.

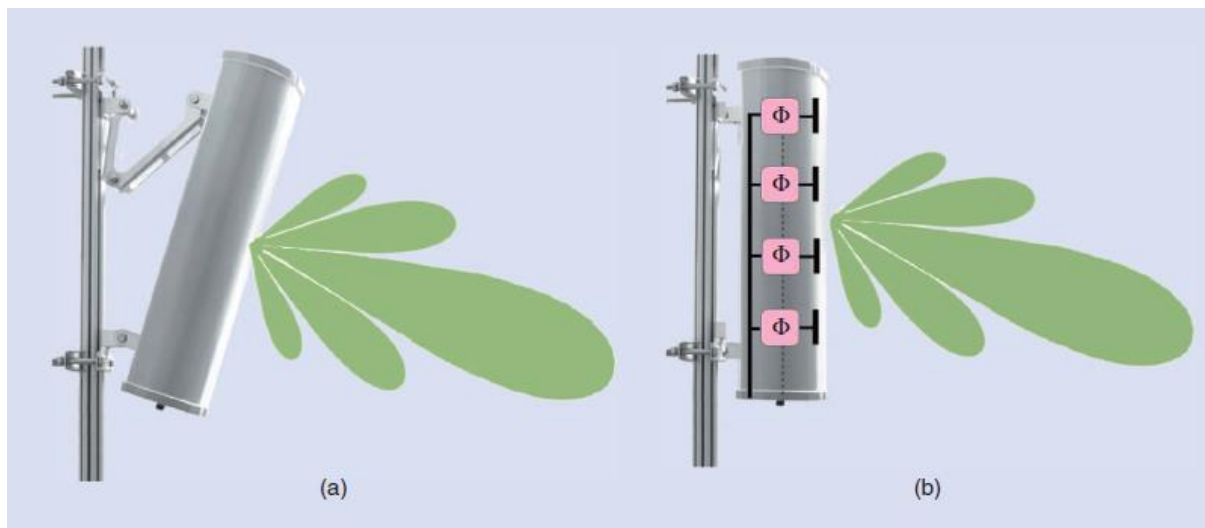
Σε αντίθεση με τέτοιες δισδιάστατες δομές (2DBF), το 3DBF προσαρμόζει την ακτινοβολία δέσμης τόσο στο *μοτίβο επιπέδου αζιμουθίου* (που ευρίσκεται συνήθως σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα) όσο και στο *μοτίβο επιπέδου ανύψωσης* (που αναφέρεται στον κατακόρυφο άξονα). Έτσι, παρέχονται περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας στην υποστήριξη των χρηστών, υψηλότερη χωρητικότητα χρήστη, λιγότερες παρεμβολές, υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, βελτιωμένη κάλυψη και αυξημένη φασματική απόδοση. [75]

### 3.6.1 2DBeamforming

Σε αυτή τη μέθοδο, αντί να υιοθετείται μια πανκατευθυντική κεραία στον BS, κάθε κελί χωρίζεται σε τομείς (π.χ. τρεις τομείς) και κάθε τομέας εξυπηρετείται από μια κατευθυντική κεραία. Η κεραία που υποστηρίζει κάθε τομέα είναι στην ουσία ένα μονοδιάστατος πίνακας στοιχείων κεραίας που παρέχει μοτίβο ακτινοβολίας σε σχήμα ανεμιστήρα. Ο αριθμός των οριζόντιων μοτίβων ακτινοβολίας που μπορούν να παραχθούν σε κάθε τομέα εξαρτάται από τον αριθμό των κεραιών σε αυτόν τον τομέα. Εάν τοποθετηθούν περισσότερες από μία κεραιές σε κάθε τομέα, είναι δυνατό να σχηματιστούν και να κατευθυνθούν πολλές ακτίνες σε διαφορετικές γωνίες στο οριζόντιο επίπεδο. Στη συνέχεια, κάθε ένα από αυτά τα μοτίβα μπορεί να υποστηρίξει έναν χρήστη ή μια ομάδα χρηστών σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.

### 3.6.2 Εισαγωγή στο 3DBeamforming

Όπως μόλις αναφέρθηκε, στο 2DBF, το μοτίβο δέσμης έχει σχεδιαστεί μόνο στο οριζόντιο επίπεδο. Για να χρησιμοποιηθεί ο κατακόρυφος τομέας, η κλίση της κεραίας μπορεί να ληφθεί υπόψη στον κατακόρυφο άξονα. Η γωνία κλίσης της κεραίας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του οριζώντιου επιπέδου και της κατεύθυνσης της οπτικής όρασης του σχεδίου κεραίας. Για να ρυθμιστεί η γωνία κλίσης της κεραίας κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα, μπορεί να υιοθετηθεί μια μηχανική ευθυγράμμιση της κεραίας. Στην πραγματικότητα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.9 (α) (το οποίο αντιπροσωπεύει μηχανική κλίση), ορισμένες ρυθμιζόμενες αγκύλες χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν τη γωνία κλίσης της κεραίας. Από την άλλη πλευρά, σε ορισμένες κεραιές, είναι επίσης δυνατό να ελέγχεται ηλεκτρικά η γωνία κλίσης (που ονομάζεται ηλεκτρική κλίση). Όπως φαίνεται Εικόνα 3.9 (b), η ηλεκτρική καθοδήγηση πραγματοποιείται εφαρμόζοντας μια συνολική μετατόπιση φάσης σε όλα τα στοιχεία κεραίας στη συστοιχία.



Εικόνα 3.9: Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων κλίσης κεραίας: (α) μηχανική κλίση και (b) ηλεκτρική κλίση.[75]

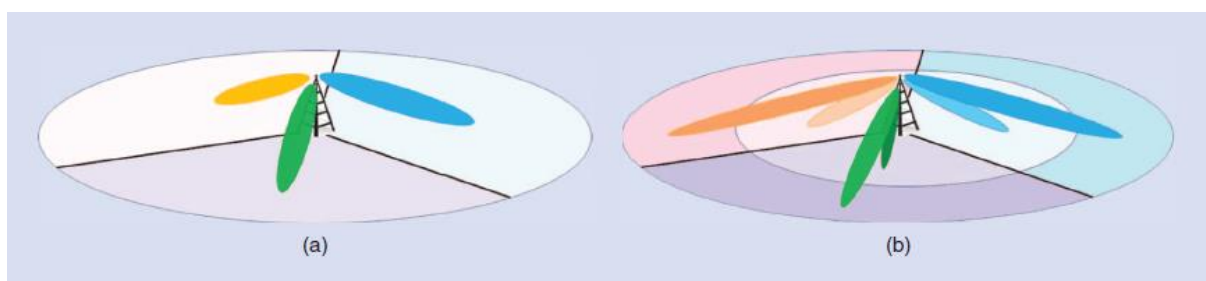
Ένα ενεργό σύστημα κεραίας (Active Antenna System, AAS) είναι μια πρόσφατη τεχνολογία που βοηθά στην απόκτηση περισσότερου ελέγχου στα στοιχεία κεραίας ξεχωριστά. Στο AAS, κάθε στοιχείο συστοιχίας είναι ενσωματωμένο με ξεχωριστή μονάδα πομποδέκτη ραδιοσυχνότητας (RF) που παρέχει ηλεκτρονικά ένα τηλεχειριστήριο στα στοιχεία αυτά. Χρησιμοποιώντας AAS στο BS κυψελοειδών δικτύων, το μοτίβο κάθετης ακτινοβολίας μπορεί επίσης να ρυθμιστεί δυναμικά σε κάθε τομέα και μπορούν επίσης να

δημιουργηθούν πολλαπλές ακτίνες ανύψωσης για την υποστήριξη πολλαπλών χρηστών ή κάλυψη πολλαπλών περιοχών. Ένας σχεδιασμός του 3DBF επιτυγχάνεται με την προσθήκη αυτού του τύπου κάθετης μορφής δέσμης και συμβατικής οριζόντιας μορφής δέσμης.

Ανάλογα με τον τρόπο αλλαγής της κλίσης της κεραίας, το 3DBF μπορεί να ταξινομηθεί σε *στατικό 3DBF* και *δυναμικό 3DBF*. Το στατικό 3DBF αναφέρεται σε ένα σύστημα όπου η κλίση της κεραίας στο BS έχει οριστεί σε μια σταθερή τιμή σύμφωνα με ορισμένες στατιστικές μετρήσεις, για παράδειγμα τη μέση τιμή των κάθετων γωνιών των χρηστών. Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να προσαρμοστεί στην μεταβαλλόμενη θέση των χρηστών, δηλαδή, μόλις επιλεγεί η γωνία κλίσης, θα παραμείνει αμετάβλητη. Αντίθετα, το δυναμικό 3DBF είναι μια τεχνική που κατευθύνει τη γωνία κλίσης της κεραίας BS σύμφωνα με συγκεκριμένες τοποθεσίες χρήστη και χρησιμοποιεί και τις δύο μεθόδους κλίσης κεραίων ανάλογα. Ως εκ τούτου, το δυναμικό 3DBF προσφέρει επιπλέον βαθμούς ελευθερίας για βελτιστοποίηση απόδοσης σε σύγκριση με το στατικό 3DBF.

Εφαρμόζοντας το *δυναμικό 3DBF*, ένα BS μπορεί να κατευθύνει τον κύριο λοβό της δέσμης κεραίας σε έναν συγκεκριμένο χρήστη. Κατά συνέπεια, μεγιστοποιείται η επιθυμητή ισχύς σήματος στους προοριζόμενους χρήστες. Το 3DBF μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών σε ένα σενάριο πολλαπλών κυψελών ρυθμίζοντας σωστά τις δέσμες κεραίων. Με την υιοθέτηση συντονισμού μεταξύ γειτονικών κυψελών, είναι δυνατόν να επιτευχθεί αντιστάθμιση μεταξύ της επιθυμητής ισχύος σήματος στους επιδιωκόμενους χρήστες και του επιπέδου παρεμβολών. Έτσι η απόδοση θα βελτιωθεί σημαντικά.

Από την άλλη πλευρά, το *στατικό 3DBF* σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας μπορεί να υιοθετήσει μια τομεοποίηση στην κυψέλη, γεγονός που βελτιώνει επίσης την απόδοση του δικτύου. Όπως βλέπουμε στο σχήμα της Εικόνας 3.10 (a), η παραδοσιακή μέθοδος τμηματοποίησης παρέχει τομείς (κεραίες) που σχηματίζονται κατά την εφαπτομενική κατεύθυνση στο οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, όπως απεικονίζεται στο σχήμα της Εικόνας 3.10 (b), η χρήση δύο γωνιών κλίσης σε κάθε τομέα επιτρέπει την επιπρόσθετη κατάτμηση κατά μήκος της ακτινικής κατεύθυνσης, η οποία ονομάζεται κάθετη τομή. Ο διαχωρισμός του κελιού σε διάφορους τομείς μπορεί να χρησιμοποιήσει περισσότερη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και να αυξήσει σημαντικά την χωρητικότητα του δικτύου. Επιπλέον, η κάθετη τμηματοποίηση από το 3DBF παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στην εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης σε σύγκριση με τη συμβατική τμηματική αλλαγή αλλάζοντας προσαρμοστικά τον αριθμό τομέων/τμημάτων για την εξυπηρέτηση μεταβλητών φορτίων κίνησης στο κελί.



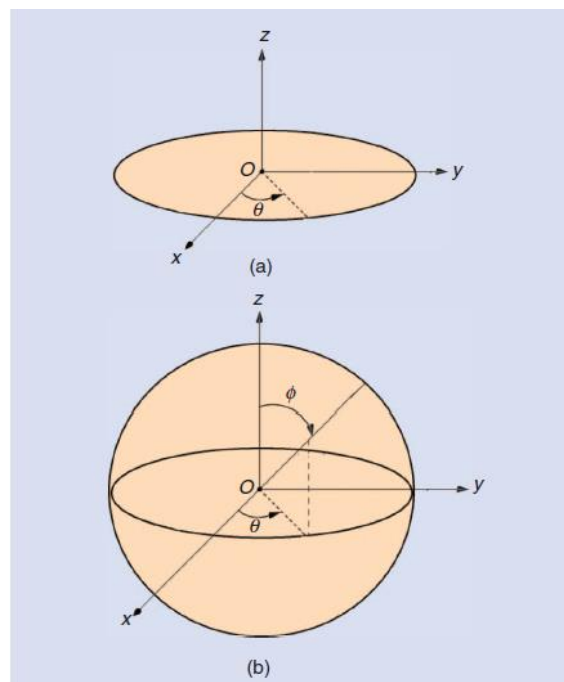
Εικόνα 3.10: (a) Συμβατική τμηματοποίηση (b) Κάθετη τμηματοποίηση. [75]

### 3.6.3 Μοντελοποίηση 3D ασύρματου καναλιού

Ένα μοντέλο καναλιού 3DBF πρέπει να περιγράφει με ακρίβεια το χωρικό περιβάλλον μαζί με τα χαρακτηριστικά του χρόνου και της συχνότητας. Για την καταγραφή, λοιπόν, των

χωρικών ιδιοτήτων του 3DBF, χρειάζονται: διαμορφώσεις κεραιάς και οι ιδιότητες του πεδίου διάδοσης [80]. Τα περισσότερα από τα βασικά μοντέλα καναλιών σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι μοντέλα 2D. Τα μοντέλα 2D, όπως το μοντέλο χωρικού καναλιού 3GPP ή το μοντέλο καναλιού διπλής κατεύθυνσης [81], θεωρούν κατανομή των σκεδαστών μόνο στο επίπεδο του αζιμούθιου και δεν λαμβάνουν υπόψη τη γωνία ανύψωσης. Για παράδειγμα, το ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο Clark [82] είναι επίσης ένα μοντέλο 2D που υποθέτει όλα τα σήματα που λαμβάνονται από ομοιόμορφες κατευθύνσεις στο επίπεδο του αζιμουθίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11 (a).

Για τη βελτίωση των 2D μοντέλων, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες σε μοντέλα 3D καναλιών για να συμπεριλάβουν μη μηδενικές γωνίες ανύψωσης και να αξιολογούν με ακρίβεια τα συστήματα. Συγκεκριμένα, ένα από τα πρώτα ερευνητικά έργα σχετικά με τη στατιστική μοντελοποίηση των τρισδιάστατων καναλιών [83], αποτελεί η επέκταση του μοντέλου 2D του Clark. Σε αυτό το μοντέλο, οι σκεδαστές υποτίθεται ότι κατανέμονται σε έναν κύλινδρο γύρω από τον δέκτη και, στην πραγματικότητα, λαμβάνονται υπόψη τόσο οι γωνίες άφιξης του αζιμούθιου όσο και οι γωνίες ανύψωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η γωνία αζιμουθίου κατανέμεται ομοιόμορφα σε έναν κύκλο, ενώ η γωνία ανύψωσης έχει μη ομοιόμορφη κατανομή. Αυτό το μοντέλο επεκτάθηκε αργότερα σε ένα μοντέλο δύο κυλίνδρων στο οποίο τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης τοποθετούνται εντός δύο κυλίνδρων σκέδασης. Γενικά, οι σκεδαστές μπορούν να υπάρχουν μέσα σε μια σφαίρα γύρω από το δέκτη (όπως στην Εικόνα 3.11 (b)).



Εικόνα 3.11: (a) Μοντέλο καναλιών 2D (b) Μοντέλο καναλιών 3D [75]

Ένα από τα πιο δημοφιλή μοντέλα καναλιών 3D είναι το μοντέλο καναλιού WINNER [84], το οποίο εκτός από τις διαφορετικές γωνίες ανύψωσης και αζιμουθίου, αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει επίσης άλλες παραμέτρους όπως τον αριθμό των κεραιών, μοτίβα κάθετης και οριζόντιας ακτινοβολίας και εκπομπές διπλής πόλωσης. Αυτό το μοντέλο μπορεί να φιλοξενήσει εύρος ζώνης έως 100 MHz και συχνότητες μεταξύ 2 και 6 GHz. Όμως, παρόλο που το WINNER είναι ανεξάρτητο μοντέλο κεραιάς, εφαρμόζεται πλέον μόνο σε ομοιόμορφες γραμμικές συστοιχίες κεραιών. Τα νέα μοντέλα 3D πρέπει να υποστηρίζουν μαζικές και υπέρυθρες αναπτύξεις κεραιών, μεγαλύτερο εύρος ζώνης, υψηλότερες

συχνότητες, χρήστες υψηλής ταχύτητας, νέα σενάρια ανάπτυξης όπως επικοινωνία D2D και μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών περιβαλλόντων διάδοσης (π.χ. περιοχές αστικές, αγροτικές, εξωτερικές ή εσωτερικές) [75].

Μια πιθανή επέκταση του 3DBF για συστήματα 5G είναι η υλοποίηση massive MIMO τεχνολογίας η οποία χρησιμοποιεί έως και αρκετές εκατοντάδες στοιχεία κεραίας. Γενικά, η προσθήκη περισσότερων στοιχείων κεραίας στη συστοιχία παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στα σχέδια διεύθυνσης δέσμης και αυξάνει τον αριθμό των ακτινών ακτινοβολίας της συστοιχίας. Για κάθετη τομεακή κατάταξη στην οποία ο αριθμός των κάθετων τομέων είναι συνήθως μικρός (π.χ δύο ή τρεις), απαιτείται μόνο ένας μικρός αριθμός κεραιών στο κάθετο επίπεδο. Ωστόσο, στο 3DBF με προσαρμογή μοτίβου δέσμης ανά χρήστη (δηλαδή παρακολούθηση χρήστη), απαιτείται μεγάλος αριθμός κεραιών. Ως εκ τούτου, μία από τις προκλήσεις του 3DBF είναι οι φυσικοί περιορισμοί και η τοποθέτηση μεγάλου αριθμού κεραιών σε BS. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί σε υψηλότερες συχνότητες που αναμένονται για δίκτυα 5G. Επίσης, το FD-MIMO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Για παράδειγμα [85], μια 2D συστοιχία 32 κεραιών που περιλαμβάνει 8 θύρες κεραιών στο οριζόντιο επίπεδο και 4 θύρες κεραιών στο κατακόρυφο επίπεδο, με κάθε θύρα κεραίας να αποτελείται από ένα υπόγειο 4 κεραιών στην κατακόρυφη διάσταση, έχει ως αποτέλεσμα συνολικά 128 στοιχεία σε αυτήν την κεραία ( $8 \times 4 \times 4 = 128$ ). Το μέγεθος αυτής της κεραίας στη ζώνη των 2,5 GHz είναι  $1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ , το οποίο είναι κατάλληλο για τοποθέτηση σε έναν πύργο BS. Μια παρόμοια μελέτη δείχνει ότι ο ίδιος αριθμός κεραιών μπορεί να τοποθετηθεί σε έναν κύλινδρο με διάμετρο 1 m.

Συνοψίζοντας, η προσαρμογή του κάθετου μοτίβου δέσμης στο οριζόντιο σχήμα πολλαπλών κεραιών είναι το βασικό στοιχείο για τον σχηματισμό της τρισδιάστατης δομής. Αυτή η τεχνική προσφέρει καλύτερη φασματική απόδοση και καλύτερο έλεγχο της απόδοσης των κυψελών. Για την εφαρμογή αυτής της τεχνικής απαιτούνται: μια σταθερή καθοδική κλίση σε ολόκληρο το κελί, ένας κύριος λοβός που κατευθύνεται απευθείας στον τερματικό σταθμό. Σύμφωνα με το ITU [81], το μοτίβο της 3D κεραίας που μεταδίδει προς μια δεδομένη κατεύθυνση του χρήστη καθορίζεται από τον τύπο:

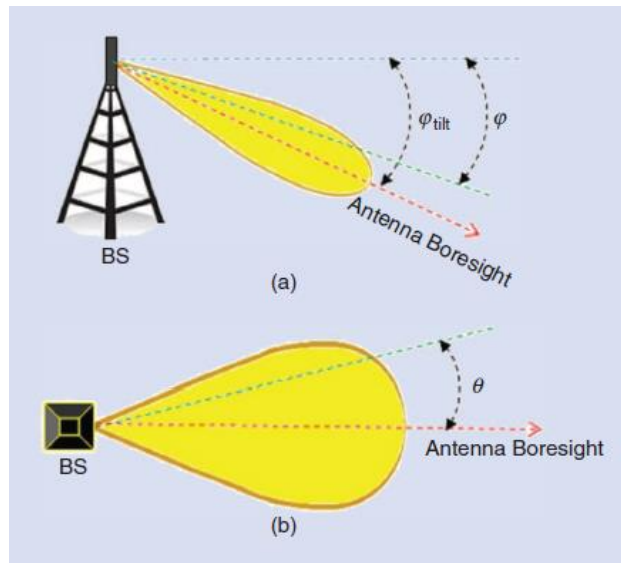
$$A(\theta, \varphi) = G_{max} - \min[A_H(\theta) + A_V(\varphi), A_m], \quad (3.62)$$

όπου το  $G_{max}$  το μέγιστο κέρδος κεραίας στην κατεύθυνση της κύριας δέσμης (boresight),  $\theta$  η γωνία κατεύθυνσης του χρήστη στο οριζόντιο επίπεδο και  $\varphi$  η γωνία κλίσης της κεραίας του σταθμού βάσης (όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 3.12). Τα  $A_H$  και  $A_V$  αντιπροσωπεύουν τα σχετικά κέρδη των μοτίβων κεραίας στα οριζόντια και κατακόρυφα επίπεδα, αντίστοιχα, και εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$A_H(\theta) = \min \left[ 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \quad (3.63)$$

$$A_V(\varphi) = \min \left[ 12 \left( \frac{\varphi - \varphi_{tilt}}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right] \quad (3.64)$$

Όπου όπου το  $\varphi_{tilt}$  αντιπροσωπεύει τη γωνία κλίσης της κύριας δέσμης, τα  $\theta_{3dB}$  και  $\varphi_{3dB}$  υποδεικνύουν το πλάτος δέσμης 3 dB των οριζόντιων και κάθετων γωνιών, αντίστοιχα, και το  $A_m$  η μέγιστη εξασθένιση του επιπέδου πλευρικού λοβού του μοτίβου κεραίας. Σε κανονικές καταστάσεις, έχουμε  $A_m = 20 \sim 30 \text{ dB}$ ,  $\theta_{3dB} = 60^\circ \sim 70^\circ$ , και  $\varphi_{3dB} = 8^\circ \sim 15^\circ$ .

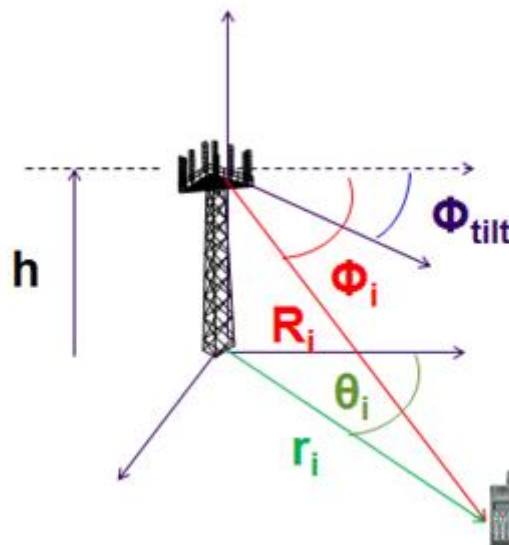


Εικόνα 3.12: Μοντελοποίηση 3D μοτίβου κεραίας (a) στο κατακόρυφο επίπεδο (b) στο οριζόντιο επίπεδο. [75]

Κάθε πλευρά του σταθμού βάσης αποτελείται από 3 κεραίες (3 τομείς). Επομένως για οποιαδήποτε πλευρά  $s$  του δικτύου έχουμε [86]:

$$\begin{cases} A_H(\theta_s^2) = A_H\left(\theta_s^1 + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ A_H(\theta_s^3) = A_H\left(\theta_s^1 - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ A_V(\varphi_s^1) = A_V(\varphi_s^2) = A_V(\varphi_s^3) \end{cases} \quad (3.65)$$

Όπου  $\theta_s^\alpha$  και  $\varphi_s^\alpha$ ,  $\alpha \in \{1,2,3\}$  οι γωνίες των κεραίων για κάθε πλευρά  $s$ . Στην Εικόνα 3.13 δίνεται το μοντέλο κεραίας 3D αναλυτικότερα. Ο χρήστης βρίσκεται στη θέση  $(r_i, \theta_i)$  σε απόσταση  $R_i = \sqrt{r_i^2 + h^2}$  από τον σταθμό βάσης (όπου το  $r_i$  αντιπροσωπεύει την προβολή του  $R_i$  στο έδαφος).



Εικόνα 3.12: Μοντέλο κεραίας 3D. [86]

### 3.6.4 Εφαρμογές του 3DBF

Παρόλο που το 3DBF είναι νέα τεχνολογία των ασύρματων κυψελοειδών δικτύων, η ιστορία του μπορεί να ανιχνευθεί από τη δεκαετία του 1970 όταν προτάθηκαν ορισμένες μέθοδοι για την εφαρμογή ακτινών ακτινοβολίας πολλαπλών υψομέτρων σε ραντάρ και υποβρύχια συστήματα. Για παράδειγμα, στο [76], χρησιμοποιήθηκε η έννοια της κάθετης διαμόρφωσης δέσμης για μια σειρά κεραιών ή ακουστικών στοιχείων σε συνθετικά συστήματα ραντάρ για την αύξηση της ανάλυσης και της ανίχνευσης. Σε αυτό το σύστημα, υιοθετούνται πολλές συνεχόμενες ακτίνες ανύψωσης με διαφορετικές συχνότητες, οι οποίες μπορούν επαναχρησιμοποιήσουν συχνότητες σε κυψελοειδή δίκτυα.

Εκτός από τα συστήματα ραδιοεπικοινωνίας, τεχνικές παρόμοιες με το 3DBF έχουν εφαρμοστεί και σε άλλους τομείς επεξεργασίας σήματος. Μια δημοφιλής εφαρμογή του 3DBF μπορεί να βρεθεί σε σχήματα απεικόνισης. Η τρισδιάστατη απεικόνιση υιοθετείται ευρέως σε ιατρικά συστήματα χρησιμοποιώντας υπερήχους, μικροκύματα και ακτίνες X [77], και το 3DBF μπορεί να προσφέρει υψηλότερη ανάλυση και ποιότητα εικόνας σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Επιπροσθέτως, η επεξεργασία ήχου και ομιλίας είναι ένας άλλος σημαντικός τομέας εφαρμογής που έχει ήδη υιοθετήσει το 3DBF. Σε αυτήν την περίπτωση, το 3DBF χρησιμοποιείται σε μια δισδιάστατη (2D) ή τρισδιάστατη (3D) σειρά ηχείων για την εστίαση της ηχητικής ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Παρομοίως, μπορεί να εφαρμοστεί μια σειρά μικροφώνων και το 3DBF για τη λήψη ήχου από την επιθυμητή κατεύθυνση στον 3D χώρο. Για παράδειγμα, ένα κινούμενο άτομο μπορεί να παρακολουθείται ενώ μιλάει ή μια πηγή ήχου μπορεί να εντοπιστεί σε εφαρμογές τηλεδιάσκεψης [78].

Στο [79], μια τεχνική 3DBF προτάθηκε να χρησιμοποιήσει μια σφαιρική συστοιχία που αποτελείται από μικρόφωνα όπου λαμβάνονται υπόψη διαφορετικές συχνότητες και εφέ διάδοσης κυμάτων ήχου και ραδιοκυμάτων. Αυτές οι διαμορφώσεις μπορούν να δώσουν έμπνευση για το σχεδιασμό τοπολογιών 3D κεραιών για ασύρματη επικοινωνία. Αυτό μπορεί επίσης να δώσει ιδέες για το σχεδιασμό μοτίβων δέσμης στο 3DBF με σύστημα διεύθυνσης δέσμης ανά χρήστη, δεδομένου ότι η τροποποίηση του σχήματος δέσμης κεραίας με τις γωνίες ανύψωσης και αζιμούθιου μπορεί να αυξήσει τις παρεμβολές του παρεμβολέα και να επηρεάσει την απόδοση του 3DBF στο δίκτυο. Αυτά τα άφθονα προηγούμενα έργα που σχετίζονται με το 3DBF δείχνουν ότι αυτή η τεχνική έχει ισχυρή σύνδεση με άλλες περιοχές επεξεργασίας σήματος. Με την αξιοποίηση αυτών των αποτελεσμάτων που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε άλλες εφαρμογές, είναι δυνατή η επιτυχή ανάπτυξη του 3DBF σε συστήματα 5G.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Βασικές Αρχιτεκτονικές Συστημάτων Πέμπτης Γενιάς

Οι σημερινές εφαρμογές Διαδικτύου απαιτούν τα υφιστάμενα δίκτυα να είναι γρήγορα, να μεταφέρουν μεγάλο όγκο δεδομένων και να αναπτύξουν μια σειρά από ξεχωριστές, δυναμικές εφαρμογές και υπηρεσίες. Ως εκ τούτου χρειάζονται νέες αρχιτεκτονικές προκειμένου να ικανοποιηθούν όλες αυτές οι απαιτήσεις. Εκτός από το hardware του δικτύου, τα καταναμημένα πρωτόκολλα και το software, τα παλαιά δίκτυα πλημμυρίζονται με συσκευές εναλλαγής που αποφασίζουν για τη διαδρομή που λαμβάνει κάθε πακέτο ξεχωριστά. Οι διαδρομές δεδομένων και οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων για εναλλαγή ή δρομολόγηση συγκεντρώνονται στην ίδια συσκευή. Τα δίκτυα σήμερα εξαρτώνται από διευθύνσεις IP για την αναγνώριση και τον εντοπισμό διακομιστών και εφαρμογών. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί καλά για στατικά δίκτυα όπου κάθε φυσική συσκευή είναι αναγνωρίσιμη από μια διεύθυνση IP, αλλά είναι εξαιρετικά επίπονη για μεγάλα εικονικά δίκτυα. Η διαχείριση τέτοιων πολύπλοκων περιβαλλόντων χρησιμοποιώντας παραδοσιακά δίκτυα είναι χρονοβόρα και δαπανηρή, ειδικά στην περίπτωση μετεγκατάστασης εικονικής μηχανής (VM) και διαμόρφωσης δικτύου.

Λόγω της μεγάλης ζήτησης υπηρεσιών δικτύου, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας αντιμετωπίζουν συμφόρηση φάσματος και οι χειριστές του κέντρου δεδομένων αντιμετωπίζουν τεράστια αύξηση στον αριθμό των διακομιστών και των εικονικών μηχανών. Προκειμένου να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις, οι φορείς εκμετάλλευσης απαιτούν ένα δίκτυο που να είναι αποτελεσματικό, ευέλικτο, ευέλικτο και επεκτάσιμο. Η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό (SDN), η εικονοποίηση δικτυακών λειτουργιών (NFV), ο τεμαχισμός (NetworkSlicing) και η πύκνωση δικτύου (UDN) είναι οι λύσεις που ξεπερνούν τις προκλήσεις που περιγράφονται παραπάνω.

