

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ &  
ΠΑΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ**  
UNIVERSITY OF PATRAS

**Θέμα Διπλωματικής Εργασίας:**

**«Τεχνο-οικονομική ανάλυση κέρδους παρόχων για κινητά δίκτυα  
πέμπτης γενιάς και εξής: Η περίπτωση της τεχνολογίας Network  
Function Virtualization (NFV)»**

**Συγγραφέας: Θεοφάνης Η. Τσικριτέας,**

**AM: 1058220**

**Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Ι. Μπούρας,**

**Πάτρα, Ιούνιος 2022**

## Πρόλογος-Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών και υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Χρήστο Ι. Μπούρα, για την συνεργασία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα την διδάκτορα Αναστασία Α. Κόλλια για την καθοδήγηση, την επιμονή της και το αδιάκοπο ενδιαφέρον που μου υπέδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος συμβάλλοντας στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την στήριξη, την εμπιστοσύνη και την συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια. Ακόμη, αποδίδω ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες στους φίλους μου οι οποίοι αποτέλεσαν σημαντικό κομμάτι της ζωής μου καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος-Ευχαριστίες .....	2
Κατάλογος εικόνων .....	6
Ακρωνύμια.....	7
Περίληψη .....	9
Executive summary .....	10
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	11
1.1 Συνεισφορά διπλωματικής και επιμέρους στόχοι.....	12
1.2 Διάρθρωση κεφαλαίων .....	13
<b>2. Κινητά δίκτυα επικοινωνιών</b> .....	13
2.1 Εξέλιξη κινητών δικτύων - προηγούμενες γενιές.....	13
2.1.1 Πρώτη γενιά (1G).....	14
2.1.2 Δεύτερη γενιά (2G).....	15
2.1.3 Τρίτη γενιά (3G).....	16
2.1.4 Τέταρτη γενιά (4G).....	17
2.2 Επισκόπηση κινητών δικτύων επικοινωνίας 5G .....	19
2.3 Περιπτώσεις χρήσης και εφαρμογές 5G.....	20
2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 5G .....	23
2.5 Αρχιτεκτονική και ασφάλεια 5G .....	26
2.6 Τεχνολογίες κινητών δικτύων 5G.....	30
2.6.1 Software Defined Networking (SDN).....	30
2.6.2 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) .....	32
2.6.3 Επικοινωνία «συσκευής με συσκευή» (Device-to-Device) .....	33
2.6.4 Cognitive Radio.....	34
2.6.5 Radio Access Network .....	35
2.6.6 Υπολογιστική Νέφους (Cloud Computing) .....	35
2.6.7 Millimeter Waves (mmWave).....	36
2.7 Πάροχοι κινητών δικτύων και όφελος από τα δίκτυα 5G .....	37
2.7.1 Οι πάροχοι κινητών υπηρεσιών στην Ελλάδα.....	37

2.7.2	Συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας.....	39
2.7.3	Ανάπτυξη δικτύων 5G στην Ελλάδα.....	40
2.8	Κινητά δίκτυα 6G: όραμα και πιθανές τεχνικές.....	42
2.8.1	Πρόοδος έρευνας 6G.....	43
2.8.2	Χαρακτηριστικά δικτύων 6G.....	44
2.8.3	Απαιτήσεις και εφαρμογές των δικτύων 6G.....	45
2.8.4	Προκλήσεις για τα δίκτυα 6G.....	49
<b>3.</b>	<b>Network Function Virtualization (NFV)</b> .....	<b>49</b>
3.1	Ιστορική ανασκόπηση.....	49
3.2	Δομή και αρχιτεκτονική.....	50
3.2.1	Virtual Network Function Layer (NFVI).....	53
3.2.2	Επίπεδο υποδομής NFVI.....	54
3.2.3	Operation Support Subsystem (OSS).....	55
3.2.4	NFV MANO.....	56
3.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αρχιτεκτονικής NFV.....	57
3.4	Εικονικοποίηση LTE EPC.....	59
3.4.1	Η περίπτωση του vEPC και σχεδιασμός.....	60
3.5	NFV για τεμαχισμό δικτύου (Network Slicing).....	61
<b>4.</b>	<b>Οικονομικό πλαίσιο NFV</b> .....	<b>63</b>
4.1	Βασικές οικονομικές Έννοιες.....	63
4.2	Τεχνοοικονομικό πλαίσιο - Σχετικές έρευνες.....	64
4.3	NFV-Οικονομική προσέγγιση.....	66
<b>5.</b>	<b>Τεχνοοικονομική μελέτη εργασίας</b> .....	<b>67</b>
5.1	Ανάλυση οφέλους 5G δικτύων.....	67
5.2	Μοντέλο τιμολόγησης.....	69
5.3	Εικονικοποίηση δικτύου πρόσβασης επικοινωνίας – Η περίπτωση του C-RAN.....	70
5.3.1	Βασικά οφέλη C-RAN.....	73
5.3.2	Τεχνικές προκλήσεις του C-RAN.....	74
5.4	Αρχιτεκτονική C-RAN και Σενάρια Ανάπτυξης.....	75
5.4.1	C-RAN έναντι παραδοσιακού RAN.....	78

5.5 TCO .....	83
5.6 Net Present Value (NPV).....	85
5.7 Ανάλυση CapEx και OpEx και πειράματα .....	86
<b>6. Συμπεράσματα .....</b>	<b>92</b>
<b>7. Μελλοντική έρευνα .....</b>	<b>94</b>
Βιβλιογραφία.....	96

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Εξέλιξη τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας [9].....	18
Εικόνα 2. Νέες εφαρμογές της 5G εποχής [15] .....	23
Εικόνα 3 Γενική αρχιτεκτονική δικτύων 5G [21].....	29
Εικόνα 4 Υβριδική 5G οπτική ασύρματη αρχιτεκτονική βασισμένη σε SDN [25].....	32
Εικόνα 5 MIMO roadmap [27] .....	33
Εικόνα 6 D2D επικοινωνίες [30] .....	34
Εικόνα 7 Ενοποιημένη ευέλικτη fog and cloud computing αρχιτεκτονική για 5G δίκτυα [34].....	36
Εικόνα 8 Εφαρμογή 5G στην Ελλάδα [41].....	42
Εικόνα 9 Προκλήσεις 6G [45] .....	48
Εικόνα 10 Σχέδιο της VNF αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβανομένου VNFs, VNFI, και NFV-MANO [48].....	51
Εικόνα 11 Διαφορές NFV – SDN [49] .....	52
Εικόνα 12 Διαχειριζόμενη υπηρεσία δρομολογητή με χρήση NFV [50].....	53
Εικόνα 13 Αρχιτεκτονική NFV MANO [51].....	57
Εικόνα 14 Από το παραδοσιακό EPC στο εικονικοποιημένο EPC.....	60
Εικόνα 15 Σύνδεση συσκευών και slice .....	62
Εικόνα 16 NFV for network slicing [54] .....	63
Εικόνα 17 Μέθοδος διαχωρισμού συναρτήσεων BTS [63].....	75
Εικόνα 18 C-RAN αρχιτεκτονική 1: Fully Centralized Solution [63].....	76
Εικόνα 19 C-RAN Αρχιτεκτονική 2: Partial Centralized Solution [63].....	76
Εικόνα 20 Traditional RAN vs C-RAN [67] .....	79
Εικόνα 21 Ανάλυση TCO μιας τοποθεσίας.....	84
Εικόνα 22 Σύνοψη κόστους δικτύου [62].....	85
Εικόνα 23 Στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας στην αρχιτεκτονική C-RAN για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.....	90

## Ακρωνύμια

- 1G:** Πρώτη γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 2G:** Δεύτερη γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 2.5G:** 2,5 γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας (GPRS)
- 2.75G:** 2,75 γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας (EDGE)
- 3G:** Τρίτη γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 4G:** Τέταρτη γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 5G:** Πέμπτη γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- 6G:** Έκτη γενιά τεχνολογιών κινητής τηλεπικοινωνίας
- AMPS:** Advanced mobile phone system
- API:** Application programming interface
- BBU:** Baseband Unit
- BCI:** Brain computer interface
- BTS:** Base transceiver Station
- C-RAN:** Cloud radio access network
- CR:** Cognitive radio
- D2D:** Device-to-device
- DHCP:** Dynamic Host Configuration Protocol
- DoS:** Denial-of-Service
- EDGE:** Enhanced Data GSM Evolution
- EPC:** Evolved Packet Core
- eMBB:** Enhanced mobile broadband
- FDMA:** Frequency Division Multiple Access
- FWA:** Fixed wireless access
- GBPS:** Giga bits per second
- GSM:** Global System of Mobile Communication
- HSS:** Home Subscriber System
- IoE:** Internet of energy

**IoT:** Internet of things  
**ITU:** International telecommunication union  
**LTE:** Long term evolution  
**M2M:** Machine-to-machine  
**MCS:** Modulation and coding scheme  
**MEC:** Multi-access edge computing  
**MIMO:** multiple-input multiple-output  
**MME:** Mobility Management Entity  
**MMS:** Multimedia Messaging Service  
**mmWave:** Millimeter Wave  
**MTS:** Mobile Telephone System  
**NFV:** Network Function Virtualization  
**NMT:** Nordic mobile telephone  
**OSS:** Operation Support Subsystem  
**P-GW:** Packet Data Network Gateway  
**RAN:** radio access network  
**RRH:** Remote Radio Head  
**S-GW:** Serving Gateway  
**SBA:** Service Based Architecture  
**SDN:** Software Defined Networking  
**SDR:** Software Defined Radio  
**SST:** Slice/Service Type  
**TDMA:** Time Division Multiple Access  
**UPF:** User lane function  
**URLLC:** Ultra reliable low latency communications  
**VM:** Virtual machine  
**WCDMA:** Wide band Code Division Multiple Access



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει μέσω μιας τεχνο-οικονομικής ανάλυσης την περίπτωση της Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (Network Function Virtualization - NFV) στα κινητά δίκτυα 5G, μιας τεχνολογίας που προσεγγίζει την ανάπτυξη των νέων δικτύων με αρκετό ενδιαφέρον. Ο κύριος στόχος των NFV τεχνικών είναι η ανεξαρτητοποίηση του λογισμικού από το υλικό και παροχή των ίδιων λειτουργιών μέσω λογισμικού που μπορεί να λειτουργεί για οποιαδήποτε περιοχή και σε ανεξαρτήτου κατασκευαστή υλικό. Τα οικονομικά οφέλη που δημιουργούν αυτές οι τεχνικές οδηγούν στην αλλαγή των υπάρχουσών δικτύων δημιουργώντας πιο σύγχρονες δομές. Το NFV δίνει την δυνατότητα της μετατροπής του διαδικτυακού υλικού σε εξομοιώσεις δίνοντας έτσι μεγάλη ευελιξία στον τρόπο υλοποίησης.

Το NFV και τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G) αποτελούν τεχνολογίες αιχμής και όπως όλα δείχνουν θα επικρατήσουν τα επόμενα χρόνια καθώς αποτελούν επίκεντρο μελετών της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών. Σημειώνεται ότι τα δίκτυα 5G είναι βασισμένα στην τεχνολογία του NFV.

Η δυνατότητα μείωσης του κόστους που μπορεί να παρουσιάσει η αρχιτεκτονική NFV είναι αξιοσημείωτη, καθώς η εικονική υλοποίηση μειώνει τις ανάγκες για πόρους ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος. Η χρήση του επιφέρει αποδοτικότερες εκτιμήσεις CapEx και OpEx με μικρότερες δαπάνες σε διάφορους τομείς.

Αρχικά, παρουσιάζονται αναλυτικά η δομή των κινητών δικτύων επικοινωνίας και ειδικότερα τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας 5G. Έπειτα, αναλύονται τόσο οι βασικές αρχές εικονικοποίησης δικτύων (NFV) όσο και οι βασικές αρχιτεκτονικές της, παρουσιάζοντας τις περιπτώσεις εικονικοποίησης που αφορούν την συγκεκριμένη τεχνολογία. Τέλος, εξετάζεται το κόστος δύο περιπτώσεων τεχνολογιών κινητών δικτύων επικοινωνίας, συγκρίνοντας δεδομένα και δίνοντας στους παρόχους τηλεπικοινωνιών μία εικόνα όσων αφορά την ανάπτυξη τους στην Ελλάδα χρησιμοποιώντας και τεχνολογίες όπως το NFV.

## Executive summary

This thesis presents through a techno-economic analysis the case of Network Function Virtualization (NFV) in the fifth generation mobile networks, a technology that approaches the development of new networks with considerable interest. The main goal of NFV techniques is to make the software independent of the hardware and to provide the same functions through software that can work for any area and in any independent manufacturer's hardware. The economic benefits of these techniques lead to the transformation of existing networks by creating more modern structures and adopting this technology. NFV enables the conversion of real hardware into simulations, thus giving great flexibility in the way of implementation.

NFV and fifth generation (5G) networks are cutting-edge technologies and are likely to prevail in the coming years as they become the focus of studies in the telecommunications industry. Note that 5G networks are based on NFV technology.

The potential cost reduction of the NFV approach is remarkable, as virtual implementation reduces resource needs, thus minimizing costs. Its use results in more efficient CapEx and OpEx estimates with lower costs in various areas.

First, the structure of mobile communication networks is presented in detail, and in particular the fifth generation mobile communication networks. Then, both the basic principles of network virtualization (NFV) and its basic architectures are analyzed, presenting the virtualization cases related to the specific technology. Finally, the cost of two cases of mobile communication technologies is examined, comparing data and giving telecommunications providers an idea of their development in Greece using technologies such as NFV.

## 1. Εισαγωγή

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G αποτελούν βασικό παράγοντα για τον κλάδο της βιομηχανίας που απαιτεί αξιόπιστες, ασφαλείς, με χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά ταχύτατες επικοινωνίες. Σήμερα, οι κλάδοι της βιομηχανίας διακρίνονται από τους διαφορετικούς τύπους υλικού με διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Μέχρι τώρα, η εξάρτηση μεταξύ εξοπλισμού και λογισμικού δικτύου βασισμένη στα πρότυπα των προμηθευτών δεν ήταν εφικτό να διασπαστεί βάζοντας περιορισμούς στους παρόχους. Καθώς νέες υπηρεσίες λαμβάνουν χώρα και η ανάπτυξη των δικτύων εξελίσσεται, απαιτούνται βελτιώσεις και εκσυγχρονισμός των δικτύων το οποίο οδηγεί σε αύξηση των δαπανών.

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνο-οικονομικές μελέτες λαμβάνουν αξιοσημείωτη βαρύτητα στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Ο ανταγωνισμός και η μεγάλη πρόοδος της τεχνολογίας οδηγεί την βιομηχανία σε αναζήτηση καλύτερων λύσεων, με την τεχνολογία να εξελίσσεται βασισμένη και σε οικονομικά δεδομένα. Οι παρόχοι υπηρεσιών καλούνται να ακολουθήσουν τις εξελίξεις και να επενδύσουν στα δίκτυα τους ώστε να επιφέρουν τις απαραίτητες αναβαθμίσεις.

Η αρχιτεκτονική Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (Network Function Virtualization - NFV) έχει ως στόχο την εξάλειψη της εξάρτησης που έχει το λογισμικό δικτύου με το υλικό, την δυνατότητα ανάπτυξης δικτύου κάνοντας χρήση υλικού διαφορετικών προμηθευτών και την ύπαρξη συνεργασίας με οποιαδήποτε πλατφόρμα λογισμικού. Οι τυπικές λειτουργίες δικτύωσης πρόκειται να αντικατασταθούν με την είσοδο του NFV για τα ασύρματα δίκτυα. Προβλέπεται επίσης βελτίωση στις δαπάνες CapEx και OpEx, καθώς η εκτέλεση του μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εξοπλισμό που έχει βάση το Cloud, ανεξάρτητα από την τοποθεσία των μονάδων δικτύου. Η αρχιτεκτονική δικτύου του παρελθόντος πρόκειται να αλλάξει και ο λόγος είναι ότι η αρχιτεκτονική NFV φέρνει σημαντικές αλλαγές στα παραδοσιακά δίκτυα.

Η αρχιτεκτονική NFV συνδέεται με πολλές περιπτώσεις χρήσης, όμως σε αυτή την έρευνα δίνεται περισσότερο βάση στο κινητό πεδίο δικτύου και πιο ειδικά στην εικονικοποίηση του LTE, μέσω του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network - RAN), αναλύοντας την προσέγγιση του Κεντρικού Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (Centralized RAN - CRAN) το οποίο αποτελεί σημαντικό βήμα για τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας.

## 1.1 Συνεισφορά διπλωματικής και επιμέρους στόχοι

Η παρούσα διπλωματική εξετάζει την εξέλιξη των τρεχόντων θεμάτων των κινητών δικτύων επικοινωνίας και αναλύει την ενσωμάτωση των σύγχρονων τεχνολογιών στην δομή του δικτύου με σκοπό τον εκσυγχρονισμό και την βελτιστοποίηση της διαχείρισης των κινητών δικτύων. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στα κινητά δίκτυα επικοινωνίας και ανάλυση επάνω σε ζητήματα που έχουν να κάνουν με την 5<sup>η</sup> γενιά. Αναλύονται οι νέες τεχνολογίες και αναφέρονται θέματα λειτουργικότητας και αξιοπιστίας. Επιπλέον, πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση στην τεχνολογία NFV παρουσιάζοντας τις πιθανές αξιόπιστες και πλήρως λειτουργικές χρήσεις του. Γίνεται προσπάθεια ώστε να απαντηθούν βασικά ερωτήματα που προκύπτουν από την εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνολογίας σε ένα δίκτυο, βασιζόμενη σε οικονομικά στοιχεία που προκύπτουν από επιστημονική έρευνα. Βασικοί στόχοι της εργασίας είναι οι παρακάτω:

- Περιγραφή των απαιτήσεων που προκύπτουν στα δίκτυα 5G.
- Βιβλιογραφική έρευνα στα θέματα των δικτύων 5G και στις σχετιζόμενες τεχνολογίες του.
- Ανάλυση των τεχνολογιών παρουσιάζοντας τα χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα.
- Ανάλυση στην δομή και την λειτουργικότητα της αρχιτεκτονικής NFV.
- Επιλογή προσεγγίσεων βασισμένα σε NFV με στόχο την ανάδειξη της λειτουργίας του.
- Πειραματική αξιολόγηση και ανάλυση συμπερασμάτων σχετικά με την εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών.

Τέλος, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν μέσω της αξιολόγησης των επιμέρους προσεγγίσεων και περιγράφονται σημαντικές περιπτώσεις για μελλοντική έρευνα σε σχετικά ζητήματα.

## 1.2 Διάρθρωση κεφαλαίων

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται μια γενική εικόνα των κινητών δικτύων επικοινωνίας πέμπτης γενιάς, όπως επίσης και μια αναδρομή σε προηγούμενες γενιές δικτύων. Γίνεται αναλυτική αναφορά σε πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και στις απαιτήσεις. Γίνεται αναφορά στις σχετικές τεχνολογίες της πέμπτης γενιάς. Επιπλέον, δίνονται στοιχεία που αφορούν τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας στην Ελλάδα και πως η είσοδος της πέμπτης γενιάς επηρέασε την κινητή τηλεφωνία. Επίσης, γίνεται μια εισαγωγή σε μελέτες που αφορούν την επόμενη έκτη γενιά. Στο κεφάλαιο 3, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την τεχνολογία NFV. Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του, οι πιθανές εφαρμογές του και τα βασικά οφέλη που μπορεί να αποφέρει. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μία εισαγωγή στο βασικό οικονομικό πλαίσιο που αφορά την συγκεκριμένη ερευνητική διαδικασία. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία. Στο κεφάλαιο 6 δίνονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία και την μελέτη που πραγματοποιήθηκε. Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στις κινητές τηλεπικοινωνίες.