### 4.1 Network Function Virtualization (NFV)

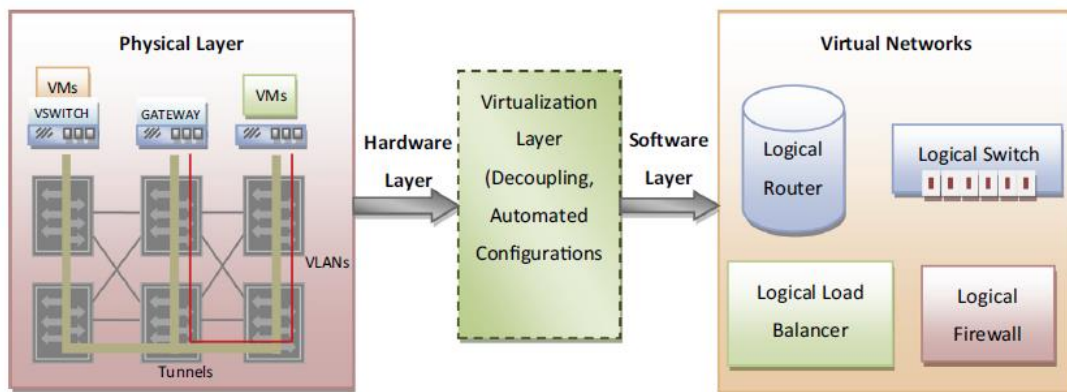
Η Εικονοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization, NFV) χρησιμοποιεί τεχνολογίες εικονικοποίησης για να εξομοιώσει λειτουργίες κόμβων δικτύων σε δομικά στοιχεία που μπορούν να συνδεθούν μαζί για να δημιουργήσουν υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών. Μια εικονική λειτουργία δικτύου, ή VNF, μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες εικονικές μηχανές που τρέχουν διαφορετικό λογισμικό και διεργασίες, πάνω σε κοινούς εξυπηρετητές, μεταγωγείς και συσκευές αποθήκευσης, ή ακόμα και σε υπολογιστικά νέφη, αντί να χρειάζεται εξειδικευμένες συσκευές για κάθε λειτουργία του δικτύου.[21]

Το NFV βασίζεται, αλλά διαφέρει από, τις παραδοσιακές τεχνικές εικονοποίησης, δηλαδή του διαχωρισμού ενός φυσικού διακομιστή για πολλαπλούς μικρότερους ιδεατούς (virtual servers) με τη βοήθεια ενός εικονικού δικτύου.[22]

#### 4.1.1 Αρχιτεκτονική NFV

Το NFV διαχωρίζει τον εξοπλισμό του δικτύου, δηλαδή τις φυσικές συσκευές, (hardware) από τις λειτουργίες που εκτελούν (software). Αυτό σημαίνει ότι μία λειτουργία π.χ. ένα firewall μπορεί να δοθεί σε μία εταιρία ως λογισμικό. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μία πληθώρα εικονικών λειτουργιών που τις ονομάζουμε VNF (Virtual Network Functions), οι οποίες μπορούν να τρέξουν ανά πάσα στιγμή ως λογισμικά μέσα σε κάποιον διακομιστή. Έτσι δεν υπάρχει η ανάγκη για αγορά και εγκατάσταση

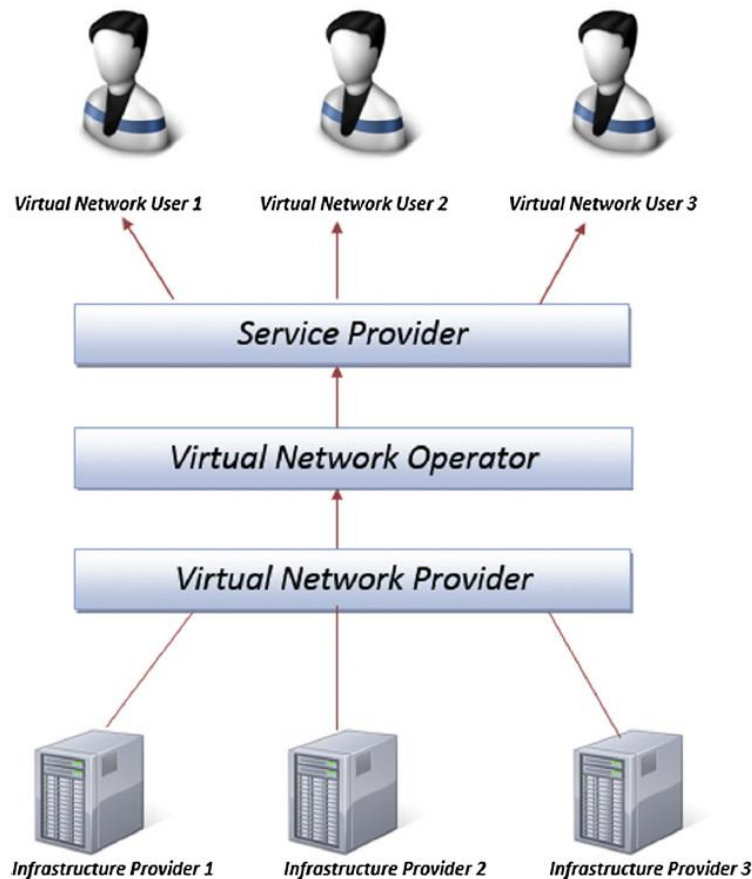
επιπλέον υλικού. Μόλις γίνει η εικονοποίηση, το υφιστάμενο φυσικό δίκτυο χρησιμοποιείται μόνο για προώθηση πακέτων.



Εικόνα 4.1: Η έννοια της εικονοποίησης δικτύου.[31]

Για τον σχεδιασμό αυτής της αρχιτεκτονικής απαιτείται ένα πάροχος υποδομής (Infrastructure Provider, InP) ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη συντήρηση του εκάστοτε φυσικού εξοπλισμού. Σε επόμενο επίπεδο, για τη συναρμολόγηση του εικονικού δικτύου, χρειάζεται ένας πάροχος εικονικού δικτύου (Virtual Network Provider, VNP) όπου μέσω ενός χειριστή (Virtual Network Operator, VNO) θα αιτείται εικονικών πόρων. Για τον πάροχο του εικονικού δικτύου είναι απαραίτητος ένας αριθμός υπηρεσιών (Service provider) που θα χρησιμοποιήσουν τους πόρους για να προσαρμόσουν εξειδικευμένες υπηρεσίες στους χρήστες.

Τέλος, οι τελικοί χρήστες καταναλώνουν τους πόρους του εικονικού δικτύου μέσω υπηρεσιών που παρέχονται απευθείας από το εικονικό δίκτυο ή από κάποιον πάροχο. Τρία στοιχεία είναι απαραίτητα για τη σωστή λειτουργία ενός εικονικού δικτύου: εικονικοί διακομιστές (virtualservers), εικονικοί κόμβοι (virtualnodes) και εικονικοί σύνδεσμοι (virtuallinks). Οι εικονικοί διακομιστές παρέχουν στους τελικούς χρήστες ένα μέσο πρόσβασης σε υπηρεσίες εικονικού δικτύου εφαρμόζοντας εικονικές μηχανές. Οι εικονικοί διακομιστές μπορούν επίσης να εναλλάσσονται μεταξύ εικονικών μηχανών για να επιτρέπουν δυναμικές αλλαγές υπηρεσιών. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη λόγω των συνεχών μεταβαλλόμενων αναγκών των πελατών. Οι εικονικοί κόμβοι αντιπροσωπεύουν φυσικούς κόμβους όπως δρομολογητές (routers) και διακόπτες (switch). Ο κόμβος διαμορφώνεται από έναν χειριστή για την προώθηση δεδομένων. Οι εικονικοί σύνδεσμοι παρέχουν ένα μέσο διαχωρισμού και κοινής χρήσης φυσικών συνδέσμων. [31]



Εικόνα 4.2: Γενικευμένη αρχιτεκτονική εικονοποίησης δικτύου.[31]

Γενικά, το NFV υπόσχεται ότι οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών θα έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες για ευελιξία, μειωμένο κόστος και μεγαλύτερη ταχύτητα στις υπηρεσίες που παρέχουν.[22]

Για την επίτευξη των παραπάνω θα πρέπει να γίνουν τα εξής[22]:

- **Διαχωρισμός του software από το hardware:** Εφόσον τα στοιχεία του δικτύου δεν είναι συνδυασμός του software και του hardware μαζί, τότε είναι πολύ πιο εύκολο να εξελιχθούν και τα δύο ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.
- **Ευέλικτη ανάπτυξη λειτουργιών του δικτύου:** Η ανεξαρτητοποίηση του hardware από το software βοηθάει στο να μπορούν να εκτελούνται ορισμένες λειτουργίες του δικτύου σε διαφορετικούς χρόνους. Αυτό βοηθάει το δίκτυο να παρέχει τις υπηρεσίες του ταχύτερα μέσα από την ίδια φυσική υποδομή.
- **Δυναμική κλιμάκωση:** Ο διαχωρισμός των λειτουργιών του δικτύου σε ξεχωριστά κομμάτια software παρέχει μεγάλη ευελιξία στο να κλιμακώνεται η απόδοση του VNF με πιο δυναμικό τρόπο όταν χρειαστεί.

Για την παροχή των υπηρεσιών θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πολλαπλά NFV. Το NFV απαιτεί μια δομή ενορχήστρωσης<sup>4</sup> που επιτρέπει την εγκατάσταση, την παρακολούθηση και τη λειτουργία της εικονοποίησης των λειτουργιών του δικτύου.

<sup>4</sup> Η ενορχήστρωση είναι η αυτοματοποιημένη διαμόρφωση, ο συντονισμός και η διαχείριση συστημάτων και λογισμικών.

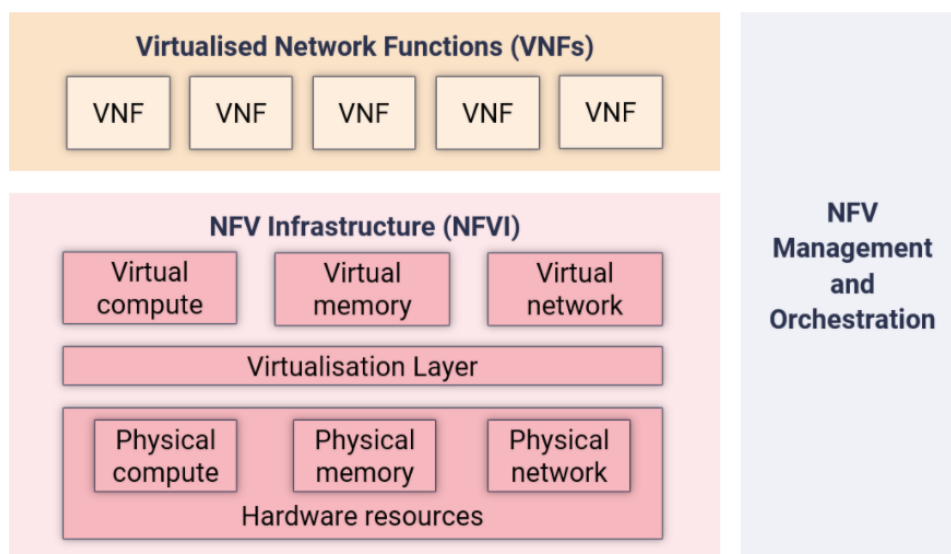
[https://en.wikipedia.org/wiki/Orchestration\\_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orchestration_(computing))

Συνολικά, η δομή αυτού του εικονικού δικτύου αποτελείται από εφαρμογές software για τις λειτουργίες του δικτύου (VNF), hardware (που δηλώνεται ως NFVInfrastructure-NFVI) και έναν διαχειριστή εικονοποίησης/εικονοποίησης και ενορχήστρωσης (ManagementandOrchestration-MANO).[18]

Τα VNF είναι εφαρμογές λογισμικού των λειτουργιών του δικτύου ( routers, firewalls κλπ). Πρόκειται για λειτουργικά μπλοκ μέσα σε μία διαδικτυακή υποδομή που έχουν συγκεκριμένη συμπεριφορά. Οπότε, το VNF είναι το αποτέλεσμα της εφαρμογής μίας λειτουργίας δικτύου (NF) που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας ιδεατούς πόρους. Οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών παρέχουν υπηρεσίες οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλά NF τα οποία εικονοποιούνται και αναπτύσσονται σε εικονικές πηγές όπως για παράδειγμα ένα VM. Το μεγάλο πλεονέκτημα με αυτή τη μέθοδο είναι ότι ο τελικός χρήστης δεν μπορεί να παρατηρήσει κάποια σημαντική διαφορά στις υπηρεσίες που τους παρέχονται των οποίων οι λειτουργίες τρέχουν πάνω σε μία φυσική υποδομή και αυτών που οι λειτουργίες τους τρέχουν πάνω σε μια εικονική μηχανή.[22]

Το NFVI είναι ο συνδυασμός των πόρων του software και του hardware ο οποίος δημιουργεί το περιβάλλον πάνω στο οποίο αναπτύσσονται τα VNFs. Οι φυσικοί πόροι περιλαμβάνουν ειδικό υλικό, αποθηκευτικό χώρο καθώς και μία υποδομή δικτύου που παρέχει την κατάλληλη σύνδεση και ισχύ του επεξεργαστή. Οι εικονικοί πόροι έχουν να κάνουν με ένα “αφαιρετικό σχέδιο” των υπολογιστικών, αποθηκευτικών και δικτυακών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα layer για εικονοποίηση το οποίο διαχωρίζει τους εικονικούς πόρους από τους φυσικούς [22]. Ουσιαστικά στο κατώτερο επίπεδο της υποδομής τοποθετούνται οι φυσικοί πόροι (π.χ υπολογιστικές, αποθηκευτικές και δικτυακές μονάδες). Στην κορυφή αυτών βρίσκεται το επίπεδο εικονοποίησης (Virtualisation Layer), στο οποίο υπάρχει ένας ελεγκτής και οι εικονικοί πόροι του δικτύου (Virtual compute, Virtual memory, Virtual network), οι οποίοι δημιουργούνται με τη βοήθεια του ελεγκτή.

Το NFVMANO παρέχει την λειτουργικότητα που απαιτείται για την κατανομή των VNF, για την διαμόρφωση των VNF και των δομών που τρέχουν πάνω σε αυτά[22]. Με άλλα λόγια, παρέχει την ενορχήστρωση και τη διαχείριση του κύκλου ζωής των φυσικών και λειτουργικών πόρων που υποστηρίζουν την υποδομή την εικονοποίησης.



Εικόνα 4.3: Αρχιτεκτονική NFV.

<https://stlpartners.com/telcocloud/nfv-architectural-framework/>

### 4.1.2 Εικονοποίηση των σταθμών βάσης

Όπως προαναφέρθηκε, το NFV χαρακτηρίζεται από την ευελιξία τοποθέτησης NF σε οποιαδήποτε θέση εντός της τοπολογίας του δικτύου. Η ευελιξία αυτή εισάγει τις επιλογές ενός κεντρικού RAN (C-RAN) και ενός κατακεντρωμένου RAN (D-RAN). Γενικά, η αρχιτεκτονική RAN των παραδοσιακών κυψελωτών δικτύων συνήθως αποτελείται από σταθμούς βάσης, οι οποίοι επεξεργάζονται και μεταδίδουν τα σήματα των κινητών τηλεφώνων, διαβιβάζοντας τα δεδομένα τους στον πυρήνα του δικτύου μέσω του backhaul. Το C-RAN έχει ως στόχο την συγκέντρωση των πόρων στη ζώνη βάσης. Με τη βοήθεια του NFV και hardware μεγάλου όγκου για την επεξεργασία σήματος βάσης, η προσέγγιση C-RAN μπορεί να επεκταθεί στο λεγόμενο Cloud-RAN όπου τα NFs αναπτύσσονται με εικονικό τρόπο. Η λειτουργία του C-RAN έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2.2).

### 4.1.3 Εικονοποίηση του πυρήνα του κινητού δικτύου

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν ανάγκη πλέον από τεράστιο εξοπλισμό ο οποίος είναι αρκετά μεγάλου κόστους. Όταν μια συγκεκριμένη λειτουργία δεν είναι διαθέσιμη, οι πάροχοι πρέπει να αντικαταστήσουν τον υπάρχον εξοπλισμό. Αυτή η ενέργεια αναδεικνύει δυσκολίες προσαρμογής των προσφερόμενων υπηρεσιών. Το Cloud EPC (Cloud Evolved Packet Core) μπορεί δυνητικά να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα εικονοποιώντας το δίκτυο πυρήνα της κινητής επικοινωνίας, ώστε να ανταποκρίνεται στις ολοένα και μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς. Ο ιστόχους εικονοποίησης του EPC περιλαμβάνονται εξής: Mobility Management Entity (MME), Home Subscriber Server (HSS), Serving Gateway (SGW), Packet Data Network Gateway (PGW) και Policy and Charging Rules Function (PCRF) [24]. Η εικονοποίηση είναι δυνατή μόνο για ένα μέρος του κύριου δικτύου, για παράδειγμα μόνο για SGW και PGW. Η υλοποίηση των υπόλοιπων συστατικών του δικτύου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με κανονικό τρόπο.

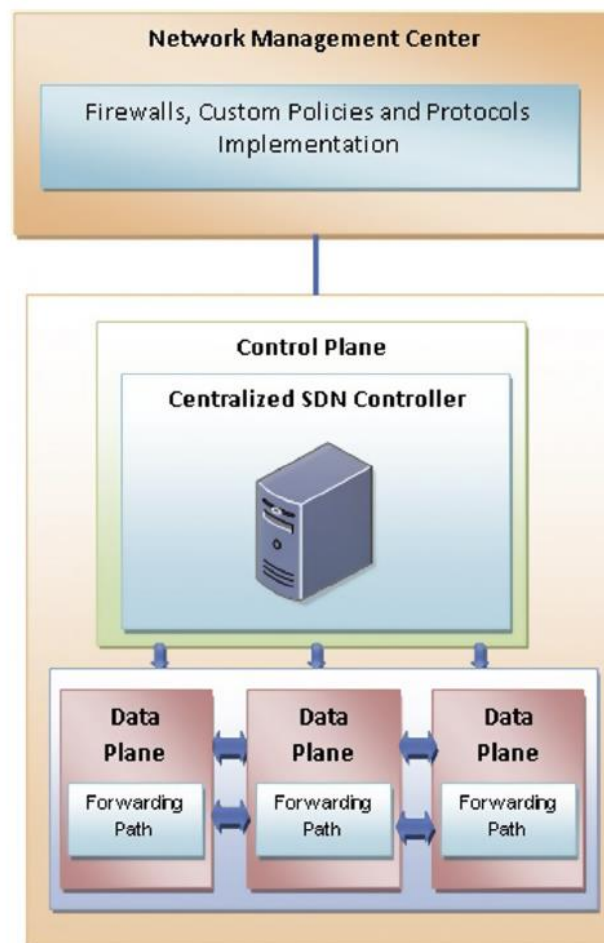
Για την εικονοποίηση του δικτύου χρειαζόμαστε μια εικονική λειτουργία VNF. Ως πρώτο βήμα θεωρούμε την ενσωμάτωση ενός μόνο εικονικού πυρήνα δικτύου κινητών. Αυτό το δίκτυο για κινητές συσκευές αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο υπηρεσιών που λειτουργούν με τη μορφή αλυσίδων (μία αλυσίδα ανά σημείο συγκέντρωσης, TAP). Οι αλυσίδες αυτές είναι ενσωματωμένες στο φυσικό στρώμα του δικτύου. Όλες οι αλυσίδες δευτερευουσών υπηρεσιών εξετάζονται ξεχωριστά για upstream και downstream για την κατεύθυνση της ροής κυκλοφορίας [23]. Για κάθε βασική αλυσίδα υπηρεσιών δικτύου, οι απαιτήσεις εύρους ζώνης (στο επίπεδο χρήστη και ελέγχου) στις εικονικές συνδέσεις μεταξύ των VNF, καθώς και στους πόρους επεξεργασίας, αποθήκευσης και μεταγωγής (throughput) βρίσκονται σε φυσικούς κόμβους.

Συμπερασματικά, το Cloud EPC επιτρέπει την υλοποίηση μιας πιο ευέλικτης, ανθεκτικής και επεκτάσιμης αρχιτεκτονικής πυρήνα. Επίσης, επιτρέπει την έξυπνη κατανομή και διαχείριση των πόρων του υλικού για την εξάλειψη των φαινομένων συμφόρησης, καθώς και δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης καινοτόμων υπηρεσιών για τη δημιουργία νέων πηγών εσόδων (π.χ. M2M επικοινωνίες). Η εικονοποίηση του EPC «ελευθερώνει» τους κατακεντρωμένους πόρους του δικτύου από γεωγραφικά όρια, εξασφαλίζοντας την σταθερότητα και την αξιοπιστία των υπηρεσιών, ακόμη και σε περιπτώσεις αστοχίας, ενώ παράλληλα μειώνει και τις αντίστοιχες συνολικές ζημιές. Τελευταίο και εξίσου σημαντικό,

καθιστά δυνατή την ευέλικτη ανάπτυξη των υφιστάμενων εικονοποιημένων συστατικών SGW και PGW, τοποθετώντας τα για παράδειγμα σε συνθήκες συνύπαρξης με ένα eNodeB.

## 4.2 Software Defined Networking (SDN)

Το Software-Defined Networking (SDN) ή σε ελληνική μετάφραση Δικτύωση καθορισμένη από το λογισμικό είναι μια καινούργια και έξυπνη αρχιτεκτονική που έχει στόχο τον προγραμματισμό του δικτύου. Η κύρια ιδέα πίσω από το SDN είναι να διαχωριστεί το επίπεδο προώθησης/δεδομένων (forwarding/data) από το επίπεδο ελέγχου παρέχοντας ταυτόχρονα δυνατότητα προγραμματισμού στο επίπεδο ελέγχου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Με άλλα λόγια, στόχος είναι να μετακινηθεί το επίπεδο ελέγχου έξω από τους switches ώστε να γίνεται ο έλεγχος των δεδομένων εξωτερικά, μέσω μιας λογικής οντότητας λογισμικού που ονομάζεται ελεγκτής (controller). Από αυτόν και μέσω ενός ασφαλούς καναλιού περιγράφει τα στοιχεία, τις παρεχόμενες λειτουργίες και το πρωτόκολλο διαχείρισης του επιπέδου προώθησης. Με αυτόν τον τρόπο καταγράφονται οι κοινές απαιτήσεις των πινάκων προώθησης για την πλειοψηφία των switches και των πινάκων ροής τους. Αυτή η συγκεντρωτική δομή κάνει τον ελεγκτή κατάλληλο να εκτελέσει τις λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα διευκολύνεται η τροποποίηση της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω του κεντρικού επιπέδου ελέγχου. [29]

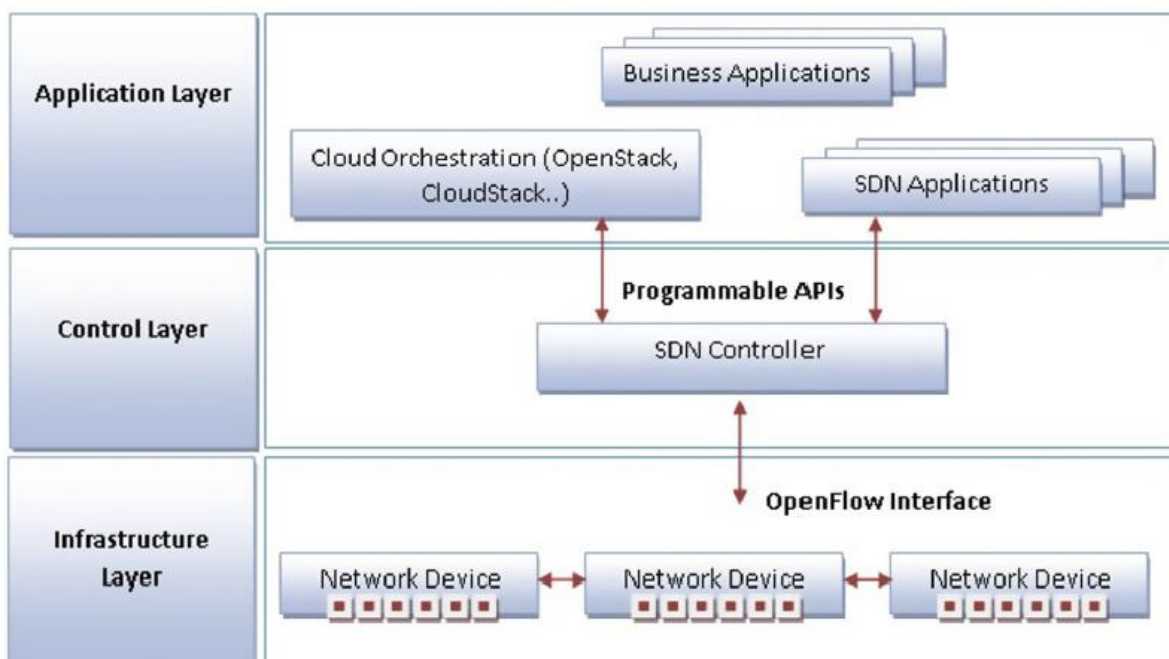


Εικόνα 4.4: Γενικευμένη αρχιτεκτονική SDN. [31]

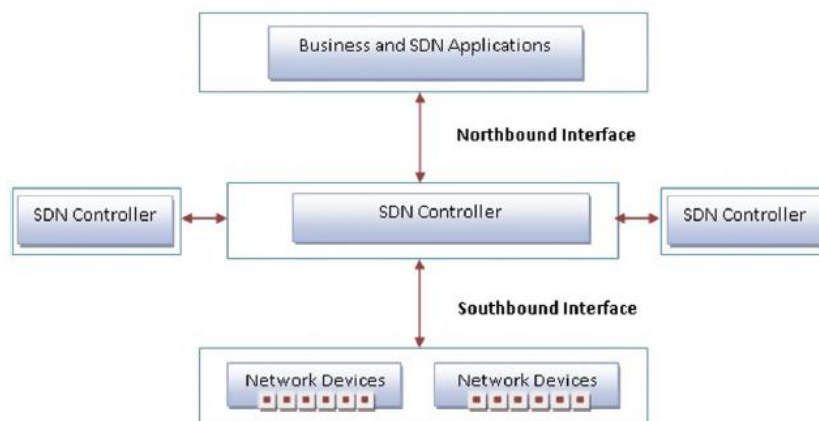
### 4.2.1 Αρχιτεκτονική SDN

Το SDN έχει υιοθετήσει μια σειρά διεπαφών, που εκτείνονται σε δυο διαστάσεις, υψηλού επιπέδου αφαίρεσης για τον προγραμματισμό διαφόρων υπηρεσιών και εφαρμογών σε επίπεδο δικτύου και επίπεδο ελέγχου. Οι διεπαφές προγραμματισμού (API) μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και εφαρμογών είναι γνωστές ως “northbound interfaces” και εκτελούνται στην πλατφόρμα του δικτύου. Οι διεπαφές “northbound” βασίζονται σε λογισμικά ανοικτού κώδικα. Από την άλλη, οι “southbound interfaces” είναι οι διεπαφές μεταξύ επιπέδου ελέγχου και συσκευών δικτύου. Ένα σημαντικό πρωτόκολλο “southbound” είναι το OpenFlow, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων υποδομής του δικτύου και των ελεγκτών του δικτύου, που βασίζονται στο λογισμικό. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει στους χρήστες και στις εφαρμογές να αλληλεπιδρούν απευθείας με το δίκτυο[30]. Η συστηματική αφαίρεση λειτουργιών θα οδηγήσει στην επίτευξη μιας ιεραρχικής αρχιτεκτονικής ελέγχου, στην οποία τα υψηλά επίπεδα ελέγχουν τα χαμηλότερα μέσω καθορισμένων συμπεριφορών, χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζουν την ακριβή υλοποίηση[24].

Η μεταφορά και η επεξεργασία δεδομένων πραγματοποιούνται μέσω των αντίστοιχων πόρων δικτύου. Το ποσό των δεδομένων που αποστέλλονται και λαμβάνονται από τους χρήστες μεταφέρεται με φυσικούς πόρους, οι οποίοι μπορεί να είναι οποιοσδήποτε επίπεδο αφαίρεσης κάτω από τους πόρους που είναι ορατοί στον πελάτη ή σε οποιονδήποτε συγκεκριμένο ελεγκτή SDN. Για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτήν τη λειτουργία, θα αναλύσουμε ένα παράδειγμα ενός Ethernet switch. Από λειτουργικής άποψης οι Ethernet switches μπορούν να καταναμηθούν σε ένα επίπεδο δεδομένων και σε ένα επίπεδο ελέγχου. Το επίπεδο δεδομένων αντιπροσωπεύει έναν πίνακα προώθησης σύμφωνα με τον οποίο προωθούνται τα εισερχόμενα πακέτα σε έναν Ethernet switch. Οι πίνακες προώθησης αποτελούνται από εγγραφές που λένε σε ποια θύρα εξόδου θα πρέπει να αποσταλούν τα λαμβανόμενα πλαίσια Ethernet. Το επίπεδο ελέγχου αναλαμβάνει ένα σύνολο ενεργειών, όπως τη συμπλήρωση αυτών των πινάκων προώθησης. Προκειμένου να εκτελεστεί γρήγορα η επεξεργασία του πλαισίου, αυτές οι ενέργειες υλοποιούνται στο υλικό μαζί με τον πίνακα προώθησης. [29]



Εικόνα 4.5: Αρχιτεκτονική SDN.[31]



Εικόνα 4.6: Κατευθυντικότητα διεπαφών (API) στην αρχιτεκτονική SDN.[31]

Με την εφαρμογή ενός νέου επιπέδου ενορχήστρωσης, το SDN μπορεί να αντιμετωπίσει την πολυπλοκότητα του παραδοσιακού δικτύου. Εξαλείφοντας την πολυπλοκότητα του επιπέδου υποδομής και προσθέτοντας ορατότητα για εφαρμογές και υπηρεσίες, το SDN απλοποιεί τη διαχείριση του δικτύου και φέρνει την εικονοποίηση στο δίκτυο. Αφαιρεί τον έλεγχο ροής από μεμονωμένες συσκευές σε επίπεδο δικτύου. Ο έλεγχος ροής δεδομένων σε ολόκληρο το δίκτυο δίνει στους διαχειριστές τη δύναμη να καθορίζουν ροές δικτύου που πληρούν τις απαιτήσεις συνδεσιμότητας και καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών.[31]

Με την προσέγγιση SDN, οι διαχειριστές δικτύου δεν χρειάζεται πλέον να εφαρμόζουν ξεχωριστές πολιτικές και πρωτόκολλα σε κάθε συσκευή στο δίκτυο ξεχωριστά και οι λειτουργίες επιπέδου ελέγχου διαχωρίζονται από φυσικές συσκευές και εκτελούνται από εξωτερικό ελεγκτή, όπως αναφέραμε και παραπάνω.

Συμπερασματικά, το SDN καθιστά δυνατή τη διαχείριση ολόκληρου του δικτύου μέσω έξυπνων συστημάτων ενορχήστρωσης και παροχής. Η αξία του SDN στα ασύρματα δίκτυα 5G έγκειται συγκεκριμένα στην ικανότητά του να παρέχει νέες δυνατότητες, όπως εικονοποίηση δικτύου (NFV), αυτοματοποίηση και δημιουργία νέων υπηρεσιών πάνω από τους εικονοποιημένους πόρους, σε ασφαλή και αξιόπιστα δίκτυα καθώς και υπηρεσίες cloud.

#### 4.2.2 Το πρωτόκολλο OpenFlow

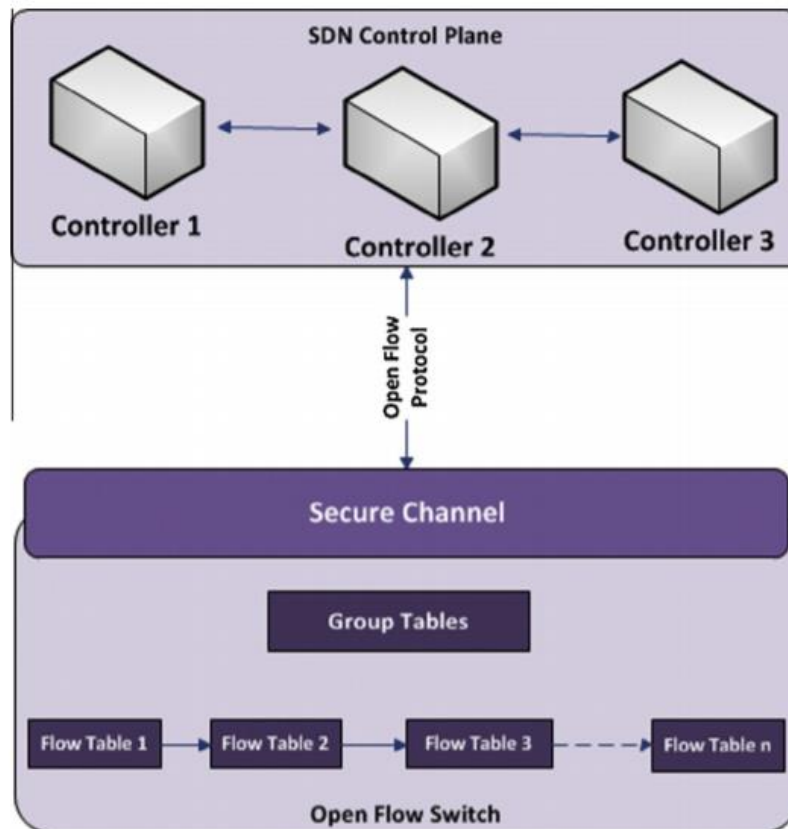
Το OpenFlow είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της southboundδιεπαφής της γενικευμένης αρχιτεκτονικής του SDN. Είναι η πρώτη τυποποιημένη διεπαφή που ορίζεται για τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και επιπέδου δεδομένων της αρχιτεκτονικής SDN [24]. Παρακάτω θα περιγράψουμε πως λειτουργεί αυτό το πρωτόκολλο.

Ένας switch στο OpenFlow περιέχει πολλαπλούς πίνακες ομάδων (group tables). Κάθε πίνακας ροής (flow table) αποτελείται από πολλές καταχωρήσεις. Αυτές οι εγγραφές είναι συγκεκριμένες για μια συγκεκριμένη ροή και περιγράφουν την προώθηση πακέτων, την τροποποίηση πακέτων, την επεξεργασία μια ομάδας του πίνακα και την επεξεργασία αγωγών. Οι καταχωρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ του διακόπτη (switch) και του ελεγκτή (controller) σε ένα ασφαλές κανάλι. Επιπλέον, ο διακόπτης μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις προώθησης για τα εισερχόμενα πακέτα με μια απλή αναζήτηση στις εγγραφές του πίνακα. Οι διακόπτες εκτελούν έλεγχο ακριβούς αντιστοίχισης σε συγκεκριμένα πεδία των εισερχόμενων πακέτων.



Για κάθε εισερχόμενο πακέτο, ο διακόπτης διαπερνά τον πίνακα ροής του για να βρει μια αντίστοιχη εγγραφή. Οι πίνακες αριθμούνται διαδοχικά, ξεκινώντας από το 0. Ο αγωγός επεξεργασίας πακέτων ξεκινά πάντα από τον πρώτο πίνακα. Αρχικά, το πακέτο κάνει ταιριάσματα με τις καταχωρήσεις 0 του πίνακα ροής. Εάν το πακέτο ταιριάζει με μια εγγραφή, εκτελείται το αντίστοιχο σύνολο εντολών.[31]

Επιπροσθέτως, είναι επιτρεπτή η αποστολή πακέτων σε επόμενους πίνακες για περαιτέρω επεξεργασία και επικοινωνία συγκεντρωτικών πληροφοριών (μεταδεδομένων) μεταξύ πινάκων. Οι εγγραφές των πινάκων ροής μπορούν επίσης να προωθούνται σε μια θύρα είτε φυσική είτε εικονική.



Εικόνα 4.7: Η βασική αρχιτεκτονική OpenFlow.[31]

Οι καταχωρήσεις ροής μπορεί επίσης να δείχνουν μια ομάδα, η οποία χρήζει πρόσθετης επεξεργασίας. Ένας πίνακας ομάδων που αποτελείται από εγγραφές προσφέρει πρόσθετες μεθόδους προώθησης (ομαδική επικοινωνία (multicast), broadcast, fast reroute κ.λπ.) Μια καταχώριση ομάδας αποτελείται από ένα αναγνωριστικό, έναν τύπο ομάδας, μετρητές και έναν «κουβά» ενεργειών, όπου κάθε ένας περιέχει τις ενέργειες που είναι προς εκτέλεση και κάποιες σχετικές παραμέτρους. Οι ομάδες επιτρέπουν επίσης την προώθηση πολλαπλών ροών π.χ. προώθηση IP. Μερικές φορές το πακέτο μπορεί να μην ταιριάζει με μια εγγραφή ροής σε οποιονδήποτε από τους πίνακες ροής. Σε περίπτωση απώλειας, η ενέργεια που θα ακολουθήσει εξαρτάται από τη διαμόρφωση του πίνακα. Από προεπιλογή, το πακέτο αποστέλλεται στον ελεγκτή μέσω του ασφαλούς καναλιού. Μια άλλη επιλογή είναι να οδηγηθούμε σε απόρριψη του πακέτου.[31]

Μέσω του SDN, η διαχείριση και η διαμόρφωση δικτύων γίνεται πιο δυναμική και ευέλικτη λόγω της υποδομής αυτής. Όμως, η περιοχή δικτύωσης δεν αντιμετωπίζει μόνο την

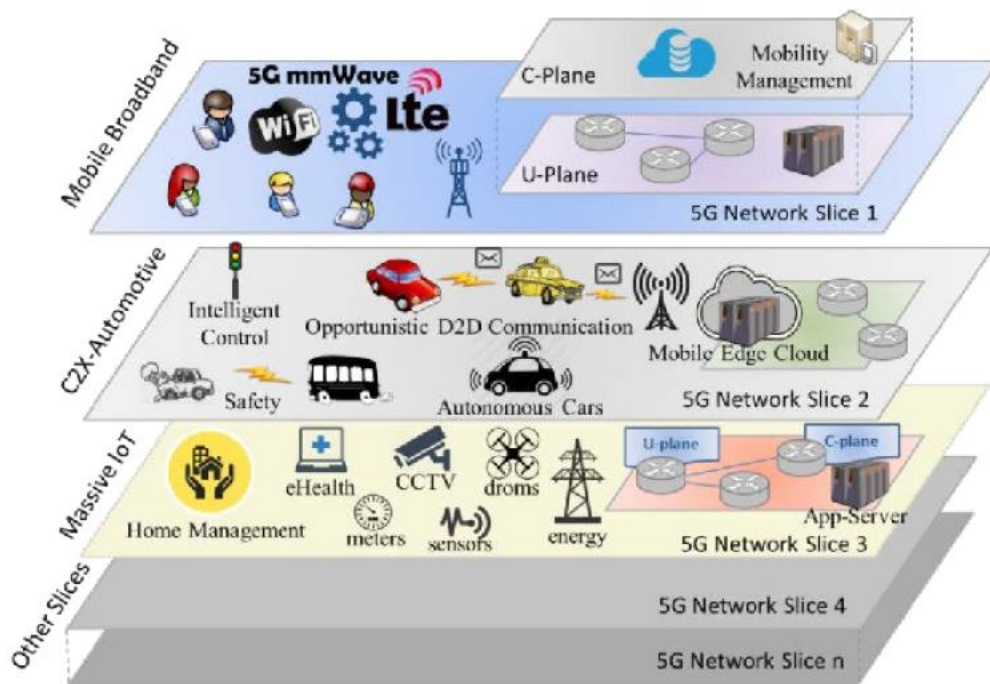
εμφάνιση του SDN, αλλά και την εικονοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Έτσι SDN και NFV συνδέονται για τη δημιουργία ενός αυτοματοποιημένου, επεκτάσιμου και ευέλικτου περιβάλλοντος δικτύωσης και cloud.

### 4.3 Network Slicing

---

Τα συστήματα Πέμπτης γενιάς για να ικανοποιήσουν τις πολυάριθμες απαιτήσεις των καταναλωτών στους τομείς της υγείας, της ενημέρωσης, της βιομηχανίας, των μεταφορών κ.λπ και τις απαιτήσεις απόδοσης, χρειάζονται βελτιώσεις όσον αφορά τις αρχιτεκτονικές τους. Μέσω των προαναφερθέντων τεχνολογιών όπως το Software Defined Networking (SDN) και το Network Function Virtualization (NFV), παρέχεται η προγραμματισσιμότητα και η ευελιξία που απαιτούνται για να δημιουργηθούν πολλαπλά λογικά, εικονικά κυρίως, δίκτυα, στην κορυφή ενός κοινού δικτύου. Αυτά τα λογικά δίκτυα αναφέρονται ως φέτες δικτύου (network slices). Στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής συστήματος 3GPP 5G, κάθε τεμάχιο δικτύου (φέτα) περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά που χρειάζονται για να υλοποιήσει μια συγκεκριμένη υπηρεσία δικτύου και κατά συνέπεια να εξυπηρετήσει μια συγκεκριμένη συσκευή. Ένα τεμάχιο δικτύου, λοιπόν, ορίζεται ως ο συνδυασμός κάποιων λειτουργιών, εφαρμογών καθώς και υπηρεσιών cloud (physical, virtual κτλ.) τα οποία βοηθούν ώστε να δημιουργηθεί ένα προφίλ δικτύου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (bandwidth, latency, processing, security κτλ.) για την αποτελεσματικότερη εκτέλεση κάποιας απαιτούμενης λειτουργίας ή εφαρμογής. Το Network Slicing πρόκειται για μια τεχνολογία που επιτρέπει στους παρόχους δικτύου να χτίσουν πολλά εικονικά δίκτυα πάνω σε μια κοινή υποδομή έτσι ώστε να μπορούν να παρέχονται υπηρεσίες με ταχύτητα καθώς και ελαστικότητα όσον αφορά τις προδιαγραφές τους[22].

Κάθε τμήμα του δικτύου θα λειτουργεί ως ένα ανεξάρτητο δίκτυο στο οποίο διαχειριστής θα είναι είτε ο πάροχος δικτύου είτε κάποιος εκμισθωτής πελάτης του παρόχου. Ως εκ τούτου, αντί να έχουμε πολλαπλές διαφορετικές δικτυακές υποδομές χρησιμοποιούμε ένα εικονικό δίκτυο. Πρακτικά, ένα τεμάχιο δικτύου μπορεί να παρέχει σημαντικές υπηρεσίες σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, ένα άλλο να εξυπηρετεί συσκευές του Internet of Things (IoT) και ένα άλλο να απευθύνεται σε πελάτες MNNO (Mobile Virtual Network Operator)[22] κτλ. Μια άλλη λειτουργία ενός network slice είναι το ότι επιτρέπει στους επαγγελματίες που διαχειρίζονται το δίκτυο να αφιερώνουν ακριβώς όσους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους χρειάζονται ανά network slice. Αυτό αυτόματα βοηθάει στην αποδοτική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Για παράδειγμα, μια «φέτα» μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να παρέχει χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλή ταχύτητα δεδομένων ενώ μια άλλη «φέτα» μπορεί να ρυθμιστεί για να παρέχει κυρίως ασφάλεια και εγγύηση λήψης ενός μηνύματος.



Εικόνα 4.8: Παράδειγμα NetworkSlicing. [22]

#### 4.3.1 Σενάρια χρήσης

Ως γενικό ορισμό της «φέτας» (slice) θεωρείται ένα σύνολο ροών που ανήκουν σε διαφορετικούς χρήστες. Μια ροή πακέτων είναι μια οντότητα η οποία μπορεί να έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS και να είναι μέλος ενός ενιαίου slice. Για παράδειγμα, μια ροή σε ένα δίκτυο IP θα μπορούσε να οριστεί από την πλειάδα που αποτελείται από τις διευθύνσεις IP και τις θύρες IP πηγής και προορισμού[33].

Στο πλαίσιο των ασύρματων δικτύων, υπάρχουν δύο μεγάλα σενάρια για τη χρήση των slices:

##### 4.3.1.α Quality of Service Slicing

Ο τεμαχισμός με βάση την ποιότητα υπηρεσίας βασίζεται στη δημιουργία slices για την παροχή διαφορετικών υπηρεσιών και την εξασφάλιση κάποιου τύπου QoS μέσα στο κάθε slice. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργηθεί ένα slice για να παρέχεται εξυπηρέτηση σε μια συγκεκριμένη ομάδα συσκευών με τις ίδιες απαιτήσεις (αισθητήρες ή smartphones) ή ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής (π.χ. ένα slice για υπηρεσίες πολυμέσων) [35].

##### 4.3.1.β Infrastructure Sharing Slicing

Ο τεμαχισμός με βάση την κοινή χρήση της υποδομής βασίζεται στην ιδέα της εικονοποίησης δικτύου. Υπάρχει ένας ενοικιαστής (π.χ. ένας Mobile Virtual Network Operator - MVNO), στον οποίο δίνεται ένα slice του δικτύου. Ο εκμισθωτής (tenant) έχει τον πλήρη έλεγχο της υποδομής δικτύου και των λειτουργιών του εντός του συγκεκριμένου slice [35]. Ένα σενάριο για την εφαρμογή του QoS Slicing είναι όταν ένας μελλοντικός φορέας εκμετάλλευσης δικτύου 5G προσφέρει διαφοροποιημένους τύπους υπηρεσιών ανάλογα με την περίπτωση ειδικής χρήσης. Για παράδειγμα, μια υπηρεσία υψηλού ρυθμού απόδοσης για smartphones, μια υπηρεσία για επικοινωνίες Internet of Things (IoT) ή Machine to Machine (M2M) επικοινωνίες είναι κρίσιμες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Για να

αντιμετωπιστούν αυτές οι απαιτήσεις, ορίζονται ξεχωριστά και απομονωμένα slices, καθένα από τα οποία παρέχει υπηρεσία σε μια συγκεκριμένη ομάδα χρηστών ή συσκευών.

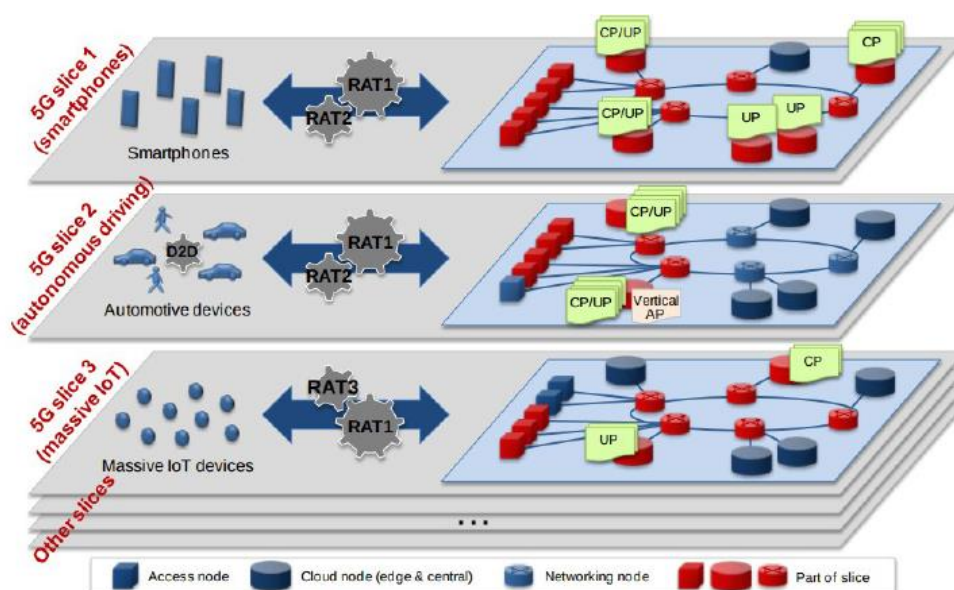
Μια άλλη πτυχή του ορισμού ενός slice σχετίζεται με το “πού” στο δίκτυο ή “μέχρι ποιο επίπεδο” θα πρέπει να εφαρμοστεί η ιδέα του τεμαχισμού (slicing). Μια καλή ταξινόμηση αυτής της πτυχής του τεμαχισμού αποτελούν τα παρακάτω επίπεδα [33]:

- **Τεμαχισμός σε επίπεδο φάσματος(Spectrum-levelslicing):** Το φάσμα μπορεί να τεμαχιστεί με πολυπλεξία χρόνου, χώρου ή συχνότητας ή με επικάλυψη πρόσβασης. Επιπλέον, μπορεί να θεωρηθεί ως εικονοποίηση σύνδεσης (linkvirtualization).
- **Τεμαχισμός σε επίπεδο υποδομής(Infrastructure-levelslicing):** Είναι ο τεμαχισμός φυσικών στοιχείων δικτύου όπως: κεραίες, σταθμοί βάσης (BSs), επεξεργαστές, μνήμη. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την εικονοποίηση.
- **Τεμαχισμός σε επίπεδο δικτύου(Network-level slicing):** Πρόκειται για τον τεμαχισμό όλων των υποδομών δικτύου.

#### 4.3.1.γNext Generation Mobile Networks (NGMN)

Στο πλαίσιο του 5G το network slicing είναι ένα καινούργιο σενάριο που προτάθηκε από το NGMN. Σε αυτό, ένα network slice μπορεί να υποστηρίξει τις υπηρεσίες επικοινωνίας ενός συγκεκριμένου τύπου σύνδεσης, αξιοποιώντας αναλόγως το control-plane και το user-plane. Ένα slice αποτελείται από μία συλλογή λειτουργιών 5G δικτύου και ρυθμίσεων RAT όπου συνδυάζονται προκειμένου να εξυπηρετήσουν ακριβώς τις απαιτήσεις των πελατών[22]. Έτσι το slicing μπορεί να ενώσει όλες τις οντότητες ενός δικτύου ώστε να είναι λειτουργικές.

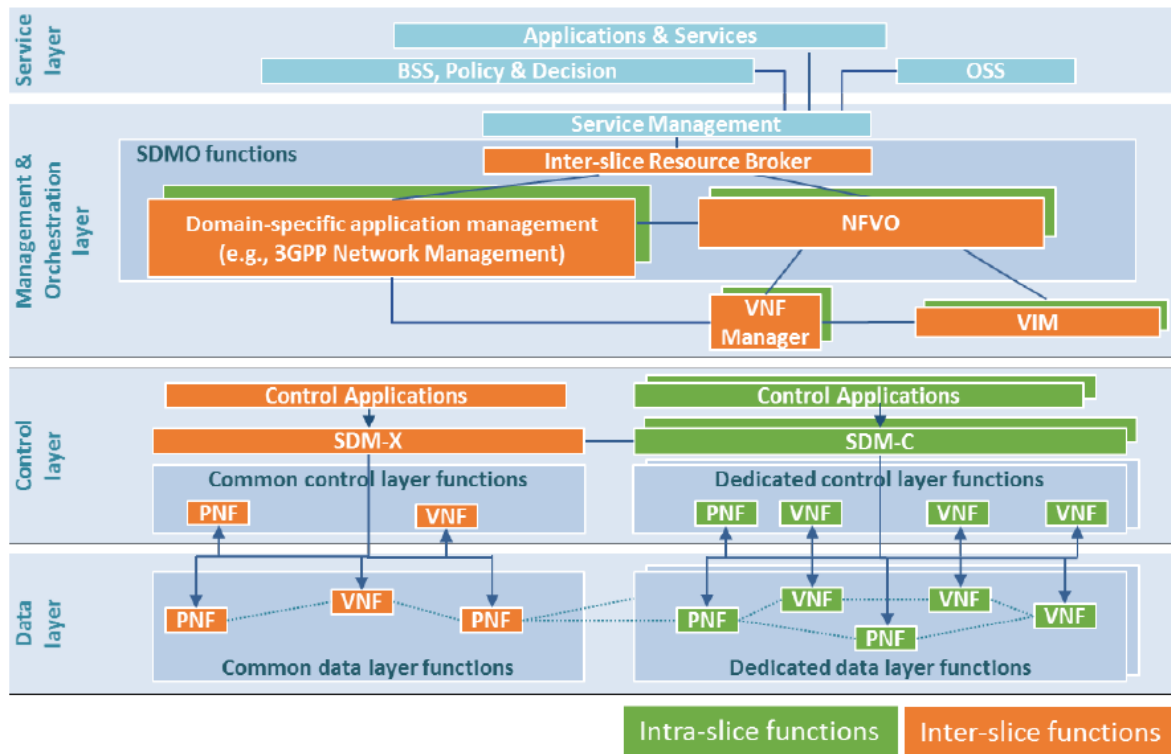
Προφανώς, όλα τα slices δεν εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες. Ο σκοπός καθενός μεμονωμένου «κομματιού» είναι να μπορεί να εξυπηρετήσει ακριβώς τις απαιτούμενες λειτουργίες του μια συγκεκριμένη στιγμή, καθώς και να αποφευχθεί η περιττή σπατάλη άλλων λειτουργικών πόρων του δικτύου (που συμβαίνει συνήθως σε μια “onesizefitsall” προσέγγιση). Βέβαια, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου μερικά slices χρησιμοποιούν από κοινού κάποιους πόρους του δικτύου. Ένα παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η χρήση ενός radioscheduler ο οποίος δεσμεύει πόρους για κάθε slice που του είναι απαραίτητοι.



Εικόνα 4.9: NetworkSlicing στην ίδια φυσική υποδομή. [22]

### 4.3.2 Αρχιτεκτονική Network Slicing

Σύμφωνα με το 5G-PPP ο τεμαχισμός δικτύου περιλαμβάνει ένα υποσύνολο πόρων του εικονικού δικτύου και το λογικό δίκτυο. Το τελευταίο, περιέχει όλες αυτές τις συναρτήσεις (NF) που χρησιμοποιούν αυτούς τους πόρους.



Εικόνα 4.10: Αρχιτεκτονική Network Slicing. [22]

Σύμφωνα με την Εικόνα 22, η αρχιτεκτονική Network Slicing χωρίζεται στα παρακάτω επίπεδα [22]:

- **Service layer** (Επίπεδο υπηρεσιών): Αποτελείται από υπηρεσίες υποστήριξης επιχειρήσεων (BSS) και business-level πολιτικές, από εφαρμογές που εκτελούνται από τον χρήστη καθώς και από το OSS.
- **Management and Orchestration layer** (Επίπεδο διαχείρισης και ενορχήστρωσης): Εμπεριέχει τις λειτουργίες VIM, τον χειριστή VNF και το NFVO. Ένας Inter-Slice broker διαχειρίζεται τους cross-slice πόρους και αλληλεπιδρά με την λειτουργία του Service Management. Επίσης το MANO layer φιλοξενεί λειτουργίες που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση εφαρμογών όπως είναι στο 3GPP τα Element Manager και ο Network Management.
- **Control layer** (Επίπεδο ελέγχου): Το επίπεδο ελέγχου είναι υπεύθυνο για τους δύο βασικούς controllers που είναι ο SDM-X (Software-Defined Mobile Network Coordinator) και ο SDM-C (Software-Defined Mobile Network Controller). Αυτοί οι δύο χειριστές αναλαμβάνουν να διαχειρίζονται τα NF ακολουθώντας τις τακτικές πρωτοκόλλου του SDN. Ουσιαστικά μετατρέπουν τις αποφάσεις των control application σε εντολές για τα VNF και PNF.
- **Multi-Domain Network Operating System Facilities** (Εγκαταστάσεις λειτουργικού συστήματος πολλαπλών τομέων): Είναι υπεύθυνο για να την δέσμευση πόρων δικτύου (ψηφιακών και μη) και την διατήρηση του ίδιου του δικτύου σε μία σταθερή κατάσταση.

- **Data layer**(*Επίπεδο δεδομένων*): Περιλαμβάνει τα PNF και VNF που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τα δεδομένα.

## 4.4 UltraDenseNetwork (UDN)

Στα κυψελοειδή δίκτυα 5G, οι μαζικές κεραιές MIMO ενσωματώνονται σε σταθμούς βάσης (BS), όπου εκατοντάδες κεραιές χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ασύρματης κυκλοφορίας, gigabit επιπέδου. Επιπροσθέτως, η τεχνολογία χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeterwave) παρέχει εκατοντάδες εύρη ζώνης megahertz για ασύρματες μεταδόσεις. Με κίνητρο τις παραπάνω δύο τεχνολογίες, θα αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός μικρών κυψελών με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν πυκνά κυψελοειδή δίκτυα 5G (UDN).[36]

Στη συμβατική κυψελοειδή αρχιτεκτονική, το δίκτυο ακολουθεί δέντροειδή δομή όπου κάθε μακροκυψέλη (macrocell) του BS ελέγχεται από τους διαχειριστές BS στο κεντρικό δίκτυο και όλη η κίνηση οπισθόζευξης(backhaul) προωθείται στο κεντρικό δίκτυο από τη δεδομένη πύλη. Προκειμένου να υποστηριχθεί η ανάπτυξη μικροκυττάρων (π.χ., ανάπτυξη femtocell, picocell και hotspot), παρουσιάζεται μια υβριδική αρχιτεκτονική για συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα με ανάπτυξη μικροκυττάρων. Σε αυτήν την υβριδική αρχιτεκτονική δικτύου, το δίκτυο μικροκυττάρων διαμορφώνεται επίσης ως ένας τύπος αρχιτεκτονικής δικτύου δέντρων, όπου κάθε μικροκυψέλη (microcell) του BS ελέγχεται από διαχειριστές BS microcell στο κεντρικό δίκτυο και η κίνηση backhaul των BS microcell προωθείται στο κεντρικό δίκτυο από το ευρυζωνικές συνδέσεις ή συνδέσεις οπτικών ινών. Η κάλυψη των μικροκυττάρων επικαλύπτεται με την κάλυψη των μακροκυττάρων. Σε σύγκριση με τα macrocell, τα microcell μπορούν να παρέχουν ασύρματη μετάδοση υψηλής ταχύτητας σε σενάρια εσωτερικού και hotspot. Τόσο το macrocell όσο και το microcell μπορούν να μεταδώσουν ανεξάρτητα δεδομένα χρήστη και δεδομένα διαχείρισης σε συνδεδεμένους χρήστες. Οι χρήστες μπορούν να παραδώσουν μακροκύτταρα και μικροκύτταρα σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους. Επιπλέον, η διαδικασία παράδοσης ελέγχεται από διαχειριστές macrocell και microcell στο κεντρικό δίκτυο. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική δικτύου, το δίκτυο μικροκυττάρων είναι συμπληρωματικό του συμβατικού δικτύου μακροκυττάρων για να καλύπτει την υψηλή μετάδοση σε περιοχές όπως εσωτερικούς χώρους ή σε σημεία hotspot.[36]

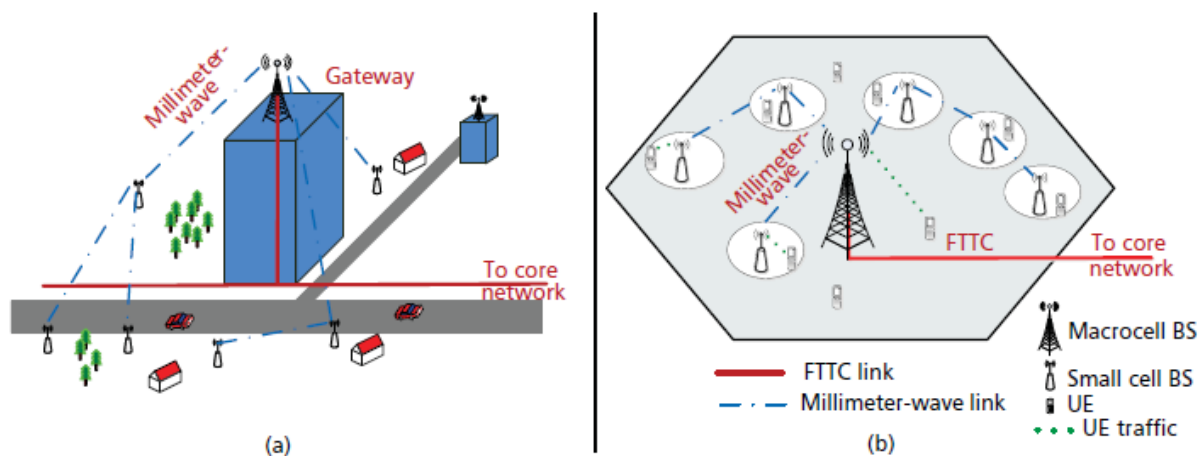
Ωστόσο, είναι δύσκολο να προωθηθεί η κυκλοφορία backhaul για κάθε microcell μέσω του ευρυζωνικού Internet ή των οπτικών ινών, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και τις γεωγραφικές προκλήσεις ανάπτυξης σε αστικά περιβάλλοντα. Τα microcells, συνήθως, δεν μπορούν να μεταδώσουν απευθείας την ασύρματη κίνηση backhaul στη δεδομένη πύλη λόγω του ότι χρησιμοποιούν mmwave τεχνολογία και περιορίζουν την απόσταση της ασύρματης μετάδοσης. Ως εκ τούτου, η ασύρματη κίνηση backhaul πρέπει να μεταδοθεί στη δεδομένη πύλη μέσω συνδέσεων πολλαπλών hop (multihoplinks). Κατά συνέπεια, η αρχιτεκτονική του δικτύου διανομής είναι μια λογική λύση για τα πολύ πυκνά κυψελοειδή δίκτυα 5G. Στα σενάρια των Ultra-Dense 5G δικτύων, για να επιλυθεί το πρόβλημα του συχνού handover του κινητού χρήστη από ένα cell στο άλλο, το macrocell διαμορφώνεται μόνο για να μεταδώσει τα δεδομένα διαχείρισης για τον έλεγχο του handover του χρήστη και το microcell αναλαμβάνει τη μετάδοση των δεδομένων του χρήστη.

Επομένως, το δίκτυο των microcells δεν αποτελεί συμπλήρωμα του δικτύου των macrocells. Τα UDN αποτελούνται από micro και macrocells, καθιστώντας την πύκνωση του δικτύου ως μια βασική αρχιτεκτονική των 5G δικτύων. Με βάση τη διαμόρφωση της πύλης

backhaul προτείνονται δυο αρχιτεκτονικές UDN: μιας πύλης (single gateway) και πολλαπλών πυλών (multiple gateways).

#### 4.4.1 UDN μονής πύλης

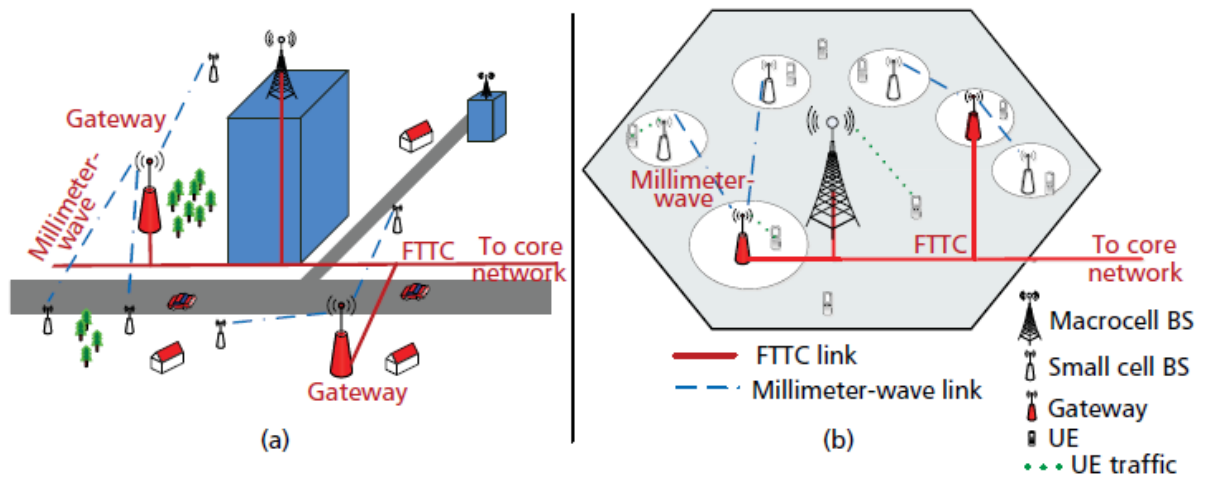
Στην Εικόνα 4.11 απεικονίζεται το σενάριο χρήσης μιας μόνο πύλης στην μάκροκυψέλη. Η πύλη διαμορφώνεται στο macrocell BS το οποίο συνήθως έχει αρκετό χώρο για να εγκαταστήσει μαζικές κεραιές χιλιοστομετρικού κύματος (massive MIMO millimeter wave) για την ασύρματη λήψη της backhaul κυκλοφορίας από τα small cells στο macrocell. Η κίνηση backhaul του small cell BS μεταδίδεται στο υφιστάμενο small cell BS με συνδέσεις χιλιοστομετρικών κυμάτων. Όλη η backhaul κυκλοφορία των small cells προωθείται τελικά στο macrocell BS μέσω συνδέσεων πολλαπλών χιλιοστομετρικών κυμάτων. Στο τέλος, η backhaul κυκλοφορία συγκεντρώνεται στο macrocell BS και προωθείται στο κεντρικό δίκτυο με οπτικές ίνες (FTTC - fiber to the cell).



Εικόνα 4.11: UDN μονής πύλης: a) Σενάριο ανάπτυξης b) Αρχιτεκτονική. [36]

#### 4.4.2 UDN πολλαπλών πυλών

Στην κατακεκομμένη αρχιτεκτονική UDN, η ανάπτυξη πολλαπλών πυλών είναι ευέλικτη για την πρόωση της κυκλοφορίας backhaul στο κεντρικό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση που απεικονίζεται και στην Εικόνα 4.12, οι πύλες αναπτύσσονται σε πολλαπλά small cells BSs σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας backhaul αλλά και της γεωγραφίας του χώρου. Η κυκλοφορία backhaul του small cell BS αναμεταδίδεται στο υφιστάμενο small cell BS με συνδέσεις χιλιοστομετρικών κυμάτων. Διαφορετικά με τη διαμόρφωση μιας ενιαίας πύλης, η κίνηση backhaul των small cells θα κατανομηθεί σε πολλαπλές πύλες στο macrocell. Η backhaul κυκλοφορία που συγκεντρώνεται στο συγκεκριμένο small cell BS π.χ. στη πύλη (gateway), τελικά προωθείται στο κεντρικό δίκτυο μέσω συνδέσεων FTTC.



Εικόνα 4.12:UDNπολλαπλών πυλών:α) Σενάριο ανάπτυξης β) Αρχιτεκτονική. [36]

Τύποι δικτύων	Συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα	UDN με μία ενιαία πύλη	UDN με πολλαπλές πύλες
Αρχιτεκτονική δικτύου	Κεντροκοποιημένη	Κατανεμημένη [37]	Κατανεμημένη
Ανάπτυξη πύκνωσης - στόχοι	Macrocells [38]	Small cells	Small cells
Λόγοι ανάπτυξης της πύκνωσης	Να ικανοποιήσει τις ανάγκες των ανθρώπων για επικοινωνία σε αστικές περιοχές	Τεχνολογίες massive MIMO κεραίας και millimeter wave επικοινωνίας [39]	Τεχνολογίες massive MIMO κεραίας και millimeter wave επικοινωνίας
Κάλυψη μεταξύ macrocells και microcells	Επικάλυψη [39]	Χωρίς επικάλυψη	Χωρίς επικάλυψη
Λειτουργίες των macrocell και microcell	Ίδια [39]	Macrocells μεταδίδουν δεδομένα διαχείρισης, microcells μεταδίδουν δεδομένα χρήστη	Macrocells μεταδίδουν δεδομένα διαχείρισης, microcells μεταδίδουν δεδομένα χρήστη
Ανάπτυξη Microcells/small cells	Σε μερικές περιοχές	Για όλα τα σενάρια	Για όλα τα σενάρια
Backhaul method	Η κυκλοφορία backhaul προωθείται απευθείας στο κεντρικό δίκτυο από την πύλη [37]	Η κυκλοφορία backhaul μεταδίδεται στην πύλη μέσω ασύρματων συνδέσεων πολλαπλών συνδέσεων	Η κυκλοφορία backhaul μεταδίδεται στην πύλη μέσω ασύρματων συνδέσεων πολλαπλών συνδέσεων
Αριθμός backhaul πυλών σε ένα macrocell	Μία	Μία	Πολλαπλές



Πλεονεκτήματα	Ευέλικτη ανάπτυξη και χαμηλό κόστος [40]	Πανταχού παρούσα και υψηλής ταχύτητας μετάδοσης [38]	Πανταχού παρούσα και υψηλής ταχύτητας μετάδοσης
Μειονεκτήματα	Μερική ανάπτυξη μικρών κελιών, χαμηλή χωρητικότητα δικτύου, άνιση κατανομή των επιτευξιμών ρυθμών μετάδοσης [38]	Χαμηλή κινητικότητα και συμφόρηση της χωρητικότητας του backhaul	Χαμηλή κινητικότητα και υψηλό κόστος

**Πίνακας 4.1:** Σύγκριση συμβατικών κυψελοειδών δικτύων και 5G UDN. [36]

Ο πίνακας σύγκρισης 4.1 μας δείχνει ότι η αρχιτεκτονική των συμβατικών κυψελοειδών δικτύων είναι ουσιαστικά μια κεντροκοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου και κάποια microcells αναπτύσσονται πυκνά σε μερικές περιοχές, π.χ. αστικές περιοχές, για την ικανοποίηση των αυξημένων απαιτήσεων επικοινωνίας των χρηστών. Όταν τα 5G smallcell του σταθμού βάσης εξοπλίζονται με μαζικές κεραίες MIMO και τεχνολογίες επικοινωνίας χιλιομετρικών κυμάτων, η περιοχή κάλυψης με smallcells πρέπει να μειωθεί. Για να επιτευχθεί η απρόσκοπτη κάλυψη, τα 5G κυψελοειδή δίκτυα πρέπει να αναπτυχθούν βασισμένα σε μια αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό πυκνών μικρών κυψελών. Έτσι, τα εξαιρετικά πυκνά κυψελοειδή δίκτυα 5G (UDN) έρχονται για να παρέχουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε όλη την περιοχή. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική των εξαιρετικά πυκνών κυψελοειδών δικτύων είναι μια αρχιτεκτονική κατανομημένου δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ανάπτυξης και γεωγραφικής κάλυψης. Κάθε σταθμός βάσης (BS) σε συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα έχει την ίδια λειτουργία και έτσι υπάρχει επικάλυψη μεταξύ macrocell και microcell. Για τα UDN, τα macrocells BS μεταδίδουν τα δεδομένα διαχείρισης και τα smallcells BS αναλαμβάνουν τη μετάδοση των δεδομένων των χρηστών. Δεν υπάρχει η αλληλοεπικάλυψη για τη λειτουργία των macrocells και των smallcells. Εκτός αυτού, τα 5G UDN με ενιαία πύλη είναι οικονομικά αποδοτικά, αλλά υστερούν στην περίπτωση κυκλοφοριακή συμφόρηση στο backhaul (bottleneck). Επιπλέον, με πολλαπλές πύλες έχουν υψηλό κόστος για την ανάπτυξη των smallcells. Σε σύγκριση με τα συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα, τα UDN έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν περιορισμένη λειτουργικότητα και κινητικότητα ακόμη και όταν ένα μεγάλο μέρος έχει υποστεί καταστροφή ή έχει καταστεί ανενεργό. Ο σκοπός αυτής της υποβάθμισης, της λεγόμενης “gracefuldegradation”, είναι η πρόληψη μιας καταστροφικής αποτυχίας.