## 2. Κινητά δίκτυα επικοινωνιών

### 2.1 Εξέλιξη κινητών δικτύων - προηγούμενες γενιές

Τα τελευταία χρόνια ο κόσμος των ασύρματων κινητών τεχνολογιών εξελίσσεται ραγδαία. Περνώντας από γενιά σε γενιά εισάγονται νέα χαρακτηριστικά, νέα πρότυπα και νέες τεχνικές που τις κάνουν να διαφέρουν σημαντικά από τις προηγούμενες. Η κάθε γενιά κινητών δικτύων παρουσιάζει αλλαγές σχετικά με την φύση του συστήματος, την ταχύτητα και την τεχνολογία. Από την αρχή των ασύρματων κινητών τεχνολογιών και την πρώτη γενιά μέχρι και την τελευταία εφαρμόσιμη γενιά η τεχνολογία έχει κάνει αρκετά μεγάλη πρόοδο. Η ασύρματη επικοινωνία με την πάροδο του χρόνου γίνεται πολύ αποδοτική και επιτρέπει την ανάπτυξη αρκετών νέων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως από δισεκατομμύρια ανθρώπους. Η εξέλιξη έχει περάσει από πολλές γενιές ξεκινώντας

από την πρώτη γενιά (1G) όπου χρησιμοποιήθηκε απλώς για φωνητικές κλήσεις, η βάση του ωστόσο έμεινε για όλες τις επόμενες γενιές. Η δεύτερη γενιά (2G) όπου εξελίχθηκε με την είσοδο της ψηφιακής τηλεφωνίας και την δυνατότητα ανταλλαγής μηνυμάτων. Στην συνέχεια, η τρίτη γενιά (3G) που επέκτεινε την δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων. Από το 2010 που αναπτύχθηκε, είναι σε λειτουργία η τέταρτη γενιά (4G) με υποστήριξη ασύρματου δικτύου internet για κινητά, με την ίδια να χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως. Ανά κάθε γενιά παρέχονται τεχνικές που υποστηρίζουν νέα χαρακτηριστικά και αυτό οδηγεί στην ραγδαία αύξηση της παγκόσμιας κινητής βιομηχανίας. Σήμερα περνάμε στην πέμπτη γενιά (5G) η οποία αποτελεί την τελευταία εφαρμόσιμη γενιά αναπτύσσοντας για πρώτη φορά τεχνολογίες που θα αναλύσουμε και στην πορεία. [1] [2]

Το 2022 αναμένεται να είναι μια πολύ κομβική χρονιά για το 5G με σημαντική πρόοδο τόσο στην ανάπτυξη των δικτύων όσο και στις συσκευές που θα ενισχύσουν ακόμη περισσότερο την εμπειρία χρήσης του. Με την ζήτηση για ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες να αυξάνεται, το 5G θα διαδοθεί περαιτέρω από τους παρόχους αφού όλο και περισσότεροι ξεκινούν αυτόνομα δίκτυα αυτής της τεχνολογίας. Παρ' όλο που το 2022 είναι μόνο ένα έτος από την δεκαετία της πέμπτης γενιάς, πρόκειται να λάβουν χώρα σημαντικές εξελίξεις. Αναμένονται σημαντικές αυξήσεις των ταχυτήτων στις οικιακές συνδέσεις και μαζική αγορά συσκευών που υποστηρίζουν δίκτυα με σύνδεση 5G. Επίσης επαναστατικές εξελίξεις αναμένονται στο προσεχές μέλλον και αφορούν την εκκίνηση του metaverse, όπως επίσης και το gaming.

### 2.1.1 Πρώτη γενιά (1G)

Η δημιουργία και η εξελικτική πορεία των δικτύων της πρώτης γενιάς (1G) εμφανίστηκε την δεκαετία του 1980 μέσω αναλογικής μετάδοσης για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, υποστηρίζοντας ωστόσο μόνο τον ήχο και τις φωνητικές κλήσεις. Η πρώτη εμφάνισή του έγινε στην Ιαπωνία από τη Nippon Telegraph and Telephone και συγκεκριμένα στην περιοχή του Τόκιο ενώ στην Ευρώπη πραγματοποίησε για πρώτη φορά την εμφάνισή της το 1981 μέσω του Nordic Mobile Telephone (NMT) στις σκανδιναβικές χώρες. Στην

Αμερική εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά οι λειτουργίες του το 1983 ενώ στη συνέχεια ακολούθησε η εφαρμογή και σε διαφορετικές χώρες. [3] [4]

Τα αναλογικά κινητά τηλέφωνα έχουν ταχύτητα έως και 2,4 kbps. Εισάγεται επίσης το πρώτο δημόσιο σύστημα κινητής τηλεφωνίας το οποίο είναι το Mobile Telephone System (MTS), ενώ το προηγμένο σύστημα επικοινωνίας Advanced Mobile Phone System (AMPS) κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στις ΗΠΑ. Για την υλοποίησή του χρησιμοποιείται αναλογικό ραδιοσήμα με συχνότητα 150Hz και η διαμόρφωση της φωνητικής κλήσης γίνεται με μια τεχνική που ονομάζεται Frequency Division Multiple Access (FDMA) η οποία είναι τεχνική για διαμόρφωση συχνότητας, επιτρέπει σε πολλούς χρήστες να στέλνουν δεδομένα μέσω ενός μόνο καναλιού επικοινωνίας, όπως ομοαξονικού καλωδίου ή δέσμης μικροκυμάτων, διαιρώντας το εύρος ζώνης του καναλιού σε ξεχωριστά μη επικαλυπτόμενα υποκανάλια συχνότητας και εκχωρώντας κάθε υποκάνάλι σε ξεχωριστό χρήστη. Είναι γνωστό ότι οι φωνητικές κλήσεις δεν παρείχαν την απαιτούμενη ασφάλεια καθώς ήταν ευάλωτες σε ανεπιθύμητη υποκλοπή από τρίτους.

### 2.1.2 Δεύτερη γενιά (2G)

Η δεύτερη γενιά ασύρματης τηλεφωνικής τεχνολογίας κυκλοφόρησε 10 χρόνια περίπου αργότερα, ενώ με την συγκεκριμένη τεχνολογία λύθηκαν αρκετά από τα προβλήματα που είχαν δημιουργηθεί κατά την χρήση της πρώτης γενιάς. Εισήγαγε νέες δυνατότητες όπως το να επιτρέπει στα διάφορα δίκτυα υπηρεσίες όπως μηνύματα κειμένου, εικονομηνύματα και μηνύματα πολυμέσων MMS.

Για πρώτη φορά ενσωματώθηκαν ψηφιακά σήματα ενώ η ασφάλεια που παρείχε τόσο στον αποστολέα όσο και στον παραλήπτη η συγκεκριμένη τεχνολογία είχε αλλάξει σημαντικά καθώς χρησιμοποιούνταν καθολικά κρυπτογραφημένα μηνύματα. Η κύρια τεχνολογία που εισήχθη ήταν το Global System of Mobile Communications (GSM) η οποία βασιζόταν σε Frequency Division Multiple Access (FDMA) που δίνει την δυνατότητα σε αρκετούς χρήστες να έχουν πρόσβαση σε μια ομάδα από ζώνες ραδιοσυχνοτήτων και στη μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης Time Division Multiple Access (TDMA) σύμφωνα με την

οποία η κάθε συχνότητα διαιρείται σε χρονοθυρίδες με αποτέλεσμα να επιτρέπονται ταυτόχρονες κλήσεις με χρήση της ίδιας συχνότητας. Η τεχνολογία GSM αναπτύχθηκε στην Ευρώπη ενώ στην Αμερική η κύρια τεχνολογία που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ήταν η Code Division Multiple Access (CDMA). [5]

Τα κύρια οφέλη των δικτύων δεύτερης γενιάς έναντι αυτών της πρώτης γενιάς ήταν:

- Ψηφιακά κρυπτογραφημένες κλήσεις ανάμεσα στο κινητό τηλέφωνο και τους σταθμούς βάσης της κινητής τηλεφωνίας.
- Αρκετά αποτελεσματικότερη χρήση φάσματος ραδιοσυχνοτήτων με δυνατότητες εξυπηρέτησης περισσότερων χρηστών ανά ζώνη συχνοτήτων.
- Υπηρεσίες δεδομένων για κινητά, ξεκινώντας με μηνύματα κειμένου SMS.

Η εξέλιξη της συγκεκριμένης γενιάς ωστόσο δεν σταμάτησε εκεί καθώς εισήχθησαν σταδιακά οι υπηρεσίες 2.5G General Packet Radio Service (GPRS) και 2.75G Enhanced Data GSM Evolution (EDGE) με σκοπό να ενσωματωθούν περισσότερες υπηρεσίες.

### 2.1.3 Τρίτη γενιά (3G)

Ο όρος 3G αναφέρεται στην τρίτη γενιά ασύρματων κινητών δικτύων η οποία αναπτύχθηκε ώστε να αντικαταστήσει τα προηγούμενα δίκτυα 2,5G και 2,75G. Τα δίκτυα 3G παρέχουν αυξημένη ταχύτητα και μπορούν να υποστηρίξουν περιήγηση στο ίντερνετ μέσω κινητού τηλεφώνου εξαιτίας της μέγιστης ταχύτητας του 384 kilobits ανά δευτερόλεπτο για Wide band Code Division Multiple Access (WCDMA). Επίσης μεγάλη ήταν και η αναβάθμισή του σε ζητήματα ασφάλειας σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά. Τα δίκτυα 3G βασίζονται επίσης στο GSM ενώ ακολουθεί πρότυπα που πληρούν τις απαιτήσεις του International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000). Η μετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μεταγωγή πακέτων.



Η έρευνα και η ανάπτυξη του στην περιοχή των δικτύων 3G πραγματοποιήθηκαν από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών την δεκαετία του 1980. Η πρώτη εμπορική αξιοποίηση έγινε από την NTT DoCoMo στην Ιαπωνία το 2001. Στην πορεία όμως υπήρξαν ανησυχίες για την αξιοπιστία των δικτύων 3G με αποτέλεσμα η διαθεσιμότητα του συστήματος να καθυστερήσει και να παρέχει περιορισμένο εύρος. Στην Ευρώπη, η πρώτη εμπορική αξιοποίηση των δικτύων 3G πραγματοποιήθηκε από την Telenor το 2001 η οποία για αρχή απευθύνονταν αποκλειστικά για επιχειρήσεις. Επιπλέον, η εμφάνιση των πρώτων δικτύων δικτύων 3G στην Αμερική έγινε το 2002 από την Monet Mobile Networks και την Verizon Wireless σε τεχνολογία CDMA2000 1x EV-Do. Μεγάλη σημασία είχε το υψηλό κόστος που απαιτούσαν οι υπηρεσίες σε δίκτυα 3G όπως και η ανάγκη απόκτησης νέας γενιάς συσκευών από τους καταναλωτές ώστε να υπάρχει η δυνατότητα υποστήριξης της νέας τεχνολογίας.

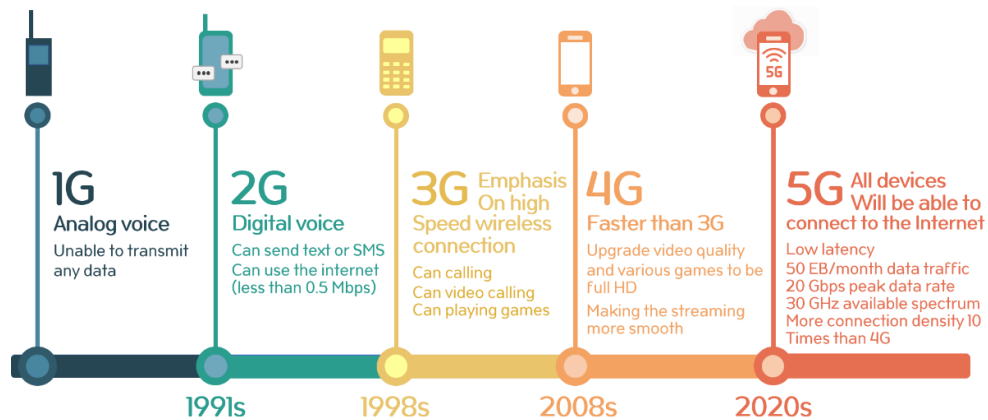
Εκτός από τα τεράστια οφέλη στο τομέα των επιχειρήσεων, σημαντικά άλλαξε και το επίπεδο της ανθρώπινης ζωής με την χρήση των δικτύων 3G. Πιο συγκεκριμένα παρέχονταν αυξημένο εύρος ζώνης και μεγαλύτερη χωρητικότητα με αποτέλεσμα ευκολότερη και γρηγορότερη πρόσβαση σε εφαρμογές διαδικτύου και πολυμέσων. Επίσης τα δίκτυα 3G είχαν καλύτερη απόδοση και καθαρότερο ψηφιακό σήμα σε σύγκριση με τα δίκτυα 2G και καλύτερη ασύρματη τηλεφωνία και κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο. [6] [7]

#### 2.1.4 Τέταρτη γενιά (4G)

Τα δίκτυα 4G αποτελεί εξέλιξη της προηγούμενης τεχνολογίας. Έχουν την δυνατότητα να προσφέρει ότι ακριβώς προσέφερε και η προηγούμενη γενιά με την διαφορά ότι δίνει την δυνατότητα να παρέχονται οι υπηρεσίες και η πρόσβαση στο διαδίκτυο με μεγαλύτερες ταχύτητες και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, οι οποίες μάλιστα προσεγγίζουν τα 35 χιλιόμετρα από το WiMAX σημείο. Σε αντίθεση με την προηγούμενη γενιά δικτύων, βασίζεται αποκλειστικά σε μεταγωγή πακέτων ενώ τέθηκε και σε ισχύ η υποστήριξη του IPv6, η οποία είναι η πιο πρόσφατη έκδοση του πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP). Οι δυνατότητες των 4G δικτύων ορίζονται από τον οργανισμό International Telecommunication Union (ITU) σύμφωνα με το International Mobile Telecommunications (IMT) Advanced.

Η τέταρτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας αποτελεί κατά κύριο λόγο εξέλιξη της προηγούμενης με την ιδιαιτερότητα ότι συμπεριλαμβάνει δύο πρότυπα, το WiMAX και το Long Term Evolution (LTE). Η πρώτη εμπορική κυκλοφορία του WiMAX πραγματοποιήθηκε στην νότια Κορέα το 2006 και προσφέρει μέγιστες ταχύτητες 128 Mbit/s για λήψη και 56 Mbit/s για μεταφόρτωση. Το LTE το οποίο έρχεται με ταχύτητες 100Mbit/s για μέγιστη λήψη και 50 Mbit/s για μέγιστη μεταφόρτωση εμφανίστηκε για πρώτη φορά για εμπορική χρήση στην Νορβηγία και στην Σουηδία.

Η δημιουργία και η ανάπτυξη των δικτύων 4G ήρθε για να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση για υπηρεσίες ευρυζωνικής σύνδεσης για φορητές συσκευές με υψηλότερες ταχύτητες. Τα δίκτυα 4G παρέχουν ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών και εφαρμογών με τον καλύτερο δυνατό οικονομικό τρόπο με παγκόσμια λειτουργικότητα και κάλυψη, βελτιωμένες ταχύτητες με έως και 10 φορές μεγαλύτερες από την προηγούμενη γενιά. Δημιουργήθηκε προηγμένης τεχνολογίας εξοπλισμός και υποστηρίχθηκαν δυνατότητες χρήσης δικτύου με μεγαλύτερη σταθερότητα και σαφώς πιο εύκολη, όπως επίσης και μεγαλύτερη απόδοση λόγω του αυξημένου εύρους ζώνης. [8] [4]



Εικόνα 1. Εξέλιξη τεχνολογιών κινητής επικοινωνίας [9]

## 2.2 Επισκόπηση κινητών δικτύων επικοινωνίας 5G

Τα ασύρματα δίκτυα 5G αποτελούν το επόμενο στάδιο της εξέλιξης της κινητής τηλεφωνίας διαμορφώνοντας έναν νέο κόσμο τόσο για τους δισεκατομμύρια ανθρώπους που θα μπορούν να τα χρησιμοποιούν, όσο και την παγκόσμια βιομηχανία και τις επιχειρήσεις. Είναι η επόμενη γενιά συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας και έρχεται να επεκτείνει την τέταρτη γενιά κινητών δικτύων η οποία χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως. Όλο και περισσότερες εταιρείες επενδύουν ώστε να ενσωματώσουν το συγκεκριμένο πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας με τις Intel, Qualcomm, Nokia, BT, Verizon και Samsung να πρωταγωνιστούν. Η μετάβαση στα δίκτυα 5G είναι η απάντηση στην ανάγκη για την προσαρμογή και ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και στην αύξηση του πλήθους των συνδέσεων η οποία θεωρείται σημαντική και αναπόφευκτη. Οι υψηλές συχνότητες και ο τρόπος λειτουργίας του περιλαμβάνουν υψηλή απόδοση και μειωμένο κόστος. Χαρακτηριστική είναι η πληθώρα εφαρμογών του IoT και των κινητών δικτύων 5G, όπως η εικονική πραγματικότητα, απομακρυσμένος υπολογισμός (remote computing) και υπηρεσίες νέφους (cloud services), υπηρεσίες υγείας με ηλεκτρονικά μέσα, οδήγηση αυτοκινήτου και λοιπά. [10]

Αναλύοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G παρατηρούνται ταχύτητες που κυμαίνονται από 50 Mbps έως και περισσότερο από 1Gbps με τις πιο γρήγορες ταχύτητες του 5G να εμφανίζονται στις ζώνες Millimeter Wave (mmWave) με μέγιστη τιμή τα 4Gbps. Μέσω του φάσματος χαμηλής ζώνης παρέχεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης όπως επίσης και αυξημένη περιοχή κάλυψης σε μία τοποθεσία, ενώ οι ταχύτητες του είναι χαμηλές στις μεσαίες και υψηλές ζώνες. Επίσης διατηρεί αρκετά χαμηλό ποσοστό σφαλμάτων χάρη στη χρήση της τεχνικής Modulation and Coding Scheme (MCS). [11]

Η 1<sup>η</sup> Δεκεμβρίου του 2018 ήταν η μέρα όπου το πρότυπο ασύρματης κινητής πέμπτης γενιάς προσφέρθηκε για χρήση, με την Νότια Κορέα να είναι η πρώτη χώρα που το υιοθετεί. Στη συνέχεια η Κίνα προσπάθησε να πρωτοστατήσει στο νέο δίκτυο 5G με εταιρείες όπως η China Mobile και η China Telecom να είναι σημαντικοί συμμετέχοντες στην υποστήριξή του. Οι Ηνωμένες Πολιτείες κυριάρχησαν στην αποδοτική εκμετάλλευση φάσματος με τις AT&T και Verizon να είναι σημαντικοί συμμετέχοντες σε αυτή τη χώρα ενώ

λίγο αργότερα η Ευρώπη υιοθέτησε την γενιά 5G και υποστήριξε τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Κορυφαία θεωρήθηκε και η ανάπτυξη στην Ιαπωνία με τις εταιρείες NNT Docomo, Softbank και KDDI να συγκαταλέγονται στις κορυφαίες εταιρίες στην χώρα. [12] Η προώθηση και οι ανάγκες για το IoT και για Big Data γίνονται ευρέως απαραίτητες και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τις περισσότερες χώρες να ξεκίνησαν την ενσωμάτωση των υπηρεσιών του 5G από το 2020 και έπειτα. Περνώντας από γενιά σε γενιά παρατηρείται η ιλιγγιώδη εξέλιξη της δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων και οι ανάγκες για μείωση των απαιτούμενων χρόνων με το 5G να εκτιμάται ήδη ότι παρουσιάζεται τουλάχιστον 3 φορές ταχύτερο από το προηγούμενο πρότυπο.

### 2.3 Περιπτώσεις χρήσης και εφαρμογές 5G

Κάθε νέα γενιά συνοδεύεται και από ένα σύνολο νέων σεναρίων χρήσης και εφαρμογών. Έτσι και η πέμπτη γενιά εξελίσσεται και επικεντρώνεται στο IoT και σε άλλες κρίσιμες εφαρμογές επικοινωνίας. Περιπτώσεις χρήσης που μπορούν να αναφερθούν είναι οι ακόλουθες. [13] [14]

- Σταθερή ασύρματη πρόσβαση Fixed Wireless Access (FWA) (από 2018-2019). Παρέχοντας κάτι περισσότερο από μία απλή πρόσβαση για βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή τηλεφωνία, το FWA που βασίζεται σε έναν πραγματικό πυρήνα 5G θέτει τις βάσεις για εντελώς νέες επεκτάσεις υπηρεσιών που απαιτούν χαμηλό λανθάνοντα χρόνο ενώ απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης.
- Βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση για κινητά ακόμη και προηγούμενης γενιάς - enhanced Mobile Broadband (eMBB) (από 2019-2021). Αποτελεί επέκταση των υπαρχόντων ευρυζωνικών υπηρεσιών τέταρτης γενιάς και είναι από τις πρώτες εμπορικές υπηρεσίες 5G που κυκλοφόρησαν. Κύρια χαρακτηριστικά που προσφέρει είναι μεγαλύτερη χωρητικότητα, βελτιωμένη συνδεσιμότητα και υποστήριξη υψηλότερης κινητικότητας χρηστών.