#### 4.4.3 Μοντέλο Πύκνωσης Δικτύου

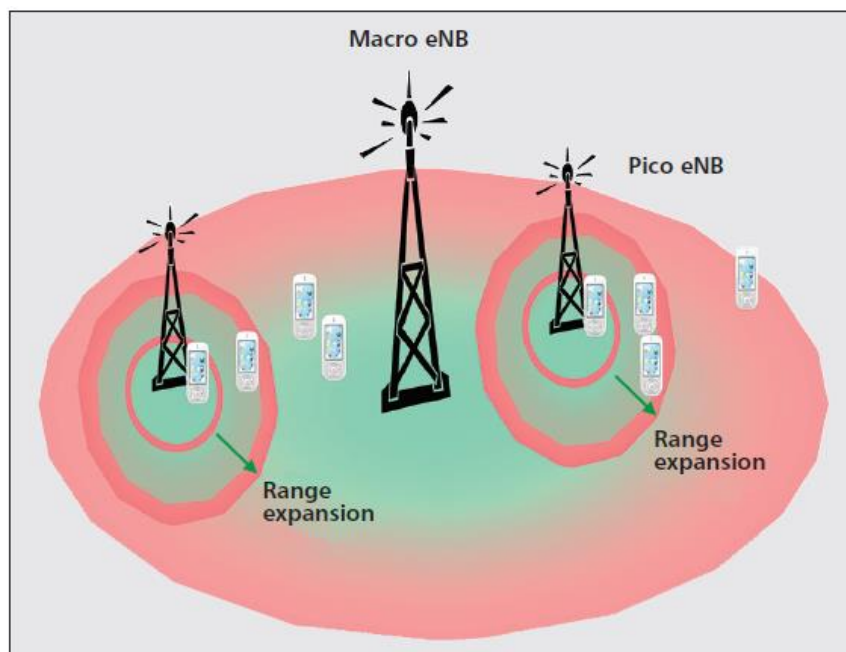
Σύμφωνα με τον Martin Cooper [41], η αύξηση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του αριθμού των ασύρματων κόμβων του δικτύου, στην αυξημένη χρήση του φάσματος και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των συνδέσεων. Για μια απλή απεικόνιση των βασικών παραγόντων που διέπουν την απόδοση ενός κυψελοειδούς συστήματος, έχουμε την ακόλουθη εξίσωση χωρητικότητας ενός καναλιού με AWGN. [41]:

$$R < C = m \left( \frac{BW}{n} \right) \log_2 \left( 1 + \frac{S}{1 + N} \right) \quad (4.1)$$

όπου  $R$  απόδοση ενός χρήστη σε ένα κυψελοειδές σύστημα,  $BW$  το εύρος ζώνης του σήματος του σταθμού βάσης, η ακέραια παράμετρος  $n$  (συντελεστής φορτίου) δηλώνει τον αριθμό

των χρηστών που μοιράζονται τον συγκεκριμένο σταθμό βάσης, η ακέραια παράμετρος  $m$  (συντελεστής χωρικής πολυπλεξίας) υποδηλώνει τον αριθμό των χωρικών ρευμάτων που μεταδίδονται μεταξύ ενός σταθμού βάσης και της συσκευής του χρήστη και  $S$  η ισχύς σήματος. Επιπλέον, τα  $I$  και  $N$  υποδηλώνουν τη δύναμη παρεμβολής και θορύβου, αντίστοιχα, στον δέκτη. Να σημειωθεί ότι, το εύρος ζώνης σήματος  $W$ , κάθε σταθμού βάσης, μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας πρόσθετο φάσμα, το οποίο οδηγεί σε γραμμική αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων. Ο συντελεστής φορτίου  $n$  ( $\geq 1$ ) μπορεί να μειωθεί μέσω της διαίρεσης των κυψελών, πράγμα που συνεπάγεται την ανάπτυξη ενός μεγαλύτερου αριθμού σταθμών βάσης ώστε να εξασφαλίζει ότι η κυκλοφορία του χρήστη κατανέμεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα μεταξύ όλων των σταθμών βάσης. Ο συντελεστής χωρικής πολυπλεξίας  $m$  μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας έναν μεγαλύτερο αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης και στις συσκευές των χρηστών. Η διάσπαση των κυψελών έχει την ως αποτέλεσμα τη μείωση της απώλειας διαδρομής μεταξύ μιας συσκευής χρήστη και των σταθμών βάσης, η οποία αυξάνει τόσο τα επιθυμητά όσο και τα παρεμβατικά επίπεδα σήματος  $S$  και  $I$ , πράγμα που επηρεάζει ουσιαστικά και την επίδραση του θορύβου  $N$ . Συμπερασματικά, η μείωση των παρεμβολών είναι πρωταρχικής σημασίας για τη βελτίωση της απόδοσης των συνδέσεων στα σύγχρονα κυψελοειδή συστήματα. Αυτό απαιτεί συνδυασμό πόρων μεταξύ πομπών και προηγμένης επεξεργασίας σημάτων στους δέκτες.

Όλα τα παραπάνω στοιχεία για την ενίσχυση της ασύρματης χωρητικότητας αποτελούν τον ορισμό “NetworkDensification” (πύκνωση δικτύου). Η τεχνική networkdensification περιλαμβάνει τη χωρική πυκνότητα (densificationoverspace), όπου εγκαθιστούμε σε μεγάλη πυκνότητα νέα smallcells (π.χpicocells, femtocells) και τη συχνοτική πυκνότητα (densificationoverfrequency ή spectralaggregation), όπου χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες περιοχές του ραδιοφάσματος σε διαφορετικές συχνότητες. Στην Εικόνα 4.13 που ακολουθεί, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επεκτείνουμε την κάλυψη μια κυψέλης με τη χρήση της τεχνολογίας NetworkDensification. Κατά την χωρική πυκνωση (spatialdensification) αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών ανά κόμβο, αυξάνουμε την πυκνότητα των εγκατεστημένων σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή και προσπαθούμε να διανέμουμε ομοιόμορφα τους χρήστες στους σταθμούς βάσης. Κατά τηνπύκνωση συχνότητας-συσσώρευση φάσματος (spectralaggregation) χρησιμοποιούνται οι μεγαλύτερες ποσότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, οι οποίες εκτείνονται από τα 500 Mhz ως τις χιλιοστομετρικές συχνότητες κύματος(30-300Ghz) [41].



Εικόνα 4.13:Τεχνολογία πύκνωσης δικτύου. [41]

Ένας επιπλέον τρόπος για να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου είναι να γίνουν οι κυψέλες πιο μικρές [42]. Τα σημαντικότερα οφέλη της συρρίκνωσης των κυψελών είναι η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος σε μια γεωγραφική περιοχή και η μείωση των χρηστών που δεσμεύουν αριθμό πόρων του δικτύου. Αυτό επιτρέπει σε κάθε σταθμό βάσης να αφιερώνει τους πόρους του και την backhaul σύνδεση του σε ολόένα και μικρότερο αριθμό χρηστών. Έτσι το κέρδος πυκνώσεως  $\rho$ , αν επιτύχουμε ρυθμό δεδομένων  $R_1$  όταν η πυκνότητα είναι  $\lambda_1$  BSs/km<sup>2</sup> και στη συνέχεια θεωρήσουμε υψηλότερη πυκνότητα  $\lambda_2$ , με αντίστοιχο ρυθμό  $R_2$ , είναι [42]:

$$\rho = \frac{R_2 \lambda_1}{R_1 \lambda_2}, \quad \rho > 0 \quad (4.2)$$

Αν η πυκνότητα του δικτύου διπλασιαστεί και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης διπλασιαστεί επίσης, τότε το κέρδος πυκνώσεως είναι  $\rho = 1$ . Αυτό σημαίνει ότι αύξηση της πυκνότητας του σταθμού βάσης έχει μια αναλογική αύξηση του επιτευχθέντος ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

Σε ένα δίκτυο περιορισμένων παρεμβολών με πλήρης ρυθμιστές, ο λόγος σήματος προς παρεμβολές-θόρυβου (SINR) είναι ουσιαστικά ίσος με το SIR και, επειδή η κατανομή SIR παραμένει περίπου σταθερή καθώς το δίκτυο συμπυκνώνεται, το καλύτερο σενάριο είναι όταν  $\rho \approx 1$ . Στην πραγματικότητα, οι ρυθμιστές (buffers) δεν είναι πάντα γεμάτοι και τα smallcells τείνουν να έχουν ελαφρύτερο φορτίο με μικρότερες παρεμβολές από τα macrocells καθώς το δίκτυο συμπυκνώνεται. Επομένως, το SINR συνήθως αυξάνεται με την πυκνότητα. Ωστόσο, σε μικροκυματικές συχνότητες το κέρδος στο SINR δεν είναι αρκετό για να συμβαδίσει με τη μείωση της χρήσης smallcells, και επομένως  $\rho < 1$ .

Μια ενδιαφέρουσα πτυχή των συχνοτήτων mmWave είναι ότι τα κέρδη πυκνότητας  $\rho \gg 1$  είναι πιθανά. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε αυτές τις συχνότητες, η επικοινωνία περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το θόρυβο και η αύξηση της πυκνότητας ελαφραίνει το φορτίο και αυξάνει τον SINR. Ένα παράδειγμα αυτού [43], η αύξηση του αριθμού BSs σε μια δεδομένη περιοχή από 36 σε 96, η οποία μείωσε την απόσταση μεταξύ τους από 170 μέτρα σε 85 μέτρα, αύξησε το ρυθμό από 24,5 Mbps σε 1396 Mbps, δίνοντας κέρδος πυκνότητας:

$$\rho = \frac{1396 \cdot 36}{24,5 \cdot 96} = 21,3 \quad (4.3)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Ασφάλεια Συστημάτων 5G

Η εισαγωγή αυτού του πλήθους σύνθετων νέων απαιτήσεων και νέων τεχνολογιών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ασφάλεια του 5G, και έτσι η ανάγκη επανεξέτασης των ιδιοτήτων του γίνεται απαραίτητη. Για παράδειγμα, η πολυεπίπεδη μίσθωση (κοινή χρήση υποδομών από πολλούς φορείς εικονικών δικτύων) σε δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς απαιτεί αυστηρή απομόνωση σε πολλαπλά επίπεδα για την εξασφάλιση της απόλυτης ασφάλειας [44]. Επιπλέον, σε σενάρια τεχνολογιών που αποσυνδέουν την πραγματική λειτουργικότητα από τις υποκείμενες λειτουργίες hardware και μεσαίου λογισμικού, όπως για παράδειγμα οι SDN και NFV, ακόμα και στις υπηρεσίες cloud η έννοια ενός εξαιρετικά ασφαλούς δικτύου αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία [32].

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το δίκτυο πρέπει να διατηρήσει τη συνολική ασφάλεια από άκρο σε άκρο (E2E), την ασφάλεια της φυσικής υποδομής και των νέων εικονοποιημένων πόρων (που είναι εφαρμογές ή λειτουργίες του δικτύου). Αναλυτικά, το δίκτυο 5G χρειάζεται να παρέχει [32]:

- 1) **Ασφάλεια πληροφοριών χρήστη**, η οποία αναφέρεται στην προστασία δεδομένων των E2E χρηστών αλλά και επικοινωνιών τύπου μηχανής (MTC).
- 2) **Ασφάλεια των στοιχείων δικτύου**, που σχετίζεται με την προστασία συσκευών (εξοπλισμός χρήστη, UE), στοιχείων δικτύου και εφαρμογών, που βασίζονται σε μια VNF αρχιτεκτονική.
- 3) **Ασφάλεια μεταφοράς/διεπαφής**, η οποία αναφέρεται στην προστασία των διαδρόμων επικοινωνίας.

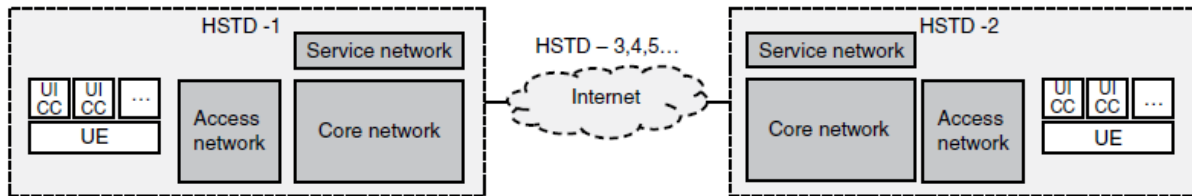
Ως γενικά παραδείγματα τύπων επιθέσεων μπορούμε να αναφέρουμε:

- Επιθέσεις σε χρήστες (UE) ή σε στοιχεία δικτύου (NE), όπως “μόλυνση” μέσω κακόβουλου λογισμικού ή ρομπότ που μολύνουν συσκευές συνδρομητών, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν ψευδείς λογαριασμούς και να υποκλέψουν δεδομένα.
- Επιθέσεις εναντίον των διαφόρων υποσυστημάτων δικτύου, όπως το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) και το κεντρικό δίκτυο (CN), προκαλώντας εξάντληση πόρων, παραβιάσεις όρων και προϋποθέσεων, ή επιθέσεις στο σύστημα ονοματοδοσίας Διαδικτύου (DNS).
- Επιθέσεις σε εφαρμογές τελικού χρήστη, όπως κακόβουλο λογισμικό από πλευράς διακομιστή, εφαρμογής και πρωτοκόλλου και επιθέσεις άρνησης εξυπηρέτησης (DDoS), δηλαδή εναντίον ενός υπολογιστή, ή μιας υπηρεσίας.

### 5.1 Αρχιτεκτονική ασφάλειας 5G

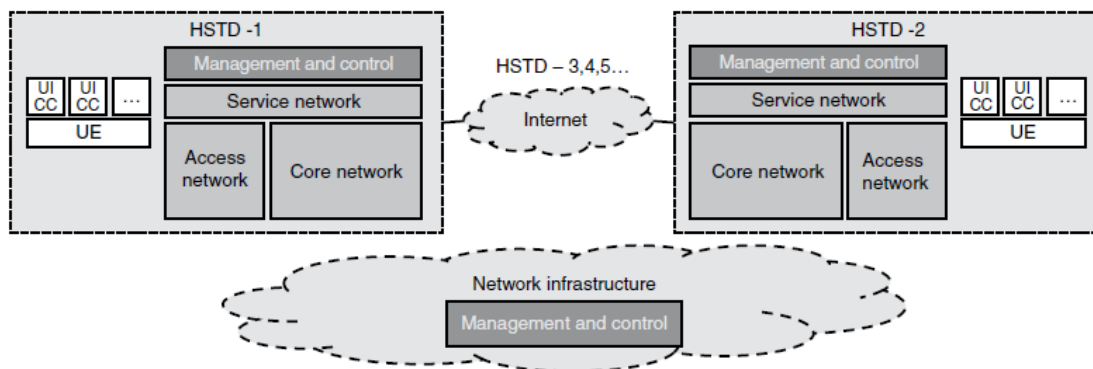
Συνολικά, το 5G απαιτεί τη χρήση πολλών νέων τύπων ασφαλείας, λόγω των νέων επιχειρηματικών εφαρμογών, των νέων αρχιτεκτονικών, των νέων τεχνολογιών και των νέων σεναρίων. Από αυτήν την άποψη, οι νέες επιχειρηματικές εφαρμογές, οι οποίες εκπροσωπούνται από το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), δημιουργούν πρωτοφανείς προκλήσεις για την ασφάλεια, καθώς και ανοιχτές και κοινόχρηστες αρχιτεκτονικές δικτύου, με χαρακτηριστικά cloud, virtualization και pooling που αναμένεται να αντικαταστήσουν το δίκτυο κλειστού τύπου αρχιτεκτονικές εξ ολοκλήρου σε παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.[48]

Τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς περιλάμβαναν έναν ή περισσότερους τομείς ασφάλειας και εμπιστοσύνης, ή πιο συγκεκριμένα, τουλάχιστον τόσους τομείς όπως ο αριθμός των οικιακών δικτύων που εξυπηρετούν καθέναν από τους συμμετέχοντες που εμπλέκονται. Αυτό το παράδειγμα αντικατοπτρίζεται στην Εικόνα 5.1.



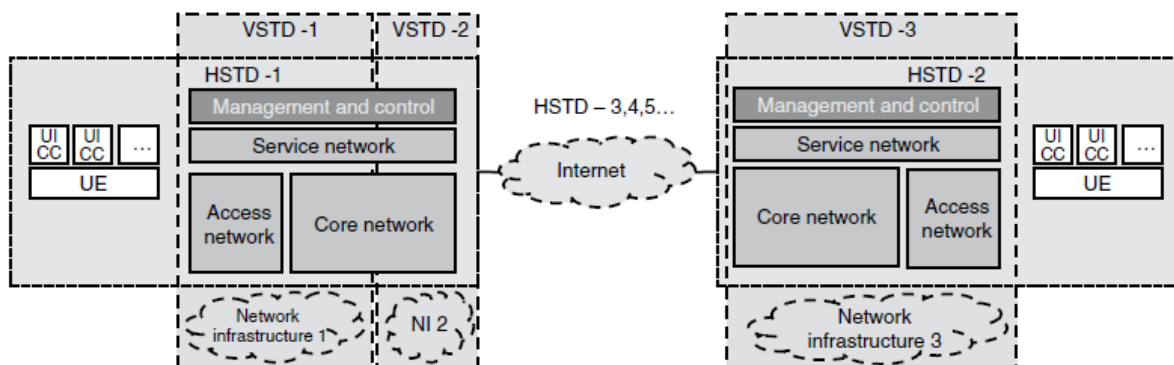
Εικόνα 5.1: Τομείς ασφάλειας και εμπιστοσύνης σε παραδοσιακά δίκτυα.[32]

Στα δίκτυα 5G, το πρότυπο ασφάλειας και εμπιστοσύνης γίνεται όλο και πιο περίπλοκο. Οι οριζόντιοι τομείς ασφάλειας και εμπιστοσύνης (Horizontalsecurity and trustdomains, HSTD) υλοποιούνται μέσω εικονοποιημένων και μη εικονοποιημένων πόρων που λειτουργούν σε μια υποδομή που μπορεί να ανήκει σε άλλη οργάνωση (π.χ ένας πάροχος δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2). Για την πραγματοποίηση μια ασφαλούς επικοινωνίας E2E, προφανώς, απαιτούνται κοινές λειτουργίες διαχείρισης και ελέγχου.



Εικόνα 5.2: Ο αντίκτυπος της εικονοποίησης στους τομείς ασφάλειας και εμπιστοσύνης στο δίκτυο 5G.[32]

Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε ότι έχουμε επιπλέον κατακόρυφους τομείς ασφάλειας και εμπιστοσύνης (Vertical security and trust domains, VSTD). Η Εικόνα 5.3 απεικονίζει το πλήρες πρότυπο ασφάλειας και εμπιστοσύνης δικτύου 5G.

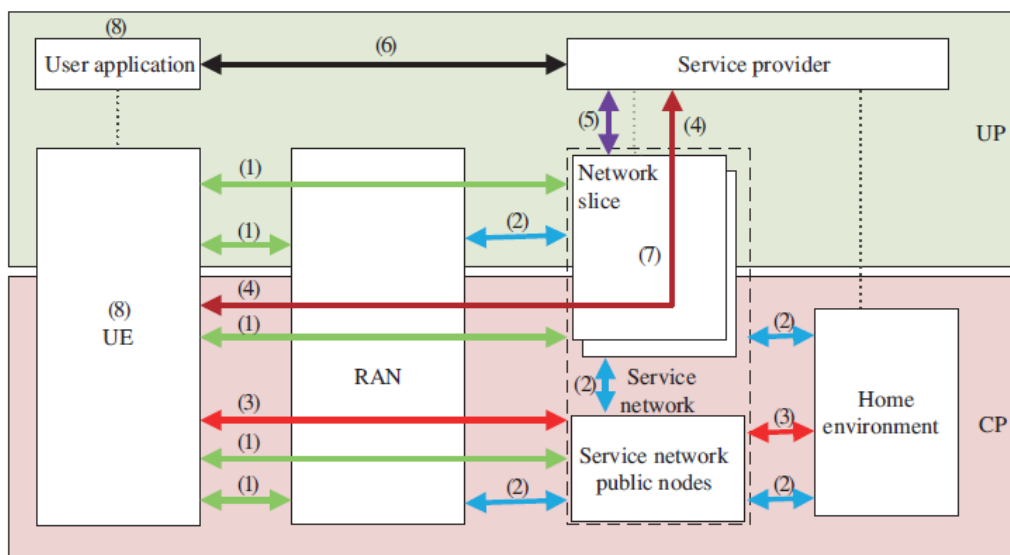


Εικόνα 5.3: Παράδειγμα ασφάλειας και εμπιστοσύνης τομέα 5G.[32]

### 5.1.1 Δυνατότητες λογικής αρχιτεκτονικής ασφάλειας

Η ενεργοποίηση του μηχανισμού προστασίας μεταξύ επιπέδου χρήστη και επιπέδου ελέγχου στην ασφάλεια των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς και η προστασία των δεδομένων, απαιτεί την ενσωμάτωση ενός ενοποιημένου πλαισίου ελέγχου ταυτότητας . Μια αρχιτεκτονική που προτάθηκε από την ομάδα China IMT-2020 (5G) τον Ιούλιο του 2017 έχει 8 βασικούς τομείς που είναι οι εξής [48]:

1. **Η ασφάλεια πρόσβασης στο δίκτυο:** Η ασφάλεια των δεδομένων χρήστη πρέπει να είναι εγγυημένη και αυτό περιλαμβάνει την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα και των δύο σηματοδοτήσεων (δηλαδή, σηματοδότηση στο δίκτυο πρόσβασης και στο κεντρικό δίκτυο ταυτόχρονα) και των δεδομένων χρήστη μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη (UE) και του δικτύου στο επίπεδο ελέγχου/επίπεδο χρήστη.
2. **Η ασφάλεια του τομέα του δικτύου:** Η ασφαλής ανταλλαγή τόσο σηματοδότησης όσο και δεδομένων χρήστη μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων δικτύου, συμπεριλαμβανομένων RAN και δημόσιων κόμβων του δικτύου υπηρεσιών, δημόσιων κόμβων και οικιακού περιβάλλοντος, δημόσιων κόμβων και slice, και οικιακού περιβάλλοντος και slice.
3. **Ο αρχικός έλεγχος ταυτότητας και διαχείριση κλειδιών:** Θα πρέπει να συμπεριληφθούν διάφοροι μηχανισμοί ελέγχου ταυτότητας και διαχείρισης κλειδιών που ενσωματώνουν το πλαίσιο ελέγχου ταυτότητας, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου ταυτότητας ασφαλείας βασισμένου σε χειριστές-ασφάλεια-διαπιστευτήρια μεταξύ δικτύων UE και 3GPP, καθώς και τη διαχείριση κλειδιών του χρήστη για την προστασία των δεδομένων μετά από επιτυχή έλεγχο ταυτότητας.
4. **Ο εκ νέου έλεγχος ταυτότητας και διαχείριση κλειδιών:** Δηλαδή, έλεγχος ταυτότητας της υπηρεσίας και σχετική διαχείριση κλειδιών μεταξύ των συσκευών και του εξωτερικού δικτύου δεδομένων (δηλαδή, τον πάροχο υπηρεσιών).
5. **Το άνοιγμα της δυνατότητας ασφαλείας:** Πρέπει να υποστηρίζεται το άνοιγμα της δυνατότητας ασφαλείας μεταξύ της οντότητας δικτύου 5G και του εξωτερικού παρόχου υπηρεσιών.
6. **Την ασφάλεια των εφαρμογών:** Πρέπει να διασφαλίζονται ασφαλείς επικοινωνίες μεταξύ των συσκευών των χρηστών και του παρόχου υπηρεσιών.
7. **Η ασφάλεια των slices:** Η ασφάλεια των slices πρέπει να είναι εγγυημένη, συμπεριλαμβανομένης της εξουσιοδότησης και της απομόνωσης τους.
8. **Η οπτικοποίηση ασφάλειας και διαμόρφωση:** Πρέπει να γίνεται αντιληπτή τόσο η κατάσταση εκτέλεσης των χαρακτηριστικών ασφαλείας όσο και η ικανότητα των χαρακτηριστικών ασφαλείας να εγγυώνται την ασφάλεια των υπηρεσιών.

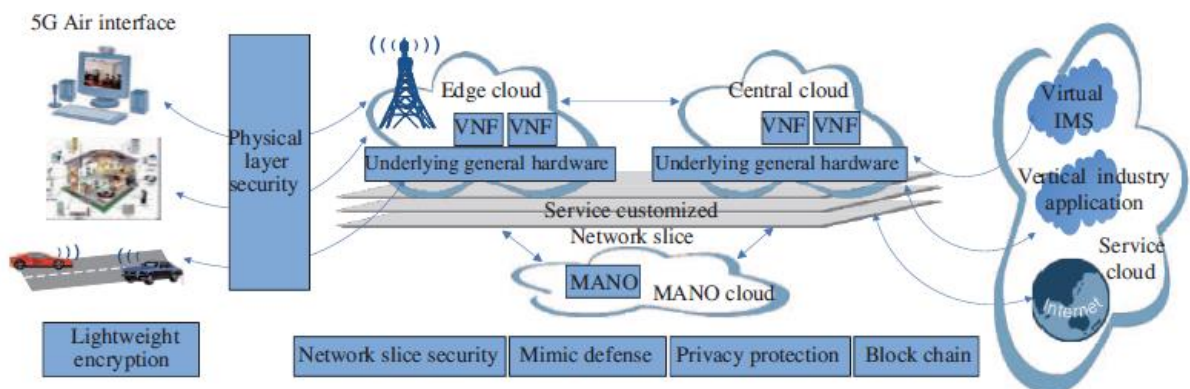


Εικόνα 5.4: Η αρχιτεκτονική ασφάλειας που προτείνεται από την ομάδα China IMT-2020.[48]

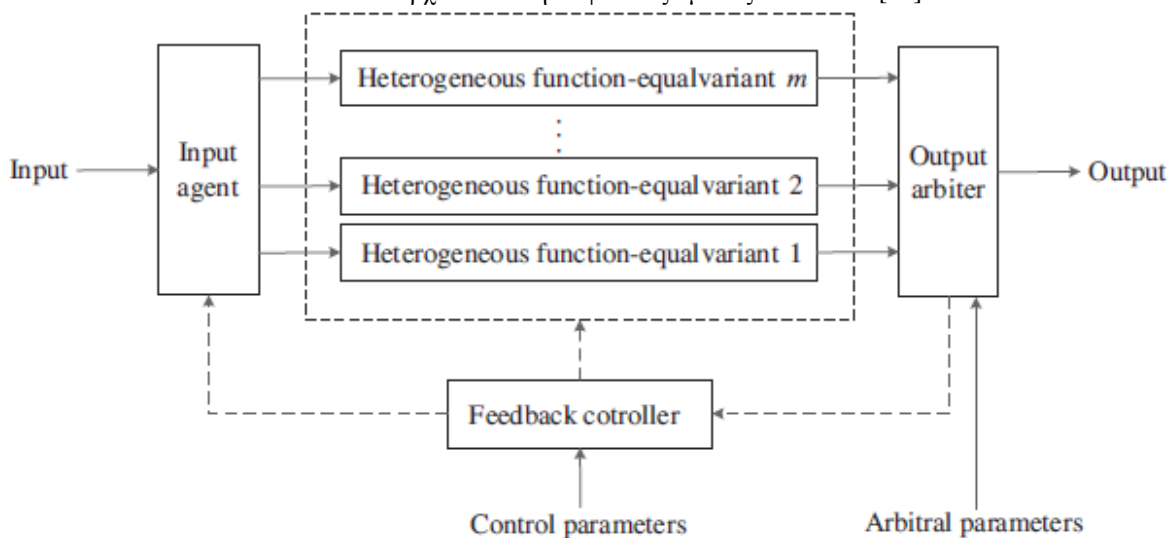
Συμπερασματικά, οι πρώτοι έξι τομείς περιγράφουν τις απαιτήσεις ασφαλείας μεταξύ διαφορετικών στοιχείων, ενώ οι δύο τελευταίοι τομείς ασφαλείας (ασφάλεια slice, και οπτικοποίηση ασφαλείας και διαμόρφωση) περιγράφουν τις απαιτήσεις ασφαλείας του slice δικτύου και τον ίδιο τον εξοπλισμό χρήστη/την εφαρμογή χρήστη.

### 5.1.2 Δυνατότητες αναπτυξιακής αρχιτεκτονικής ασφαλείας

Η τρέχουσα τάση ανάπτυξης βασίζεται στην αρχιτεκτονική ασφαλείας 5G που συνδυάζει χαρακτηριστικά δικτύου 5G cloud, pooling και virtualization για να εξερευνήσει τους μηχανισμούς και το πλαίσιο ανάπτυξης ενδογενούς ασφαλείας. Από την προοπτική του επιπέδου ανάπτυξης των δυνατοτήτων ασφαλείας του 5G, μια ιδιαίτερα αξιοσημείωτη και τυπική αρχιτεκτονική είναι αυτή της μιμητικής άμυνας του συστήματος (mimicdefensesystem). Η μιμητική άμυνα, είναι μια ενεργή θεωρία άμυνας που δημιουργήθηκε από την Κινεζική Ακαδημία Μηχανικής, της ακαδημαϊκής ομάδας WuJiangxing [49]. Ένα αφηρημένο μοντέλο του συστήματος αυτού παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.6 όπου η ετερογενής ισοδύναμη λειτουργία (heterogeneousfunction-equal) αντιπροσωπεύει εγκαταστάσεις με διαφορετικά επίπεδα και αναλυτικά στοιχεία (π.χ δίκτυο, πλατφόρμα, σύστημα, μονάδα συνδεσμολογίας, εξαρτήματα, υλοποίηση software, υλοποίηση hardware, συνδυασμόςsoftware-hardware).