- Τεράστια εφαρμογή σε M2M/IoT (από 2021-2022). Οι υποδομές του IoT και Machine-to-Machine είχαν μείνει σχετικά στάσιμες λόγω των περιορισμένων ταχυτήτων και των καθυστερήσεων στα δίκτυα 4G στον μεγάλο όγκο συνδεδεμένων συσκευών που θέλουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Το 5G έχει ρυθμιστεί ώστε να κάνει πρόοδο στον χώρο αυτό και με τις αυξημένες ταχύτητες και το μεγαλύτερο εύρος ζώνης να μπορεί να εφαρμοστεί άψογα.
- Κρίσιμες επικοινωνίες IoT με μηδαμινές καθυστερήσεις (από 2024-2025). Ορισμένες κρίσιμες περιπτώσεις όπου η εφαρμογή των δικτύων 5G είναι αναγκαία είναι τα αυτό-οδηγούμενα αυτοκίνητα τα οποία απαιτούν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης ενώ δεν απαιτούν πολύ μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Όμως, υπηρεσίες όπως αυτές των υπηρεσιών νέφους (cloud services) έχουν μεγαλύτερη ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων.

Η τεχνολογία 5G θα ωφελήσει ένα ευρύ φάσμα μελλοντικών βιομηχανιών όπως επίσης και το εμπόριο, την εκπαίδευση, τις μεταφορές, την υγεία, τα έξυπνα σπίτια και την ψυχαγωγία. Επίσης θα συνεχίσει είναι πολύ σημαντική παγκοσμίως μέσω των πολλαπλών εφαρμογών του τόσο κοινωνικά όσο και οικονομικά. [13] [14]

## **e-Health**

Στόχος αποτελεί η ανάπτυξη μια πλατφόρμας τηλεϊατρικής και τηλεπαρακολούθησης που να επιτρέπει την υλοποίηση όλων των απαραίτητων διαδικασιών και να βοηθήσει τον κλάδο να εξελιχθεί. Η δυνατότητα της εξ αποστάσεως βοήθειας μέσω διαδραστικών σχέσεων μεταξύ ασθενών και ιατρικού προσωπικού μπορεί να παρέχει μια εξατομικευμένη θεραπευτική διαδικασία. Αυτό είναι μια σπουδαία λύση για μείωση κόστους και προωθείται η ανάπτυξη νέων υπηρεσιών υγείας.

## **Έξυπνη βιομηχανία**

Εφαρμογή στην ανάπτυξη μιας ψηφιακής έξυπνης βιομηχανικής πλατφόρμας που μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες της βιομηχανίας και των πελατών. Η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας μπορεί να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες παραγωγής, την ενεργειακή απόδοση και τον προγραμματισμό σε πραγματικό χρόνο. Μπορεί να υλοποιηθεί μια ολοκληρωμένη IoT λύση που να επιτρέπει την συλλογή δεδομένων από αισθητήρες στους βιομηχανικούς τομείς. Το ταχύτερο δίκτυο 5G δίνει την δυνατότητα σύνδεσης μεγαλύτερου όγκου συσκευών ανά πάσα στιγμή και προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες.

## **IoT και αισθητήρες**

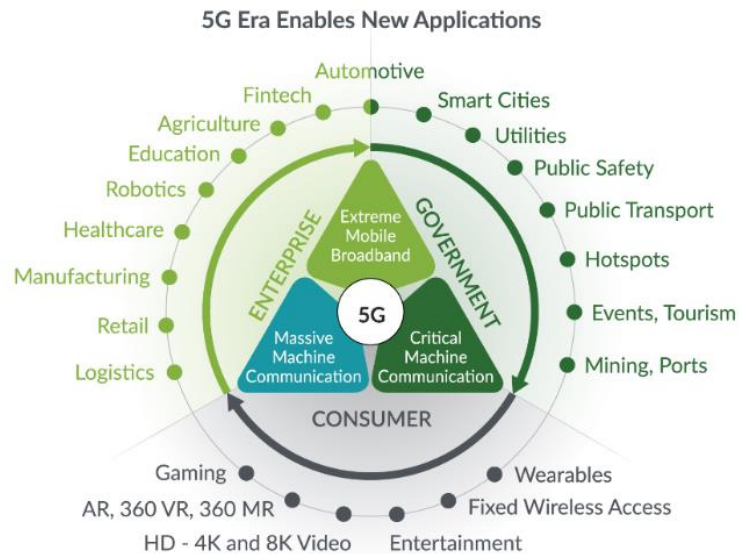
Πρόθεση είναι η χρήση έξυπνων αισθητήρων και IoT συστημάτων σε πολλαπλά πεδία εφαρμογής. Το δίκτυο 5G θα επιτρέπει την άμεση επικοινωνία μεταξύ των συσκευών επιταχύνοντας και βελτιστοποιώντας έτσι τις διαδικασίες υλοποίησης. Στόχους αποτελούν ο τηλεχειρισμός σε πραγματικό χρόνο των συνθηκών λειτουργίας διεργασιών και εγκαταστάσεων, ο τηλεχειρισμός βαρέων μηχανημάτων σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, η βελτιστοποίηση της διαχείρισης των πόρων. Πολύ σημαντική είναι η συλλογή δεδομένων που προέρχονται από απομακρυσμένους αισθητήρες που αφορούν την κατάσταση του χώρου εργασίας, την διαχείριση έξυπνων συστημάτων και λοιπά.

## **Έξυπνες πόλεις**

Ένας άλλος στόχος είναι η ανάπτυξη έξυπνων πόλεων στις οποίες θα παρέχονται υπηρεσίες όπως διαχείριση κυκλοφορίας, άμεση ενημέρωση καιρού, διαχείριση ενέργειας, διαχείριση κίνησης, έξυπνος φωτισμός των δρόμων, διαχείριση υδάτινων πόρων, απόκριση έκτακτης ανάγκης. Κάτι τέτοιο απαιτεί αξιόπιστο ασύρματο δίκτυο. Επίσης σημαντικό είναι να εξασφαλιστεί μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας για τους πολίτες με χρήση καινοτόμων τεχνολογιών που προσδιορίζουν αμέσως την κατάσταση ανάγκης και βελτιστοποιούν τις δραστηριότητες παρέμβασης μέσω συσκευών συνδεδεμένων στο 5G δίκτυο.

## Έξυπνη γεωργία

Η τεχνολογία 5G βρίσκει εφαρμογή και στην γεωργία με καινοτόμες λύσεις. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν drones συνδεδεμένα στο δίκτυο 5G για μετάδοση σε πραγματικό χρόνο δεδομένων που βοηθούν στην γενικότερη διαχείριση των τμημάτων παραγωγής. Επίσης, χρησιμοποιώντας έξυπνους αισθητήρες και τεχνολογία GPS, οι αγρότες μπορούν να παρακολουθούν την τοποθεσία των ζώων. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο άρδευσης και έλεγχο διαχείρισης ενέργειας.



Εικόνα 2. Νέες εφαρμογές της 5G εποχής [15]

## 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα 5G

### Πλεονεκτήματα της πέμπτης γενιάς

- Μαζική ροή περιεχομένου

Μαζί με την πολύ μεγάλη ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας, υπήρξε πολύ μεγάλη αύξηση και στην ζήτηση περιεχομένου πολυμέσων. Η ζήτηση τα τελευταία χρόνια επεκτείνεται σε ταινίες, υπηρεσίες πολυμέσων, βιντεοκλήσεις και άλλα. Η ανάπτυξη των δικτύων 5G πρέπει να έχει τη δυνατότητα για υποστήριξη ροής περιεχομένου εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας, και γενικότερα περιεχομένου μεγάλου όγκου. Επίσης, το 5G απαιτείται για την υποστήριξη πολυδιάστατων ρεαλιστικών υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να δει ένα μεγάλο αθλητικό γεγονός μέσω ενός ρεαλιστικού πίνακα ολογραμμάτων σε πραγματικό χρόνο.

- Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση

Παρόλο που η φασματική απόδοση αποτελούσε κυρίαρχο ζήτημα για την βελτιστοποίηση των δικτύων τις προηγούμενες δεκαετίες, έχει μετατοπιστεί η εστίαση των προσπαθειών βελτίωσης και στον τομέα της ενεργειακής απόδοσης λόγω της περιορισμένης διάρκειας ζωής των μπαταριών στις συσκευές. Επιπροσθέτως, τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση στην σημαντική κατανάλωση ισχύος και τις δαπάνες που απαιτούνται για την σύνδεση των πολλαπλών δικτύων ώστε να γίνει βελτίωση σε σχέση με τους υπάρχοντες μηχανισμούς και να προσεγγιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η φιλική προς το περιβάλλον δικτύωση.

- Μεγαλύτερη ταχύτητα στις μεταδόσεις

Η ταχύτητα στις μεταδόσεις μπορεί να αγγίζει τα 15 με 20 Giga bits το δευτερόλεπτο (Gbps). Δίνεται επομένως η δυνατότητα στους χρήστες να απολαμβάνουν υψηλότερες ταχύτητες και να έχουν πρόσβαση σε εφαρμογές και αρχεία απευθείας χωρίς αναμονή. Επίσης, με την εκτεταμένη χρήση του νέφους (cloud), οι συσκευές θα εξαρτώνται λιγότερο από την εσωτερική μνήμη όπως και πολλές διεργασίες θα γίνονται στο νέφος (cloud) οπότε υπάρχει ανάγκη για εξαιρετικά γρήγορο δίκτυο.

- Χαμηλή καθυστέρηση (Low latency)



Τα νέα δίκτυα 5G έχουν έρθει να εκπληρώσουν τους στόχους για μείωση του λανθάνοντα χρόνου με σημαντική βελτίωση από την προηγούμενη τέταρτη γενιά, με τη μετ' επιστροφής μετάδοση δεδομένων να διαρκεί λιγότερο από πέντε χιλιοστά του δευτερολέπτου. Δημιουργείται η δυνατότητα για έλεγχο συσκευών από απόσταση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο καθώς ο λανθάνων χρόνος γίνεται ταχύτερος από την ανθρώπινη οπτική επεξεργασία.

- Αυξημένο εύρος ζώνης

Στα δίκτυα της πέμπτης γενιάς έχει υπάρξει διαφορετικός σχεδιασμός από τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, επιτρέποντας βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας του διαδικτύου. Η ανάγκη για παροχή απρόσκοπτα μεγάλης συνδεσιμότητας σε μεγάλο κοινό σε διάφορους χώρους, οδήγησε στην ανάπτυξη των δικτύων 5G ώστε να παρέχεται η αναγκαία συνεκτικότητα. Σημαντικό αντίκτυπο έχει και στις επιχειρήσεις καθώς με το αυξημένο εύρος ζώνης μπορούν να λαμβάνουν περισσότερες πληροφορίες από πελάτες και προμηθευτές και να διαχειρίζονται μεγάλους όγκους δεδομένων.

### **Μειονεκτήματα της πέμπτης γενιάς**

- Επιπτώσεις στην υγεία

Πιθανές μπορεί να θεωρηθούν και κάποιες αρνητικές επιπτώσεις όσον αφορά το 5G υψηλής ζώνης από την εγγενή φύση της ακτινοβολίας, καθώς το 5G σχετίζεται με συχνότητες μεγαλύτερες από αυτές του 4G. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί υψηλότερο με αποτέλεσμα πιθανότητα για μικρά φαινόμενα διείσδυσης στον άνθρωπο.

- Τεχνολογικός αποκλεισμός

Η υλοποίηση του δικτύου 5G συνεπάγεται επίσης έλλειψη άμεσης προσβασιμότητας για πολλούς χρήστες λόγω απαξίωσης των μέσων προηγούμενης γενιάς, σε συνδυασμό με καθυστέρηση στην εφαρμογή του λόγω έλλειψης υποδομών για την χρήση του. [16] [17]

- Μειωμένη απόσταση εκπομπής

Παρά το ότι που η λειτουργία του 5G είναι σε υψηλές ταχύτητες, δεν έχει τόσο μεγάλη απόσταση εκπομπής σε σύγκριση με το 4G. Επίσης, η συχνότητα του δικτύου μπορεί να επηρεαστεί από τα ψηλά κτήρια ή ακόμη και τα δέντρα και μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται αρκετοί πύργοι εκπομπής ώστε να υπάρχει πλήρης κάλυψη και κάτι τέτοιο είναι αρκετά δαπανηρό.

- Περιορισμένη παγκόσμια κάλυψη

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα του 5G είναι η διαθεσιμότητα του μόνο σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Οι αστικές περιοχές έχουν τα οφέλη του 5G, ενώ οι πιο απομακρυσμένες περιοχές αναμένεται να τα έχουν τα επόμενα χρόνια.

- Κυβερνοασφάλεια

Άλλο σημαντικό μειονέκτημα είναι η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο καθώς η επέκταση του εύρους ζώνης μπορεί να κάνει ευάλωτα τα συστήματα. Επίσης, το γεγονός ότι το 5G συνδέεται με πολλές συσκευές ενισχύει το ενδεχόμενο επιθέσεων. Για αυτό τον λόγο οι εταιρείες πρέπει να προστατεύουν τις υποδομές τους με συνέπεια επιπρόσθετα έξοδα.

## 2.5 Αρχιτεκτονική και ασφάλεια 5G

Ο στόχος όλων των προηγούμενων γενιών ήταν να προσφέρουν γρήγορες, αξιόπιστες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας στους χρήστες, έτσι και με την πέμπτη γενιά έγινε

προσπάθεια να διευρυνθεί αυτό το πεδίο και να προσφέρει ένα ευρύ φάσμα ασύρματων υπηρεσιών μέσω δικτύων πολλαπλών επιπέδων και πλατφόρμες πολλαπλής πρόσβασης. Το 5G χρησιμοποιεί ένα σύνολο έξυπνων αρχιτεκτονικών με αποτέλεσμα να μην περιορίζεται από την εγγύτητα του σταθμού βάσης ή την πολύπλοκη υποδομή.

Η αρχιτεκτονική του βασικού δικτύου της πέμπτης γενιάς βρίσκεται στο επίκεντρο των προδιαγραφών του 5G. Ο νέος πυρήνας της πέμπτης γενιάς χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική στοίχισης cloud βασισμένη σε αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες (Service Based Architecture - SBA) που επεκτείνεται σε όλες τις λειτουργίες των δικτύων 5G, όπως ασφάλεια, έλεγχος ταυτότητας, διαχείριση περιόδων σύνδεσης. Ο σχεδιασμός της πέμπτης γενιάς δίνει επιπλέον έμφαση στο NFV το οποίο παρουσιάζεται ως μία ολοκληρωμένη ιδέα σχεδιασμού με λειτουργίες λογισμικού που αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας την υποδομή πολλαπλής πρόσβασης (Multi-access Edge Computing - MEC) που αποτελεί βασική αρχιτεκτονική της πέμπτης γενιάς. Η μετάβαση από την τέταρτη γενιά στην πέμπτη γενιά συνοδεύεται από αρχιτεκτονικές όπως το Millimeter Wave, massive MIMO, Network slicing. [18]

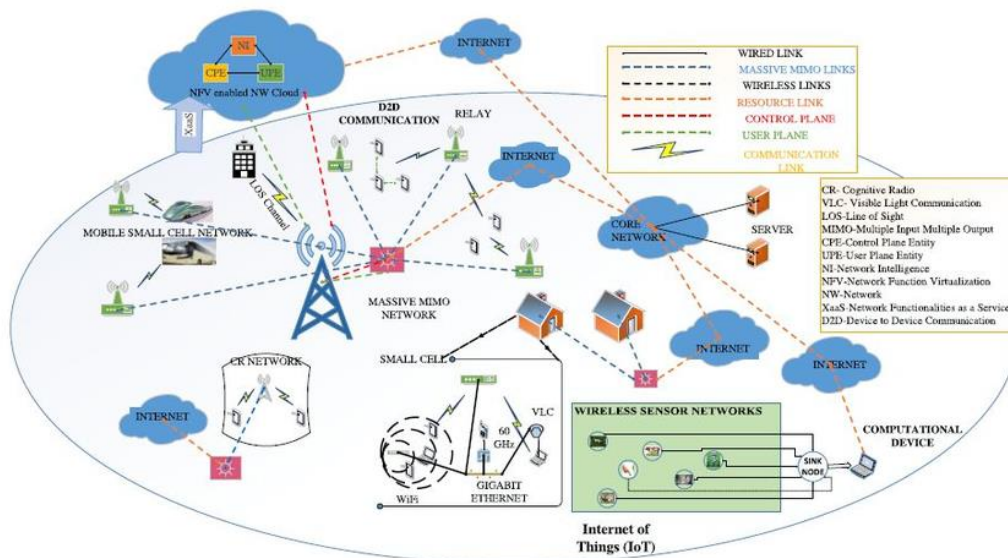
Σημαντικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής 5G είναι το beamforming. Πρόκειται για μια τεχνική επεξεργασίας σήματος με στόχο την κατευθυντική λήψη και μετάδοσή του. Είναι μία τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο άκρο εκπομπής και στο άκρο του δέκτη. Ο τρόπος με τον οποίο αυτό επιτυγχάνεται αφορά την διάταξη των κεραιών και το είδος των παρεμβολών που επηρεάζουν τα σήματα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε ραδιοφωνικά ή ηχητικά σήματα και έχει εφαρμογή στα ραντάρ, στα σόναρ, στις ασύρματες επικοινωνίες, στην βιοϊατρική. Το ψηφιακό beamforming ενσωματώνει την αποστολή δεδομένων σε διάφορες ροές, ενώ το αναλογικό σχηματίζει ραδιοκύματα προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Τα συστήματα 5G κάνουν χρήση τόσο της ψηφιακής όσο και της αναλογικής διαμόρφωσης δέσμης ώστε να βελτιωθεί η χωρητικότητα του συστήματος.

Ο τεμαχισμός δικτύου (Network slicing) είναι μια τεχνολογία η οποία παίζει σημαντικό ρόλο για την υποστήριξη των δικτύων της κινητής τηλεφωνίας 5G. Είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει την πολυπλεξία και την ανεξαρτησία των δικτύων σε μία υποδομή δικτύου. Κάθε τμήμα δρα ανεξάρτητα και προσαρμόζεται ώστε πληροί τις προϋποθέσεις και τις διάφορες απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Η υλοποίηση της εκμεταλλεύεται τις έννοιες της δικτύωσης που πλαισιώνονται από Δικτύωση που Καθορίζεται

από Λογισμικό (Software Defined Networking - SDN) και το NFV, τα οποία επιτρέπουν την υλοποίηση ευέλικτων και επεκτάσιμων τμημάτων δικτύου πάνω σε μία κοινή δικτυακή υποδομή. Βελτιώνει τις υπηρεσίες και δημιουργεί ένα εικονικό δίκτυο που λειτουργεί σε φυσική υποδομή επιτρέποντας την διαχείριση από ένα κεντρικό δίκτυο υπολογιστή.

Με το νέο φάσμα συχνοτήτων της πέμπτης γενιάς αξιοποιούνται περισσότερες περιοχές συχνοτήτων. Στο νέο φάσμα συχνοτήτων συμπεριλαμβάνονται συχνότητες που κυμαίνονται μεταξύ 30GHz και 300GHz, που καλούνται Millimeter Wave (mmWave), ενώ τα μήκη κύματος κυμαίνονται από 1-10nm. Το 5G mmWave που είναι διαθέσιμο σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων, πάνω από 25GHz, ξεχωρίζει μεταξύ των ζωνών ραδιοσυχνοτήτων για τα χαρακτηριστικά υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής καθυστέρησης. Μέσα σε αυτές τις ζώνες υψηλής και χαμηλής συχνότητας, κάθε πάροχος έχει αρχίσει να χαράσσει τα δικά του διακριτά μεμονωμένα τμήματα του φάσματος του 5G.

Επίσης, το MEC αποτελεί μία ορισμένη από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute – ETSI) αρχιτεκτονική δικτύου και επιτρέπει ιδιότητες cloud computing. Βασίζεται στην εκτέλεση εφαρμογών και εργασιών επεξεργασίας κοντά στον πελάτη κινητής τηλεφωνίας με στόχο την καλύτερη απόδοση και την μειωμένη συμφόρηση. Μέσω του σχεδιασμού της, εφαρμόζεται στους σταθμούς βάσης και επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη υπηρεσιών για τους πελάτες. Επίσης, παρέχει την δυνατότητα στους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας να δίνουν πρόσβαση στο δίκτυο σε εξουσιοδοτημένους συνεργάτες όπως προγραμματιστές και παρόχους περιεχομένου. [19] [20]



Εικόνα 3 Γενική αρχιτεκτονική δικτύων 5G [21]

Η τεχνολογία 5G βασίζεται σε ορισμένες προδιαγραφές:

- Δίνεται η δυνατότητα να παρέχει ρυθμό δεδομένων από 10Gbps, βελτιώνοντας από 10 έως 100 φορές το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που υποστήριζαν τα δίκτυα 4G και 4.5G.
- Χρονοκαθυστέρηση που τείνει να γίνει μικρότερη του 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου.
- Έως 1000 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας.
- Έως και 100 επιπλέον συσκευές ανά μονάδα επιφάνειας δίνοντας την δυνατότητα υποστήριξης του ήδη αυξημένου αριθμού ενεργών συσκευών.
- Δυνατότητα 100% κάλυψης βάσει τοποθεσίας.
- Μείωση κατά 90% της κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο.
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταριών συσκευών IoT χαμηλής ισχύος.

[22]

Καθώς η ανάπτυξη των δικτύων 5G συνεχίζεται και οι κρίσιμοι κόμβοι απόδοσης μεταφέρονται όλο και περισσότερο σε ψηφιακή μορφή, υπάρχει ανάγκη για συνεχή παρα-

κολούθηση και αξιολόγηση της ασφάλειας. Στα δίκτυα 5G παρουσιάζονται νέες προκλήσεις ως προς την ασφάλεια. Τα δίκτυα 5G χρειάζονται ισχυρές αρχιτεκτονικές και λύσεις ασφάλειας καθώς θα αποτελέσουν τα δίκτυα επικοινωνίας που θα μεσολαβούν σε πολλές πτυχές της ζωής και των δραστηριοτήτων μας. Επομένως, διερευνώνται και αναδεικνύονται οι σημαντικές προκλήσεις σχετικά με την διασφάλιση του απορρήτου της επικοινωνίας σε δίκτυα 5G και προτείνονται λύσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ασφαλή συστήματα. Σημαντικά ζητήματα ασφάλειας και δίκτυα 5G σχετίζονται και με τα εξής:

- Μετάδοση κλειδίων κρυπτογράφησης μέσω μη ασφαλών καναλιών.
- Μειωμένη προστασία κρυπτογραφικής ακεραιότητας για το επίπεδο δεδομένων χρήστη.
- Ζητήματα διατήρησης ασφαλείας κατά την περιαγωγή, αφού οι παράμετροι ασφαλείας χρήστη δεν ενημερώνονται κατά την μετάβαση μεταξύ δικτύων.
- Πιθανές επιθέσεις τύπου Denial-of-Service (DoS) στην υποδομή λόγω των μη κρυπτογραφημένων καναλιών.

## 2.6 Τεχνολογίες κινητών δικτύων 5G

### 2.6.1 Software Defined Networking (SDN)

Με τον όρο Δικτύωση που Καθορίζεται από Λογισμικό (Software Defined Networking - SDN) αναφερόμαστε σε αρχιτεκτονική δικτύου βασισμένη στο λογισμικό με πολλά δυνητικά οφέλη για τα δίκτυα 5G. Συγκεκριμένα η αρχιτεκτονική SDN παρέχει μία “έξυπνη” αρχιτεκτονική για απευθείας προγραμματιζόμενο έλεγχο στο δίκτυο καθώς και την δημιουργία πολλαπλών ιεραρχιών δικτύου.

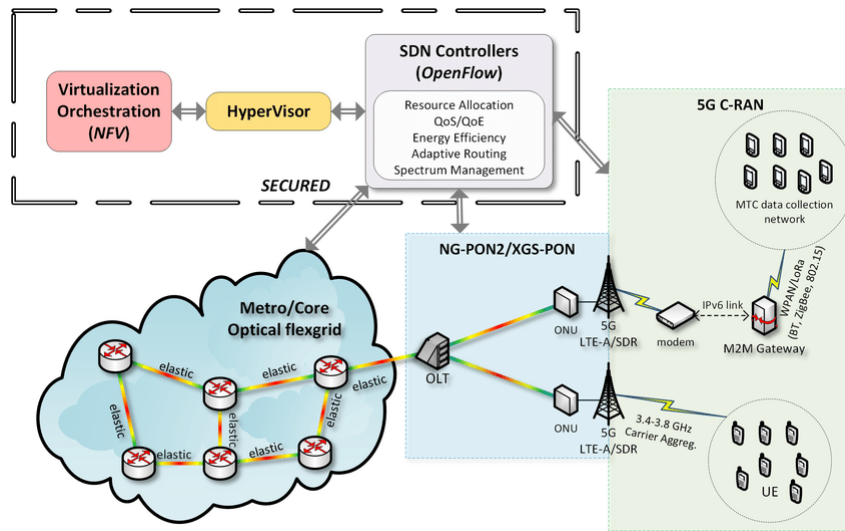
Ο τρόπος λειτουργίας των δικτύων σήμερα αποτελεί ζήτημα για πολλούς παρόχους υπηρεσιών, εισάγοντας εμπόδια στην πρόοδο στον χώρο των νέων υπηρεσιών και των υπηρεσιών νέφους (cloud). Η αρχιτεκτονική SDN αποτελεί λύση για διάφορες περιπτώσεις

αφού δίνει την δυνατότητα για έλεγχο του δικτύου μέσω λογισμικού και προγραμματισμού. Ο τρόπος με τον οποίο αυτό λειτουργεί έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε το δίκτυο. [23]

Η βασισμένη στο λογισμικό δικτύωση (SDN) είναι διαδεδομένη και άμεσα συνδεδεμένη με τα σύγχρονα δίκτυα επικοινωνιών αλλά και με τα μελλοντικά. Η τεχνολογία SDN έχει σχεδιαστεί για να κάνει τα δίκτυα πιο ευέλικτα. Με χρήση SDN για τον σχεδιασμό, την δημιουργία και την διαχείριση δικτύων, τα επίπεδα ελέγχου και προώθησης του δικτύου διαχωρίζονται επιτρέποντας το να γίνεται άμεσα προγραμματιζόμενος.

Ο στόχος της τεχνολογίας SDN είναι η συγκέντρωση της πληροφορίας σε ένα δίκτυο αφαιρώντας την διαδικασία προώθησης πακέτου (data plane) από τη διαδικασία δρομολόγησης (control plane). Στο επίπεδο δεδομένων (control plane) συγκεντρώνονται οι ελεγκτές οι οποίοι αποτελούν τον «εγκέφαλο» του δικτύου και το σημείο που συγκεντρώνεται όλη η νοημοσύνη. Οι 4 βασικές αρχές της βασισμένης στο λογισμικό δικτύωσης (SDN) είναι: ο διαχωρισμός των διαδικασιών προώθησης και δρομολόγησης, κεντρική διαχείριση, ανοικτά περιβάλλοντα χρήσης (interfaces) και η δυνατότητα ρύθμισης μέσω προγραμματισμού. Η αρχιτεκτονική SDN παρέχει δυνατότητες:

- Άμεσος προγραμματισμός, ώστε ο έλεγχος του δικτύου να μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω προγραμματισμού.
- Κεντρικής διαχείρισης, που πραγματοποιείται από τμήματα λογισμικού που καλούνται ελεγκτές SDN και διατηρούν συνολική εικόνα του δικτύου.
- Ρύθμισης μέσω προγραμματισμού, επιτρέποντας στους διαχειριστές να διαμορφώνουν, να διαχειρίζονται, να ασφαλίζουν και να βελτιστοποιούν την χρήση των πόρων του δικτύου γρήγορα μέσω δυναμικών αυτοματοποιημένων προγραμμάτων SDN. [24]



Εικόνα 4 Υβριδική 5G οπτική ασύρματη αρχιτεκτονική βασισμένη σε SDN [25]

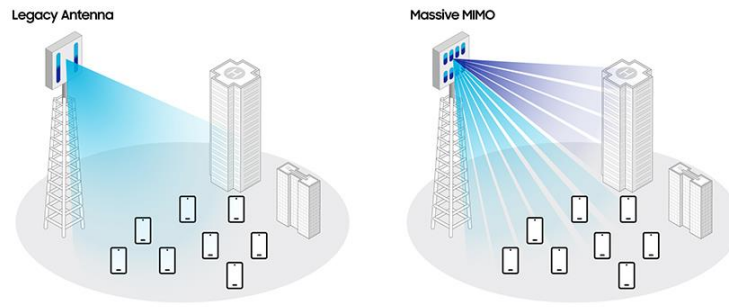
## 2.6.2 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

Η τεχνολογία Πολλαπλής-Εισόδου Πολλαπλής-Εξόδου (Multiple-Input Multiple-Output - MIMO) χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για την χρήση ανακλώμενων σημάτων ώστε να παρέχει κέρδη στην ευρωστία και στην απόδοση του καναλιού. Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιείται πλέον ευρέως αν και είναι διαθέσιμη εδώ και πάρα πολύ καιρό και αποτελεί βασικό στοιχείο των προτύπων επικοινωνίας συμπεριλαμβανομένων των Wi-Fi 4, Wi-Fi 5, 3G, WiMAX και LTE. [26]

Ειδικά, η τεχνολογία MIMO αναφέρεται σε μία πρακτική για την αποστολή και λήψη περισσότερων του ενός σημάτων στον ίδιο χρόνο μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού με αξιοποίηση της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Το φαινόμενο πολλαπλών διαδρομών είναι η χρήση της Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας για την κωδικοποίηση των καναλιών που είναι υπεύθυνα για την μετάδοση περισσότερων δεδομένων. Η τεχνολογία MIMO αφορά την προ κωδικοποίηση, την χωρική πολυπλεξία και την κωδικοποίηση διαφοροποίησης.



Σύμφωνα με την τεχνολογία MIMO χρησιμοποιούνται πολλαπλές κεραιές, μπορεί να αυξηθεί η χωρητικότητα ενός καναλιού. Κάτι τέτοιο καθιστά την συγκεκριμένη τεχνολογία μία από τις σημαντικότερες από αυτές που εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια. [26]



Εικόνα 5 MIMO roadmap [27]

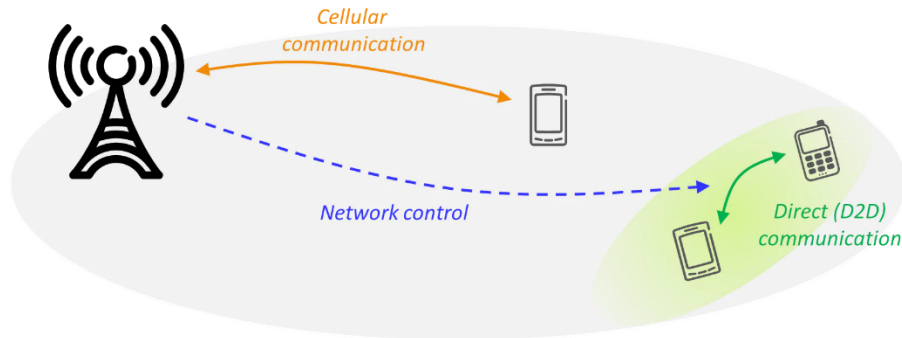
### 2.6.3 Επικοινωνία «συσκευής με συσκευή» (Device-to-Device)

Στα δίκτυα 5G, η δυνατότητα επικοινωνίας «συσκευής με συσκευή» (device to device, D2D) υποστηρίζει την τοπική διαχείριση συνδέσεων επικοινωνίας μικρών αποστάσεων επιτρέποντας τον διαχωρισμό της τοπικής κίνησης από το συνολικό δίκτυο. Έτσι, αφαιρείται φορτίο από το κεντρικό δίκτυο και ανατίθεται στις τελικές συσκευές μέρος της διαχείρισης του δικτύου μέσω της απευθείας επικοινωνίας τους.

Η επικοινωνία «συσκευής με συσκευή» (device to device, D2D) αφορά την άμεση επικοινωνία μεταξύ δύο χρηστών χωρίς την παρέμβαση σταθμών βάσης. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όσο καλύτερα γίνεται το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων και να βελτιωθεί σημαντικά η απόδοσή του δικτύου. Επικοινωνία D2D χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, για τοπικές υπηρεσίες και για βελτίωση υπηρεσιών IoT.

Κάθε ασύρματη συσκευή με δυνατότητα D2D μπορεί να έχει διπλό ρόλο, είτε ως κόμβος υποδομής, είτε ως συσκευή τελικού χρήστη. Επίσης το direct D2D κάνει πιο εύκολη την επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης λόγω της τοπικής σύνδεσης μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις. Είναι από τα κυριότερα χαρακτηριστικά για

την υποστήριξη υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο με την μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία. [28] [29]



Εικόνα 6 D2D επικοινωνίες [30]

## 2.6.4 Cognitive Radio

Το Cognitive Radio (CR) είναι μια λειτουργία για δυναμική διαχείριση φάσματος. Με την χρήση της ρυθμίζονται τα κανάλια δυναμικά έτσι ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές και η συμφόρηση στους τελικούς χρήστες. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση πομποδέκτη που ανιχνεύει τα διαθέσιμα κανάλια αυτόματα και αλλάζει τις παραμέτρους μετάδοσης και λήψης ανάλογα ώστε να δοθεί η δυνατότητα για περισσότερες ασύρματες επικοινωνίες. Με χρήση της λειτουργίας Cognitive Radio (CR) υποστηρίζονται εργασίες όπως έλεγχος ισχύος, η ανίχνευση φάσματος, η ανίχνευση φάσματος ευρείας ζώνης και η διαχείρισή του, γίνονται όλο και πιο απαραίτητες καθώς ο αριθμός των διασυνδεδεμένων συσκευών αυξάνεται σημαντικά αυτές οι λειτουργίες γίνονται όλο και πιο απαραίτητες. Η λειτουργία Cognitive Radio (CR) είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος αξιοποίησης των πόρων του δικτύου. [31]

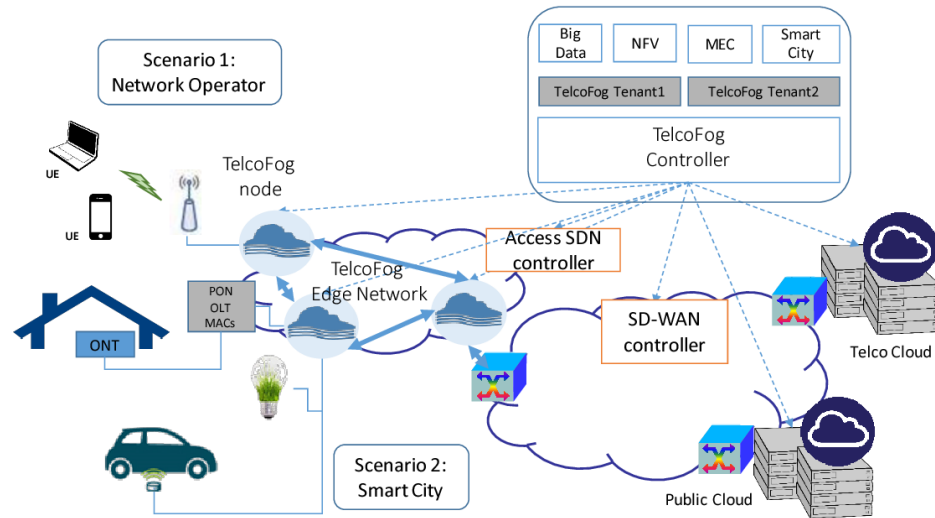
## 2.6.5 Radio Access Network

Ένα Radio Access Network (RAN) είναι ένα σημαντικό στοιχείο ενός ασύρματου συστήματος τηλεπικοινωνιών που συνδέει μεμονωμένες συσκευές με άλλα μέρη ενός δικτύου μέσω μιας ραδιοζεύξης. Το RAN συνδέει τον εξοπλισμό χρήστη μέσω μιας σύνδεσης οπτικών ινών ή ασύρματης σύνδεσης. Ο σύνδεσμος αυτός πηγαίνει στο κεντρικό δίκτυο, το οποίο διαχειρίζεται τις πληροφορίες. Τα δίκτυα RAN έχουν εξελιχθεί από γενιά σε γενιά δικτύωσης κινητής τηλεφωνίας. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τέταρτης γενιάς τη δεκαετία του 2000, εισήχθη το Long-Term Evolution RAN με το δίκτυο ραδιοπρόσβασης να αλλάζει σημαντικά. Στα δίκτυα 4G, η συνδεσιμότητα του συστήματος για πρώτη φορά βασίστηκε στο πρωτόκολλο IP, που αντικατέστησε το κύκλωμα προγενέστερων τύπων δικτύου.

Στα δίκτυα 5G, έρχονται βελτιώσεις με τη μορφή κεντρικού RAN, που ονομάζεται επίσης Cloud-RAN (C-RAN) και πολλαπλών συστοιχιών κεραιών, όπως πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων MIMO. [32]

## 2.6.6 Υπολογιστική Νέφος (Cloud Computing)

Η υπολογιστική νέφος (Cloud Computing) βασίζεται στην ύπαρξη του συμπλέγματος δικτυωμένων υπολογιστών όπου μέσω με συνεργατικό τρόπο επιτυγχάνεται η εκτέλεση εργασιών που απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Συχνά παρέχουν υπηρεσίες για τους τελικούς χρήστες με δυναμικά επεκτάσιμο και απρόσκοπτο τρόπο. Με χρήση της Υπολογιστικής Νέφος οι οργανισμοί μπορούν να αποφεύγουν δαπάνες για υλικό και λογισμικό. Η αξιοποίηση της υπολογιστικής ισχύος ενός τεράστιου δικτύου υπολογιστών δημιουργεί δύο υπηρεσίες προς αξιοποίηση, το λογισμικό ως υπηρεσία και το υλικό ως υπηρεσία. Επιτρέπεται σε άτομα και οργανισμούς να συνδέονται σε ένα “νέφος” υπολογιστικών πόρων για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους και να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους σε χωρητικότητα ή υπολογιστικές μονάδες χωρίς να απαιτείται η επένδυση σε νέα υποδομή. [33]



Εικόνα 7 Ενοποιημένη ευέλικτη fog and cloud computing αρχιτεκτονική για 5G δίκτυα [34]

### 2.6.7 Millimeter Waves (mmWave)

Το Millimeter Wave είναι το μέρος του φάσματος με μήκη κύματος μεταξύ 10 millimeters (30 GHz) και 1 millimeter (300 GHz) που αξιοποιείται στα δίκτυα 5G. Τα εύρη συχνοτήτων τα οποία καλύπτουν κυμαίνονται μεταξύ των 30 και 300 GHz. Ενώ τα ραδιοκύματα υψηλότερης συχνότητας έχουν μειωμένη εμβέλεια περίπου 300 μέτρων, μικρότερα μεγέθη κυψελών με αυξημένο αριθμό κεραιών έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως μειωμένο γενικό κόστος, μεγαλύτερη χωρητικότητα σύνδεσης δικτύου και μειωμένο λανθάνοντα χρόνο. Η απόδοση επιπέδου ζεύξης του ασύρματου συστήματος mmWave εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα το σχήμα μετάδοσης, η προσέγγιση για την αναγνώριση του καναλιού, ο τρόπος σχεδίασης της κυματομορφής του μεταδιδόμενου σήματος, η δομή και οι στρατηγικές πρόσβασης. [35]

## 2.7 Πάροχοι κινητών δικτύων και όφελος από τα δίκτυα 5G

### 2.7.1 Οι πάροχοι κινητών υπηρεσιών στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα πρωταγωνιστούν τρεις πάροχοι κινητής τηλεφωνίας, οι εταιρείες COSMOTE έχοντας το 46,9%, WIND με 24,5% και VODAFONE 28,9%. Τα δίκτυα που χρησιμοποιούν έχουν ζώνες συχνοτήτων στα 800MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz και 2600 MHz. Με αυτές τις εταιρείες έχουν συγχωνευτεί άλλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας όπως Cyta, Q-Telecom, Tellas και άλλες. Την 16<sup>η</sup> Δεκεμβρίου του 2020 η COSMOTE παρουσίασε το δίκτυο 5G έπειτα από δύο χρόνια δοκιμών και ελέγχων.