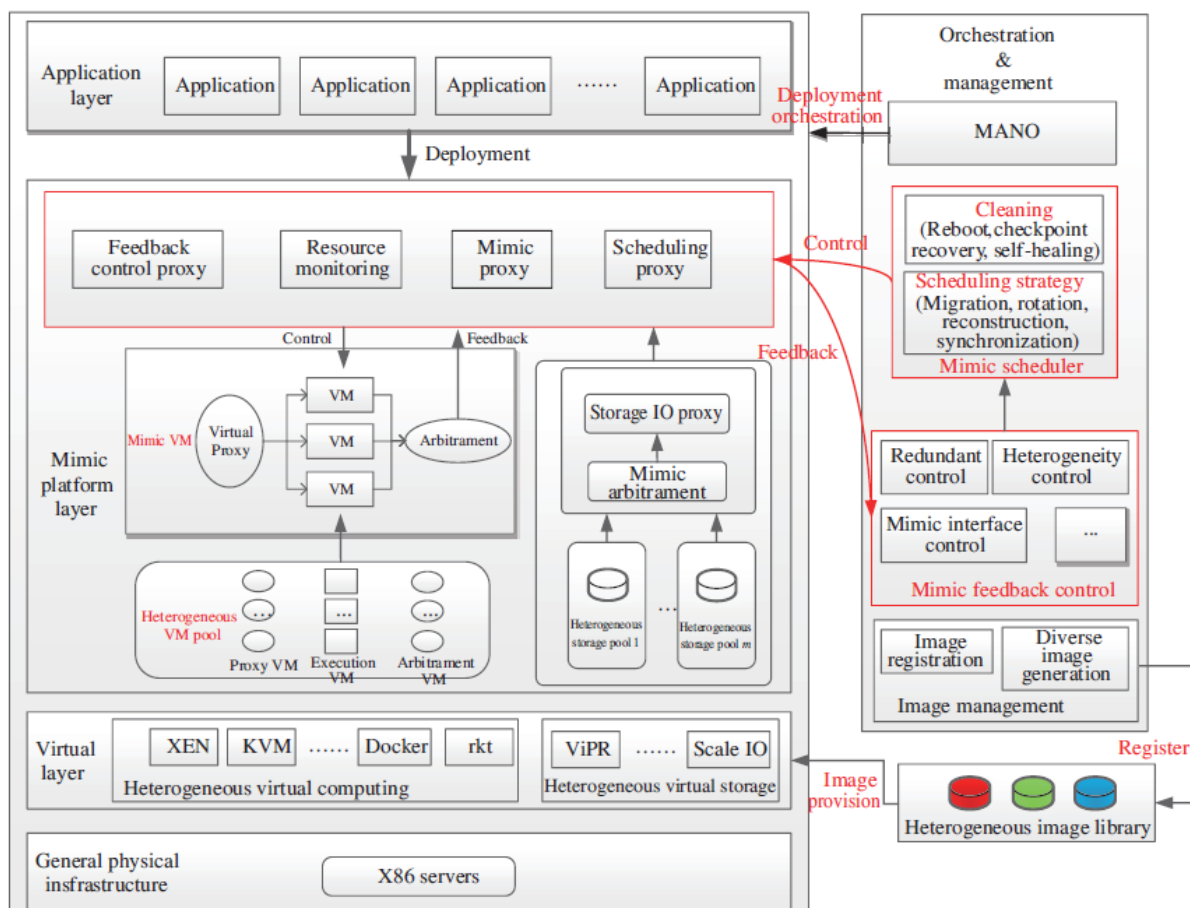
Εικόνα 5.5: Αρχιτεκτονική ασφαλείας άμυνας δικτύου 5G.[48]



Εικόνα 5.6: Αφηρημένο μοντέλο του μιμητικού αμυντικού συστήματος.[48]

Ένα προβλεπόμενο σύστημα άμυνας δικτύου 5G προσθέτει ένα μιμητικό επίπεδο πλατφόρμας μεταξύ του εικονικού επιπέδου και του επιπέδου εφαρμογών στη γενική αρχιτεκτονική υπηρεσίας cloud 5G και επίσης προσθέτει αντίστοιχες λειτουργίες διαχείρισης προγραμματισμού μίμησης. Αναλυτικότερα, το σύστημα άμυνας περιλαμβάνει:

Ένα επίπεδο πλατφόρμας μίμησης που περιλαμβάνει διακομιστή μεσολάβησης μίμησης (*mimic proxy*), διακομιστή μεσολάβησης ελέγχου ανατροφοδότησης (*feedback control proxy*), διακομιστή μεσολάβησης προγραμματισμού (*scheduling proxy*), ελεγκτή πόρων (*resource monitoring*), υλοποίηση ανάπτυξης εικονικής μηχανής μίμησης, ελεγκτή χρόνου εκτέλεσης (*run-time monitoring*) και ανατροφοδότηση πληροφοριών. Επιπλέον, περιλαμβάνεται μια ετερογενής βιβλιοθήκη εικόνων (*heterogeneous image library*) όπου δημιουργούνται εικόνες και εγγραφές. Ο ελεγκτής μίμησης ανατροφοδότησης (*mimic feedback controller*) αποτελείται από έναν ελεγκτή περιορισμού (*redundant controller*), έναν ετερογενή ελεγκτή (*heterogeneous controller*) και έναν μιμητικό ελεγκτή διεπαφής (*mimic interface controller*), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τις αντίστοιχες απαιτήσεις επιπέδου ασφάλειας. Επιπρόσθετα, υπάρχει και ένας μιμητικός χρονοπρογραμματιστής που περιλαμβάνει τον μηχανισμό χρονοπρογραμματισμού και τη στρατηγική καθαρισμού για τη λήψη των πληροφοριών από τον ελεγκτή ανατροφοδότησης και χειρίζεται δυναμικά την μιμητική εικονική μηχανή (*mimic VM*) που βασίζεται σε μια στρατηγική ασφάλειας.



Εικόνα 5.7: Μιμητική αρχιτεκτονική άμυνας 5G.[48]

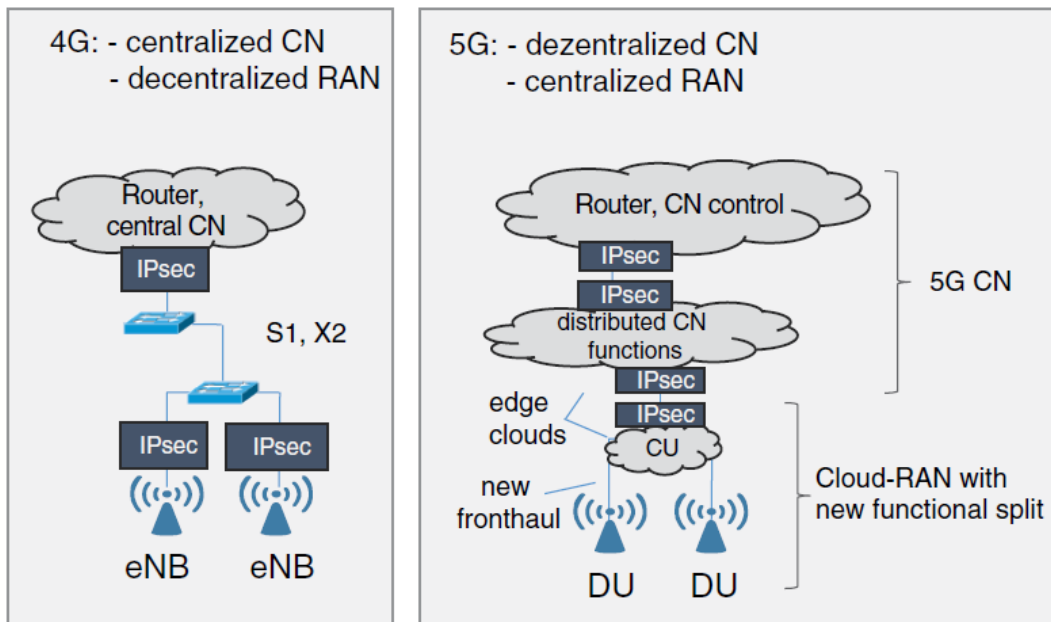
### 5.1.3 Ασφάλεια υποδομής



Η ασφάλεια υποδομής μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου μοντέλου Open Systems Interconnect (OSI) στο δίκτυο μεταφοράς, συχνά με έμφαση στα υψηλότερα επίπεδα. Ως εκ τούτου, το επίπεδο 1 (φυσικό επίπεδο) προσφέρει μια συμπληρωματική προσέγγιση εφόσον τα ανώτερα στρώματα διαχωρίζονται από το φυσικό στρώμα. Οι παραδοσιακές λύσεις που προτείνονται για τις προκλήσεις ασφαλείας στα ανώτερα στρώματα χρησιμοποιούν διάφορους τύπους ιδιωτικών και δημόσιων μυστικών κλειδιών μέσω υπολογισμών που βασίζονται σε μηχανισμούς κρυπτογραφίας (π.χ over-the-top, OTT).

Οι συσκευές των δικτύων 4ης γενιάς (4G) κάνουν πιστοποίηση αυθεντικότητας στον πυρήνα του κινητού και έτσι ενδέχεται να επικοινωνούν μέσω μη ασφαλών δικτύων μεταφοράς δεδομένων. Το λεγόμενο στρώμα πρόσβασης Access Stratum (AS) τερματίζεται στον ενισχυμένο κόμβο-B (eNB) και έτσι προστατεύει τον έλεγχο και τη μεταφορά δεδομένων μόνο μέσω της διεπαφής αέρα (airinterface). Τόσο το επίπεδο χρήστη (userplane) όσο και η κυκλοφορία στο επίπεδο ελέγχου (controlplane) μεταξύ του eNB και του κεντρικού δικτύου προστατεύεται από κρυπτογράφηση και ακεραιότητα. Προς το παρόν, όμως, προστατεύονται μόνο τα κλειδιά κρυπτογράφησης και η κίνηση ελέγχου μεταξύ eNB.

Στο σύστημα 5G, μέρος της λειτουργικότητας του πυρήνα του δικτύου (corenetwork, CN) μπορεί να τοποθετηθεί σε σύννεφα (clouds), ενώ κάποιο μέρος της λειτουργικότητας RAN μπορεί να συγκεντρωθεί, πιθανώς, στα ίδια σύννεφα. Αυτοί οι κόμβοι συγκέντρωσης εξελίσσονται σήμερα σε κέντρα δεδομένων που προσφέρουν δυνατότητες υπολογισμού και αποθήκευσης που μπορούν να εκχωρηθούν δυναμικά σε διαφορετικούς χειριστές δικτύου και υπηρεσίες τους. Ωστόσο, αυτές οι καταναμημένες λειτουργίες πρέπει να ελέγχονται από το κεντρικό δίκτυο. Ξεκινώντας από την κορυφή, τα σύννεφα CN θα φιλοξενήσουν τη δρομολόγηση (routing) για την πρόσβαση στο Internet, μαζί με κεντρικές λειτουργίες ελέγχου. Στη συνέχεια, ένα άλλο σύννεφο θα φιλοξενήσει καταναμημένες συναρτήσεις CN. Οι κεντρικές λειτουργίες RAN μπορούν να αναπτυχθούν στις λεγόμενες κεντρικές μονάδες (CUs), ενώ άλλες λειτουργίες RAN υλοποιούνται ως καταναμημένες μονάδες (DUs). Από την άποψη της ασφάλειας, η διανομή της λειτουργικότητας CN και η συγκέντρωση του RAN παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τη μία πλευρά, η ευάλωτη επιφάνεια αυξάνεται, ενώ από την άλλη πλευρά μειώνεται ο κίνδυνος επιτυχούς επίθεσης σε ένα από τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος.



Εικόνα 5.4: Βασικές διαφορές αρχιτεκτονικών ασφάλειας δικτύων 4G και 5G.[32]

Η αρχιτεκτονική του δικτύου 5G προβλέπει τη διαθεσιμότητα των clouds σε συνδυασμό με κόμβους συγκέντρωσης όπου οι λειτουργίες CN και RAN μπορούν να δημιουργηθούν με ευελιξία. Εάν γίνεται κοινή χρήση πόρων cloud, αυτό σημαίνει ότι οι λειτουργίες δικτύου CN και RAN πρέπει να ενσωματωθούν από ένα πρωτόκολλο ασφαλούς υποδομής μεταφοράς, όπως το IPsec. Το πρωτόκολλο IPsec [46] παρέχει εμπιστευτικότητα, έλεγχο ταυτότητας και ακεραιότητα στις ροές δεδομένων σε επίπεδο IP μεταξύ δύο πόρων του δικτύου (peers), μέσω μιας αρχιτεκτονικής ασφάλειας που καθορίζει πρωτόκολλα ασφαλείας για την προστασία του περιεχομένου του πακέτου IP.

## 5.2 Βασικές τεχνολογίες ασφάλειας 5G

### 5.2.1 Ασφάλεια φυσικού στρώματος

Η φύση της μετάδοσης του ασύρματου τομέα καθιστά τους χρήστες του δικτύου ευαίσθητους σε μεγάλη ποικιλία επιθέσεων (ενεργών και παθητικών). Η ασφάλεια έναντι αυτών των επιθέσεων ταξινομείται σε τρεις κατηγορίες [32]:

**Τεχνικές βασισμένες στη γνώση καναλιών:** Η γνώση της θέσης των καναλιών που βρίσκονται σε αποστάσεις μικρότερες από το μισό μήκος κύματος, μπορεί να αξιοποιηθεί για τη λήψη ασφαλών κλειδιών. Μερικές φορές το κλειδί ενός αποστολέα και ενός παραλήπτη είναι κοινό, όταν για παράδειγμα χρησιμοποιείτε η τεχνική της διπλής διαίρεσης χρόνου (TDD) σε χαμηλή κινητικότητα. Η κύρια ιδέα συνίσταται στην παραγωγή ενός χρονικά μεταβλητού συμμετρικού κλειδιού χρησιμοποιώντας το κανάλι ως γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Τα ασύρματα κανάλια εμφανίζουν μεγάλη τυχαιότητα λόγω διάδοσης πολλαπλών διαδρομών (multipath propagation) και χρονικής διακύμανσης (time variance). Στο [47], έχει προταθεί μια μέθοδος στην οποία πραγματοποιείται διακριτική εκτίμηση καναλιού με έγχυση τεχνητού θορύβου στον χώρο του καναλιού του δέκτη για υποβάθμιση της απόδοσης και εκτίμηση της υποκλοπής.

**Τεχνικές κωδικοποίησης και ισχύος:** Η κωδικοποίηση συνήθως θεωρείται δημόσια, αλλά εάν ο κωδικοποιητής είναι μυστικός, η κωδικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την ανθεκτικότητα έναντι της παρεμβολής και της υποκλοπής. Η προσέγγιση

κωδικοποίησης υποδιαιρείται στη χρήση τεχνικών κωδικοποίησης διόρθωσης σφαλμάτων και φάσματος διασποράς. Η προστασία των πληροφοριών μπορεί επίσης να διευκολυνθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές ισχύος. Τα συνηθισμένα σχήματα εδώ περιλαμβάνουν επίσης τη χρήση κατευθυντικών κεραιών και την έγχυση τεχνητού θορύβου. Μια κατευθυντική κεραία διευκολύνει τη λήψη δεδομένων από την κατεύθυνση που δεν καλύπτεται από το σήμα επίθεσης.

**Τεχνικές που βασίζονται στην ανίχνευση σημάτων:** Οποιαδήποτε προσέγγιση ασφάλειας E2E εξαρτάται από τους αλγόριθμους και τις μεθόδους που εφαρμόζονται στα τελικά σημεία μιας σύνδεσης δεδομένων, δηλαδή στις συσκευές των χρηστών (UE). Ως εκ τούτου, ο τελικός χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν δικό του επιλεγμένο αλγόριθμο για προστασία κρυπτογράφησης και ακεραιότητας της δικής του σύνδεσης.

Το «δακτυλικό αποτύπωμα» των ασύρματων καναλιών υποδηλώνει ότι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις χωρικές θέσεις των πομπών και των δεκτών. Εφαρμόζοντας μεθόδους επεξεργασίας σήματος, όπως τεχνητό θόρυβο, μορφοποίηση δέσμης MIMO (beamforming), συνεργατική παρεμβολή και κωδικοποίηση ασφαλείας, οι τεχνολογίες ασφαλούς μετάδοσης φυσικού επιπέδου μπορούν να διευρύνουν τις διαφορές μεταξύ των ασύρματων χαρακτηριστικών, έτσι ώστε οι χρήστες-στόχοι να μπορούν να αποδιαμορφώνουν σήματα, όσο οι παράνομοι χρήστες λαμβάνουν σήματα από άλλες τοποθεσίες και έτσι δεν μπορούν να ανακτήσουν τις πληροφορίες. Συνεπώς, η δημιουργία μυστικών κλειδιών με βάση το φυσικό στρώμα διασφαλίζεται από τα εγγενή χαρακτηριστικά ασφαλείας (δηλαδή, ταχύτητα, χρονική διακύμανση και αμοιβαιότητα) του ασύρματου καναλιού. Συγκεκριμένα, το τυχαίο ασύρματο κανάλι μεταξύ νόμιμων πομποδεκτών παρέχει κοινή τυχειότητα, η ποιότητα παραλλαγής χρόνου επιτρέπει γρήγορες ενημερώσεις του μυστικού κλειδιού και επιπλέον, τα αμοιβαία χαρακτηριστικά καθιστούν πολύ πιο εύκολη τη διανομή και τη διαχείριση του μυστικού κλειδιού.

Γενικά, τεχνολογίες ασφαλούς μετάδοσης έχουν εφαρμοστεί [48] σε ποικίλα δίκτυα επικοινωνίας, όπως ετερογενή δίκτυα κυψελών, συνεργατικά δίκτυα αναμετάδοσης, δίκτυα D2D, τεράστια δίκτυα MIMO, δίκτυα χιλιοστομετρικών κυμάτων και δίκτυα NOMA. Ενδεικτικά θα αναφέρουμε ότι: στα ετερογενή δίκτυα έχει εφαρμοστεί η τεχνική του τεχνητού θορύβου και η μορφοποίηση καναλιών MIMO, στα D2D δίκτυα έχει μελετηθεί μια μέθοδος που επιτρέπει την συνεργασία μεταξύ χρηστών σε σχέση με την κοινή χρήση του φάσματος για τη βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου και επιπλέον στο δίκτυο NOMA χρησιμοποιήθηκαν φυσικές παρεμβολές που προκαλούνται από τον μη-ορθογώνιο σχεδιασμό του δικτύου, για να μειώσει την ποιότητα σήματος των υποκλοπών και να βελτιώσει την απόδοση της μυστικότητας.

### 5.2.2 Έλεγχος ταυτότητας φυσικού επιπέδου

Η βασική αρχή του ελέγχου ταυτότητας φυσικού επιπέδου είναι η προσθήκη χαρακτηριστικών ασύρματου καναλιού που χρησιμοποιούν τις τοποθεσίες των χρηστών ως νέες παραμέτρους ελέγχου ταυτότητας. Μια «σφραγίδα θέσης» προστίθεται έτσι στις πληροφορίες ταυτότητας χρήστη, τη σηματοδότηση και τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας στοιχεία χωρικού φάσματος. Η υπάρχουσα έρευνα σχετικά με τον έλεγχο ταυτότητας φυσικού επιπέδου επικεντρώνεται κυρίως σε τρεις πτυχές: έλεγχο ταυτότητας με βάση τα δακτυλικά αποτυπώματα καναλιών, τον έλεγχο ταυτότητας με βάση την απόκριση, και έλεγχο ταυτότητας μεταξύ επιπέδων, τα οποία παρουσιάζονται ως εξής [48]:

Ο έλεγχος ταυτότητας με βάση δακτυλικά αποτυπώματα προτάθηκε για πρώτη φορά [50] το 2008 και χρησιμοποιεί μοναδικά χαρακτηριστικά ασύρματου καναλιού που δημιουργούνται από την τοποθεσία ενός χρήστη ως δακτυλικό αποτύπωμα για την αναγνώριση του. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των διαδοχικών πακέτων δεδομένων των καναλιών έτσι ώστε να προσδιοριστεί εάν η ασύρματη σύνδεση έχει αλλάξει, και αυτό επιβεβαιώνει περαιτέρω τη νομιμότητα του χρήστη σύμφωνα με τον συντελεστή συσχέτισης καναλιών [50]. Την ίδια χρονιά μια ομάδα ανθρώπων [51], απέδειξε τη δυνατότητα χρήσης δακτυλικών αποτυπωμάτων καναλιού για την επίτευξη ελέγχου ταυτότητας. Τα τελευταία χρόνια, ο έλεγχος ταυτότητας με βάση τα δακτυλικά αποτυπώματα έχει επίσης εξεταστεί εκτενώς σε νέα σενάρια επικοινωνίας και ασύρματες τεχνολογίες 5G. Επιπλέον μελετήθηκε [52] η εφαρμογή πιστοποίησης φυσικού επιπέδου με βάση τα δακτυλικά αποτυπώματα καναλιού στο σύστημα MIMO και στο σύστημα IoT, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, για να απλοποιηθεί η διαδικασία ελέγχου ταυτότητας και να μειωθεί ο λανθάνων χρόνος και η πολυπλοκότητα του ελέγχου ταυτότητας, εφαρμόστηκε έλεγχος ταυτότητας με βάση τα δακτυλικά αποτυπώματα καναλιού σε ετερογενή δίκτυο που βασίζεται σε SDN, εξάγοντας τα χαρακτηριστικά του καναλιού ως πληροφορίες του περιβάλλοντος ασφαλείας.

Για την επίτευξη ενός βελτιωμένου ελέγχου ταυτότητας, ο έλεγχος ταυτότητας πολλαπλών επιπέδων συνδυάζει τις παραμέτρους ελέγχου ταυτότητας φυσικού επιπέδου και τον έλεγχο ταυτότητας ανώτερου επιπέδου επιτρέποντας την αλληλεπίδραση πληροφοριών μεταξύ του φυσικού και του ανώτερου στρώματος. Οι Wenetal. [44] συνδύασαν τον έλεγχο ταυτότητας ανώτερου επιπέδου και τον έλεγχο ταυτότητας φυσικού επιπέδου για να επιτύχουν τον έλεγχο ταυτότητας πολλαπλών επιπέδων σε δίκτυα οχημάτων 5G, δίκτυα ad hoc<sup>5</sup> και έξυπνα συστήματα μετρητών.

### 5.3 Απαιτήσεις ασφαλείας τεχνολογιών SDN και NFV

Σε αυτήν την ενότητα, ως αποτέλεσμα της προηγούμενης ανάλυσης απειλών, εφιστούμε την προσοχή σε επιλεγμένες απαιτήσεις για ασφάλεια 5G. Αυτές δεν επηρεάζουν αποκλειστικά το σχεδιασμό υπηρεσιών ασφαλείας που αναπτύσσονται για να προσφέρουν προστασία και προστασία της ιδιωτικής ζωής, αλλά αναμένεται να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό και τη συνολική σχεδίαση αρχιτεκτονικής 5G. [32]

Λαμβάνοντας υπόψη την κυρίαρχη τάση για προγραμματιζόμενες υποδομές που βασίζονται σε SDN, η μετάβαση στο 5G ακολουθείται από την υιοθέτηση πολλών αναδυόμενων τεχνολογιών εικονοποίησης όπως το NFV χρησιμοποιώντας SDN. Η αρχιτεκτονική SDN, με την αποσύνδεση των λειτουργιών ελέγχου δικτύου και προώθησης, τα λογικά συγκεντρωτικά στοιχεία ελέγχου δικτύου και τις εκτεθειμένες διεπαφές που επιτρέπουν τον προγραμματισμό των στοιχείων δικτύου (switches), εισάγει νέους στόχους επίθεσης και εκμετάλλευσης στο επίπεδο ελέγχου και χρήστη, εκτός από το επίπεδο εφαρμογής. Οι εισβολείς ενδέχεται να προσπαθήσουν να θέσουν σε κίνδυνο στοιχεία SDN, ελεγκτές ή διακόπτες. Ειδικά οι ελεγκτές SDN είναι ελκυστικοί στόχοι για επιθέσεις, καθώς τέτοιες επιθέσεις ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο το επίπεδο ελέγχου SDN. Ένας ελεγκτής SDN που έχει παραβιαστεί, επιτρέπει σε έναν εισβολέα να εγκαταστήσει νέους κανόνες ροής και να κατευθύνει την κυκλοφορία στις ροές όπως επιθυμεί, αλλάζοντας το σχεδιασμό του δικτύου. Μια άλλη κοινή απειλή ασφαλείας έναντι του επιπέδου ελέγχου είναι η επίθεση

<sup>5</sup> Ένα ασύρματο **ad hoc δίκτυο** είναι ένας αποκεντρωμένος τύπος ασύρματου δικτύου, δε βασίζεται σε κάποια προϋπάρχουσα υποδομή, όπως δρομολογητές στα ενσύρματα δίκτυα ή ασύρματα access points στα διαχειριζόμενα ασύρματα δίκτυα. [53]

DoS προς τον ελεγκτή SDN, εξαντλώντας τους πόρους του. Αξιοποιώντας τις ευπάθειες ασφαλείας σε γνωστά πρωτόκολλα SDN, όπως το OpenFlow, οι εισβολείς θα μπορούσαν να εκτρέψουν τις ροές κυκλοφορίας ή απλώς να παραβλέψουν τους ήδη εγκατεστημένους κανόνες ροής για σκοπούς αναγνώρισης.

Όσον αφορά το NFV, παρόλο που δικαιολογημένα συνδέεται με τη μείωση του κόστους μέσω της αντικατάστασης εξειδικευμένου υλικού με εικονοποιημένες υπηρεσίες, η υιοθέτησή του συνεπάγεται σημαντικούς κινδύνους ασφαλείας. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) [45], υπάρχουν κίνδυνοι που σχετίζονται με την εικονοποίηση του δικτύου (π.χ. διαρροή μνήμης- memoryleakage, ασφάλεια δρομολόγησης- routingsecurity), παραδοσιακές απειλές δικτύωσης (π.χ. επιθέσεις πλημμύρας- floodingattacks) και αυτές τις νέες απειλές που προκύπτουν από το συνδυασμό τεχνολογίας εικονοποίησης και δικτύωσης. Επιπλέον, άλλοι κίνδυνοι ασφαλείας που πρέπει να λάβουμε υπόψη σχετικά με τη χρήση του NFV είναι αυτοί που αφορούν το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μιας λειτουργίας δικτύου.

## 5.4 Απαιτήσεις ασφαλείας Network Slicing

Ο σχεδιασμός μελλοντικών λύσεων ασφαλείας θα πρέπει να ασχολείται με το γεγονός ότι οι πόροι υποδομής μοιράζονται μεταξύ διαφορετικών φορέων εκμετάλλευσης και επιπλέον μεταξύ των slice και των υπηρεσιών τους. Η αυτόνομη λειτουργία κάθε slice είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών που προσφέρει στους ενοικιαστές (tenants) ανάλογα με τη συμφωνία για την παροχή ακεραιότητας και εμπιστευτικότητας δεδομένων. Λαμβάνοντας υπόψη το κοινόχρηστο μοντέλο υποδομής, το οποίο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ένα κοινό περιβάλλον υπολογιστών, θα πρέπει να προβλεφθούν ειδικά μέτρα ασφαλείας για τον χειρισμό πιθανών κακόβουλων επιθέσεων οι οποίες ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο ένα slice του δικτύου απειλώντας στη συνέχεια και όλα τα υπόλοιπα slices.

Τα συστήματα ασφαλείας 5G πρέπει να παρέχουν διαφορετικά επίπεδα πρόσβασης σε υπηρεσίες, πόρους υποδομής και πληροφορίες σε εκμισθωτούς με διαφορετικές δυνατότητες διαχείρισης και πεδίο εφαρμογής. Κατά συνέπεια, απαιτούνται ευέλικτα, κλιμακούμενα και πιθανώς ιεραρχικά σχήματα πρόσβασης. Δεν πρέπει να επιτρέπεται στους ενοικιαστές να έχουν πρόσβαση σε πόρους ή πληροφορίες που ανήκουν σε άλλους ενοικιαστές, χωρίς να αποκλείονται ειδικές περιπτώσεις στις οποίες οι πόροι πρέπει να μοιράζονται δεδομένα. Από την άλλη πλευρά, οι πάροχοι θα πρέπει να μπορούν να παρακολουθούν ολόκληρη την υποδομή που διαθέτουν, χωρίς να έχουν πρόσβαση σε ευαίσθητα δεδομένα.[32]

Για να επιλυθούν τα προβλήματα ασφάλειας του Network Slicing θα πρέπει να εξετάζονται ζητήματα όπως ο ασφαλής χωρισμός των slices, η ασφαλής πρόσβαση των τερματικών σε κάθε slice και η παροχή ασφάλειας στα ευαίσθητα δεδομένα/στοιχεία του δικτύου. Επιπλέον, κάθε slice θα πρέπει να χρησιμοποιεί ανεξάρτητες πολιτικές ασφάλειας. Ειδικότερα, για τις απαιτήσεις ασφάλειας όσον αφορά την απομόνωση των slices, προτείνονται λύσεις βασισμένες σε μυστικά κλειδιά. Παρόλο που το ίδιο τερματικό στο επίπεδο ελέγχου μπορεί να μοιραστεί ένα κλειδί, διάφορα κλειδιά του επιπέδου δεδομένων δεδομένων χρησιμοποιούνται σε διάφορα slice. Αρχικά, το τερματικό και το δίκτυο πιστοποιούνται και το σύστημα κλειδιού ασφαλείας του επιπέδου ελέγχου δημιουργείται μετά τον έλεγχο ταυτότητας. Στη συνέχεια, η οντότητα που είναι υπεύθυνη για την επιλογή slice στο δίκτυο επιλέγει το κατάλληλο slice για το τερματικό και ζητά την δημιουργία ενός μοναδικού κύριου κλειδιού για το slice. Σε περίπτωση χαμηλού επιπέδου ασφαλείας, το

slice μπορεί να χρησιμοποιήσει το κύριο κλειδί για να «αντλήσει» τα διάφορα κλειδιά που απαιτούνται για την κρυπτογράφηση στο επίπεδο χρήστη και την προστασία της ακεραιότητας. Όταν το επίπεδο ασφάλειας είναι υψηλότερο, η λειτουργία ασφαλείας στο slice αλληλεπιδρά με το τερματικό και την αρχή ελέγχου ταυτότητας τρίτου για να πραγματοποιήσει έλεγχο ταυτότητας και εξουσιοδότηση του τερματικού εντός του slice. Έτσι, όλες αυτές οι λειτουργίες ασφάλειας του επιπέδου χρήστη πραγματοποιούνται χωρίς την παρακολούθηση του χειριστή.[48]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Εφαρμογές του 5G

Αυτή η νέα εποχή των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς που συνδυάζει ταχύτητες άνω των 100 megabit ανά δευτερόλεπτο και βελτιωμένη συνδεσιμότητα, χώρο αποθήκευσης με βάση το cloud και μια σειρά συνδεδεμένων υπηρεσιών, καθώς επίσης και εκτεταμένη υπολογιστική ικανότητα με την αρχιτεκτονική εικονικού συστήματος, θα ανοίξει ένα κινητό Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) είναι ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων, μηχανών, ατόμων και άλλων συσκευών που επιτρέπει τη συνδεσιμότητα και τη δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μέσω έξυπνων εφαρμογών και υπηρεσιών. Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από smartphone, tablet, ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, οχήματα, φορητά και αισθητήρες που είναι ικανοί για επικοινωνία IoT. Για να λειτουργήσει καλά, ένα πλήρως υλοποιημένο Διαδίκτυο των πραγμάτων, το οικοσύστημα πρέπει να διαθέτει δίκτυο 5G που συνδέει όλες αυτές τις συσκευές και λαμβάνει υπόψη τη χρήση ισχύος, ζήτησης δεδομένων και φάσματος.

Τα προηγμένα ψηφιακά δίκτυα θα συγκεντρώσουν ένα σύστημα που συνδέει δισεκατομμύρια συσκευές και αισθητήρες, επιτρέποντας την πρόοδο στην υγειονομική περίθαλψη, την εκπαίδευση, τη διαχείριση πόρων, τις μεταφορές, τη γεωργία και πολλούς άλλους τομείς. Παρακάτω θα δούμε τις εφαρμογές του 5G σε κάποιους από αυτούς τους τομείς.[54]

### 6.1 Κλάδος Ιατρικής

Μέσω των δικτύων 5G υπάρχουν σημαντικές ευκαιρίες για βελτίωση της υγειονομικής περίθαλψης μέσω ιατρικών υπηρεσιών που επιτρέπουν εξαιρετικά γρήγορη συνδεσιμότητα, έξυπνη διαχείριση και τεράστιες δυνατότητες διαχείρισης των δεδομένων στον τομέα της τηλεϊατρικής και των συσκευών ελέγχου υγείας. Μέρος του λεγόμενου «Διαδικτύου ιατρικών πραγμάτων», περιλαμβάνει συσκευές όπως κλινικά φορητά και τηλεχειριστήρια, καθώς και πολλές άλλες συσκευές που παρακολουθούν και μεταδίδουν ηλεκτρονικά ιατρικά δεδομένα, όπως ζωτικά σημεία, σωματική δραστηριότητα, προσωπική ασφάλεια και τήρηση του ακριβούς χρόνου λήψης φαρμάκων. Αυτές οι συσκευές θα προσφέρουν υπηρεσίες διάγνωσης και θεραπείας τηλεϊατρικής που δεν έχουμε ξαναδεί, καθώς και τηλεδιάσκεψη υψηλής ανάλυσης, παρέχοντας παράλληλα ποιοτική φροντίδα σε προσιτές τιμές. Ορισμένες ιατρικές λειτουργίες κρίσιμης σημασίας απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα με διαστήματα καθυστέρησης που είναι κάτω από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Το 5G θα το κάνει αυτό δυνατό και θα προσφέρει συνεπείς, αξιόπιστες εμπειρίες χρήστη για τη βελτίωση της ιατρικής περίθαλψης. Σήμερα, υπάρχουν ορισμένες εφαρμογές υγείας ωφελούν μια σειρά βιομηχανιών οι οποίες απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης και αξιόπιστη συνδεσιμότητα, και αυτές οι εφαρμογές αποτελούν μέρος των αναδυόμενων περιπτώσεων 5G.

#### 6.1.1 Τηλεϊατρική

Μία από τις αρετές της ψηφιακής ιατρικής είναι η απομακρυσμένη πρόσβαση σε εικόνες και η δυνατότητα γρήγορης ανταλλαγής πληροφοριών σε γεωγραφικές περιοχές. Εάν ένας γιατρός σε ένα μέρος της χώρας (ή του κόσμου) χρειάζεται μια δεύτερη γνώμη, μπορεί να μεταδώσει την ιατρική εικόνα ή το αποτέλεσμα της εξέτασης σε άλλο γιατρό και να ενημερώσει το άτομο για την ιατρική του κατάσταση. Αυτό βοηθά τους γιατρούς να αποκτήσουν πρόσβαση σε πολύ απαραίτητη εμπειρογνομosύνη και επιτρέπει στο σύστημα υγειονομικής περίθαλψης να ξεπεράσει τις ανισότητες με βάση τη γεωγραφία (ιδιαίτερα για τις αγροτικές περιοχές), το εισόδημα ή την τάξη.

Μέσω της ψηφιακής τεχνολογίας, ωστόσο, οι ειδικοί που ασκούνται από πολύ μακριά μπορούν να κερδίσουν από αυτά τα οφέλη. Αυτό μειώνει τις ανισότητες στην υγεία και βοηθά στη γεφύρωση του αστικού/αγροτικού χάσματος που υπάρχει στις περισσότερες χώρες. Επιπλέον, οι ασθενείς δεν χρειάζεται να ταξιδεύουν σωματικά για να έχουν πρόσβαση σε ιατρική βοήθεια υψηλής ποιότητας. Η υψηλής ταχύτητας μετάδοση ακτίνων X ή αξονικής τομογραφίας επιτρέπει στους ασθενείς να λαμβάνουν γρήγορα μια δεύτερη ή τρίτη γνώμη. Έτσι, δεν θα περιορίζονται σε ειδικούς που ζουν στην πόλη καταγωγής τους, αλλά θα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα παγκόσμιο δίκτυο επαγγελματιών του ιατρικού τομέα.

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, είναι ότι οι χειρουργοί θα μπορούν να χρησιμοποιούν εικονικά εργαλεία για συγκεκριμένα είδη διαδικασιών. Αυτό θα επέτρεπε στους έμπειρους γιατρούς να καθοδηγούν νέους γιατρούς από απόσταση με κατάλληλες τεχνικές. Βοηθά επίσης τις περιοχές που δεν διαθέτουν συγκεκριμένες ιατρικές ειδικότητες να επωφεληθούν από την εμπειρία των πιο πυκνοκατοικημένων αστικών περιοχών. Άλλες καινοτομίες που χρησιμοποιούνται ήδη, είναι η χρήση ρομπότ που βοηθούν σε μικρές διαδικασίες.

### 6.1.2 Συσκευές ελέγχου υγείας

Οι νέες εφαρμογές, θα επεκτείνουν τη χρήση συσκευών παρακολούθησης και φορητού ιατρικού εξοπλισμού. Για ασθενείς που πάσχουν από σοβαρά ή χρόνια προβλήματα υγείας, όπως καρδιαγγειακές παθήσεις, διαβήτη ή καρκίνο, οι συσκευές απομακρυσμένης παρακολούθησης μπορούν να παρακολουθούν ζωτικά σημεία και επίπεδα γλυκόζης και να διαβιβάζουν ηλεκτρονικά αυτές τις πληροφορίες σε παρόχους υγειονομικής περίθαλψης. Αντί να περιμένουμε να συμβεί μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης, αυτός ο εξοπλισμός και η συναρπαστική συνδεσιμότητα παρέχουν ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης που βοηθά τους γιατρούς να εντοπίσουν πιθανά προβλήματα και οι ασθενείς να λαμβάνουν ιατρική περίθαλψη. Αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιείται σήμερα με υπάρχοντα δίκτυα και συσκευές 4G, αλλά αυτό που είναι μοναδικό για το 5G είναι η διευκόλυνση των επικοινωνιών τύπου μηχανής που θα βοηθήσουν στην επέκταση της παρακολούθησης και στην παροχή αναλυτικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο που μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα της υγείας.

Το ίδρυμα Michael J. Fox [54], πρωτοστάτησε στην εργασία σε συσκευές που παρακολουθούν ασθενείς με νόσο του Πάρκινσον. Αντί να βασίζονται στην αυτοαναφορά των ασθενών σχετικά με τον αριθμό και τη διάρκεια των τρέμουλων και τον τρόπο με τον οποίο ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου, οι γιατροί αναπτύσσουν φορητούς αισθητήρες κίνησης που παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για πολλές διαφορετικές πτυχές της νόσου. Αυτή η ικανότητα ανάλυσης των δεδομένων θα βοηθήσει στον προσδιορισμό πραγμάτων όπως εάν τα συμπτώματα επιδεινώνονται και τις πιθανές αιτίες επιδείνωσης. Πληροφορίες σχετικά με το αν ένα συγκεκριμένο είδος φαρμάκου βοηθά τους ασθενείς ή όχι και πώς επηρεάζεται αυτό το φάρμακο λαμβάνονται από εφαρμογές οι οποίες παρακολουθούν π.χ την πρόσληψη τροφής, την άσκηση κλπ.

Αυτά τα είδη εργαλείων παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τους ηλικιωμένους. Πολλά από αυτά τα άτομα στερούνται κινητικότητας και δεν μπορούν να ταξιδέψουν σε κάποιο ιατρείο ή νοσοκομείο. Εάν η διάγνωση δεν είναι πολύ περίπλοκη, μπορούν να λάβουν ιατρική βοήθεια μέσω τηλεδιάσκεψης και τηλεϊατρικής. Οι γιατροί και οι νοσοκόμες μπορούν να εντοπίσουν την κίνηση, τις πτώσεις και ομιλία του λόγου, μεταξύ άλλων, προκειμένου να παρέχουν διάγνωση σε πραγματικό χρόνο των προβλημάτων υγείας των ανθρώπων.



Στην Ταϊβάν, για παράδειγμα [54], έχει εφαρμόσει ένα σύστημα διαχείρισης πληροφοριών για την υγειονομική περίθαλψη που ονομάζεται «Citizen Telecare Service System» (CTSS). Χρησιμοποιώντας μια πλατφόρμα πληροφοριών τηλεπικοινωνιών, η κυβέρνηση επιδιώκει να ξεπεράσει τους γεωγραφικούς περιορισμούς, να ανακατανεμίει ιατρικούς πόρους και να δώσει στους ηλικιωμένους πολίτες μια αίσθηση άνεσης στο σπίτι τους όταν παρακολουθούν τις φυσιολογικές τους λειτουργίες. Το πρόγραμμα στοχεύει στην πλήρη ενσωμάτωση τεχνολογιών που επιτρέπουν συνεχή βιομετρική παρακολούθηση, παρακολούθηση και προειδοποίηση μέσω έγκαιρων ειδοποιήσεων που σχετίζονται με μη φυσιολογικά σενάρια υγείας, εκπαίδευση στον τομέα της υγείας και ιατρική βοήθεια για ασθενείς με χρόνιες ασθένειες, όπως η υπέρταση.

Το σύστημα επιτρέπει τη διαχείριση σε πραγματικό χρόνο μέσω της παρακολούθησης των χιλιάδων μεταβολικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται καθημερινά στο σώμα, υπενθυμίζοντας στον ασθενή να αναπτύξει έναν υγιεινό τρόπο ζωής. Χρησιμοποιώντας το δωρεάν δίκτυο WiFi της πόλης, φορητές συσκευές ή φορητούς υπολογιστές μέσω GPRS, το πρόγραμμα περιλαμβάνει ένα έξυπνο σύστημα ιατρικών υπηρεσιών για τη διαχείριση χρόνιων παθήσεων. Επιπλέον, έχουν εφαρμοστεί αλγόριθμοι για την πρόληψη κρίσιμων καταστάσεων περίθαλψης. Σήμερα, υπάρχουν πολλά ιατροτεχνολογικά προϊόντα στην αγορά, αλλά παραμένει μια πρόκληση για την παροχή ενός έξυπνου δείκτη για την αξιολόγηση κινδύνου υπέρτασης, αρρυθμίας, εγκεφαλικού επεισοδίου και άλλων καταστάσεων. Το CTSS έχει εφαρμόσει έναν αλγόριθμο ανάλυσης κινδύνου καρδιαγγειακών παθήσεων σε κινητές συσκευές, φορητούς υπολογιστές και διακομιστές και αυτόν τον έξυπνο αλγόριθμο για έγκαιρη προειδοποίηση για αρρυθμία.[55]

Οι απομακρυσμένες συσκευές ελέγχου υγείας είναι επίσης χρήσιμες για μωρά. Υπάρχουν ρούχα με αναπνευστικούς αισθητήρες που παρακολουθούν τη θέση του σώματος του μωρού, το επίπεδο δραστηριότητας και τη θερμοκρασία του δέρματος του. Οι γονείς μπορούν να δουν όλα αυτά τα δεδομένα σε μια εφαρμογή iOS/Android ή, ενδεχομένως, μέσω μιας έξυπνης κούπα που δείχνει τα αναπνευστικά μοτίβα του μωρού [56]. Επιπλέον, οι φορητές συσκευές βοηθούν τους ασθενείς να παρακολουθούν την υγεία των βρεφών και την παρακολούθηση των επίπεδα υγρασίας μέσω έξυπνων πανών και οι γονείς να ενημερώνονται τότε πρέπει να αλλάξουν τις πάνες. Υπήρξαν πιλοτικά προγράμματα για το σύνδρομο ξαφνικού βρεφικού θανάτου στις Ηνωμένες Πολιτείες καθώς και στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Ακόμη, αυτού του είδους η τεχνολογία στον τομέα της Ιατρικής, εκμεταλλεύεται εξατομικευμένες πληροφορίες σχετικά με τα γονίδια ή το περιβάλλον ενός ασθενούς για να στοχεύσει σχετικές ιατρικές θεραπείες. Πολλά φάρμακα δεν λειτουργούν σε όλους τους ανθρώπους, αλλά είναι αποτελεσματικά για άτομα με συγκεκριμένη γενετική ιδιομορφία. Το ίδιο ισχύει και για τις παρενέργειες ή τις ανεπιθύμητες ενέργειες αυτών των φαρμάκων. Η ενσωμάτωση λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με τον ασθενή βοηθά τους γιατρούς να φέρουν τις πιο κατάλληλες θεραπείες σε αυτά τα άτομα.

Αυτές οι εξελίξεις σχετίζονται ιδιαίτερα με τη γονιδιωματική του καρκίνου που είναι εφαρμογή γενετικής θεραπείας σε διαγνώσεις καρκίνου και θεραπεία που προσαρμόζεται στις ατομικές συνθήκες των ανθρώπων. Οι περισσότεροι καρκίνοι είναι πολύπλοκοι και αλληλεπιδρούν με τη γενετική σύνθεση των ανθρώπων. Η γνώση του τρόπου με τον οποίο τα γονίδια επηρεάζουν την καρκινική ανάπτυξη είναι πολύτιμη για τους ασθενείς και τους γιατρούς. Για να εξατομικεύσουν τη θεραπεία, οι γιατροί χρειάζονται πρόσβαση σε λεπτομερείς γνώσεις σχετικά με τη γενετική σύνθεση, το κοινωνικό περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά του τρόπου ζωής. Οι δεσεκατομμύρια συσκευές και αισθητήρες που

αναπτύσσονται με το 5G θα επιτρέψουν τη συλλογή αυτών των δεδομένων και, ενώ οι περισσότεροι επιτραπέζιοι υπολογιστές ή tablet δεν διαθέτουν επαρκή χώρο αποθήκευσης για αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας, η αποθήκευση αυτών των δεδομένων σε ένα cloud τα καθιστά διαθέσιμα σε γιατρούς και ερευνητές που χρειάζονται πρόσβαση όλο το εικοσιτετράωρο. Το cloud παρέχει τις εκτεταμένες δυνατότητες αποθήκευσης που χρειάζονται οι γιατροί για να επωφεληθούν από αυτές τις τελευταίες εξελίξεις.

Τα Εθνικά Ινστιτούτα Υγείας (NIH) [57] δημιούργησαν μια πρωτοβουλία ιατρικής ακριβείας που θα επιτρέψει την έρευνα για ένα ευρύ φάσμα ασθενειών και θα εφαρμόσει στατιστική ισχύ για την ανίχνευση συσχετίσεων μεταξύ γενετικών περιβαλλοντικών εκθέσεων και μιας ευρείας ποικιλίας αποτελεσμάτων υγείας. Τα NIH έχουν ξεκινήσει ένα πρόγραμμα εθελοντών ενός εκατομμυρίου που έχει σχεδιαστεί για να συγκεντρώνει λεπτομερείς γενετικές πληροφορίες για μια μεγάλη ομάδα ανθρώπων και να χρησιμοποιεί αυτήν την έρευνα για να βοηθήσει άλλα άτομα [58]. Τα συμμετέχοντα άτομα θα αποκτήσουν πρόσβαση στις δικές τους λεπτομερείς ιατρικές πληροφορίες ως αντάλλαγμα, επιτρέποντας στους ερευνητές να χρησιμοποιήσουν το DNA τους για γνώσεις υγείας. Με τα εργαλεία προσδιορισμού αλληλουχίας να πέφτουν κάτω από 1.000\$, οι γενετικές δοκιμές μπορούν να φέρουν φάρμακο ακριβείας σε μεγάλο αριθμό ανθρώπων.

Συνοψίζοντας, οι γιατροί σε συνδυασμό με κλινικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, μπορούν να αξιοποιήσουν τις τελευταίες γνώσεις σχετικά με τη διάγνωση και τη θεραπεία. Το software επιτρέπει στους γιατρούς να εισάγουν βασικά συμπτώματα και ζωτικά σημεία και να λαμβάνουν συμβουλές για πιθανά ιατρικά ζητήματα και αλληλεπιδράσεις φαρμάκων, και να είναι πιο ακριβείς στη θεραπεία των ασθενών τους. Τέλος, μέσω του μοντέλου πρόβλεψης, οι γιατροί μπορούν να προβλέψουν ποιοι ασθενείς διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο μελετώντας τις πληροφορίες του DNA τους.

### 6.1.3 Ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων

Η αξιόπιστη ανάλυση δεδομένων προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα στην ψηφιακή ιατρική. Στον «κόσμο» των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς οι ψηφιακές υποδομές θα γίνουν πιο ισχυρές και θα βοηθήσουν τους παρόχους και τους ασθενείς να λάβουν τις πληροφορίες που χρειάζονται. Η ικανότητα αξιολόγησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θα επιτρέψει στις θεραπείες να φτάσουν ταχύτερα στους ασθενείς. Μέσω της χρήσης της ανάλυσης δεδομένων, οι γιατροί μπορούν να συγκεντρώσουν και να αναλύσουν πληροφορίες με νέους και ευφυείς τρόπους. Οι συσκευές, μέσω ειδοποιήσεων μπορούν να ενημερώνουν τους γιατρούς ή ακόμη και τους ίδιους τους ασθενείς όταν μετρήσεις των ζωτικών οργάνων τους βρίσκονται εκτός αποδεκτών ορίων. Το CollaborativeCancerCloud [59] είναι μια πλατφόρμα ανάλυσης που ενσωματώνει πληροφορίες ασθενών από διάφορους οργανισμούς. Επιτρέπει στα συμμετέχοντα ιδρύματα να μοιράζονται με ασφάλεια τα γονιδιώματα, την απεικόνιση και τα κλινικά δεδομένα των ασθενών για πιθανές ανακαλύψεις που σώζουν ζωές. Επιπλέον, θα επιτρέψει την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων από ιστότοπους σε όλο τον κόσμο με κατανομημένο τρόπο, διατηρώντας παράλληλα το απόρρητο και την ασφάλεια των δεδομένων των ασθενών σε κάθε ιστότοπο. Αυτό μετέτρεψε τη θεραπεία και κατέστησε δυνατή τη βελτίωση των θεραπειών για τον καρκίνο. Μια άλλη δυνατότητα που παρέχεται μέσω του cloud, είναι η δυνατότητα των ερευνητών να κάνουν διακριτά ερωτήματα σχετικά με συγκεκριμένους καρκίνους και να λαμβάνουν συγκεντρωτικές πληροφορίες.

Εξίσου σημαντική είναι η χρήση των φορητών συσκευών που βοηθούν στη θεραπεία επειδή μπορούν να στέλνουν ιατρικές ειδοποιήσεις εάν το άτομο υποφέρει από οξεία κρίση ή

έκτακτη ανάγκη για υγεία. Ένας ασθενής που πέφτει και δεν μπορεί να σηκωθεί μπορεί να χρησιμοποιήσει μια τέτοια συσκευή για να καλέσει βοήθεια. Τα θύματα καρδιακής προσβολής ή εκείνοι που είναι ανίκανοι από εγκεφαλικό επεισόδιο λαμβάνουν βοήθεια από άλλους με smartphone ή άλλου είδους φορητές συσκευές. Αυτός ο εξοπλισμός ενημερώνει τους ανθρώπους όταν η συνταγή τους πρόκειται να εξαντληθεί ή τους υπενθυμίζει να παίρνουν φάρμακα σε μια συγκεκριμένη στιγμή. [54]

## 6.2 Κλάδος Εκπαίδευσης

Η τεχνολογία 5G προσφέρει ποικίλες δυνατότητες όταν εφαρμόζεται σε εκπαιδευτικό πλαίσιο (από το δημοτικό έως και την τριτοβάθμια εκπαίδευση). Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, λοιπόν, προσφέρουν καινοτόμες εκπαιδευτικές υπηρεσίες με απαιτήσεις υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλού λανθάνοντα χρόνου.

Αυτές οι υπηρεσίες, προσεγγίζονται και εφαρμόζονται μέσω της επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας στην εκπαίδευση, και συγκεκριμένα στις εργαστηριακές δραστηριότητες. Η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) επιτρέπει τον εμπλουτισμό του περιβάλλοντος που περιβάλλει τους μαθητές με πρόσθετες πληροφορίες. Είναι ενδιαφέρον στον τομέα της εκπαίδευσης χάρη στην υποστήριξή του στην ανταλλαγή γνώσεων μέσω του σχολιασμού του περιβάλλοντος. Επιπλέον, επιτρέπει την υποστήριξη μαθητών με μειωμένη ικανότητα, οι οποίοι μπορούν να ενσωματώσουν τη μαθησιακή τους εμπειρία μέσω κατάλληλων οπτικών, ακουστικών και απτικών ερεθισμάτων. Η εικονική πραγματικότητα (VR) επιτρέπει την αντικατάσταση του πραγματικού περιβάλλοντος με ένα εικονικό. Είναι χρήσιμο για εργαστηριακές δραστηριότητες όπου να χειρίζονται αντικείμενα με ρεαλιστικό τρόπο και διεξάγουν εκπαίδευση απαλλαγμένα από συνέπειες πιθανών λαθών των μαθητών. Τόσο η AR όσο και η VR παρέχουν στους χρήστες συναρπαστική εμπειρία, αλλά απαιτούν υποδομή ικανή να παρέχει ισχυρές εγγυήσεις για υψηλής ποιότητας βίντεο 360°, αμφίδρομες αλληλεπιδράσεις χαμηλού λανθάνοντος χρόνου, ακριβή εντοπισμό και προσανατολισμό των χρηστών. Χάρη στο 5G, αυτές τις εμπειρίες θα μπορούσαν να απολαμβάνουν οι χρήστες σε προσωπικές συσκευές, από απομακρυσμένη τοποθεσία μέσω υποδομών cloud και edge, αποκαλύπτοντας έτσι μια σειρά από καινοτόμα εκπαιδευτικά σενάρια. [60]

### 6.2.1 Επαυξημένη και Εικονική πραγματικότητα

Η επαυξημένη και η εικονική πραγματικότητα μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα μεγάλο εύρος εκπαιδευτικών σεναρίων. Γενικότερα, η εξ αποστάσεως εκπαίδευση μπορεί να παρουσιάσει σχετικούς περιορισμούς σε πρακτικά πειράματα με φυσικές συσκευές. Μια λύση, λοιπόν, για αυτούς τους περιορισμούς θα μπορούσε να ήταν η χρήση κινητών συσκευών από μαθητές ώστε να έχουν τη δυνατότητα να προσεγγίσουν αυτές τις δραστηριότητες καθώς μέσω του AR/VR επιτυγχάνεται:

- Μετάδοση περιεχομένου υψηλής ποιότητας από τον καθηγητή σε πληθυσμό περίπου 100 μαθητών, οι οποίοι είναι ταυτόχρονα συνδεδεμένοι και σε θέση να αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο σε εικονικό περιβάλλον.
- Ανακατανομή στον πληθυσμό υψηλής ποιότητας υλικών που παράγονται από μεμονωμένους μαθητές, προκειμένου να μοιραστούν και να συζητήσουν την εργαστηριακή εργασία που πραγματοποίησε κάθε μαθητής ως απάντηση στα ερεθίσματα του εκπαιδευτικού.

- Καθοδήγηση του παραπάνω πληθυσμού σε κάποια συναρπαστική εμπειρία AR και VR, όπως η εικονική πρόσβαση σε ένα τεράστιο κέντρο υπολογιστή όπου ο δάσκαλος δείχνει πώς να διαμορφώσει διάφορες συσκευές.

Όσον αφορά το τελευταίο στοιχείο, κάθε εκπαιδευόμενος μπορεί να έχει πρόσβαση σε ένα εικονικό δίκτυο συσκευών προκειμένου παραδείγματος χάρη να αντιδράσει αμέσως σε μια προσομοιωμένη επίθεση εισβολέων ή να πειραματιστούν με ένα κακόβουλο ιό. Συνήθως, αυτές οι δραστηριότητες δεν μπορούν να διεξαχθούν από απομακρυσμένο σημείο και με υψηλό αριθμό μαθητών επειδή (i) δεν υπάρχει επαρκής αριθμός συσκευών που να επιτρέπουν σε κάθε μαθητή να πειραματιστεί μαζί τους και (ii) οι εργαζόμενοι μαθητές δεν έχουν στη διάθεσή τους συσκευές με τις οποίες θα πειραματιστούν στα σπίτια τους. Η VR θα επέτρεπε να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, υπό τον όρο ότι οι απαιτήσεις εύρους ζώνης και καθυστέρησης πληρούνται από την υποκείμενη τεχνολογία του δικτύου.

Να προστεθεί ότι, μπορούν να επινοηθούν πολλές χρήσιμες εφαρμογές AR/VR σε διάφορους άλλους τομείς εκπαίδευσης [60]. Για παράδειγμα, στον τομέα της Ιστορίας και της Αρχαιολογίας, η AR μπορεί να παράσχει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με, π.χ., τον φερόμενο γλύπτη που δημιούργησε ένα άγαλμα σε ένα μουσείο που οι μαθητές πλαισιώνουν με τις συσκευές τους. Το VR μπορεί να προσφέρει μια τρισδιάστατη ανακατασκευή σηράγγων κάτω από έναν αρχαίο αιγυπτιακό τάφο, στην οποία δεν μπορεί να επισκεφτεί πλήρως μη εξουσιοδοτημένα άτομα. Στον τομέα της Βοτανικής, το AR μπορεί να δώσει στον μαθητή την πλήρη κατάταξη των φωτογραφιών ενός φυτού, μαζί με εικόνες εναλλακτικών ποικιλιών του ίδιου είδους. Στη Χημεία, οι μαθητές μπορούν να παίζουν με τρισδιάστατα μοντέλα μορίων και να εκτελέσουν χωρίς κίνδυνο εικονικά πειράματα με επικίνδυνες ουσίες. Μέχρι στιγμής, αυτές οι εμπειρίες ήταν δύσκολο να αναπτυχθούν λόγω της αδυναμίας του δικτύου να παρέχει υψηλό ρυθμό δεδομένων σε μεγάλο αριθμό μαθητών, και με χαμηλές καθυστερήσεις ώστε οι συναρπαστικές εμπειρίες να είναι ρεαλιστικές.

Όλα τα παραπάνω μπορούν να επιτευχθούν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό λόγω της τεχνολογία 5G η οποία, όπως είδαμε, περιλαμβάνει πλατφόρμες cloud και edge για σκοπούς συλλογής στατιστικών στοιχείων δικτύου και παρακολούθησης επιδόσεων, επαναδιαμόρφωση ασύρματων καναλιών σύμφωνα με τις απαιτήσεις εφαρμογών και διαχείριση και βελτιστοποίηση δικτύου [61]. Το cloudcomputing σημαίνει μεταφορά δεδομένων από περιφερειακές συσκευές που ενδέχεται να είναι περιορισμένοι σε πόρους, μέσω Διαδικτύου, σε ομάδες υπολογιστών υψηλής απόδοσης όπου η επεξεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί πιο αποτελεσματικά. Το Edgecomputing είναι μια παραλλαγή του cloudcomputing όπου η επεξεργασία εκτελείται σε διακομιστές στα σύνορα του δικτύου, μειώνοντας έτσι την κυκλοφορία και την καθυστέρηση του δικτύου. Αυτό το χαρακτηριστικό ταιριάζει απόλυτα με τις ανάγκες του AR/VR: από τη μία πλευρά, τα περιεχόμενα AR / VR είναι πιθανότατα μεγάλου μεγέθους και μπορεί να αποθηκευτούν εύκολα σε έναν κόμβο cloud, παρά σε συσκευές χρηστών, από όπου οι μαθητές μπορούν να τα κατεβάσουν, και όπου πραγματοποιείται επεξεργασία που εγγυάται τις απαιτήσεις χαμηλού λανθάνοντος χρόνου. Αυτή η λύση, σε συνδυασμό με την απόδοση 5G, υποστηρίζει επαρκώς τη μικτή μάθηση (εν μέρει παρουσία των μαθητών και εν μέρει εξ αποστάσεως), καθιστώντας δυνατή την ανταλλαγή μαθησιακών εμπειριών μέσω κυβερνοχώρων.

Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των σύγχρονων τάξεων, μπορεί κανείς να σκεφτεί να χρησιμοποιήσει τη συσκευή του δασκάλου, η οποία είναι κατάλληλα εξοπλισμένη με πόρους μνήμης και υπολογισμού, ως ο διακομιστής αιχμής από τον οποίο οι μαθητές μπορούν να κατεβάζουν κοινόχρηστα αρχεία και πιθανώς να ανεβάζουν τα δικά

τους. Αυτό σχετίζεται με τα δευτερεύοντα σχετικά χαρακτηριστικά του 5G, δηλαδή τη φύση του πολλαπλών RAT (τεχνολογία πολλαπλής ασύρματης πρόσβασης). Αυτό σημαίνει ότι το 5G θα μπορεί να συνεργαστεί με άλλες ασύρματες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, το WiFi είναι μια τεχνολογία που μπορεί να φτάσει, σε πραγματικό χρόνο, ρυθμό έως 200 Mbps. Τεχνολογίες διπλών χιλιοστομετρικών κυμάτων προβλέπονται για την υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων σε δίκτυα 5G [62]. Αυτές οι τεχνολογίες παρέχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 3-5 Gbps, σε smallcells ακτίνας 10 m. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κοινή χρήση περιεχομένου AR/VR υψηλής ποιότητας για αίθουσες διδασκαλίας, με υψηλότερη απόδοση που επιτυγχάνεται μόνο μέσω της καθαρής τεχνολογίας 5G.

## 6.2.2 Εκπαίδευση στην μουσική

Η μουσική συνεπάγεται την ανταλλαγή πληροφοριών πολυμέσων, τουλάχιστον με τη μορφή ροών ήχου υψηλής ποιότητας, για την υποστήριξη επαγγελματικών εφαρμογών. Όλα τα δεδομένα πρέπει να υποστηρίζονται ώστε να παρέχουν ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για εξ αποστάσεως μάθηση και κατανεμημένη μουσική παράσταση. Οι τεχνολογίες AR και VR είναι κατάλληλες για να προσφέρουν τέτοιου είδους διδακτικές δραστηριότητες. Η τεχνολογία του AR ενισχύει τις μουσικές ή θεατρικές ζωντανές εκπομπές και επιτρέπει στους συμμετέχοντες να διερευνήσουν συγκεκριμένες πτυχές της παράστασης. Για παράδειγμα, η εικόνα μπορεί να περιλαμβάνει ετικέτες που επισημαίνουν το όνομα και τον ρόλο των χαρακτήρων στη σκηνή, υπότιτλους για τους στίχους, πληροφορίες σχετικά με την πλοκή, κ.λπ., όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1. Η εισαγωγή του AR μπορεί, επίσης, να παρέχει ειδικά βοηθητικά εργαλεία. Για παράδειγμα, ένας μαθητής με προβλήματα όρασης θα μπορούσε να παρακολουθήσει μια έκδοση υψηλής αντίθεσης ή να επιτρέψει περιγραφή της σκηνής.



Εικόνα 6.1: Παράδειγμα εφαρμογής επαυξημένης πραγματικότητας για διαδραστική όπερα.[63]

Μια πιο προηγμένη περίπτωση χρήσης είναι η απομακρυσμένη συμμετοχή σε ζωντανά μαθήματα. Η ιδέα είναι να δοθεί στους μαθητές σε απευθείας σύνδεση, που παρακολουθούν μια μουσική παράσταση σε πραγματικό χρόνο μέσω του Διαδικτύου, τη δυνατότητα να περιστρέψουν το κεφάλι τους ή ακόμα και να μετακινηθούν στην εικονική τάξη. Σε αυτήν την περίπτωση, οι προσαρμοσμένες από το χρήστη ροές πολυμέσων πρέπει να αναδημιουργήσουν το απομακρυσμένο περιβάλλον τόσο από άποψη υψηλής ποιότητας

χωροταξικού ήχου όσο και σφαιρικού βίντεο 4K. Αυτό το είδος εκπαιδευτικής εφαρμογής απαιτεί επίσης αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο με τον δάσκαλο και άλλους συνομηλίκους. Λάβετε υπόψη ότι τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά του 5G θα πρέπει να υποστηρίζουν τέτοιες λειτουργίες τόσο σε πολυσύχναστα μέρη, όπως όπερες και αίθουσες συναυλιών, όσο και όσο κινούμαστε, π.χ. όταν ταξιδεύουμε. Αυτές οι πτυχές μπορεί να ανοίξουν νέες, απρόβλεπτες οδούς για μελλοντικές εκπαιδευτικές δραστηριότητες στη μουσική.[60]

## 6.3 Κλάδος Αυτοκινητοβιομηχανίας

Η νέα τεχνολογία της κινητής τηλεφωνίας είναι πλέον διαδεδομένο ότι, είναι σε μεγάλο βαθμό ένας από του κύριους μοχλούς της αλλαγής στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι χρησιμοποιούν τα αυτοκίνητα τους [64]. Οι διαχειριστές δικτύων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των συνδεδεμένων υπηρεσιών των αυτοκινήτων γενικά. Με τις νέες τεχνολογίες η διαχείριση των συσκευών, ο έλεγχος των αναβαθμίσεων ή οι πληροφορίες περιαγωγής καθώς και η διαχείριση των συνδρομητών, και γενικότερα η γνώση πληροφοριών που σχετίζονται με την τοποθεσία για τη βελτίωση των υπηρεσιών, γίνονται με μεγαλύτερη ευκολία. Επιπλέον, η αυτοματοποιημένη οδήγηση, η παροχή υπηρεσιών οδικής ασφάλειας, ο έλεγχος της κυκλοφορίας και η ψηφιοποίηση των μεταφορών φέρνει νέα δεδομένα στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας.

### 6.3.1 Έλεγχος κυκλοφορίας και αυτοματοποιημένη οδήγηση

Όσον αφορά τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων, οι χειριστές μπορούν να χειριστούν μεγάλες ποσότητες δεδομένων που μπορούν να αναλυθούν για να παρέχουν πληροφορίες για τη θέση του χρήστη. Με την παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας μέσα στο αυτοκίνητο και μέσω της επικοινωνία M2M μέσα στο αυτοκίνητο συλλέγονται δεδομένα από αισθητήρες. Έτσι, παρέχονται αναλυτικά στοιχεία του συνδεδεμένου αυτοκινήτου και υπηρεσίες καθοδήγησης για άπειρους οδηγούς. Μια ακόμη λειτουργία που παρέχουν τα προηγμένα 5G συστήματα, είναι προειδοποιήσεις στους οδηγούς για επικίνδυνες καταστάσεις και να τους αποτρέψουν από τυχόν ατυχήματα. Επιπροσθέτως, Συνεργατικά Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) ανταλλάσσουν πληροφορίες αξιόπιστα και σε πραγματικό χρόνο μέσω των δικτύων 5G και σε συνδυασμό με την αυτοματοποιημένη οδήγηση των οχημάτων συμβάλλουν στην μείωση του χρόνου ταξιδιού, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές αερίων, την αύξηση της ασφάλειας[65].

Ο οδικός χάρτης εφαρμογών C2C-CC (Car-2-Car Communication Consortium), όπως αναφέρει και το [66], προβλέπει τέσσερις φάσεις ανάπτυξης για άμεση επικοινωνία V2V. Κάθε επόμενη φάση επεκτείνει την προηγούμενη επιτρέποντας στα οχήματα να ανταλλάσσουν πρόσθετες πληροφορίες, επιτρέποντας έτσι την πραγματοποίηση νέων κατηγοριών περιπτώσεων χρήσης.

1. Αρχικά τα οχήματα να διαδίδουν τις πληροφορίες κατάστασής τους, επιτρέποντας έτσι σε άλλα οχήματα να γνωρίζουν την παρουσία τους και τους ενδεχόμενους κινδύνους που εντοπίζονται στο δρόμο.
2. Δεύτερον, η φάση της ανίχνευσης επιτρέπει σε διάφορους συμμετέχοντες στην κυκλοφορία να παρέχουν πρόσθετες πληροφορίες, δηλαδή πληροφορίες που αποκτώνται μέσω διαφόρων αισθητήρων επί του οχήματος, όπως κάμερες και ραντάρ. Αυτό επιτρέπει

στα οχήματα να «βλέπουν με τα μάτια των άλλων» και έτσι να ανιχνεύουν διαφορετικά κρυμμένα αντικείμενα ή να λαμβάνουν μια πιο ακριβή εικόνα για το τι συμβαίνει στο περιβάλλον τους (π.χ. μια διασταύρωση με διάφορα οχήματα και πεζούς).

3. Κατά την τρίτη, συνεργατική φάση οδήγησης θα επιτραπεί στα οχήματα να μοιραστούν τις προθέσεις τους με άλλους συμμετέχοντες στην κυκλοφορία. Αυτές οι πληροφορίες θα χρησιμοποιηθούν από αυτοματοποιημένους αλγόριθμους οδήγησης για να επιτρέψουν στα οχήματα να προβλέψουν με ακρίβεια τι θα κάνουν άλλοι συμμετέχοντες στην κυκλοφορία στο εγγύς μέλλον και έτσι να βελτιστοποιήσουν τις δικές τους αποφάσεις και ενέργειες.
4. Τέλος, η τελευταία συγχρονισμένη φάση οδήγησης, όπου τα οχήματα οδηγούνται αυτόνομα και είναι σε θέση να ανταλλάσσουν και να συγχρονίζουν τις τροχιές οδήγησης μεταξύ τους και έτσι να επιτυγχάνουν τα βέλτιστα πρότυπα οδήγησης.