	Πάροχος	Φάσμα Down-link(MHz)	Φάσμα Up-link(MHz)	Τεχνολογία	Ημερομηνία Έναρξης Δικαιώματος Χρήσης	Ημερομηνία Λήξης Δικαιώματος Χρήσης
<b>800 MHz</b>	Cosmote	811-821	852-862	Χωρίς περιορισμούς	1/11/2014	28/02/2030
<b>800 MHz</b>	Vodafone	801-811	842-852	Χωρίς περιορισμούς	1/11/2014	28/02/2030
<b>800 MHz</b>	Wind	791-801	832-842	Χωρίς περιορισμούς	1/11/2014	28/02/2030
<b>900 MHz</b>	Cosmote	925-930	880-885	Χωρίς περιορισμούς	30/09/2012	19/09/2027
<b>900 MHz</b>	Cosmote	930-935	885-890	Χωρίς περιορισμούς	09/09/2002 09/09/2017	08/09/2017 29/09/2027
<b>900 MHz</b>	Wind	935-945	890-900	Χωρίς περιορισμούς	30/09/2012	29/09/2027
<b>900 MHz</b>	Vodafone	950-960	905-915	Χωρίς περιορισμούς	30/09/2012	29/09/2027
<b>900 MHz</b>	Vodafone	945-950	900-905	Χωρίς περιορισμούς	06/08/2001 06/08/2016	05/08/2016 19/09/2027
<b>1800 MHz</b>	Wind	1805-1810	1710-1715	Χωρίς περιορισμούς	06/08/2001	05/08/2016

<b>1800 MHz</b>	Wind	1810-1820	1715-1725	Χωρίς περιορισμούς	06/08/2001	05/08/2016
<b>1800 MHz</b>	Vodafone	1820-1830	1725-1735	Χωρίς περιορισμούς	01/07/2012	31/06/2027
<b>1800 MHz</b>	Vodafone	1830-1845	1735-1750	Χωρίς περιορισμούς	06/08/2001	05/08/2016
<b>1800 MHz</b>	Cosmote	1855-1880	1760-1785	GSM/DCS	05/12/1995	04/12/2020
<b>1800 MHz</b>	Cosmote	1845-1855	1750-1760	Χωρίς περιορισμούς	01/07/2012	31/06/22
<b>2100 MHz</b>	Vodafone	2110.3-2130.3	1920.3-1940.3	UMTS/IMT 2000	06/08/2001	05/08/2021
<b>2100 MHz</b>	Wind	2130.3-2140.3	1940.3-1950.3	UMTS/IMT 2000	06/08/2001	05/08/2021
<b>2100 MHz</b>	Cosmote	2140.3-2155.3	1950.3-1965.3	UMTS/IMT 2000	06/08/2001	05/08/2021
<b>2600 MHz</b>	Cosmote	2640-2670	2520-2550	Χωρίς περιορισμούς	01/11/2014	28/03/2030
<b>2600 MHz</b>	Vodafone	2620-2640	2500-2520	Χωρίς περιορισμούς	01/11/2014	28/03/2030
<b>2600 MHz</b>	Wind	2670-2690	2550-2570	Χωρίς περιορισμούς	01/11/2014	28/03/2030

*Πίνακας 1 Υπηρεσίες παρόχων*

Ο παραπάνω πίνακας παρουσιάζει τις υπηρεσίες που τα δίκτυα αυτά παρέχουν. Η δεύτερη στήλη δείχνει το downlink φάσμα, δηλαδή στις συχνότητες που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης για εκπομπή. Η τρίτη στήλη αντιστοιχεί στο uplink φάσμα, δηλαδή στις συχνότητες που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης για τη λήψη σήματος. Στην επόμενη στήλη αναφέρεται η διαθέσιμη τεχνολογία για κάθε ζώνη συχνοτήτων. Επίσης, η ένδειξη «χωρίς περιορισμούς» υποδεικνύει ότι κάθε εταιρεία μπορεί να επιλέξει χωρίς περιορισμούς ποια τεχνολογία επιθυμεί να χρησιμοποιήσει με την προϋπόθεση να τηρηθούν οι τεχνικοί όροι που αναγράφονται στο σχετικό Δικαίωμα Χρήσης Ραδιοσυχνότητας της ΕΕΤΤ [36].

Η WIND ως στρατηγικός μεγάλος επενδυτής σε υποδομές νέας γενιάς κινητής και σταθερής τηλεφωνίας, συνέβαλλε σημαντικά στην ανάπτυξη του των δικτύων 5G στην

Ελλάδα με συνεχείς επενδύσεις και τεχνογνωσία. Σε συνεργασία με τον Δήμο Καλαμάτας επιχείρησε την ανάπτυξη ενός εκ των πρώτων πιλοτικών δικτύων 5G.

### 2.7.2 Συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας

Η Ελλάδα κατατάσσεται τα τελευταία 5 χρόνια στις ακριβότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις ετήσιες μελέτες σύγκρισης τιμών παροχής υπηρεσιών ευρυζωνικού κινητού δικτύου. Η συνδεσιμότητα με το διαδίκτυο μέσω κινητών δεδομένων αποτελεί σημαντικό παράγοντα ψηφιακής οικονομίας. Η Ελλάδα κατέχει την τρίτη θέση στην ψηφιακή ανταγωνιστικότητα σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή [37].

Παρατηρήθηκε ότι το στα μέσα του 2020, οι διαμορφωμένες τιμές παροχής των υπηρεσιών κινητών δικτύων στην Ελλάδα ήταν σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Συγκριτικά με ευρωπαϊκές χώρες όπως είναι η Γερμανία, η Αυστρία, η Ιταλία, η Ιρλανδία και άλλες, οι τιμές υπηρεσιών στην Ελλάδα κυμαίνονται σε παρόμοια επίπεδα.

Παρουσιάζονται παρακάτω οι αναλυτικές εγγεγραμμένες και ενεργές συνδέσεις των τελευταίων ετών.

Έτος	Κινητή Τηλεφωνία	Σταθερή τηλεφωνία	Σύνολο σταθερής και κινητής τηλεφωνίας
Δεκ. 2015	4,546,539	4,972,954	9,519,493
Δεκ. 2016	4,946,302	5,413,015	10,359,317
Δεκ. 2017	5,261,147	6,016,714	11,277,861
Δεκ. 2018	5,516,841	6,396,842	11,913,683
Δεκ. 2019	5,819,679	6,797,429	12,617,108
Δεκ. 2020	6,111,419	7,206,787	13,318,206

Πίνακας 2 Συνδρομητές κινητής και σταθερής τηλεφωνίας [38]

### Ρυθμός κίνησης συνδρομητών

Σημαντικό στοιχείο για την μελέτη αποτελεί ο ρυθμός κίνησης των συνδρομητών, ο οποίος έχει σχέση με το ποσοστό συνδρομητών που πρόκειται να διακόψουν τις υπηρεσίες που σχετίζονται με τις υπηρεσίες των 5G δικτύων από ένα πάροχο μέσα σε ένα χρονικό διάστημα. Ένα μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι:

$$CR_{year} = \frac{Outflow_{year}}{N_{year}}$$

Όπου το  $N_{year}$  είναι ο αριθμός συνδρομητών που προβλέπεται για ένα συγκεκριμένο έτος, το  $CR_{year}$  είναι το ποσοστό της αλλαγής – διακοπής συνδρομητών από ένα πάροχο σε κάποιο άλλο σε ένα συγκεκριμένο χρόνο και το  $Outflow_{year}$  είναι ο αριθμός των συνδρομητών που δήλωσαν ότι θέλουν να διακόψουν και διέκοψαν τη σύνδεση τους σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Με το παραπάνω κλάσμα οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών μπορούν να υπολογίσουν τα κέρδη που θα αποκτήσουν αλλά και αυτά που θα χάσουν, από χρήστες που τελικά θα αποχωρήσουν. Με βάση την ΕΕΤΤ, ο ρυθμός κίνησης κυμαίνεται από 1 έως 5% . Σύμφωνα με το παραπάνω στοιχείο ο ρυθμός κίνησης φαίνεται να είναι μικρός έχοντας σαν συνέπεια ότι τελικά δεν έχουμε σημαντικό βαθμό επίδρασης στα έσοδα των τηλεπικοινωνιακών παρόχων. Αν όμως θεωρηθεί ότι συμβαίνει η χειρότερη περίπτωση δηλαδή το 5% του ποσοστού των συνδρομητών, τότε θα υπάρχει μια σχετική μείωση στα μελλοντικά κέρδη.

### 2.7.3 Ανάπτυξη δικτύων 5G στην Ελλάδα

Όπως γνωρίζουμε η τεχνολογία των δικτύων 5G είναι στις περισσότερες χώρες σε φάση ανάπτυξης και περιορισμένης λειτουργίας. Στόχος των παρόχων στην Ελλάδα είναι το 2021 να πραγματοποιηθεί η δημιουργία νέων υποδομών σε διάφορες περιοχές της χώρας. Κινητά τηλέφωνα που υποστηρίζουν 5G διατίθενται στην αγορά της Ευρώπης από τον Σεπτέμβριο του 2019.

Η Ελλάδα έχει σκοπό να εισέλθει στην εποχή των δικτύων 5G και το προσεχές διάστημα αναμένεται ένας πλήρης χάρτης του δικτύου που ενσωματώνει στρατηγικές ανάπτυξης νέων υποδομών που θα συμπεριλαμβάνουν δίκτυα οπτικών ινών, δικτύων Wi-Fi, υποδομές έξυπνων πόλεων, ασύρματα και δορυφορικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών και την εξειδίκευση IoT δικτύων [39].

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να συνεισφέρουν καθοριστικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό της ελληνικής οικονομίας, στην αύξηση του μεγέθους των επιχειρήσεων και στην



εξασφάλισης ενός μεγαλύτερου βιομηχανικού αποτυπώματος. Οι δαπάνες για την ανάπτυξη των δικτύων θα διεξαχθούν από πόρους της ελληνικής οικονομίας. Οι εφαρμογές για δίκτυα 5G πρόκειται να αυξήσουν την παραγωγικότητα των κλάδων, ενώ μέσω αυτών θα δοθούν ευκαιρίες όχι μόνο για τις αστικές ή βιομηχανικά αναπτυγμένες περιοχές, αλλά και σε όλη την ελληνική επικράτεια. Το σύνολο της επένδυσης για την περίοδο 2021-2030, εξαρτάται από [40]:

- το ύψος των δαπανών που θα επενδυθούν για να αναπτυχθούν τα δίκτυα. Αυτό καθορίζεται από το βαθμό πύκνωσης των δικτύων και το βαθμό κοινής χρήσης των υποδομών μεταξύ των παρόχων / επενδυτών,
- το ύψος των επενδύσεων των κλάδων για την ενεργοποίηση εφαρμογών 5G – το οποίο καθορίζεται από το βαθμό διεύδυσης των δικτύων 5G στους κλάδους της οικονομίας.

Τα επακόλουθα κέρδη για όλους τους κλάδους της ελληνικής οικονομίας εξαρτώνται σημαντικά από το ύψος και την ταχύτητα υλοποίησης των απαιτούμενων επενδύσεων.

### **Σχεδιασμός για την δημοπρασία φάσματος 5G στην Ελλάδα**

Τον Φεβρουάριο του 2020, η εθνική επιτροπή τηλεπικοινωνιών και ταχυδρομείων εκκίνησε δημόσια διαβούλευση ώστε να παραχωρηθούν τα δικαιώματα χρήσης ραδιοσυχνότητας σε ζώνες συχνοτήτων που αφορούν ζώνες συχνοτήτων όπως 700 MHz, 2100 MHz, 3800 MHz. Σύμφωνα με πηγές της ΕΕΤΤ οι ζώνες συχνοτήτων που περιλαμβάνονται στην δημοπρασία φάσματος αφορούν: ζεύγος φάσματος 60 MHz στη ζώνη συχνοτήτων 700 MHz, 120 MHz στη ζώνη συχνοτήτων 2100 MHz και 280 MHz φάσματος στη ζώνη συχνοτήτων 3400-3800 MHz. Επίσης, ένα ζεύγος φάσματος 2x30 MHz που είχε χορηγηθεί στην Cosmote καθώς και άλλο ένα ζεύγος φάσματος 2x30 MHz, που έχει δεσμευθεί από το Ελληνικό Δημόσιο αποκλειστικά για την παροχή υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών σε αγροτικές περιοχές. Για να εξασφαλιστεί η καλύτερη χρήση του φάσματος και να αποφευχθεί η υπερβολική συγκέντρωση φάσματος από έναν ή περισσότερους πλειοδότες, η ΕΕΤΤ εξετάζει την περίπτωση της επιβολής περιορισμού (ανά πάροχο) στο

μέγιστο φάσμα που χορηγείται στη ζώνη 700 MHz, στη ζώνη 2100 MHz και στη ζώνη 3400-3800 MHz.



Εικόνα 8 Εφαρμογή 5G στην Ελλάδα [41]

## 2.8 Κινητά δίκτυα 6G: όραμα και πιθανές τεχνικές

Αν και τα δίκτυα 5G είναι ακόμη στα πρώτα χρόνια ανάπτυξης και λειτουργίας τους, οι ιδέες για την επόμενη γενιά έχουν ήδη αρχίσει να έρχονται στο προσκήνιο. Το 6G είναι ένα υπό ανάπτυξη πρότυπο για τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών το οποίο πρόκειται να υποστηριχθεί στις τηλεπικοινωνίες. Πρόκειται να αποτελέσει τον διάδοχο της πέμπτης γενιάς και θα είναι σημαντικά ταχύτερο. Τα δίκτυα 6G αναμένεται να είναι όπως και τα προηγούμενα ευρυζωνικά κυψελωτά με την περιοχή εξυπηρέτησης να χωρίζεται σε μικρές περιοχές, τις κυψέλες. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη έχει ήδη εκδηλωθεί έμπρακτα από εταιρείες όπως οι Samsung, Xiaomi, Nokia, Apple.

Τα δίκτυα 6G αναμένεται να παρουσιάσουν διαφορές σε σχέση με τα δίκτυα προηγούμενων γενιών και είναι πιθανόν να υποστηρίζουν εφαρμογές πέρα από αυτές που υπάρχει η δυνατότητα να υποστηριχθούν αυτή την στιγμή, όπως π.χ. η τεχνητή νοημοσύνη, η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (Virtual Reality - VR/ Augmented Reality - AR)

και εφαρμογές IoT. Οι φορείς εκμετάλλευσης των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να υιοθετήσουν ευέλικτα αποκεντρωμένα επιχειρηματικά μοντέλα για τα δίκτυα 6G, με τοπική αδειοδότηση φάσματος, κοινή χρήση φάσματος, κοινή χρήση υποδομής και έξυπνη αυτοματοποιημένη διαχείριση που θα υποστηρίζεται από υπολογιστές αιχμής, τεχνητή νοημοσύνη, επικοινωνία σύντομων πακέτων και τεχνολογίες blockchain. [42]

### 2.8.1 Πρόοδος έρευνας 6G

Το 2020 ερευνητές από την Σιγκαπούρη και την Ιαπωνία δημοσίευσαν εργασία σχετικά με την δημιουργία ενός chip για κύματα terahertz, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για δίκτυα 6G [42]. Επίσης την ίδια χρονιά οι σημαντικότερες εταιρείες στις τηλεπικοινωνίες δημιούργησαν την Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS) ώστε να προωθήσουν την τεχνολογία του 6G στην Αμερική. Επίσης, το 2022 μία ερευνητική ομάδα από την Κίνα ισχυρίστηκε ότι πέτυχε παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων 206,25 gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbit/s) για πρώτη φορά σε περιβάλλον εργαστηρίου εντός της ζώνης συχνοτήτων terahertz που αποτελεί την βάση της κυψελοειδούς τεχνολογίας 6G [42].

Οι τομείς έρευνας που αναπτύσσονται για την πρόοδο στα δίκτυα 6G όπως προκύπτει από τις μελέτες που πραγματοποιούνται αφορούν την Τρισδιάστατη Δικτύωση (3D Networking) και την Τεχνητή Νοημοσύνη για Ασύρματα Περιβάλλοντα (AI for Wireless) με τους ερευνητές να καλούνται να αντιμετωπίσουν την υψηλή κινητικότητα, τον σχεδιασμό λύσεων τεχνητής νοημοσύνης χαμηλής πολυπλοκότητας και μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Οι βασικές αρχές του 3D Ρυθμού-Αξιοπιστίας-Καθυστέρησης (3D Rate-Reliability-Latency) μεταβάλλουν τα θεμελιώδη όρια επικοινωνίας και εισέρχεται η τρισδιάστατη φύση των συστημάτων 6G. Επίσης, ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων 6G αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως την παρουσία ετερογενών συσκευών με διαφορετικές δυνατότητες και μοτίβα κινητικότητας. Δημιουργείται ανάγκη για πρωτόκολλα που μπορούν να προσαρμοστούν στο περιβάλλον [43].

## 2.8.2 Χαρακτηριστικά δικτύων 6G

Η τεχνολογία της έκτης γενιάς αναμένεται να ξεπεράσει τις προκλήσεις. Ο σχεδιασμός του είναι προσαρμοσμένος στις απαιτήσεις απόδοσης τις τεχνολογικές τάσεις του σήμερα. Όσο εξελίσσεται, οριοθετούνται οι νέες υπηρεσίες 6G οι οποίες θα παρέχονται και προσδιορίζονται οι διαδικασίες για την διευκόλυνση του άλματος από τα τρέχοντα συστήματα 5G προς τα 6G. Κάθε νέα γενιά κινητής τηλεφωνίας βασίζεται σε καινοτόμες εφαρμογές. Στα δίκτυα 6G αναμένεται να παρουσιαστούν συναρπαστικές νέες εφαρμογές και τεχνολογικές τάσεις που θα θέσουν τους στόχους και θα επαναπροσδιορίσουν υπηρεσίες προηγούμενων γενιών. Εφαρμογές που θα υποστηρίζονται από δίκτυα 6G:

- Πολυαισθητηριακές εφαρμογές (Extended Reality - XR).
- Ρομποτική και Αυτόνομα Συστήματα.
- Ασύρματες αλληλεπιδράσεις εγκεφάλου-υπολογιστή.
- Blockchain τεχνολογία.

Οι εφαρμογές οδηγούν σε νέες τάσεις για τα δίκτυα 6G και θα προσεγγίσουν διευρυμένο περισσότερο φάσμα συχνοτήτων και αυξημένη αξιοπιστία. Η πλειοψηφία των 6G εφαρμογών απαιτούν για ρυθμούς μετάδοσης πιο υψηλούς από 5G εφαρμογές. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για περισσότερους πόρους φάσματος οδηγώντας στην περαιτέρω εξερεύνηση συχνοτήτων ακόμη και κάτω των 6 GHz. Η επανάσταση των δεδομένων πρόκειται να συνεχιστεί στο μέλλον και αναμένεται να μετατοπιστεί από τα 'μεγάλα' δεδομένα (Big Data), στα μαζικά 'μικρά δεδομένα' (Small Data). Τα δίκτυα 6G πρέπει να μπορούν να αξιοποιήσουν τόσο τα μεγάλα όσο και τα μικρά δεδομένα σε όλη τους την υποδομή και να βελτιώνουν τις λειτουργίες ή να παρέχουν νέες. Η τάση αυτή οδηγεί σε καινούργιες τεχνικές μηχανικής εκμάθησης που πηγαίνουν ένα βήμα παραπέρα από την ανάλυση μεγάλων δεδομένων που γνωρίζουμε [43].

Αναμένεται να εισαχθούν νέες κατηγορίες υπηρεσιών 6G. Η χαμηλή καθυστέρηση δίνει στον σχεδιασμό των δικτύων 6G την δυνατότητα να επιτρέπουν οποιαδήποτε απα-

ραίτητη απόδοση στον χώρο του ρυθμού και της αξιοπιστίας. Η διάκριση μεταξύ Βελτιωμένης Κινητής Ευρυζωνικότητας (enhanced Mobile Broadband - eMBB) και Εξαιρετικά Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστέρησης (Ultra-Reliable Low Latency communications - URLLC) δεν θα είναι πλέον βιώσιμη για την υποστήριξη εφαρμογών όπως Πολυαισθητηριακές Εφαρμογές ( Extended Reality – XR), Ασύρματες Αλληλεπιδράσεις εγκεφάλου-υπολογιστή (Brain Computer Interface - BCI), λόγω απαιτήσεων για χαμηλή καθυστέρηση, υψηλής αξιοπιστίας, και υψηλών ρυθμών δεδομένων μετάδοσης. Τα συστήματα του 6G είναι απαραίτητο να παρέχουν υπηρεσίες ελέγχου, εντοπισμού, ανίχνευσης και ενεργειακές υπηρεσίες.

Για να ενεργοποιηθούν οι προαναφερθείσες υπηρεσίες και να διασφαλιστεί η απόδοσή τους, πρέπει να ενσωματωθεί στο 6G μια ομάδα νέων τεχνολογιών και ενσωματωθούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά [43].

- Πάνω από 6 GHz για 6G – από Small Cells σε Tiny Cells.
- Πομποδέκτες με ενσωματωμένες ζώνες συχνοτήτων.
- Επικοινωνία με Μεγάλες Ευφυείς Επιφάνειες.
- Edge AI
- Ολοκληρωμένα επίγεια, αερομεταφερόμενα και δορυφορικά δίκτυα.
- Μεταφορά και Συγκομιδή Ενέργειας.

### 2.8.3 Απαιτήσεις και εφαρμογές των δικτύων 6G

Η τεχνολογία 5G συνδέονται με πολλά ζητήματα όπως η απόδοση, η καθυστέρηση, η ενεργειακή απόδοση, το κόστος εγκατάστασης, η αξιοπιστία και η πολυπλοκότητα του υλικού. Πιθανότατα, Τα δίκτυα 5G δεν θα μπορέσουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της αγοράς μετά το 2030. Τα δίκτυα 6G θα καλύψουν το κενό μεταξύ των απαιτήσεων της αγοράς και περιορισμών των δικτύων 5G. Με βάση τάσεις και προβλέψεις για μελλοντικές ανάγκες, κάποιοι από τους κύριους στόχους για τα 6G συστήματα είναι εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων ανά συσκευή, πολύ μεγάλος αριθμός συνδεδεμένων συ-

σκευών, πολύ χαμηλή καθυστέρηση, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, εξαιρετικά υψηλή αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Πολλοί δείκτες των δικτύων 5G θα ισχύουν και για τα δίκτυα 6G, όμως θα αναθεωρηθούν για να συμβαδίσουν με τις απαιτήσεις και αναμένεται να μελετηθούν σε μελλοντικές έρευνες. Η ερευνητική κοινότητα και η βιομηχανία στοχεύουν σε δίκτυα 6G που να υποστηρίζουν μέγιστο ρυθμός δεδομένων 1 Tbps, λανθάνουσα κατάσταση 0,1 ms, μεγάλη διάρκεια μπαταριών των συσκευών, συνδεσιμότητα συσκευής 100/m<sup>3</sup> και την ενεργειακή απόδοση.

Κατηγοριοποίηση των απαιτήσεων ξεχωριστά για κάθε περίπτωση χρήσης των δικτύων 6G:

- 1) **Αυτοματοποιημένη βιομηχανία:** απαιτούνται δίκτυα τα οποία θα εξυπηρετούν ταχύτερα επικοινωνίες ανάμεσα σε ανθρώπους και μηχανές. Αυτός ο τομέας επιτρέπει πληθώρα από νέες εφαρμογές. Απαιτεί όμως επικοινωνία μεταξύ μεγάλων συνδεδεμένων συστημάτων χωρίς να χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση Αναπτυγμένη ρομποτική με στόχο την υλοποίηση συνδέσεων με μέγιστο λανθάνοντα χρόνο 100 ms και χρόνους αντίδρασης επιστροφής 1 ms.
- 2) **Αυτόνομη οδήγηση:** Η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων ή ανάμεσα σε όχημα και κάποια υποδομή και η αυτόνομη οδήγηση μπορεί να συνεισφέρει σε μεγάλη μείωση των τροχαίων ατυχημάτων. Όμως, η καθυστέρηση της τάξης των μερικών ms που πιθανότατα χρειάζονται για αποφυγή σύγκρουσης είναι κρίσιμη για μια αυτόνομη οδήγησης. Αν και προς το παρόν δεν υπάρχουν πλήρως λειτουργικά αυτόνομα οχήματα, είναι βέβαιο ότι θα προκύψει στην επόμενη δεκαετία σε αυτόν τον τομέα.
- 3) **Υγειονομική περίθαλψη:** Η τηλεδιάγνωση, η εξ' αποστάσεως χειρουργική επέμβαση και η τηλεαποκατάσταση είναι μερικές από τις πολλές εφαρμογές στην υγεία. Χρησιμοποιώντας προηγμένα τηλεδιαγνωστικά εργαλεία, θα μπορεί να γίνει ιατρική διάγνωση οπουδήποτε και οποτεδήποτε ανεξάρτητα από το που βρίσκεται ασθενής και ιατρός.

Οι κύριες απαιτήσεις για τις παραπάνω υπηρεσίες είναι:

**Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων:** Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων καθώς ένα βίντεο υψηλής ευκρίνειας 1080p απαιτεί ρυθμό μετάδοσης 1-5 Mb/s, ενώ ένα 4K βίντεο 15 - 25 Mb/s. Ένα ολόγραμμα απαιτεί 0,5-2 Gb/s, ενώ ολογράμματα μεγάλου μεγέθους θέλουν έως και κάποια TB/s.

**Λανθάνουσα περίοδος:** Οι χρόνοι αντίδρασης του ανθρώπινου εγκεφάλου μπορεί να είναι διαφορετικοί σε αισθητηριακές εισροές που εκλαμβάνει και κυμαίνονται μεταξύ 1 ms και 100 ms, αφού απαιτούνται 10 ms για να γίνουν αντιληπτές οι οπτικές πληροφορίες και μέχρι 100 ms για να γίνει η αποκωδικοποίηση ηχητικών σημάτων, ενώ για απτικά σήματα είναι αρκετό το 1 ms.

**Συγχρονισμός:** Καθώς το ανθρώπινο μυαλό έχει πολύ μειωμένους χρόνους αντίδρασης σε διάφορες εισόδους, τέτοιου είδους εισροές σε πραγματικό χρόνο θα πρέπει να είναι σε απόλυτο συγχρονισμό.

**Δίκτυα καθορισμένα σε λογισμικό και εικονικοποίηση:** Το λογισμικό και η εικονικοποίηση είναι δύο κρίσιμα χαρακτηριστικά που αποτελούν τη βάση της διαδικασίας σχεδιασμού για να διασφαλιστεί η ευελιξία, η επαναδιαμόρφωση και η δυνατότητα προγραμματισμού. Επιπλέον, θα επιτρέψουν την κοινή χρήση δισεκατομμυρίων συσκευών σε μια κοινή φυσική υποδομή.

**Ενσωματωμένα Δίκτυα Διαστήματος-Εδάφους:** Αυτή η περίπτωση χρήσης αναφέρεται σε πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω της απρόσκοπτης ενοποίησης των επίγειων και διαστημικών δικτύων. Η παροχή διαδικτύου από το διάστημα χρησιμοποιώντας μεγάλους δορυφόρους είναι κάτι που έχει αποκτήσει και πάλι την δημοτικότητα του. Τα σημαντικότερα οφέλη που παρέχουν είναι η πρόσβαση στο διαδίκτυο από κάθε μέρος σε παγκόσμια κλίμακα, όπως επίσης και να παρέχεται αυτή η δυνατότητα και σε κινούμενες μονάδες όπως αεροπλάνα και πλοία, παρουσιάζοντας εμπλουτισμένες επιλογές δικτύου που συνδέονται

με τα πρωτόκολλα του επίγειου διαδικτύου. Οι κινητές συσκευές θα μπορούν να έχουν δορυφορική πρόσβαση χωρίς να στηρίζονται σε επίγειες υποδομές.

Τέτοιες υπηρεσίες δικτύου έχουν τις εξής απαιτήσεις:

- 1) Ευέλικτη διευθυνσιοδότηση και δρομολόγηση από δορυφόρους τύπου χαμηλής Τροχιάς Γης (Low Earth orbit).
- 2) Δυνατότητα εύρους ζώνης δορυφόρου: εμπόδιο θα μπορούσαν να αποτελέσουν για τους δορυφόρους οι επίγειες δικτυακές υποδομές και ο διαδορυφορικός σύνδεσμος.
- 3) Έλεγχος εισόδου από δορυφόρους: η λειτουργία κάποιου δορυφόρου ως σημείο πρόσβασης απαιτεί την συνεργασία όλων των δορυφόρων ώστε να είναι γνωστό το κυκλοφοριακό φορτίο στο διαστημικό δίκτυο και να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος.

Οπότε συνοψίζοντας τις απαιτήσεις που αφορούν τα δίκτυα 6G θα μπορούσαν να τονιστούν οι εξής [44]:

- 1) Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων: ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτεροι του 1TB/s που τροφοδοτούν την ολογραφική επικοινωνία και το υψηλό ποσοστό πληροφοριών των εφαρμογών του διαδικτύου. Τουλάχιστον 50 φορές μεγαλύτερο από το 5G.
- 2) Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εμπειρίας χρήστη: το λιγότερο 10x από την αντίστοιχη τιμή της πέμπτης γενιάς.
- 3) Καθυστέρηση επιπέδου χρήστη: το ελάχιστο θα πρέπει να είναι κατά 40 φορές καλύτερο από ό,τι στο 5G.



Εικόνα 9 Προκλήσεις 6G [45]



## 2.8.4 Προκλήσεις για τα δίκτυα 6G

Οι προκλήσεις και οι δυνατότητες που σχετίζονται με τις ασύρματες επικοινωνίες 6G πηγάζουν από κάποια βασικά στοιχεία, στα οποία συμπεριλαμβάνονται η παροχή ασφάλειας δικτύου και η εξασφάλιση του απορρήτου δεδομένων, η δημιουργία μιας οικονομικά αποδοτικής προσέγγισης προς την ταχεία ανάπτυξη και η επέκταση του δικτύου με έμφαση στις απομακρυσμένες περιοχές, η μείωση της τιμής χρήσης των κινητών επικοινωνιών και η επίτευξη υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Η ικανοποίηση όλων των απαιτήσεων είναι αρκετά δύσκολη. Θα πρέπει να υπάρχουν παραχωρήσεις μεταξύ αυτών των στοιχείων, οδηγώντας έτσι σε μια λεπτή ισορροπία μεταξύ των αναγκών και των απαιτήσεων.

## 3. Network Function Virtualization (NFV)

### 3.1 Ιστορική ανασκόπηση

Η ανάγκη για ταχύτερη και ευκολότερη προσθήκη νέων λειτουργιών και εφαρμογών οδήγησε τους παρόχους υπηρεσιών στην ιδέα της Εικονικοποίησης Δικτυακών Λειτουργιών (Network Function Virtualization - NFV). Τον Οκτώβριο του 2013 εμφανίστηκε η πρώτη εκδοχή του προτύπου NFV από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute - ETSI) το οποίο ανέλαβε αυτή την πρωτοβουλία. Το ETSI ISG NFV αποτελεί μια ομάδα προδιαγραφών που έθεσε τα πρότυπα για τη διαχείριση του NFV και την ενορχήστρωση δικτύου (MANO). Το ISG απαρτίζεται από εκπροσώπους από την Ευρώπη και άλλες περιοχές. Αντιμετωπίζει αρκετές πτυχές όπως η αρχιτεκτονική, το μοντέλο πληροφοριών, τα πρωτόκολλα, το μοντέλο δεδομένων, τα APIs (Application Programming Interface), την αξιοπιστία και την ασφάλεια, μελλοντικές εξελίξεις. Το ETSI είναι επίσης καθοριστικό σε συνεργατικά έργα όπως το OPNFV. [46]

## 3.2 Δομή και αρχιτεκτονική

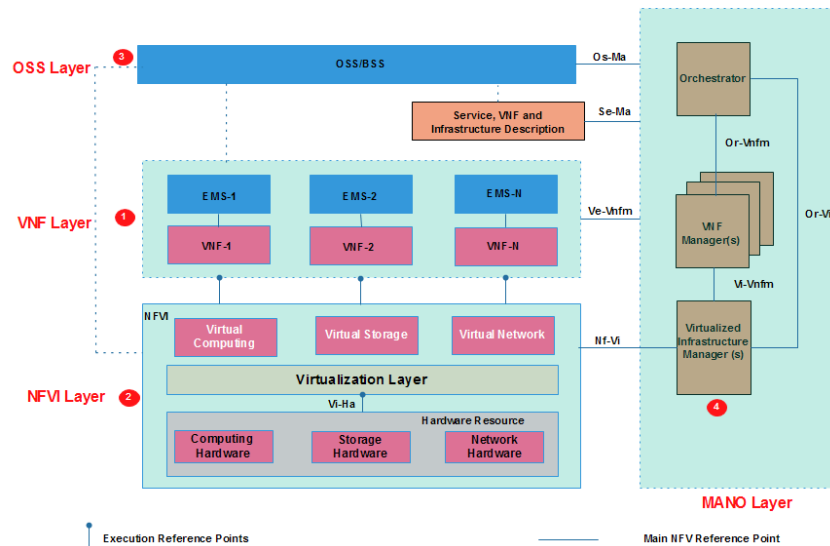
Τα σύγχρονα δίκτυα τηλεπικοινωνιών περιέχουν ολοένα και περισσότερη ποικιλία ιδιόκτητου υλικού. Κάθε νέα υπηρεσία που εκκινεί απαιτεί συχνά αναδιαμόρφωση του δικτύου και την ανάγκη για νέο εξοπλισμό που απαιτεί χώρο εγκατάστασης, επιπλέον κόστος και προσωπικό συντήρησης. Σε έναν ψηφιακό κόσμο όπου επιταχύνεται η καινοτομία, απαιτείται μεγαλύτερη ευελιξία από ότι επιτρέπουν οι συσκευές που βασίζονται στο υλικό. Η αρχιτεκτονική NFV προτάθηκε ως μέσο αντιμετώπισης τέτοιων δυσκολιών. Οι βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης ώστε να υπάρξει αυτή η πρόοδος περιλαμβάνει το SDN και το NFV. Το SDN και το NFV λειτουργούν συμπληρωματικά και πλήρως συν εξαρτώμενα. Η αρχιτεκτονική SDN παρέχει τα μέσα για δυναμικό έλεγχο του δικτύου και την παροχή δικτύων ως υπηρεσία, ενώ η αρχιτεκτονική NFV προσφέρει την δυνατότητα διαχείρισης και της εικονοποίησης των πόρων για την παροχή λειτουργιών δικτύου και την σύνθεσή τους σε υπηρεσίες υψηλότερου επιπέδου. Το NFV συμπεριλαμβάνει την εφαρμογή λειτουργιών δικτύου σε λογισμικό που μπορεί να λειτουργεί σε πολλαπλές τοποθεσίες του δικτύου όπως αυτό απαιτείται χωρίς να δημιουργείται η ανάγκη για εγκατάσταση νέου εξοπλισμού. [47]

### Αρχιτεκτονική ETSI NFVI

Το ETSI έχει δημιουργήσει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο υψηλού επιπέδου, το οποίο αποτελεί βάση για την ανάπτυξη νέων. Το πρότυπο που παρουσιάζεται στην εικόνα μας δείχνει πώς το NFVI βοηθάει στο να αποσυνδεθεί το υλικό από το λογισμικό. Το μπλοκ NFV αποτελείται από τέσσερα κύρια στρώματα:

1. Επίπεδο λειτουργίας δικτύου εικονοποίησης (VNF).
2. Επίπεδο υποδομής NFV (NFVI).
3. Επίπεδο υποσυστήματος υποστήριξης λειτουργίας (Operations Support Systems - OSS).

4. Στρώμα διαχείρισης και ενορχήστρωσης (Management and Orchestration - MANO).



Εικόνα 10 Σχέδιο της VNF αρχιτεκτονικής, συμπεριλαμβανομένων VNFs, VNFI, και NFV-MANO [48]

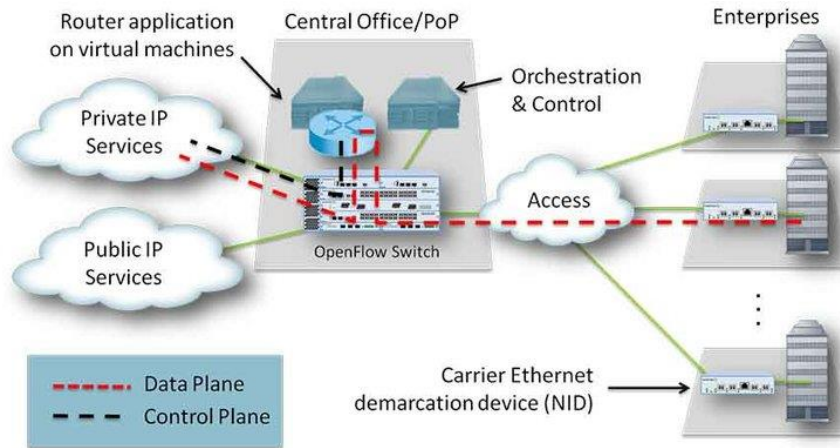
## ΣΧΕΣΗ NFV- SDN

Συχνά η αρχιτεκτονική NFV συγχέεται με τη δικτύωση λογισμικού SDN επειδή πρόκειται για δύο παρόμοιες τεχνολογίες που έχουν όμως διαφορές. Η σχέση της τεχνολογίας NFV με αυτή του SDN είναι συμπληρωματική. Οι δύο αυτές τεχνολογίες μπορούν να συνεργαστούν για να βελτιώσουν σημαντικά την διαχείριση μιας υποδομής NFV και να δημιουργήσουν ένα δυναμικό περιβάλλον δικτύου. Είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια εικονική λειτουργία δικτύου σαν αυτόνομη οντότητα, όμως υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα από την εφαρμογή της τεχνολογίας SDN για την υλοποίηση και την διαχείριση της υποδομής αυτής. Γενικότερα, όλες οι λειτουργίες ελέγχου δικτύου μπορούν να πραγματοποιηθούν εφαρμόζοντας τεχνολογίες τόσο NFV όσο και SDN. Η βασική ομοιότητά τους είναι ότι μέσω της εικονικοποίησης δίνουν λύσεις σε διάφορους τομείς ενός δικτύου, το οποίο όμως επιτυγχάνουν με διαφορετικό τρόπο. Το NFV εικονικοποιεί όλους τους φυσικούς πόρους δικτύου μέσω ενός προγράμματος διαχείρισης το οποίο επιτρέπει την ανάπτυξη δικτύου χωρίς την προσθήκη περισσότερων συσκευών, ενώ το SDN αφαιρεί πόρους

όπως δρομολογητές και κατευθύνει την λήψη αποφάσεων στο επίπεδο ελέγχου εικονικού δικτύου επιτυγχάνοντας ευέλικτη διαχείριση υπηρεσιών.

NFV	SDN
Αυξάνει την επεκτασιμότητα και την ευελιξία και επιταχύνει τον χρόνο κυκλοφορίας	Μειώνει το κόστος του δικτύου λόγω της αποφυγής ακριβών δρομολογητών και διακοπών
Δεν έχει καθοριστεί πρωτόκολλο για το NFV	Χρησιμοποιεί το OpenFlow σαν πρωτόκολλο επικοινωνίας
Απευθύνεται σε παρόχους υπηρεσιών	Επικεντρώνεται κυρίως σε κέντρα δεδομένων
Οι λειτουργίες NFV επιτελούνται σε industry standard διακομιστές	Οι λειτουργίες του SDN επιτελούνται σε τυποποιημένους διακομιστέςb
Υποστηρίζεται από παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών	Υποστηρίζεται από διάφορους προμηθευτές λογισμικού και υλικού εταιρικής δικτύωσης
Δρομολογητές, τείχη προστασίας, πύλες, CDN, WAN, επιταχυντές, διασφάλιση SLA	Ενορχήστρωση και δικτύωση cloud
Μετεγκατάσταση λειτουργιών δικτύου από αποκλειστικές συσκευές σε γενικούς διακομιστές	Διαχωρισμός ελέγχου και δεδομένων, συγκεντροποίηση του ελέγχου και δυνατότητα προγραμματισμού του δικτύου

Εικόνα 11 Διαφορές NFV – SDN [49]



Εικόνα 12 Διαχειριζόμενη υπηρεσία δρομολογητή με χρήση NFV [50]

Για να μπορέσει μια αρχιτεκτονική να γίνει πιο ευέλικτη για την υλοποίηση νέων υπηρεσιών, το SDN και το NFV καταργούν τους περιορισμούς με δύο τρόπους. Το SDN διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο προώθησης και το NFV αποσυνδέει τις λειτουργίες δικτύου από το υλικό. Έτσι υποστηρίζεται με διάφορους τρόπους ευέλικτη και επεκτάσιμη ανάπτυξη δικτύου.

### Ρόλος των αρχιτεκτονικών SDN και NFV στα δίκτυα 5G

Αυτές οι δύο αρχιτεκτονικές παίζουν θεμελιώδη ρόλο στην τεχνολογία 5G. Η αυξανόμενη ζήτηση θα επηρεάσει αρκετά την υποδομή δικτύου, ενώ το NFV μαζί με το SDN θα αποτελέσουν τρόπους απλούστευσης της ανάπτυξης και της διαχείρισης τέτοιων υποδομών. Το NFV υπόσχεται μείωση κόστους, ευκολία και ευελιξία στην ανάπτυξη των υποδομών, δίνοντας αξία στην αποδοτική υποδομή κέντρων δεδομένων και το SDN διευκολύνει την διαμόρφωση, την διαχείριση και την κλιμάκωση της αναπτυγμένης υποδομής δικτύου.