Το ερώτημα είναι εάν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για την επικοινωνία οχημάτων για υψηλότερα επίπεδα αυτοματισμού. Για παράδειγμα, εάν μια σύγκρουση πρέπει να αποφευχθεί λόγω ενός απροσδόκητου συμβάντος, τα οχήματα πρέπει να ενεργούν αυτόνομα λίγο πριν από τη σύγκρουση. Τα οχήματα δεν θα ανταλλάσσουν μόνο τροχιές, αλλά και θα επαναπροσδιορίζουν συνεχώς (συνεταιριστική λήψη αποφάσεων). Τα υψηλότερα επίπεδα αυτοματισμού θα απαιτούν μικρότερο λανθάνοντα χρόνο και μεγαλύτερη αξιοπιστία, καθώς ο χρόνος αντίδρασης του προγράμματος οδήγησης αφαιρείται από την εξίσωση. Η ανταλλαγή δεδομένων αισθητήρα για συλλογική αντίληψη θα οδηγήσει σε μεγαλύτερα μεγέθη μηνυμάτων. Θα πρέπει να καθοριστούν νέα μηνύματα με δεδομένα πρόθεσης και συντονισμού για τη συμφωνία συνεργασίας. Αυτά είναι όλες οι σημαντικές υπηρεσίες όπου το 5G θα παίξει κεντρικό ρόλο.



Εικόνα 6.2: Υπηρεσίες 5G στα αυτοκίνητα.[67]

### 6.3.2 Υπηρεσίες διαδικτύου εν κινήσει

Η συνδεσιμότητα των οχημάτων με τα δίκτυα 5G σε συνδυασμό με το γρήγορο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που προσφέρουν έχει τη δυνατότητα να παρέχει υπηρεσίες ψυχαγωγίας στο αυτοκίνητο μέσω πρόσβασης στο Διαδίκτυο με εκπληκτικές επιδόσεις. Επιπλέον, σε συνδυασμό με την αυτοματοποιημένη οδήγηση και με την εξέλιξη των ταμπλό

των οχημάτων θα επιτρέψει στον οδηγό να χρησιμοποιεί υπηρεσίες αναψυχής ενώ το αυτοκίνητο οδηγεί αυτόνομα.

## 6.3 Κλάδος Ψυχαγωγίας και Ενημέρωσης

Ο τομέας της ψυχαγωγίας και της ενημέρωσης έχει βιώσει μεγάλες αλλαγές λόγω της αλλαγής συμπεριφοράς των ατόμων οι οποίοι αλληλεπιδρούν άμεσα με τα μέσα ενημέρωσης και ψυχαγωγίας. Από την άλλη πλευρά, η βιομηχανία τυχερών διαδικτυακών παιχνιδιών, με αυξημένη ανάλυση γραφικών και ταυτόχρονα συμβάντα μεταξύ διαφορετικών ενεργών χρηστών συνεπάγεται υψηλό επίπεδο αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο χρήστη, ειδικά όταν εξετάζουμε την εκμετάλλευση βελτιωμένων συσκευών παιχνιδιών με τους οποίους αλληλεπιδρούν οι άνθρωποι (γυαλιά, χειριστήρια, κ.λπ.). Οι παίκτες θέλουν όσο το δυνατόν περισσότερο ρεαλισμό και επίσης θέλουν να έχουν την πιο συναρπαστική εμπειρία παίζοντας. Τόσο το κινητό όσο και το σταθερό Διαδίκτυο, μαζί με τα κέντρα δεδομένων και το cloud computing, έχουν συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της πιο συναρπαστικής εμπειρίας. Επίσης, οι αυξανόμενες δυνατότητες των συσκευών μαζί με τις καινοτόμες υπηρεσίες που παρέχονται, έχουν επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά των καταναλωτών στα μέσα ενημέρωσης και ψυχαγωγίας.

Οι προσπάθειες της βιομηχανίας παιχνιδιών τοποθετούνται στην ενίσχυση της εμπειρίας των παικτών προσθέτοντας την εικονική πραγματικότητα (VR) και τη χρήση της βιοαισθητήρων, προκειμένου να επιτρέψει στον παίκτη να εντοπίσει ανθρώπους στο παιχνίδι, σε πραγματικούς ή φανταστικούς κόσμους. Επίσης, η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) εισάγεται για να αλληλεπιδρά με αντικείμενα του περιβάλλοντος του παιχνιδιού με ρεαλιστικό τρόπο. Η επαυξημένη πραγματικότητα λοιπόν, η οποία αναμένεται να φέρει επανάσταση στη βιομηχανία παιχνιδιών γενικά, λόγω του εγγενούς ρεαλισμού, επιτρέπει στον παίκτη να βιώσει τον πραγματικό κόσμο σε συνδυασμό με το παιχνίδι που παίζει.

Ορισμένες από τις κύριες τεχνικές προκλήσεις για την παροχή αυτού του νέου είδους ψυχαγωγικών υπηρεσιών επικεντρώνονται σε: ταχύτητα δεδομένων, κινητικότητα, καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, κάλυψη και αξιοπιστία. Ωστόσο, οι κύριες αυστηρές απαιτήσεις για την παροχή πλήρους συναρπαστικής εμπειρίας σχετίζονται με την επαυξημένη και την εικονική πραγματικότητα. Γενικά, το 5G πρέπει να παρέχει τις ακόλουθες δυνατότητες σε περιπτώσεις παράδοσης περιεχομένου και χρήσης παιχνιδιών:

- Εγγύηση υπηρεσιών χρήστη (QoS): Αξιοπιστία, κινητικότητα, καθυστέρηση. Όντας η τελευταία σημαντική προϋπόθεση για επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα. Για την εικονική πραγματικότητα και την επαυξημένη πραγματικότητα, ο χρόνος μετ'επιστροφής κυμαίνεται από 7ms έως 15ms κατώτατες τιμές ορίων.
- Ασφάλεια και εμπιστευτικότητα: Διαχείριση ταυτότητας και προσδιορισμός πηγών περιεχομένου, για να διασφαλιστεί ότι μόνο οι συνδρομητές έχουν πρόσβαση στο περιεχόμενο.
- Υποστήριξη δικτύου: Με τη μορφή εντοπισμού θέσης, η πλήρης ενσωμάτωση με συστήματα εκτός 3GPP, επιτρέπουν άμεσες επικοινωνίες συσκευής με συσκευή (D2D).

## 6.4 Κλάδος Βιομηχανίας

Οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη νέα βιομηχανική επανάσταση. Πολλές ανατρεπτικές τεχνολογίες καθοδηγούνται από καινοτόμες εταιρείες που



έχουν εξειδικευμένες δεξιότητες σε ένα δεδομένο πεδίο. Αυτές οι εταιρίες φέρνουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα, τα οποία προσφέρουν λύσεις με νέες υπηρεσίες, που είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων. Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης του κλάδου της βιομηχανίας εισάγεται ο όρος του βιομηχανικού αυτοματισμού, ο οποίος ασχολείται κυρίως με την αυτοματοποίηση των διαδικασιών της αλυσίδας παραγωγής, της ποιότητας των διαδικασιών ελέγχου και επεξεργασίας των υλικών.

Η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) προσφέρεται για την βιομηχανική παρακολούθηση. Η εξέλιξη των WSNs συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη του IoT στις κινητές επικοινωνίες και οι βιομηχανικές εφαρμογές σήμερα περιλαμβάνουν πολύ περισσότερα από την παρακολούθηση και την ανίχνευση. Η κύρια ανταγωνιστική τάση στη βιομηχανοποίηση είναι να εξελιχθεί σε έξυπνα συνδεδεμένα συστήματα πληροφοριών παραγωγής που μπορούν να λειτουργούν πέρα από τις εργοστασιακές εγκαταστάσεις, και σε αυτό το πλαίσιο οι επικοινωνίες 5G αντιπροσωπεύουν τη φυσική εξέλιξη σε WSNs για την υποστήριξη πολλών εφαρμογών που επιτρέπουν τεράστιες ευκαιρίες [68]. Η παροχή αυτών των εφαρμογών υποστηρίζει την παρακολούθηση ή την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφόρων χειριστών σε πραγματικό χρόνο και τον τηλεχειρισμό ρομποτικών λειτουργιών με σκοπό τον έλεγχο των διαδικασιών. Επιπλέον, για την παροχή υποστήριξης στην παραγωγή και την συντήρηση παρέχονται εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και υπηρεσίες cloud με μειωμένες καθυστερήσεις.

## 6.5 Κλάδος Ενέργειας

Σε ασύρματες λειτουργίες, το 5G ακολουθεί μια τάση για την ανάπτυξη του κλάδου ενέργειας. Το 5G δημιουργεί ένα έξυπνο δίκτυο που μπορεί να δημιουργήσει νέα επιχειρηματικά μοντέλα με υπολογιστές αιχμής και ομίχλης μαζί με αυτοματισμό και έξυπνο έλεγχο.

### 6.5.1 Έξυπνο δίκτυο (Smartgrid)

Τα γνωστά ως smartgrids [69] αλλάζουν τον τρόπο αποθήκευσης και παράδοσης της ενέργειας. Σήμερα, τα έξυπνα δίκτυα θεωρούνται ως η πιο επιτακτική δομή πολλών διεθνών ενεργειακών στρατηγικών παγκοσμίως σε διάφορες ταχέως αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτά τα έξυπνα δίκτυα λειτουργούν σύμφωνα με τη συνθήκη όλων των εξαρτημάτων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, τα οποία παρακολουθούν και ελέγχουν κάθε λειτουργία.

Η εισαγωγή του 5G στο έξυπνο δίκτυο δημιουργεί ακόμη μεγαλύτερη προσδοκία για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών ενέργειας. Μέσω διαφόρων διασυνδεδεμένων συσκευών ενέργειας στο δίκτυο ισχύος, τα δίκτυα 5G ανοίγουν το δρόμο για την ενσωμάτωση αυτών των συνδεδεμένων στην παρακολούθηση της ενεργειακής πρόβλεψης. Επομένως, η διασύνδεση αυτών των συσκευών με αυτά τα δίκτυα 5G βοηθά αποτελεσματικά στη διαχείριση της ενεργειακής ισορροπίας. Αυτό με τη σειρά του βοηθά στη μείωση του ενεργειακού κόστους. Η αποτελεσματική ανάλυση δεδομένων μπορεί να γίνει μέσω δικτύων 5G, τα οποία θα μπορούσαν να δώσουν τη δυνατότητα στις πόλεις να εκτελέσουν τα δικά τους ενεργειακά σχέδια που θα ήταν πιο οικονομικά αποδοτικά σύμφωνα με τις δημογραφικές συνθήκες. Επόμενη περίπτωση χρήσης των smartgrids, είναι μέσω έξυπνων μετρητών που παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας (ηλεκτρικό ρεύμα, θέρμανση, αέριο κλπ.), επιτρέπει στους χρήστες να μειώσουν ή να αλλάξουν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας.

### 6.5.2 Έξυπνες πόλεις

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-Telecommunication, ITU-T) [70], μια έξυπνη βιώσιμη πόλη είναι μια καινοτόμος πόλη που χρησιμοποιεί τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, της αποτελεσματικότητας της αστικής λειτουργίας και των υπηρεσιών και της ανταγωνιστικότητας.

Η ιδέα της έξυπνης πόλης επεκτείνει το πρότυπο ευφυούς κινητικότητας (μέσω συστημάτων μεταφοράς) όπου τα αυτοκίνητα συνδέονται μεταξύ τους για να αυξήσουν το επίπεδο ασφάλειας και να βελτιστοποιήσουν τη διαχείριση της κυκλοφορίας λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα, π.χ., βελτιωμένων δημόσιων μεταφορών και υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης. Γενικά, η κυκλοφορία των ΜΤC συσκευών χρησιμοποιούν δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες από την πλευρά του δρόμου (μέτρηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, ρύπανση, χρονισμός φωτεινού σηματοδότη, διαθεσιμότητα στάθμευσης κ.λπ.) ή αισθητήρες ενσωματωμένους στο αυτοκίνητο (μέτρηση της κατάστασης του αυτοκινήτου σε όρους κινητήρα και φρένα, για παράδειγμα, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τη θέση, την ταχύτητα κινητικότητας και την επιτάχυνση) ή ακόμα και αισθητήρες δημόσιων μεταφορών (που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της θέσης των δημόσιων λεωφορείων καθώς και της κατάστασής τους).

Μια από τις πιο συχνές απαιτήσεις σε μια έξυπνη πόλη είναι η παροχή αποτελεσματικότερης κίνησης και απρόσκοπτων ταξιδιών για άτομα σε δημοσία και ιδιωτικά μέσα μεταφοράς. Σε γενικές γραμμές, για να αυξηθεί η ασφάλεια, να μειωθεί η συμφόρηση και η ρύπανση, απαιτούνται εξαιρετικά υψηλές αξιόπιστες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Για το σκοπό αυτό, τα αυτόνομα ή υποβοηθούμενα αυτοκίνητα πρέπει να παρακολουθούν συνεχώς την κατάσταση έξω και μέσα στο αυτοκίνητο, υπάρχει μια συνεχής ανταλλαγή πληροφοριών κυρίως μεταξύ των διαφόρων συμμετεχόντων του δικτύου μεταφορών, δηλαδή, επικοινωνίες από όχημα σε όχημα (V2V) και από όχημα σε υποδομή (V2I).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Δυνατότητες και αξιολόγηση απόδοσης

## 7.1 Ενεργειακή απόδοση δικτύου

Η ενεργειακή απόδοση του δικτύου είναι ένας σημαντικός δείκτης για τα αναπτυσσόμενα δίκτυα 5G, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της κίνησης και τον αριθμό των χρηστών. Σε αυτήν την ενότητα, αναλύουμε γιατί η ενεργειακή απόδοση έγινε τόσο σχετική πρόσφατα και εισάγουμε μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης και μεθόδους μετρήσεων. Τέλος, θα προταθεί μια αξιολόγηση, με βάση προσομοιώσεις, της ενεργειακής απόδοσης του 5G έναντι των παλαιών συστημάτων.[32]

### 7.1.1 Σημαντικότητα ενεργειακής απόδοσης

Η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο μεταφράζεται σε σημαντικό κόστος για τους χειριστές. Στις αγορές, το ενεργειακό κόστος αντιπροσωπεύει το 10-15% των συνολικών λειτουργικών δαπανών του δικτύου (OPEX) και μπορεί να φτάσει έως και το 50% στις αναπτυσσόμενες αγορές. Λόγω της ταχέως αυξανόμενης χρήσης της ευρυζωνικής σύνδεσης, οι μεγαλύτεροι πάροχοι ανέφεραν πρόσφατα αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου τους κατά 35-35%, με κύριο λόγο την αυξανόμενη ζήτηση για κάλυψη και χωρητικότητα. Μέρος αυτής της ανάπτυξης οφείλεται στην άνοδο των συνδρομητών ευρυζωνικών κινητών επικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα κάθε συνδρομητής να χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο 25-50% περισσότερα δεδομένα ετησίως, με αποτέλεσμα την αναμενόμενη επταπλάσια αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας από το 2016 έως και σήμερα.

Σε αγορές όπου ο αριθμός των συνδρομητών είναι κορεσμένος, τα έσοδα των χειριστών ήταν σταθερά. Οι χρήστες αναμένουν ταχύτερες υπηρεσίες με υψηλότερα ποσοστά δεδομένων, αλλά σπάνια είναι πρόθυμοι να πληρώσουν επιπλέον χρήματα. Επομένως, οι χειριστές πρέπει να παρέχουν τους αυξανόμενους ρυθμούς δεδομένων με σταθερό κόστος. Συχνά υποστηρίζεται ότι η ενεργειακή απόδοση δεν ελήφθη υπόψη στις προηγούμενες γενιές κινητών τηλεπικοινωνιών, ενώ στην πραγματικότητα, είναι το αντίθετο: η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης ήταν ένας παράγοντας για την ταχεία αύξηση της κυκλοφορίας των δεδομένων.

Το 5G παρουσιάζει πολλά νέα χαρακτηριστικά δικτύου που έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην κατανάλωση ενέργειας και την απόδοση του δικτύου. Για παράδειγμα, το τεράστιο σύστημα διεύθυνσης δέσμης MIMO και κεραίας είναι απαραίτητο για την αύξηση του προϋπολογισμού ζεύξης και για την αντιστάθμιση της εξασθένισης, ιδίως για τις συχνότητες χιλιοστομετρικών κυμάτων και γενικά για την αύξηση της φασματικής απόδοσης ανά περιοχή. Ωστόσο, η εισαγωγή τέτοιων νέων λύσεων μπορεί δυνητικά να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, οι υπηρεσίες IoT που περιλαμβάνουν τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και αυξανόμενες απαιτήσεις κάλυψης, καθώς και υπηρεσίες που σχετίζονται με εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και συνεπώς απαιτούν ταυτόχρονη σύνδεση μέσω πολλαπλών ζωνών συχνοτήτων, αποτελούν σοβαρή πρόκληση για βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση.

### 7.1.2 Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου, χρησιμοποιούνται συχνά οι ακόλουθες μετρήσεις:

- **Ενέργεια ανά bit**, ειδικά χρησιμοποιείται σε αστικά περιβάλλοντα, όπου ο σχεδιασμός του δικτύου συνήθως περιορίζεται σε χωρητικότητα.

$$\lambda_I = \frac{E}{I} [J/bit] \quad (7.1)$$

Όπου  $E$  είναι η κατανάλωση ενέργειας σε μια δεδομένη περίοδο παρατήρησης (μετράται στο επίπεδο MAC, Medium Access Control). Ο αριθμός των παραδιδόμενων bit ανά ενέργεια [ $bit / J$ ] είναι μια κοινή μέτρηση για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης του εξοπλισμού και του λειτουργικού δικτύου σε ορισμένα περιβαλλοντικά πρότυπα των ITU- T, ETSI, κ.λπ. Υπό ορισμένες συνθήκες, επίσης, η απόδοση έναντι της κατανάλωσης ισχύος [ $bps / W$ ] μπορεί να εφαρμοστεί ως δείκτης απόδοσης.

- **Ισχύς ανά μονάδα περιοχής**, η οποία εφαρμόζεται σε προαστιακά ή αγροτικά περιβάλλοντα, όπου ο σχεδιασμός του δικτύου περιορίζεται κυρίως από την επιτευχθείσα κάλυψη.

$$\lambda_A = \frac{P}{A} [W/m^2] \quad (7.2)$$

Όπου  $A$  είναι η κάλυψη περιοχής. Η περιοχή κάλυψης ανά ημερήσια κατανάλωση ενέργειας [ $m^2 / J$ ] ή [ $m^2 / Wh$ ] εφαρμόζεται ως παράμετρος ενεργειακής απόδοσης για λειτουργικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, ενώ οι προηγούμενες μετρήσεις χρησιμοποιούνται συχνά σε προσομοιωμένα σενάρια για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης χωρίς πραγματικές μετρήσεις των εμπλεκόμενων παραμέτρων.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ενεργειακή απόδοση ενός δικτύου σε προσομοιωμένο σενάριο, απαιτούνται μοντέλα κατανάλωσης ισχύος των στοιχείων στο δίκτυο. Ένα από τα πρώτα διαδεδομένα μοντέλα κατανάλωσης ενέργειας αναπτύχθηκε στο έργο OPERA-net [72], το οποίο ξεκίνησε το 2008 ως ένα από τα πρώτα διεθνή έργα που ασχολούνται ειδικά με την ενεργειακή απόδοση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ένας από τους βασικούς στόχους του ήταν να αναπτύξει μετρήσεις απόδοσης για την αποτελεσματικότητα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Επιλέχθηκαν τρεις λειτουργικοί χώροι (αγροτικοί, υπό-αστικοί και αστικοί) που ήταν εξοπλισμένοι με αρκετούς μετρητές ισχύος για να επιτρέψουν λεπτομερείς μετρήσεις της κατανάλωσης ισχύος των διαφόρων στοιχείων των τοποθεσιών του BS. Ταυτόχρονες μετρήσεις θερμοκρασίας και φορτίου επέτρεψαν την ανάλυση των μεταξύ κατανάλωσης ισχύος, ρυθμού δεδομένων και θερμοκρασίας. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο BS, το οποίο περιγράφει την κατανάλωση ισχύος διαφορετικών διαμορφώσεων (δηλαδή, αριθμός τομέων, αριθμός πομπών ανά τομέα, μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς ραδιοσυχνότητας (RF) και πραγματικό φορτίο), που όμως ήταν αρκετά απλό για να εφαρμοστεί άμεσα σε ένα εργαλείο σχεδιασμού δικτύου. Αυτό επέτρεψε ταυτόχρονες προσομοιώσεις χωρητικότητας δικτύου, κάλυψης και κατανάλωσης ενέργειας για διαφορετικές διαμορφώσεις δικτύου. Η κατανάλωση ισχύος του BS υπολογίστηκε ως:

$$P_{BS} = \tau P_P + n P_{TRX} + (k_1 P_{RF1} + \dots + k_n P_{RFn}) / c \quad (7.3)$$

όπου, τα  $k_1 \dots k_n$  είναι συντελεστές φόρτωσης που περιγράφουν το κλάσμα της διαθέσιμης ισχύος RF που μεταδίδεται στους τομείς  $1 \dots n$ , με το  $n$  να είναι ο αριθμός των εγκατεστημένων τομέων. Το  $\tau$  υποδηλώνει την αύξηση της ισχύος επεξεργασίας στην εγκατεστημένη ζώνη βάσης, το  $P_P$  είναι η κατανάλωση ισχύος της μονάδας επεξεργασίας, ενώ το  $P_{TRX}$  περιγράφει την κατανάλωση ισχύος της ασύρματης μονάδας, το  $P_{RFn}$  αντιπροσωπεύει τη μέγιστη ισχύ εξόδου RF του τομέα  $n$  και το  $c$  είναι το συνεχές ρεύμα (direct current, DC) σε παράμετρο κλίσης μετατροπής RF. Αυτό το μοντέλο ταιριάζει ιδιαίτερα για την ανάλυση της αποτελεσματικότητας διαφορετικών διαμορφώσεων δικτύου μέσα σε ένα εργαλείο σχεδιασμού δικτύου. Το μοντέλο απαιτεί τη γνώση των πρακτικών παραμέτρων κατανάλωσης ισχύος BS για διαφορετικά επίπεδα φορτίου, τα οποία μπορούν να ληφθούν από τα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή BS.

Παρόλο που καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ανάπτυξης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε συνάρτηση με το φορτίο σε κατάσταση ενεργής λειτουργίας, οι σταθμοί βάσης των παλαιότερων συστημάτων δείχνουν σχετικά μεγάλο και σταθερό επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας ήδη σε κατάσταση αναμονής. Οι λειτουργίες αναστολής λειτουργίας BS, όπου ένα μόνο κελί ή ακόμη και ένα πλήρες BS βρίσκεται σε κατάσταση αδρανοποίησης, παίζουν σημαντικό ρόλο για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος του δικτύου κατά τη διάρκεια χαμηλών επιπέδων και περιόδων φόρτωσης. Ωστόσο, οι απαιτήσεις εκπομπής περιορίζουν το χρόνο ενεργοποίησης των λειτουργιών «ύπνου». Έτσι, για να ξεπεραστεί αυτό, το σύστημα 5G εισαγάγει νέες προσεγγίσεις καναλιών σηματοδότησης και τα 5G BS είναι ειδικά σχεδιασμένα ώστε να εισέρχονται σε διαφορετικές λειτουργίες «ύπνου» που χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη λειτουργία απενεργοποίησης και κατά συνέπεια εξοικονόμηση ενέργειας και χρόνου ανάκτησης.

Κατά συνέπεια, απαιτείται ένα νέο μοντέλο ισχύος, το οποίο να επιτρέπει τη μοντελοποίηση διαφορετικών επιπέδων απενεργοποίησης εξαρτημάτων (components) και κατανάλωσης ισχύος σε μεταβλητό χρόνο (time-variant):

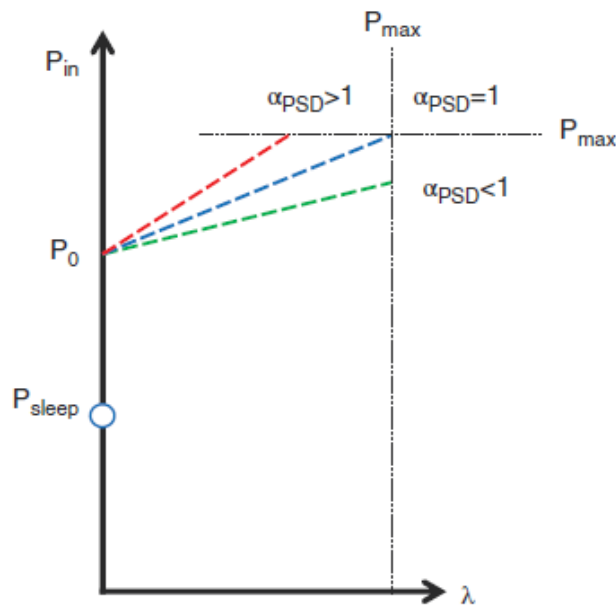
$$P_{BS} = \begin{cases} n(P_0 + v_p P_{max} \lambda \alpha_{PSD} + P_1 \lambda), & 0 < \lambda < 1 \\ nP_{sleep} & \lambda = 0 \end{cases}, \quad (7.4)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός τομέων στο BS, το  $v_p$  είναι η κλίση της εξαρτώμενης από το φορτίο κατανάλωσης ισχύος που καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την απόδοση και το  $P_1$  είναι η κατανάλωση ισχύος που σχετίζεται με τη ζώνη βάσης.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.1, η στιγμιαία κατανάλωση ισχύος ενός BS είναι ανάλογη με το επίπεδο φορτίου εύρους ζώνης  $\lambda$  με σταθερή πυκνότητα φάσματος ισχύος  $\alpha_{PSD}$ . Καθώς αυξάνεται το επίπεδο φορτίου, η συνολική κατανάλωση ισχύος του BS αυξάνεται ανάλογα. Το  $P_{max}$  είναι η μέγιστη ισχύς εξόδου, ενώ το  $P_0$  είναι η κατανάλωση ισχύος στην ελάχιστη ισχύ μη μηδενικής εξόδου λόγω της ανεξάρτητης λειτουργίας του φορτίου. Όταν το φορτίο είναι χαμηλό, το BS μπορεί να μεταβεί σε μικρο-ασυνεχή μετάδοση, πράγμα που σημαίνει ότι, αντί της συνεχούς λειτουργίας, το BS μεταβαίνει γρήγορα σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για πολύ μικρό διάστημα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η κατανάλωση ενέργειας θα μειωθεί περαιτέρω σε  $P_{sleep}$ , πράγμα που υποδηλώνει την κατανάλωση ισχύος BS σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας.

Να σημειωθεί ότι η πραγματική κατανάλωση ισχύος του BS συνδέεται στενά με την ισχύ μετάδοσης BS, ή ισοδύναμα, με την αναλογία πυκνότητας φάσματος ισχύος ( $\alpha_{PSD}$ ), η

οποία ορίζεται ως η αναλογία της πραγματικής πυκνότητας φάσματος ισχύος προς αυτήν με τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης πολλαπλασιασμένη με το συνολικό εύρος ζώνης.



Εικόνα 7.1: Απεικόνιση της συμπεριφοράς κατανάλωσης ισχύος ενός BS με σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος.[32]

### 7.1.3 Μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης και αξιολόγηση

Η ενεργειακή απόδοση μετράται σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, συνήθως για σταθμούς βάσης και τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό στο δίκτυο, και κατ'έκταση σε ένα ολόκληρο δίκτυο σε ένα ζωντανό περιβάλλον. Η απόδοση του δικτύου, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ισχύος, μπορεί να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί. Ωστόσο, οι προσομοιώσεις εξαρτώνται πάντα από υποθέσεις που ενδέχεται να διαφέρουν από τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι προσομοιώσεις καλύπτουν συνήθως τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, αλλά είναι σπάνια δυνατό να συμπεριλάβουν όλο το εξοπλισμό υποστήριξης (όπως κλιματισμός, συστήματα ασφαλείας, εξοπλισμός δικτύωσης που σχετίζεται με fronthaul ή backhaul κ.λπ.) εγκατεστημένο στις διάφορες τοποθεσίες. Συνεπώς, οι μετρήσεις εργαστηρίου είναι αναπόφευκτες για τη μέτρηση της πραγματικής απόδοσης του δικτύου. Τελικά, λόγω του πολύπλοκου χαρακτήρα των δικτύων τηλεπικοινωνιών, οι μέθοδοι αυτοί δεν μπορούν να περιγράψουν την πραγματική απόδοση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Πολλές δυνατότητες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του δικτύου δεν είναι ορατές σε μια αυτόνομη δοκιμή του BS σε ένα εργαστήριο, αλλά εμφανίζονται κατά την εξέταση ολόκληρου του δικτύου. Τέτοια αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ορατά μεταξύ διαφορετικών γενεών δικτύου και, φυσικά, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη επίσης όταν ο εξοπλισμός 5G θα μετρηθεί και θα αξιολογηθεί σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές.

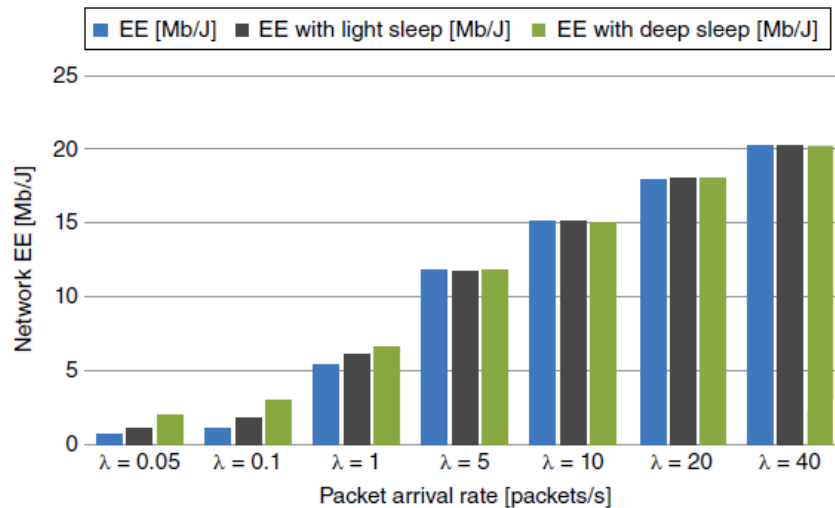
Μια μέτρηση σε ένα ενεργό περιβάλλον ενεργειακής απόδοσης περιλαμβάνει: μέτρηση με βάση την αναλογία μεταξύ της απόδοσης και της ενέργειας που καταναλώνεται (για την παροχή αυτής της απόδοσης), και μια μέτρηση που βασίζεται στην κάλυψη (δηλαδή, την περιοχή που καλύπτεται από το δίκτυο) και την ενέργεια που καταναλώνεται από το hardware που παρέχεται για αυτήν την κάλυψη, παρόμοια με αυτό που περιγράφεται στην

Ενότητα 7.1.2, αλλά εφαρμόζεται σε πραγματικά δίκτυα. Αυτή η δυαδικότητα προορίζεται να καλύψει περιπτώσεις όπου το δίκτυο αναπτύσσεται για σκοπούς χωρητικότητας και κυρίως για λόγους κάλυψης.