#### 3.2.1 Virtual Network Function Layer (NFVI)

Το συγκεκριμένο μπλοκ αποτελείται από δύο υποενότητες, τη Λειτουργία Εικονικού Δικτύου (Virtual Network Functions - VNF) και το Σύστημα Διαχείρισης Στοιχείων

(Element Management System - EMS). Το VNF αποτελεί σημαντικό τμήμα σε κάθε αρχιτεκτονική NFV. Στόχος είναι η εικονικοποίηση της λειτουργίας δικτύου. Για παράδειγμα, όταν ένας δρομολογητής είναι εικονικοποιημένος, ονομάζεται Router VNF και όταν ένας σταθμός βάσης είναι εικονικός ονομάζεται σταθμός βάσης VNF, ομοίως μπορεί να είναι διακομιστής με Πρωτόκολλο Δυναμικής Διαμόρφωσης Κεντρικού υπολογιστή (Dynamic Host Configuration Protocol -DHCP) VNF και τείχος προστασίας (Firewall) VNF. Κάθε λειτουργία ενός δικτύου που είναι εικονικοποιημένη μπορεί να ονομαστεί NFV. Στο Evolved Packet Core (EPC), υποσυναρτήσεις όπως πυλών (Gateways), Λειτουργίας Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Function – MME) και Διακομιστή Συνδρομητών (Home Subscriber Server - HSS) αποτελούν συγκεκριμένα VNF που έχουν την δυνατότητα να ενεργούν μαζί ως ένα εικονικό EPC. Όλα αυτά υλοποιούνται σε εικονικές μηχανές (Virtual Machine – VM). Ένα VNF μπορεί να αναπτυχθεί σε πολλαπλές εικονικές μηχανές (Virtual machine -VM) όπου κάθε εικονική μηχανή φιλοξενεί μια μεμονωμένη λειτουργία του VNF. Ολόκληρο το VNF μπορεί να αναπτυχθεί σε μία μόνο εικονική μηχανή.

Το EMS υλοποιεί την λειτουργική διαχείριση ενός VNF. Οι λειτουργίες διαχείρισης ενσωματώνουν διαχείριση βλαβών, διαμόρφωσης, απόδοσης και διαχείριση ασφάλειας. Γίνεται να υπάρχει ένα EMS σε ένα VNF ή και ένα EMS που να ενσωματώνεται σε διάφορα VNF. Επίσης το ίδιο το EMS μπορεί να επεκταθεί ως λειτουργία ενός VNF [48].

### 3.2.2 Επίπεδο υποδομής NFVI

Το NFV Infrastructure, το οποίο είναι το πιο σημαντικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής του NFV, είναι το σύνολο των στοιχείων υλικού και λογισμικού που δημιουργούν το περιβάλλον ανάπτυξης, διαχείρισης και εκτέλεσης VNF. Η υποδομή NFV δίνει την δυνατότητα συνδεσιμότητας σε πολλαπλές τοποθεσίες που μπορεί να εκτείνεται. Η υποδομή NFV περιλαμβάνει τους πόρους του υλικού, το επίπεδο εικονικοποίησης και τους εικονικούς πόρους.

Ο πόρος υλικού περιλαμβάνει υπολογιστές, διαδικτυακές μονάδες και μονάδες αποθήκευσης που παρέχουν επεξεργασία, αποθήκευση και συνδεσιμότητα με VNF μέσω του επιπέδου εικονικοποίησης. Οι υπολογιστικοί πόροι και οι αποθηκευτικές μονάδες συνήθως βρίσκονται στην ίδια μονάδα. Το δίκτυο υποστηρίζει λειτουργίες μεταγωγής όπως για παράδειγμα δρομολογητή, ενσύρματο ή και ασύρματο δίκτυο. Το Επίπεδο Εικονικοποίησης (Virtualization Layer) το οποίο λέγεται και hypervisor, αφαιρεί τις υλικές μονάδες και χωρίζει το λογισμικό VNF από το υποκείμενο υλικό για να αποκαταστήσει την ανεξαρτησία υλικού για τα VNF. Στο Επίπεδο Εικονικοποίησης (Virtualization Layer) πραγματοποιούνται τα ακόλουθα:

- Αφαίρεση και λογική κατάτμηση φυσικών πόρων, συνήθως ως στρώμα αφαίρεσης υλικού.
- Ενεργοποίηση του λογισμικού που εφαρμόζει το VNF για να χρησιμοποιήσει την υποκείμενη υποδομή εικονικοποίησης (Virtualization).
- Παροχή εικονικοποιημένων πόρων στο VNF, ώστε να μπορεί να εκτελεστεί.

Το μεσαίο επίπεδο εικονικοποίησης διασφαλίζει ότι τα VNF είναι αποσυνδεδεμένα από τον πόρο υλικού και επομένως το λογισμικό μπορεί να αναπτυχθεί σε διαφορετικούς φυσικούς πόρους. Επιπροσθέτως, το επίπεδο της εικονικοποίησης αφαιρεί από το επίπεδο υλικού την αποθήκευση και τον υπολογισμό που διατίθενται πλέον ως εικονικοί πόροι [48].

### 3.2.3 Operation Support Subsystem (OSS)

Στο Υποσύστημα Υποστήριξης Λειτουργίας (Operation Support Subsystem - OSS) πραγματοποιείται διαχείριση σφαλμάτων, διαχείριση δικτύου, διαχείριση παραμέτρων και διαχείριση υπηρεσιών. Το Σύστημα Υποστήριξης Επιχειρήσεων (Business Support Systems – BSS) ασχολείται με τη διαχείριση πελατών, τη διαχείριση προϊόντων και τη διαχείριση παραγγελιών και λοιπά. Στην αρχιτεκτονική NFV, το αποσυνδεδεμένο BSS/OSS ενός

χειριστή μπορεί να ενσωματωθεί στη διαχείριση της αρχιτεκτονικής του NFV χρησιμοποιώντας τυπικές διεπαφές [48].

### 3.2.4 NFV MANO

Το Επίπεδο Διαχείρισης και Ενορχήστρωσης (Management and Orchestration Layer – MANO) είναι το πλαίσιο διαχείρισης και ενορχήστρωσης όλων των πόρων στο περιβάλλον NFV. Αποτελείται από τρεις μονάδες:

- Διαχειριστής Εικονικοποιημένης Υποδομής (Virtualized Infrastructure Manager)
- Διαχειριστής VNF
- Ενορχηστρωτής

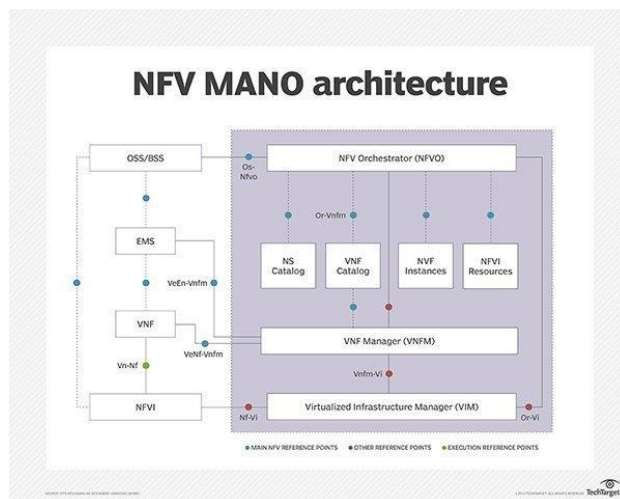
Το επίπεδο MANO αλληλοεπιδρά με τα στρώματα NFVI και VNF. Το επίπεδο MANO διαχειρίζεται όλους τους πόρους σε επίπεδο υποδομής και την κατανομή των VNF. Ο διαχειριστής εικονικής υποδομής (VIM) παρέχει λειτουργίες για τον έλεγχο και τη διαχείριση της διάδρασης ενός VNF με πόρους δικτύου, αποθηκευτικούς χώρους και υπολογιστές, όπως επίσης και για την εικονικοποίησή τους. Ο διαχειριστής εικονικής υποδομής (VIM) εκτελεί τα εξής:

- Απογραφή λογισμικού, υπολογιστών και πόρων δικτύου που ανήκουν στην υποδομή NFV.
- Διαχείριση πόρων υποδομής όπως αύξηση των ιδεατών μηχανών (VM), αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κ.τ.λ.
- Κατανομή εικονικών μηχανών σε hypervisors, υπολογιστικούς πόρους, αποθήκευση και συνδεσιμότητα δικτύου.
- Ανάλυση βασικών αιτιών των προβλημάτων της απόδοσης από την άποψη της υποδομής NFV.
- Συλλογή πληροφοριών σφαλμάτων υποδομής.



- Συλλογή πληροφοριών για προγραμματισμό, παρακολούθηση και βελτιστοποίηση χωρητικότητας.

Το επίπεδο Διαχείρισης VNF (VNF Manager) είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του κύκλου ζωής του VNF που περιλαμβάνει εγκατάσταση, ενημερώσεις, κλιμάκωση/μείωση και τερματισμό. Ένας διαχειριστής VNF μπορεί να αναπτυχθεί για την εξυπηρέτηση ενός ή και πολλών VNF. Ο ενορχηστρωτής είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση της υποδομής και των πόρων λογισμικού NFV και την υλοποίηση υπηρεσιών δικτύου. Υπάρχει ένα ακόμη ανεξάρτητο μπλοκ γνωστό ως Service, VNF και Infrastructure εκτός από τα παραπάνω δομικά στοιχεία. Το μπλοκ αυτό συμπεριλαμβάνει τα σύνολα των δεδομένων που δίνουν πληροφορίες για το πρότυπο ανάπτυξης του NFV και για την υπηρεσία, μοντέλα πληροφοριών υποδομής και γραφήματα προώθησης NFV. [48]



Εικόνα 13 Αρχιτεκτονική NFV MANO [51]

### 3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αρχιτεκτονικής NFV

#### Πλεονεκτήματα

Η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) δίνει στους παρόχους υπηρεσιών την ευελιξία να μετακινούν τις λειτουργίες δικτύου από αποκλειστικές συσκευές σε γενικούς διακομιστές. Το NFV χαρακτηρίζεται από ευελιξία και ασφάλεια, είναι οικονομικά

αποδοτικό και επεκτάσιμο. Κάτι τέτοιο κάνει τα δίκτυα πιο ευέλικτα και αποτελεσματικά. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι ώστε οι οργανισμοί να επιθυμούν την χρήση του NFV. Αναλύοντας τα πλεονεκτήματα, το NFV αντιμετωπίζει διάφορες απαιτήσεις που σχηματίζουν τα δίκτυα:

- **Ευελιξία:** η ταχεία ανάπτυξη νέων υπηρεσιών είναι πολύ σημαντική για τους πάροχους επικοινωνιών και λόγω αυτού ένα ευέλικτο και προσαρμόσιμο δίκτυο το οποίο μπορεί να εγκατασταθεί γρήγορα και εύκολα κρίνεται απαραίτητο.
- **Κόστος:** ένα από τα πιο βασικά ζητήματα για κάθε πάροχο υπηρεσιών είναι το κόστος και με την χρήση τέτοιων τεχνολογιών παρουσιάζεται σημαντική αποδοτικότητα.
- **Επεκτασιμότητα:** πρέπει να δίνεται η δυνατότητα κλιμάκωσης της αρχιτεκτονικής δικτύου σε διάφορους διακομιστές και να μην περιορίζονται σε έναν, ώστε να υπάρχει ταχεία προσαρμογή στις ανάγκες των χρηστών που αλλάζουν συνεχώς και δημιουργούν νέες υπηρεσίες.
- **Ασφάλεια:** μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στην δικτύωση είναι αυτή της ασφάλειας. Παρά το ότι η παροχή και η διαχείριση του δικτύου πραγματοποιείται από τους χειριστές, πρέπει αν επιτρέπεται στους πελάτες να εκτελούν το δικό τους εικονικό δίκτυο και να χρησιμοποιούν το δικό τους τείχος προστασίας για ασφάλεια εντός του δικτύου.
- **Ταχύτερη επίλυση προβλημάτων:** η ταχεία επίλυση προβλημάτων σε περίπτωση βλάβης των εγκαταστάσεων είναι πλέον βασική και με την χρήση της τεχνολογίας NFV είναι διαθέσιμη. Επιπροσθέτως μέσω των αντιγράφων ασφαλείας για τις διάφορες μονάδες υποδομής του δικτύου, ελαχιστοποιείται η απώλεια δεδομένων.
- **Μικρότερα Έξοδα λειτουργίας (Operating expenses – OpEx):** απλοποιεί την ανάπτυξη και τη διαχείριση των υπηρεσιών δικτύου.
- **Μικρότερες Κεφαλαιουχικές δαπάνες (Capital Expenditures - CapEx):** αυτό συνεπάγεται την εξάλειψη της υπερπαροχής υλικού και αντ' αυτού μετατοπίζει αυτή τη λειτουργία σε μοντέλα “ πληρώνεις όσο μεγαλώνεις ” (pay-as-you-grow).

- Γρήγορη αλλαγή των επιχειρηματικών απαιτήσεων: αυτό συμβαίνει επειδή το NFV μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη υπηρεσιών δικτύωσης, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση της επένδυσης [52].

Επίσης, εκτός από την σημαντική εξοικονόμηση επενδύσεων κεφαλαίου που δημιουργεί η τεχνολογία NFV, μπορεί να αποτελέσει και παράγοντα εσόδων. Το NFV βοηθά στην διαδικασία συλλογής δεδομένων και στην ανάλυσης.

### **Μειονεκτήματα**

Το NFV λειτουργεί εξαρτώμενο από το SDN και αυτό οδηγεί σε κάποιους περιορισμούς. Όπως και το SDN, το NFV θα πρέπει να αναπτυχθεί ώστε να γίνει απολύτως αξιόπιστο. Ωστόσο, με τις εξελίξεις που λαμβάνουν χώρα φαίνεται ότι θα υπάρξει βελτίωση συνολικά. Κάποιες από τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τεχνολογία NFV περιλαμβάνουν:

- Πρέπει να συνυπάρχει σε ένα υβριδικό περιβάλλον με φυσικές συσκευές που είναι ενσωματωμένες στο νέφος (Cloud).
- Το NFV απαιτεί αφηρημένη διαχείριση των δεδομένων σε αντίθεση με τα συμβατικά περιβάλλοντα πληροφορικής.
- Το NFV απαιτεί επίσης μια αναπροσαρμογή της διαδικασίας έτσι ώστε η διαχείριση παραδοσιακής και εικονικής υποδομής να μπορεί να γίνει ταυτόχρονα [53].

### **3.4 Εικονικοποίηση LTE EPC**

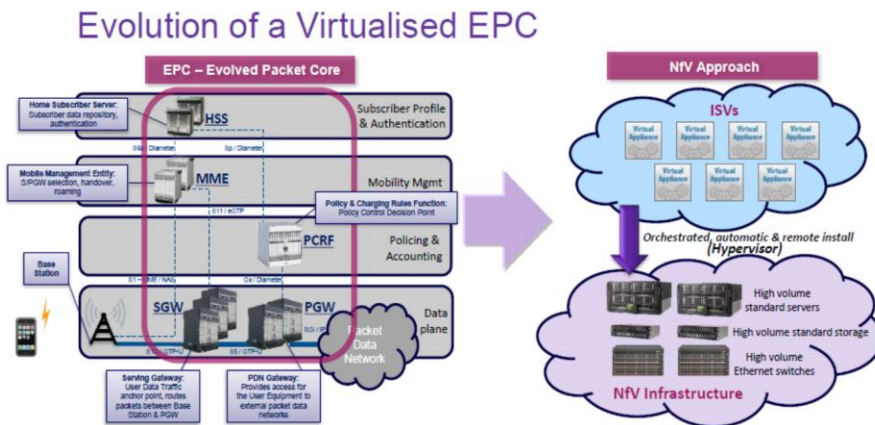
Το EPC αποτελεί μια σημαντική περίπτωση εικονικοποίησης για τα LTE δίκτυα, αφού μπορούν να διασπαστούν σε πολλαπλά VNF, χωρίς ωστόσο να δημιουργούνται αντισταθμίσεις στις παροχές του τελικού επιπέδου χρηστών. Το NFV δίνει βέλτιστες λύσεις όσον αφορά θέματα δικτύου που αντιμετωπίζουν οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας. Έχουν την δυνατότητα να αντικαταστήσουν τυπικές δομές EPC δίχως να παρατηρείται διαφορά

στην τελική υπηρεσία. Επίσης δίνουν δυνατότητες ταχείας επεκτασιμότητας του δικτύου. Για την ανάπτυξη βασικού δικτύου NFV επίσης περιλαμβάνονται πρόσθετοι οδηγοί όπως οδηγοί κοινής χρήσης δικτύου και RAN, αναπτύξεις Χειριστών Εικονικών Δικτύων κινητής τηλεφωνίας MVNO (Mobile Virtual Network Operators - MVNO), ευέλικτη επέκταση κόμβων IP.

Στην περίπτωση του EPC τα στοιχεία που μπορούν να εικονικοποιηθούν είναι:

- Mobility Management Entity (MME)
- Serving Gateway (S-GW)
- Packet Data Network Gateway (P-GW)
- Authentication, Authorization and Accounting (AAA)
- Home Subscriber System (HSS)

Η Πύλη Εξυπηρέτησης (Serving Gateway - S-GW) και η Πύλη Δικτύου Πακέτων δεδομένων (Packet Data Network Gateway- P-GW) έχουν την δυνατότητα της ξεχωριστής εικονικοποίησης λόγω της μεγάλης συμφόρησης που μπορεί να υπάρξει στο επίπεδο χρήστη.



Εικόνα 14 Από το παραδοσιακό EPC στο εικονικοποιημένο EPC

### 3.4.1 Η περίπτωση του vEPC και σχεδιασμός

Σημαντική ερευνητική δραστηριότητα συναντάται στη δικτύωση νέφους για κινητά (mobile cloud networking) η οποία σχετίζεται με την εικονικοποίηση του EPC. Για την

περίπτωση έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα. Δύο πιο σημαντικές προσεγγίσεις είναι οι παρακάτω:

- Πλήρης εικονικοποίηση: το σύνολο των λειτουργιών επιπέδου χρήστη και ελέγχου αναπτύσσονται σε ιδεατές μηχανές (VM).
- Μερική εικονικοποίηση: στην περίπτωση αυτή μόνο το επίπεδο ελέγχου αναπτύσσεται σε VM.

### 3.5 NFV για τεμαχισμό δικτύου (Network Slicing)

Η τεχνολογία 5G δίνει την δυνατότητα παροχής τμημάτων δικτύου για απαιτήσεις συνδεσιμότητας σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης. Ο αριθμός συσκευών που θα μπορούν να υποστηριχθούν, η αξιοπιστία, η καθυστέρηση και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται είναι κάποιες από αυτές τις απαιτήσεις. Το network slicing παρέχει την επιλογή τμημάτων δικτύου σύμφωνα με αυτές τις απαιτήσεις του κάθε πελάτη. Μπορούν να υπάρξουν πολλοί τύποι slice με διαφοροποιήσεις μεταξύ αυτών λόγω του Slice/Service Type (SST). Διαφορετικοί πελάτες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε τυποποιημένους τύπους slices ή να διαμορφώσουν τους δικούς τους.

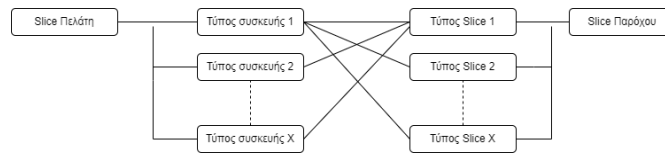
Το network slicing μπορεί να λειτουργήσει μεταξύ VNF άλλων τμημάτων και να δημιουργήσει επίπεδα απομόνωσης. Δείγμα αυτής της λειτουργίας είναι δύο περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια φυσική υποδομή χωρίς απομόνωση με όλα τα VNF κοινά. Από την άλλη μπορούν να λειτουργήσουν με πλήρη απομόνωση όπου όλα τα VNF λειτουργούν ανά τμήμα. Επίσης, τα τμήματα δικτύου υλοποιούνται από VNFs που μπορούν να βρίσκονται σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες όπως τα UP VNF που αναπτύσσονται τοπικά και τα CP VNF που αναπτύσσονται στο κεντρικό νέφος (cloud) ενός χειριστή.