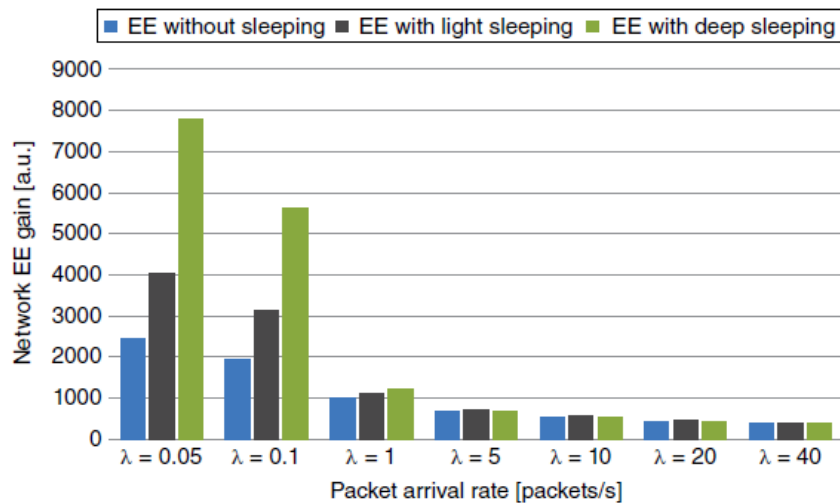
Προφανώς, η μέθοδος βασίζεται σε ένα σύνολο μετρήσεων (π.χ ενέργεια, όγκος δεδομένων, κάλυψη) που γίνονται απευθείας πάνω στο υπό δοκιμή δίκτυο. Για να εκτιμηθεί η απόδοση ενός 5G δικτύου ορίζεται ένα πλαίσιο 24 ωρών για να ληφθούν υπόψη οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Η καθορισμένη διαδικασία αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα [32]:

1. Υπολογισμός της αναμενόμενης πυκνότητας του όγκου κυκλοφορίας για μια πυκνή αστική ανάπτυξη 5G και υπολογισμός του αντίστοιχου χρόνου των πακέτων κατά την άφιξη τους.
2. Κλιμάκωση των ωρών άφιξης των ληφθέντων πακέτων για να εκτιμηθούν τα διαφορετικά επίπεδα φόρτωσης.
3. Επανάληψη των βημάτων 1 και 2 για την ανάπτυξη αγροτικών δικτύων 5G, λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων των χρηστών.
4. Εξαγωγή της συνολικής κατανάλωσης ισχύος του ασύρματου δικτύου 5G σε ένα δεδομένο φορτίο μέσω προσομοιώσεων βάσει των υπολογισμένων ωρών άφιξης των πακέτων και των σημείων φόρτωσης.
5. Επανάληψη των βημάτων για τις βασικές αναπτύξεις 4G, λαμβάνοντας υπόψη το 1000x χαμηλότερο όγκο κυκλοφορίας και τις διαφορετικές αναπτύξεις των συστημάτων 4G έναντι 5G
6. Τέλος, ενσωμάτωση αποτελεσμάτων με συγκεκριμένα βάρη δικτύου (τα οποία μπορεί να είναι διαφορετικά, π.χ. από χώρα σε χώρα) και σύγκριση της κατανάλωσης ισχύος του 5G με το 4G δίκτυο, για να βρεθεί η συνολική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν σχήματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης μια πυκνής περιοχής [73]. Στην Εικόνα 7.2 παρατηρούμε ότι, η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση 5G αντιστοιχεί για υψηλότερα επίπεδα φορτίου κίνησης, καθώς περισσότερη κίνηση μπορεί να παραδοθεί ενώ ο λόγος της ανεξάρτητης από το φορτίο στατικής κατανάλωσης ισχύος μειώνεται ανάλογα.. Οι στρατηγικές «ύπνου» μπορούν να προσφέρουν περαιτέρω κέρδη απόδοσης, ειδικά σε σενάρια χαμηλού φορτίου. Η Εικόνα 7.3 αποδεικνύει ότι όταν το επίπεδο φορτίου  $\lambda$  είναι χαμηλό, μπορεί να επιτευχθεί ένα υψηλό κέρδος απόδοσης του 5G έναντι του 4G, και αυτό το κέρδος αυξάνεται εφαρμόζοντας τις στρατηγικές «ύπνου». Ακόμη και όταν το επίπεδο φόρτωσης του συστήματος είναι πολύ υψηλό, η βελτίωση είναι αισθητή, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην εισαγωγή smallcells και ενός ενεργειακά αποδοτικότερου hardware εξοπλισμού για 5G.



Εικόνα 7.2: Ενεργειακή απόδοση RAN σε πυκνή αστική περιοχή.[73]



Εικόνα 7.3: Κέρδος ενεργειακής απόδοσης RAN σε πυκνή αστική περιοχή.[73]

## 7.2 Αξιολόγηση και ανάλυση Τεχνοοικονομικής ανάπτυξης 5G

Αυτή η ενότητα καλύπτει την οικονομική αξιολόγηση της ανάπτυξης της νέας τεχνολογίας 5G, τόσο από την άποψη του OPEX όσο και του CAPEX, περιγράφοντας μια μεθοδολογία για αυτήν την αξιολόγηση και παρουσιάζοντας τη συνολική τεχνοοικονομική αξιολόγηση και ανάλυση.

### 7.2.1 Οικονομική αξιολόγηση 5G δικτύων κινητών επικοινωνιών

Για την εισαγωγή της νέας τεχνολογίας 5G, εισήχθηκε μια οικονομική αξιολόγηση για την υποστήριξη της απόφασης σχετικά με την κυκλοφορία της. Αυτή η οικονομική ανάλυση βασίζεται στη διαφορά μεταξύ εσόδων και εξόδων από τη μια, και δαπανών από την άλλη.

Στην πράξη, η καθαρή παρούσα αξία (Net present value, NPV) είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης για την ανάλυση της κερδοφορίας μιας νέας τεχνολογίας. Ουσιαστικά, είναι η αθροιστική προεξοφλημένη ελεύθερη ταμειακή ροή μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η τεχνολογία είναι κερδοφόρα όταν το NPV είναι θετικό. Η περίοδος



αποπληρωμής είναι ένας άλλος συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης που μετρά τον απαραίτητο χρόνο για να γίνει κερδοφόρα η νέα τεχνολογία. Είναι η ημερομηνία κατά την οποία η αθροιστική προεξοφλημένη ελεύθερη ταμειακή ροή γίνεται θετική. Σε γενικές γραμμές, ένας πάροχος (Mobile network operator, MNO) μπορεί να αναμένει πρόσθετα έσοδα που δημιουργούνται από μια νέα τεχνολογία, όπως η 5G, από συνδρομές νέων πελατών, υψηλότερα τέλη συνδρομής και επακόλουθη εξοικονόμηση στις λειτουργίες δικτύου, π.χ. εξοικονόμηση του εξοπλισμού ενέργειας της νέας γενιάς. Οι δαπάνες χωρίζονται συνήθως σε κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) και λειτουργικές δαπάνες (OPEX), όπου η CAPEX περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες που ένας φορέας επενδύει για την αρχική εγκατάσταση του δικτύου, ενώ το OPEX είναι επαναλαμβανόμενες δαπάνες για τη λειτουργία, την εκτέλεση και τη συντήρηση του δικτύου.

### 7.2.2 CAPEX

Τα κύρια στοιχεία που αποτελούν το CAPEX ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας σχετίζονται με [32]:

- Αδειοδότηση φάσματος.
- Δημιουργία τοποθεσίας, συμπεριλαμβανομένης της απόκτησης τοποθεσίας.
- Αγορά κεραιών και τροφοδοτών.
- Αγορά εξοπλισμού δικτύου ασύρματης πρόσβασης (π.χ. BS).
- Αγορά βασικού εξοπλισμού δικτύου.
- Δημιουργία δικτύου μεταφορών.

Σε γενικές γραμμές, το μοντέλο CAPEX καλύπτει τη σχεδίαση μιας τοποθεσίας, την έρευνα τοποθεσίας, την απόκτηση τοποθεσιών, την πολιτική εργασία, την αγορά και εγκατάσταση ιστών, τη στέγαση, την εγκατάσταση και τη θέση λειτουργίας του μη τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και την αγορά εξοπλισμού τροφοδοσίας. Το αστικό έργο περιλαμβάνει μπετόν και χαλύβδινη δοκό ως θεμέλιο, υποστήριξη ιστών και ασύρματων κατασκευών, φράχτη και διαδρομή πρόσβασης στην τοποθεσία κ.λπ. Ο εξοπλισμός ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί σε τροφοδοσία και σύνδεση ηλεκτρικού ρεύματος, αγορά, παράδοση και εγκατάσταση γεννήτριας, δεξαμενής καυσίμου, τροφοδοτικού DC κ.λπ.

Το CAPEX διαφέρει για μια τοποθεσία χτισμένη σε ταράτσα από μια τοποθεσία χτισμένη σε ένα πράσινο έδαφος. Η υποδομή μιας πράσινης περιοχής περιλαμβάνει περισσότερα στοιχεία και είναι συχνά πιο ακριβή από μια ενός τελευταίου ορόφου. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο τιμές του κόστους δημιουργίας τοποθεσιών, ανάλογα με το αν πρόκειται μια περιοχή που μοιράζεται με άλλες προηγούμενες γενιές τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας, ή μια εντελώς νέα περιοχή αφιερωμένη αποκλειστικά στη νέα τεχνολογία. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ένα σημαντικό στοιχείο του CAPEX, το οποίο είναι το κόστος κατασκευής του δικτύου μεταφορών, δηλαδή το κόστος των fronthaul και backhaul του δικτύου από τους σταθμούς βάσης στο πρώτο σημείο συγκέντρωσης.

### 7.2.3 OPEX

Στο OPEX μια τοποθεσία μοιράζεται μεταξύ διαφορετικών γενεών κυψελοειδών δικτύων, ενεργειακού κόστους (βλ. Ενότητα 7.1), δικτύου μεταφοράς, κόστους χρέωσης και πώλησης. Μια περιοχή OPEX αποτελείται από ενοικίαση τοποθεσίας, κόστος εργασίας και ποικίλα κόστη συντήρησης. Το κόστος εργασίας ορίζεται ως το κόστος του χειριστή που είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την επίβλεψη του δικτύου. Το δίκτυο

μεταφορών OPEX αντικατοπτρίζει το ενοίκιο που καταβάλλεται σε δυνητικά τρίτα μέρη για την ενοικίαση της υποδομής δικτύου μεταφορών (π.χ. συνδεσιμότητα οπτικών ινών fronthaul ή backhaul).

#### 7.2.4 Μεθοδολογία αξιολόγησης τεχνοοικονομικής ανάπτυξης

Η προηγούμενη γενιά κυψελοειδών δικτύων (4G), σχεδιάστηκε κυρίως για χρήστες κινητών ευρυζωνικών ζωνών. Σε αυτό το πλαίσιο, η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών από άποψη κάλυψης και χωρητικότητας ήταν ο κύριος στόχος στην εξέλιξη των κινητών δικτύων. Όπως συνήθως, διερευνήθηκε μόνο η ανταλλαγή μεταξύ της εμπειρίας υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας από τη μία πλευρά και του δικτύου CAPEX και του δικτύου OPEX από την άλλη. Ωστόσο, η αυξανόμενη υιοθέτηση των μαζικών υπηρεσιών τύπου μηχανής (mMTC) φέρνει νέες προκλήσεις για τους μηχανισμούς σηματοδότησης των κυψελοειδών δικτύων και τη χωρητικότητα των συστημάτων επιπέδου ελέγχου. Επομένως, ακόμη και αν οι βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες κινητών του 5G (eMBB) μπορούν να αξιολογηθούν κάνοντας χρήση κλασικών μεθόδων, θα πρέπει να αναπτυχθεί νέα μεθοδολογία τεχνολογικής οικονομικής αξιολόγησης για υπηρεσίες mMTC.

Μια μεθοδολογία για την αξιολόγηση ανάπτυξης 5G που προτείνεται στο [74] αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Πρόβλεψη κυκλοφορίας 5G
- Εκτίμηση εσόδων 5G
- Διαστάσεις δικτύων 5G
- Αξιολόγηση σεναρίων ανάπτυξης
- Τεχνοοικονομική ανάλυση

Για την πρόβλεψη επισκεψιμότητας των 5G συστημάτων θεωρείται ότι η ζήτηση κίνησης eMBB ανά μονάδα περιοχής είναι ίση με τη μέση χρήση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας ανά χρήστη, επί τον αριθμό των χρηστών ανά μονάδα περιοχής. Η χρήση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας είναι το ποσό των δεδομένων που αποστέλλονται και λαμβάνονται ανά χρήστη κατά τη διάρκεια ενός μήνα. Για τις υπηρεσίες mMTC, η πρόβλεψη επισκεψιμότητας βασίζεται στην προβλεπόμενη δραστηριότητα ανά ημέρα και περιοχή, τον αριθμό συσκευών ανά υπηρεσία και τον χρόνο που χρειάζεται η υπηρεσία για πρόσβαση στο δίκτυο και για τη μετάδοση του ωφέλιμου φορτίου της.

Τρεις κατηγορίες υπηρεσιών mMTC έχουν καθοριστεί στο [74]:

1. Υπηρεσίες εσωτερικού χώρου mMTC/IoT οι οποίες προβλέπονται για τους σταθερούς αισθητήρες που αναπτύσσονται σε εσωτερικούς χώρους.
2. Υπηρεσίες εξωτερικού χώρου που αντιπροσωπεύουν αισθητήρες και ενεργοποιητές που αναπτύσσονται έξω, ενδεχομένως με κινητικότητα.
3. Υπηρεσίες που σε όλες τις περιπτώσεις απαιτούν κινητικότητα συσκευών.

Τα προφίλ επισκεψιμότητας ορίζονται για τρεις περιπτώσεις: χαμηλό φορτίο, βασικό και υψηλό φορτίο, όπου οι περιπτώσεις χαμηλού και υψηλού φορτίου αντιπροσωπεύουν ένα φορτίο που είναι δέκα φορές χαμηλότερο ή υψηλότερο από το βασικό, αντίστοιχα. Οι τιμές που λαμβάνονται υπόψη για το eMBB και για το mMTC παρατίθενται στον Πίνακα 7.1.

Υπηρεσία	Παράμετροι	Υψηλό φορτίο	Βασικό	Χαμηλό φορτίο
----------	------------	--------------	--------	---------------

			φορτίο	
<b>eMBB</b>	Μηνιαίαεπισκεψιμότητασε GB/μήνα/συνδρομητή (υψηλή χρήση)	100	50	20
	Μηνιαίαεπισκεψιμότητασε GB/μήνα/συνδρομητή (μέση χρήση)	30	15	8
	Μηνιαίαεπισκεψιμότητασε GB/μήνα/συνδρομητή (χαμηλή χρήση)	4	2	1
	Ποσοστό επί του συνόλου των χρηστών eMBB (%): (υψηλή χρήση)	70	20	10
	Ποσοστό επί του συνόλου των χρηστών eMBB (%): (μέση χρήση)	20	50	20
	Ποσοστό επί του συνόλου των χρηστών eMBB(%): (χαμηλή χρήση)	10	30	70
<b>mMTC</b>	Ποσοστό διείσδυσης υπηρεσιών MTC (%)	68	48	28
	Μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης MTC (%)	39	29	19
	Παράθυροάφιξηςσυσκευής (σε αριθμό πλαισίων) <sup>6</sup>	5	100	200
	Συντελεστής συμπαραγωγής συμβάντων <sup>7</sup>	0.00278	0.000278	0.000072
	NB-IoTποσοστό χρήσης επιπέδου ελέγχου ανά πλαίσιο <sup>8</sup>	0.25	0.5	0.8

**Πίνακας 7.1:**Περιπτώσεις επισκεψιμότητας των χρηστών eMBBκαι mMTC.[74]

Για την εκτίμηση των εσόδων 5G, χρειάζεται μια εκτίμηση του μέσου εσόδου ανά χρήστη ή ανά μονάδα (ARPU) για κάθε τύπο συσκευής. Η εκτίμηση λαμβάνει υπόψη την τακτική τιμολόγηση των χειριστών, την αξιολόγηση της προθυμίας των πελατών να πληρώσουν, την κίνηση ανά πελάτη, τα προγράμματα ανάπτυξης 5G και την κάθετη ανάλυση της αγοράς.

Η ARPU των υπηρεσιών της mMTC αναμένεται να είναι σχετικά χαμηλή, καθώς οι επονομαζόμενοι φορείς εκμετάλλευσης με χαμηλή ισχύ, καθορίζουν επί του παρόντος τα τιμολόγια για το χαμηλότερο άκρο της αγοράς. Οι εκτιμήσεις της ARPUγια τα επόμενα χρόνια, λαμβάνοντας υπόψη τις τάσεις που παρατηρούνται από τους κύριους παρόχους κινητής τηλεφωνίας στην Ευρώπη, απεικονίζονται στον Πίνακα 7.2.

Για υπηρεσίες eMBB, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παλαιότερες μέθοδοι αξιολόγησηςγια τα 5G. Για το mMTC, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις υπηρεσίες που βασίζονται σε περιπτώσεις όπως το έξυπνο δίκτυο (smartgrid), τη διαχείριση καταστροφών, τον εντοπισμό σεισμών ή πλημμυρών κ.λπ., επειδή μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία πρόσβασης ενεργοποιώντας τεράστιο αριθμό συσκευών σε μια περιορισμένη γεωγραφική περιοχή όταν θα στείλουνκάποιο συμβάν ταυτόχρονα. Σε τέτοιες συνθήκες, τα μοτίβα πρόσβασης επισκεψιμότητας του δικτύου θα είναι διαφορετικά από αυτά των τρέχοντωνκεντρικών δικτύων υπηρεσιών.

Έτος	2021	2022	2023	2024	2025
mMTC	5.0	4.0	3.5	3.0	2.5

<sup>6</sup> Αναφέρεται στον αριθμό των συσκευών που μπορούν να φτάσουν μέσα σε αυτό το παράθυρο.

<sup>7</sup> Παράγοντας καθορισμού των ενεργών συμβάντων και των πόρων τους σε μια χρονική στιγμή.

<sup>8</sup> Καθώς το NB-IoT χρησιμοποιεί τους ίδιους πόρους για τον έλεγχο και τη μετάδοση πληροφοριών δεδομένων, αυτός είναι ο παράγοντας που μετρά πόσους πόρους μπορούν να καταλάβουν την CP σε μια χρονική στιγμή.

URLLC	297	294	291	288	285
-------	-----	-----	-----	-----	-----

Πίνακας 7.2: Εκτιμήσεις της ARPU σε € για 28 χώρες της ΕΕ για την περίοδο 2021-2025.[74]

Τέλος, για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των συστημάτων 5G, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η κυκλοφορία μεταξύ των κυψελών και να συγκριθεί με βάση την εμπειρία των προηγούμενων γενεών κινητής τηλεφωνίας. Ο πολύ μεγάλος όγκος κυκλοφορίας ανά χρήστη eMBB σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή απαιτεί ένα υψηλό κόστος ανάπτυξης των smallcells, το οποίο θα πάρει πολύ μεγαλύτερο μέρος του συνολικού CAPEX και OPEX από ότι στις προηγούμενες γενιές τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας. Η μεγάλη ποσότητα πρόσθετων smallcells θα είναι πιο δύσκολο για τους παρόχους να κάνουν επικερδείς τις αναπτύξεις. Από την άλλη, όσον αφορά τους χρήστες mMTC, καταναλώνουν γενικά ελάχιστους πόρους. Κατά συνέπεια, η αύξηση των δαπανών της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι πολύ χαμηλή και η επίδραση στο ταμείο των φορέων εκμετάλλευσης είναι θετική.

## Πίνακας ακρωνυμίων

1G	First Generation Mobile Technology
2G	Second Generation Mobile Technology
3G	Third Generation Mobile Technology
3GPP	Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation Mobile Technology
5G	Fifth Generation Mobile Technology
AAS	Active Antenna System
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AR	Augmented Reality
ARPU	Average revenue per user or per unit
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BBU	Baseband Unit
BSS	Business Support Services
CAPEX	Capital Expenditure
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Complex Normal distribution
C-RAN	Cloud-based Radio Access Network
CUs	Centralized Units
D2D	Device-to-Device
DNS	Domain Naming System
DoS	Denial-of-Service
DUs	Distributed Units
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
eMBB	enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packet Core
FD	Full-Duplex
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
HAPS	High Altitude Platform Station
HSPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSTD	Horizontal security and trust domains
IMT	International Mobile Telecommunications
IMT-A	International Mobile Telecommunications Advanced
IMTS	Improved Mobile Telephone Service
InP	Infrastructure Provider
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key performance indicator
LCS	Local Coordination Systems
LOS (NLOS)	Line-Of-Sight (Non-LOS)
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to machine
MAC	Medium Access Control
MME	Mobility Management Entity
mMTC	massive Machine Type Communications

MNO	Mobile network operator
MS	Macro base Station
MVNO	Mobile Virtual Network Operator
NE	Network Elements
NFV	Network Function Virtualization
NMT	Nordic Mobile Telephones
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NTT	Nippon Telephone and Telegraph
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
OSS	Office of Strategic Services
P2P	Point-to-point
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDPCP	Packet Data Convergence Protocol
PGW	Packet Data Network Gateway
PNF	Physical Network Functions
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technologies
RF	Radio-Frequency
RRHs	Remote Radio Heads
SCM	Supply Chain Model
SDR	Software Defined Radio
SGW	Serving Gateway
SIC	Successive Interference Canceller
SINR	Signal-to-interference-plus-noise ratio
SVD	Singular Value Decomposition
TACS	Access Communication Systems
TAP	Traffic Aggregation Point
TDD	Time-division duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access
TSP	Telematics Service Provider
TTI	Transmission Time Interval
UAB	Unified Access and Backhaul
UDN	Ultra Dense Network
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications
VNO	Virtual Network Operator
VR	Virtual Reality
VSTD	Vertical security and trust domains
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WSN	Wireless Sensor Network
MIMO	Multiple-input Multiple-output
NIH	National Institutes of Health



## Βιβλιογραφία

---

- [1] Manjurul H. Khan, P.C. Barman. “5G- FUTURE GENERATION TECHNOLOGIES OF WIRELESS COMMUNICATION “REVOLUTION 2020” “. American Journal of Engineering Research (AJER), 2015.
- [2] Mohammad Meraj ud in Mir , Dr. Sumit Kumar. “Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G”. International Journal of Computer Science and Information Technologies, 2015.
- [3] G. Smilarubavathy, N. V. Abiramy, R. Nidhya, D. Pavithra. “The Survey on Evolution of Wireless Network Generations”. International Journal of Science Technology & Engineering, 2016.
- [4] Evans B.G., and Baughan, K. “Visions of 4G “. Electronics & Communication Engineering Journal, 2000.
- [5] Khaldoun Al Agha, Guy Pujolle, Tara Ali-Yahiya. “Mobile and Wireless Networks”. Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Time-division\\_multiple\\_access](https://en.wikipedia.org/wiki/Time-division_multiple_access)
- [7] Dr. X.Joshphin Jasaline Anitha. “4G Mobile Communications - Emerging Technologies”. International Journal of Multidisciplinary Approach and Studies, Nov- Dec 2015.
- [8] M. Junaid Arshad, Amjad Farooq, Abad Shah. “Evolution and Development Towards 4th Generation (4G) Mobile Communication Systems”. Journal of American Science, 2010.
- [9] Sidhartha Sankar Sahoo\*, Malaya Kumar Hota, Kalyan Kumar Barik. “5G Network a New Look into the Future: Beyond all Generation Networks”. American Journal of Systems and Software, 2014.
- [10] <https://el.wikipedia.org/wiki/5G>
- [11] Marina Ruggieri, Homayoun Nikookar. “5G: 2020 and Beyond”. River Publishers, 2014.
- [12] Ekram Hossain, Fellow, IEEE, and Monowar Hasan, Student Member, IEEE. “5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges”.
- [13] Shilpa Talwar, Debabani Choudhury, Konstantinos Dimou, Ehsan Aryafar, Boyd Bangerter, Kenneth Stewart Intel Corporation, Santa Clara, CA. “Enabling Technologies and Architectures for 5G Wireless”. 2014 IEEE.
- [14] Xuefei Peng and Jiandong Li. “Harvested Energy Maximization of SWIPT System with Popularity Cache Scheme in Dense Small Cell Networks”. Research Article, Hindawi, 2019.
- [15] Jonathan Rodriguez. “Fundamentals of 5G Mobile Networks”. Published by John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [16] <https://www.dataways.gr/integrated-solutions/virtualization>
- [17] Wei Xiang, Kan Zheng, Xuemin (Sherman) Shen Editors. “5G Mobile Communications”. Springer International Publishing Switzerland 2017.
- [18] Afif Osseiran, Jose F. Monserrat, Patrick Marsch. “ 5G Mobile and Wireless Communications Technology”. Cambridge University Press 2016.
- [19] Αντώνης Ασπρέας, “Μελέτη συστημάτων Massive MIMO”, Διπλωματική Εργασία, 2015.
- [20] Γεώργιος Κυριακόπουλος, “Μοντελοποίηση MIMO καναλιού με την χρήση θεωρίας γραφημάτων για επικοινωνίες χιλιομετρικών κυμάτων(5G)”, Διπλωματική Εργασία, 2015.



- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_function\\_virtualization](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_function_virtualization)
- [22] Αντώνιος Κ. Γεωργακόπουλος. “5G Network Slicing: Περιγραφή και Προκλήσεις”. Πτυχιακή Εργασία, 2018.
- [23] Andreas Baumgartner, Varon S. Reddy, Thomas Bauschert. “Mobile Core Network Virtualization: A Model for combined Virtual Core Network Function Placement and Topology Optimization”. Published in: Proceedings of the 2015 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft).
- [24] Παναγιώτης Γ. Τζαγκαράκης. “Τεχνολογίες κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς”. Πτυχιακή Εργασία, 2016.
- [25] Kenichi HIGUCHI, Anass BENJEBBOUR. “Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access”. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2015
- [26] Xuemin (Sherman) Shen. “Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks”. THE MAGAZINE OF GLOBAL INTERNETWORKING, 2015.
- [27] Hongliang Zhang, Yun Liao, Lingyang Song. “D2D-U: Device-to-Device Communications in Unlicensed Bands for 5G System”. IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, 2017.
- [28] [https://en.wikipedia.org/wiki/LTE\\_in\\_unlicensed\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_in_unlicensed_spectrum)
- [29] Akram Hakiri, Pascal Berthou. “Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges”. CNRS, LAAS, 7 Avenue du colonel Roche, F-31031 Toulouse, France Univ de Toulouse, UPS, LAAS, F-31031 Toulouse, France.
- [30] Faqir Zarrar Yousaf, Michael Bredel, Sibylle Schaller, Fabian Schneider. “NFV and SDN—Key Technology Enablers for 5G Networks”. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 2017.
- [31] Manar Jammal, Taranpreet Singh, Abdallah Shami, Rasool Asal, Yiming Li. “Software defined networking: State of the art and research challenges”. M. Jammal et al. / Computer Networks 72 (2014) 74–98.
- [32] Patrick Marsch, Ömer Bulakçı, Olav Queseth, Mauro Boldi. “5G System Design”. John Wiley & Sons Ltd, first published 2018.
- [33] ΚΑΛΥΒΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, “Δίκτυα 5ης γενιάς, Τεχνολογίες Δικτύωσης καθοριζόμενες από το Λογισμικό & Εικονοποίησης διαδικτυακών λειτουργιών”. Πτυχιακή Εργασία, 2018.
- [34] Μίντης Δημήτρης. “Επικοινωνίες 5ης Γενιάς (5G) Εφαρμογές, Τεχνολογίες και Πρότυπα”. Διπλωματική Εργασία, 2018.
- [35] Mohammad Asif Habibi, Bin Han, Hans D. Schotten, “Network Slicing in 5G Mobile Communication: Architecture, Profit Modeling, and Challenges, Conference”. 14th International Symposium on Wireless Communication Systems, August 2017.
- [36] Xiaohu Ge, Song Tu, Guoqiang Mao, Cheng-Xiang, Wang, Tao Han. “5G Ultra-Dense Cellular Networks”. IEEE Wireless Communications, Dec. 2015.
- [37] X. Ge et al., “5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advances,” IEEE Network, vol. 28, no. 6, Nov. 2014, pp. 6–11.
- [38] S. F. Yunas, M. Valkama and J. Niemela, “Spectral and Energy Efficiency of Ultra-Dense Networks under Different Deployment Strategies,” IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 1, Jan. 2015.

- [39] Bhushan et al., “Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution in 5G,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, Feb. 2014, pp. 82–89.
- [40] C.-X. Wang et al., “Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, Feb. 2014.
- [41] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, S. Geirhofer. “Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G”. *IEEE Communications Magazine* (Volume:52, Issue:2), February 2014.
- [42] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen Hanly, Angel Lozano, Anthony C.K. Soong, Jianzhong Charlie Zhang. “What Will 5G Be?”. *IEEE special issue on 5g wireless communication systems*, May 2014.
- [43] S. Larew, T. Thomas, and A. Ghosh, “Air interface design and ray tracing study for 5G millimeter wave communications,” in *Proc., IEEE Globecom B4G Workshop*, Dec. 2013.
- [44] Wen H, Ho P H, Gong G. “A novel framework for message authentication in vehicular communication networks”. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Global Telecommunications*, Honolulu, 2009.
- [45] ETSI GS NFV-SEC 001, “Network Functions Virtualisation; NFV Security; Problem Statement”, 2014
- [46] S. Kent, K. Seo. “Security architecture for the internet protocol”. RFC 4301, (2005), <https://doi.org/10.17487/RFC4301> , <http://www.rfc-editor.org/info/rfc4301> .
- [47] T.-H. Chang, Y.-W. P. Hong and C.-Y. Chi. “Training signal design for discriminatory channel estimation”. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2009)*, Dec. 2009.
- [48] Xinsheng JI, Kaizhi HUANG\* , Liang JIN, Hongbo TANG, Caixia LIU, Zhou ZHONG, Wei YOU, Xiaoming XU, Hua ZHAO, Jiangxing WU & Ming YI. “Overview of 5G security technology”. *Information Sciences* August 2018, Vol. 61 081301:1–081301:25 <https://doi.org/10.1007/s11432-017-9426-4>
- [49] Wu J X. “Research on network space mimicry defense technology”. *Cyber Secur*, 2016.
- [50] Patwari N, Kasera S K. “Temporal link signature measurements for location distinction”. *IEEE Trans Mobile Comput*, 2011.
- [51] Xiao L, Greenstein L J, Mandayam N B, et al. “Fingerprints in the ether: using the physical layer for wireless authentication”. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Glasgow, 2007.
- [52] Caparra G, Centenaro M, Laurenti N, et al. “Energy-based anchor node selection for IoT physical layer authentication”. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Kuala Lumpur, 2016.
- [53] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_ad\\_hoc\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_ad_hoc_network)
- [54] Darrell M. West. “How 5G technology enables the health internet of things”. *Center for Technology Innovation at BROOKINGS*, July 2016.
- [55] Taipei Citizen. “Telecare Service System for Hypertension Management in Elders”, undated.
- [56] Dana Wollman. “The Internet of Toddlers,” *Engadget*, January 7, 2014.

- [57] National Institutes of Health, “Precision Medicine Initiative Cohort Program”, undated.
- [58] Jocelyn Kaiser, “NIH’s 1-Million-Volunteer Precision Medicine Study Announces First Pilot Projects,” *Science*, February 25, 2016.
- [59] Jonathan Vanian. “Intel’s Cancer Cloud Gets New Recruits,” *Fortune*, March 31, 2016.
- [60] Adriano Baratè, Goffredo Haus, Luca A. Ludovico, Elena Pagani, & Nello Scarabottolo. “5G Technology for augmented and virtual reality in education”. ISSN:2184-044X ISBN:978-989-54312-5-0 , 2019.
- [61] Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., Sabella, D. “On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19, 2017.
- [62] Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su L., Vasilakos A.V. “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. *Wireless Networks*”, Springer, 2015.
- [63] Baratè, A., Ludovico, L.A. “Local and Global Semantic Networks for the Representation of Music Information”. *Journal of e-Learning and Knowledge Society*, 2016.
- [64] Massimo Condoluci ,Maria Lema Rosas, Toktam Mahmoodi, Mischa Dohler. “5G IoT Industry Verticals and Network Requirements”. Publisher: IDI Global, Apr 2017.
- [65] Fantastic-5G, “Use cases, KPIs and requirements” , 2015.
- [66] “5G automotive vision”, Oct 2015.
- [67] <https://www.slideshare.net/ITU/5g-and-automotive-cellular-v2x-vehicleteoeverything>
- [68] Pelletier A. “Virtual reality: the reality for connectivity providers”. Retrieved , July 2016.
- [69] Sofana Reka. S, Tomislav Dragicevic, Pierluigi Siano and S.R. Sahaya Prabakaran. “Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review”. Received: 18 March 2019; Accepted: 10 May 2019; Published: 4 June 2019.
- [70] ITU. “Smart Sustainable Cities: An Analysis of Definitions”. FG-SSC, 2014.
- [71] 5G PPP FANTASTIC-5G project, Internal Report IR2.1, “Use cases, KPIs and requirements, Oct. 2015.
- [72] CELTIC Opera-NET project, <https://www.celticplus.eu/project-operanet/>
- [73] 5G-PPP White Paper, “Living document on use cases and performance evaluation”, Version 1, April 2016.
- [74] 5G PPP METIS-II project, Deliverable D1.2, “Quantitative techno-economic feasibility assessment”, June 2017.
- [75] S. Mohammad Razavizadeh, Minki Ahn, and Inkyu Lee. “Three-Dimensional Beamforming- A new enabling technology for 5G wireless networks”. *IEEE Signal processing magazine*, November 2014.
- [76] H. E. Lee, “Synthetic array processing for underwater mapping applications,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Aug. 1978.

- [77] M. Karaman, I. O. Wygant, O. Oralkan, and B. T. Khuri-Yakub, "Minimally redundant 2-D array designs for 3-D medical ultrasound imaging," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 28, July 2009.
- [78] M. Valin, F. Michaud, and J. Rouat, "Robust 3D localization and tracking of sound sources using beamforming and particle filtering," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing*, May 2006.
- [79] J. Meyer and G. Elko, "A highly scalable spherical microphone array based on an orthonormal decomposition of the soundfield," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, May 2002.
- [80] H. Kanj, P. Lusina, S. M. Ali, and F. Kohandani. "A 3D-to-2D transform algorithm for incorporating 3D antenna radiation patterns in 2D channel simulators". *IEEE Antenna Propagat. Wireless Lett.*, June 2009.
- [81] ITU-R Report M.2135-1. "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-advanced", 2009.
- [82] R. H. Clarke. "A statistical theory of mobile radio reception". *Bell Syst. Tech. J.*, July/Aug, 1968.
- [83] T. Aulin. "A modified model for the fading signal at a mobile radio channel". *IEEE Trans. Veh. Technol.* Aug, 1979.
- [84] J. Meinila, P. Kyosti, L. Hentila, T. Jamsa, E. Suikkanen, E. Kunnari, and M. Narandzié. "D5.3: WINNER+ final channel models". *Wireless World Initiative New Radio WINNER*, P. Heino, Ed., CELTIC/CP5-026, 2010.
- [85] Y. H. Nam, B. L. Ng, K. Sayana, Y. Li, J. Zhang, Y. Kim, and J. Lee. "Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next-generation cellular technology". *IEEE Commun. Mag.*, June 2013.
- [86] Jean-Marc Kelif , Marceau Coupechoux , Mathieu Mansanarez. "A 3D Beamforming Analytical Model for 5G Wireless Networks", undated.