Σε ένα πλαίσιο NFV, η δημιουργία ενός τμήματος δικτύου συνήθως περιλαμβάνει τη συμπλήρωση ενός προτύπου ανάπτυξης της υπηρεσίας δικτύου και το αίτημα από τον ενорχηστρωτή NFV να δημιουργήσει μια υπηρεσία δικτύου σύμφωνα με τα περιεχόμενα

αυτού του προτύπου. Η δημιουργία εικονικών πόρων για την υποστήριξη του slice βασίζεται σε τυπικές έννοιες και διαδικασίες NFV.

Η απαιτούμενη κατανομή τμημάτων μεταξύ πελατών και παρόχων μπορεί να κοστολογηθεί ώστε να παρατηρηθεί η επίπτωση του NFV σε αυτόν τον τομέα. Το μοντέλο κόστους μπορεί να οριστεί με βάση την κατανομή των τμημάτων που απαιτείται μεταξύ του πελάτη και του παρόχου. Τα VNF θα εφαρμοστούν σε μια υποδομή εικονικοποίησης και θα λειτουργούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τον αριθμό συσκευών ανά τύπο τμήματος.

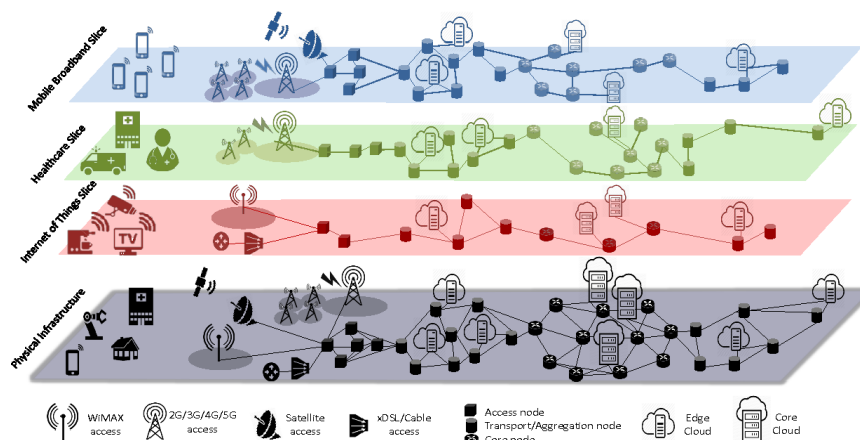
Θεωρείται ότι οι τύποι των συσκευών ενός πελάτη είναι διαφορετικοί. Η κατανομή των τμημάτων μεταξύ πελάτη και παρόχου πρέπει να τροποποιείται ανάλογα με τις απαιτήσεις και αυτό γίνεται μέσω μιας πλατφόρμας ενορχήστρωσης τμημάτων. Ο πάροχος δίνει τον απαιτούμενο τύπο τμήματος σε κάθε πελάτη. Τα VM τα οποία εικονικοποιούν τις λειτουργίες μπορούν να είναι διαφορετικών μεγεθών και αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των πυρήνων τους.



Εικόνα 15 Σύνδεση συσκευών και slice

Η εκτίμηση για τις συσκευές δημιουργείται από τις τάσεις της αγοράς, με το μέγεθος ενός τμήματος να ορίζεται ως ο αριθμός των συσκευών που θα υποστηρίξει ετησίως. Το είδος των τμημάτων σχεδιάζεται από τον πάροχο ανάλογα με τις εικονικές απαιτήσεις και έτσι προκύπτει ο υπολογισμός των συνολικών απαιτήσεων πόρων. Με αυτές τις απαιτήσεις πόρων γίνεται μετά ο καθορισμός των VM, βρίσκοντας τον αριθμό που απαιτείται για κάθε τύπο τμήματος. Αφού έχει οριστεί η απαιτούμενη εκτίμηση μπορούν να υπολογιστεί και το υπόλοιπο υποστηρικτικό υλικό όπως καλώδια, διακόπτες και λοιπά. Έτσι, οι απαιτήσεις των εικονικών μηχανών μπορεί να προβλεφθούν ανά συσκευή και σε κάθε VNF και να κλιμακωθούν για κάθε επόμενο έτος. Ο αριθμός των VM μπορεί να υπολογιστεί:

$$\text{Αριθμός VM ανά VNF} = \text{Ανώτατο όριο} \left( \frac{\text{Συνολική απαίτηση πόρων ανά VNF}}{\text{Χωρητικότητα VM}} \right)$$



Εικόνα 16 NFV for network slicing [54]

## 4. Οικονομικό πλαίσιο NFV

### 4.1 Βασικές οικονομικές Έννοιες

Παρακάτω πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά σε οικονομικές έννοιες των δικτύων. Στα επιχειρηματικά μοντέλα των δικτύων, παρατηρούνται διαφορετικά σενάρια υλοποίησης όπως για παράδειγμα τα δίκτυα να βρίσκονται κάτω από πλήρη κρατικό έλεγχο που προκύπτει από κοινοπραξία μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, να πραγματοποιούνται συνεργασίες μεταξύ ιδιωτικών οργανισμών χωρίς την επίβλεψη από το κράτος ή να ανήκουν σε ένα δημόσιο τηλεπικοινωνιακό οργανισμό. Τα λειτουργικά έξοδα και τα έξοδα δημιουργίας ενός ευρυζωνικού ασύρματου δικτύου μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικά οικονομικά μεγέθη το κεφαλαιακό κόστος (Capital Expenditure- CapEx) και το λειτουργικό κόστος (Operational Expenditure- OpEx).

Το CapEx αφορά αγορές σημαντικών αγαθών ή υπηρεσιών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του ευρυζωνικού δικτύου και για την βελτίωση της απόδοσης στο μέλλον. Το κεφαλαιακό κόστος συχνά αποτελείται από τις δαπάνες για αγορά παθητικού εξοπλισμού όπως για παράδειγμα οπτικές ίνες και κατανεμητές, ενεργού εξοπλισμού όπως δρομολογητές και δαπάνες για την πραγματοποίηση των εργασιών που είναι αναγκαίες για την εγκατάσταση του δικτύου. Παρατηρείται λοιπόν ότι το κεφαλαιακό κόστος έχει να κάνει περισσότερο με τη υποδομή του δικτύου και ένα από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά

των κεφαλαιουχικών δαπανών είναι η μακροζωία που σημαίνει ότι τα έξοδα ωφελούν τις εταιρείες για περισσότερο από ένα έτος. Παρακάτω αναλύεται το πώς η ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών στο δίκτυο όπως αυτές που αναφέρονται παραπάνω θα μειώσουν το κεφαλαιακό κόστος.

Το OpEx αντιπροσωπεύει το κόστος που επιβαρύνει τους παρόχους για τη λειτουργία και τη διαχείριση του δικτύου. Το OpEx αποτελεί μια αρκετά ευρεία έννοια, πρέπει να είναι συνήθεις για τον κλάδο στον οποίο δραστηριοποιείται η εταιρεία ενώ την ίδια στιγμή δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση για το ποια έξοδα ανήκουν στο OpEx. Παραδείγματα λειτουργικών εξόδων είναι τα λογιστικά και νομικά έξοδα, οι τόκοι που καταβάλλονται για χρέη, οι μισθοί και οι φόροι. Το OpEx αποτελείται επίσης από έξοδα έρευνας και ανάπτυξης. Ο στόχος κάθε εταιρείας είναι να μεγιστοποιεί την παραγωγή σε σχέση με το OpEx. Με αυτό τον τρόπο αντιπροσωπεύεται μια βασική μέτρηση της αποδοτικότητας μιας εταιρείας με την πάροδο του χρόνου [55] [56].

## 4.2 Τεχνοοικονομικό πλαίσιο - Σχετικές έρευνες

Η τεχνοοικονομική ανάλυση συνήθως χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της οικονομικής σκοπιμότητας μιας τεχνικής λύσης χρησιμοποιώντας μεθόδους πρόβλεψης, σχεδιασμού δικτύου και ανάλυσης δεδομένων. Μπορεί να επικεντρωθεί στη μοντελοποίηση κόστους αλλά μπορεί επίσης να επεκταθεί για να συμπεριλάβει οικονομικά αποτελέσματα. Οι ευρυζωνικές υπηρεσίες έχουν ανοίξει νέους ορίζοντες για την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών και τους παρόχους. Το μοντέλο που θα αναπτυχθεί έχει ως σκοπό να τεκμηριώσει και με αριθμητικά δεδομένα το κατά πόσο ένα NFV μοντέλο μπορεί να είναι ανταγωνιστικό. Στη συνέχεια αναφέρονται σχετικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί και αφορούν τεχνολογίες πέμπτης γενιάς και παρουσιάζουν το οικονομικό αντίκτυπό τους.

Οι συγγραφείς της εργασίας [57] παρουσιάζουν μια τεχνοοικονομική ανάλυση για την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G. Οι συγγραφείς της εργασίας [58] διεξάγουν μια τεχνοοικονομική ανάλυση, προτείνουν ένα τεχνο-οικονομικό μοντέλο για την τεχνολογία MIMO συγκρίνοντας το με την τεχνολογία Συστημάτων Κατανεμημένων Κεραιών (DAS). Στην εργασία [59], παρουσιάζεται ένα τεχνοοικονομικό



πλαίσιο για την τεχνολογία Cognitive Radio (CR) με μοντέλο ανεπτυγμένο για δίκτυα καθορισμένα από λογισμικό SDN.

Ο στόχος αυτής της μελέτης, ωστόσο, είναι να ποσοτικοποιήσει τις αλλαγές στο CapEx και στο OpEx που προκύπτουν από την εφαρμογή των αρχών NFV στο μοντέλο λειτουργίας ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας αντιμετωπίζοντας τα προβλήματα που υπήρχαν επαναδιαμορφώνοντας το δίκτυο. Επομένως, εφαρμόζεται μοντελοποίηση κόστους. Αυτός ο τύπος μοντελοποίησης χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό πιθανής εξοικονόμησης κόστους. Ως εκ τούτου, ένα μοντέλο κόστους θα πρέπει να έχει μια λεπτομερή ταξινόμηση του είδους των δαπανών που θεωρούνται ως δαπάνες CapEx και OpEx και μια εξήγηση του τρόπου ποσοτικοποίησης τους κάθε είδους δαπάνης. Έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες που αφορούν δυνατότητες NFV/SDN. Θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της συγκριτικής προσέγγισης δύο μοντέλων στα οποία γίνεται εφαρμογή τεχνολογίας NFV και μη, παρουσιάζοντας οικονομικά δεδομένα.

Το Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership - TCO) αποτελεί μια οικονομική εκτίμηση η οποία δίνει την δυνατότητα στους οργανισμούς να προσδιορίσουν το άμεσο και έμμεσο κόστος μιας υπηρεσίας ή ενός προϊόντος. Αποτελεί μία έννοια που έχει η λογιστική διαχείριση και χρησιμοποιείται για πλήρη λογιστική κοστολόγηση. Δηλαδή, είναι το κόστος αγοράς συν το κόστος λειτουργίας του κατά τη διάρκεια της ωφέλιμης ζωής του. Η ιδέα είναι να ληφθεί υπόψη το συνολικό κόστος που θα επιβαρύνει μια επιχείρηση για τη λειτουργία ενός περιουσιακού στοιχείου και όχι μόνο το αρχικό κόστος απόκτησής του. Η ανάπτυξη τεχνολογίας μπορεί να περιλαμβάνει τα ακόλουθα ως μέρος του TCO:

- Υλικό και προγράμματα υπολογιστών.
- Υλικό και λογισμικό δικτύου.
- Υλικό και λογισμικό διακομιστή.
- Υλικό και λογισμικό σταθμών εργασίας.
- Εγκατάσταση και ενσωμάτωση υλικού και λογισμικού.

Λειτουργικά έξοδα αναφέρονται στην υποδομή, την ηλεκτρική ενέργεια, το κόστος των δοκιμών. Ενώ τα μακροπρόθεσμα έξοδα έχουν να κάνουν με την αντικατάσταση, μελλοντικές δαπάνες αναβάθμισης ή επεκτασιμότητας και άλλα.

Στην περίπτωση σύγκρισης TCO των υπαρχόντων με τις προτεινόμενες λύσεις, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος που απαιτείται για τη διατήρηση της υπάρχουσας λύσης που μπορεί να μην απαιτείται απαραίτητα για μια προτεινόμενη λύση.

### 4.3 NFV-Οικονομική προσέγγιση

Η χρήση των τεχνολογιών NFV/SDN μέσω της δυνατότητας της εικονικοποίησης των λειτουργιών δικτύου που παρέχει μπορεί να μειώσει το κόστος και να επιταχύνει την ανάπτυξη των υπηρεσιών για τους χειριστές δικτύου και να αποσυνδέσει λειτουργίες όπως το τείχος προστασίας και τη κρυπτογράφηση και να τις μεταφέρει σε εικονικούς διακομιστές. Αντί να εγκαταστήσουν ακριβό ιδιόκτητο υλικό, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να αγοράσουν φθηνούς πόρους όπως αποθηκευτικό χώρο και διακομιστές για την εκτέλεση εικονικών μηχανών που εκτελούν λειτουργίες δικτύου. Αυτό συμπύσσει πολλές λειτουργίες σε έναν ενιαίο φυσικό διακομιστή, μειώνοντας το κόστος και ελαχιστοποιώντας τα φυσικά εξαρτήματα. Όταν κάποιος πελάτης θελήσει να προσθέσει κάποια νέα λειτουργία δικτύου, ο πάροχος που του παρέχει τις υπηρεσίες μπορεί χρησιμοποιώντας απλά μία εικονική μηχανή να εκτελέσει την λειτουργία που αυτός επιθυμεί. Μία τέτοια εικονικοποίηση των λειτουργιών δικτύου μπορεί να ελαχιστοποιήσει την εξάρτηση από συσκευές υλικού αποκλειστικού σκοπού και να δώσει βελτιωμένη επεκτασιμότητα και προσαρμογή σε όλο το δίκτυο.

Το βασικό πλεονέκτημα των αρχιτεκτονικών VNF και SDN είναι ότι μπορούν να ενσωματωθούν διακομιστές γενικής χρήσης που βασίζονται σε δίκτυα για χειρισμό και υπολογισμό μεγάλων δεδομένων. Αυτό είναι ένα μεγάλο βήμα για τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών καθώς θα μεταμορφώσει ολόκληρη την αρχιτεκτονική του κυψελοειδούς δικτύου. Σημαντική θα είναι η μείωση τόσο στις επενδύσεις κεφαλαίου όσο και στην κατανάλωση ενέργειας με την χρήση κέντρων δεδομένων που βασίζονται σε νέφος (cloud). Ωστόσο, οι δοκιμές της απόδοσης ενός τέτοιου δικτύου συνεχίζουν να πραγματοποιούνται

και στο μέλλον θα μπορέσει να αξιολογηθούν πλήρως τέτοια συστήματα δικτύων. Το σύνολο των παρόχων θα έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί εικονικά NFV και SDN βασισμένα σε αρχιτεκτονική νέφους (cloud).

Για τη μείωση κόστους σύμφωνα με την αρχιτεκτονική SDN/NFV, οι δρομολογητές της εικονικής μηχανής (VM) που χειρίζονται τον ίδιο αριθμό συνεδριών με αυτό των δρομολογητών του 5G, αναμένεται να έχουν χαμηλότερο κόστος. Όταν όμως ένα VM μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερο πλήθος συνεδριών τότε ενδέχεται να υπάρξει ακόμη μεγαλύτερη μείωση κόστους. Υποστηρίζεται από τους ειδικούς του κλάδου ότι τα VM θα είναι πιο ισχυρά και λιγότερο δαπανηρά από τους δρομολογητές 5G.

Κατά συνέπεια, η σύγκριση κόστους και κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ δύο διαφορετικών τεχνολογιών είναι αναμφίβολα πολύπλοκη εργασία κατά την οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές πτυχές που αφορούν στο υλικό.

## 5. Τεχνοοικονομική μελέτη εργασίας

### 5.1 Ανάλυση οφέλους 5G δικτύων

Η συγκεκριμένη μελέτη έχει ως στόχο τον ορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων ώστε να αναλυθεί το κόστος της δημιουργίας ενός 5G δικτύου τόσο με την εφαρμογή του NFV όσο και χωρίς αυτή. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης εστιάζουμε στην Ελλάδα με στοιχεία που δίνονται από τις εταιρείες στο διαδίκτυο.

Σημαντικό για να υλοποιηθεί η ανάλυση είναι ο αριθμός των συνδρομητών. Όταν αναφερόμαστε στον αριθμό των συνδρομητών κάθε εταιρείας αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε συσκευή με αριθμό επικοινωνίας έχει κάθε άτομο στην κατοχή του. Δηλαδή, ο τελικός αριθμός είναι οι συσκευές με κάρτα SIM που δραστηριοποιούνται στο δίκτυο ενός παρόχου. Κάθε τέτοια SIM λαμβάνεται μέσω της καταβολής ενός αντιτίμου προς τον πάροχο. Για να μπορέσει ένας πάροχος να δημιουργήσει υπηρεσία απαιτείται ένα δίκτυο που περιλαμβάνει συσκευές, όπως δρομολογητές, κεραιές, καλώδια, αλλά και προσωπικό και άλλα.

Σκοπός είναι να μπορεί να γίνει ένας αρχικός υπολογισμός κόστους ενός παρόχου. Επίσης να υπολογιστεί το πιθανό κέρδος που μπορεί να έχει ο πάροχος με την εισαγωγή νέων τεχνολογιών όπως NFV. Η απόδοση επένδυσης υπολογίζεται από την Απόδοση των Επενδύσεων (Return On Investment - ROI). Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι βασικός στην επιστήμη της οικονομίας καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογηθεί μια επένδυση και να συγκριθούν τα κέρδη.

$$\text{Απόδοση επένδυσης} = \frac{(\text{Κέρδος επένδυσης} - \text{Κόστος επένδυσης})}{\text{Κόστος επένδυσης}}$$

Στόχος των παρόχων επικοινωνιών είναι να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους. Ο ανταγωνισμός όμως στον συγκεκριμένο τομέα είναι αρκετά υψηλός. Οπότε στόχος είναι η παροχή ανταγωνιστικών τιμών όμως με σημαντικό κέρδος.

Η ποιότητα και οι ταχύτητες των υπηρεσιών είναι σημαντικός παράγοντας για την επιλογή των συνδρομητών. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών μπορεί να δώσει πλεονεκτήματα. Στην περίπτωση μας αναφερόμαστε στη Ελλάδα η οποία έχει έκταση 131.9 km<sup>2</sup>, πληθυσμό 11 εκατομμύρια με το 67% του πληθυσμού να ζει σε αστικές περιοχές και το 33% σε αγροτικές [60].

Σύμφωνα με την ελληνική στατιστική υπηρεσία, αντιστοιχούν 129 συσκευές κινητά κινητών τηλεφώνων ανά 100 καταναλωτές. Επίσης σύμφωνα με την ΕΕΤΤ, ο αριθμός των κινητών συσκευών θα φτάσει τα 16 εκατομμύρια το 2022 [61]. Για την ανάλυση του οφέλους και την πρόβλεψη κόστους απαραίτητα στοιχεία είναι:

- Ο αριθμός των συνδρομητών τα επόμενα χρόνια
- Η ανάλυση βέλτιστης τιμολόγησης
- Η ανάλυση CapEx και OpEx του δικτύου

Η εκτίμηση των συνδρομητών είναι πολύ σημαντική για την ανάλυση της επένδυσης. Μπορούν να ληφθούν υπόψη στοιχεία της ΕΕΤΤ [61]. Επίσης για την προτίμηση παρόχων από τους καταναλωτές σημαντική είναι η ανάλυση της τιμής και του ανταγωνισμού. Από την άλλη, βασικά στοιχεία είναι οι εκτιμήσεις CapEx και OpEx. Είναι δύο βασικές

κατηγορίες που χρησιμοποιούνται από τις εταιρείες ώστε να απλοποιηθούν οι δαπάνες. Οι δαπάνες που καλούνται να πληρώσουν ποικίλουν.

## Αντιμετώπιση περιπτώσεων χρήσης 5G

Η εξέλιξη στα δίκτυα 5G είναι αποτέλεσμα της συνεχόμενης βελτίωσης των τεχνολογιών τηλεπικοινωνιών σε συνεργασία με 3GPP. Με την είσοδο κάθε νέας έκδοσης έρχονται καινούργιες και σημαντικά βελτιωμένες δυνατότητες, όπως η υποστήριξη περισσότερου φάσματος, εισαγωγή πρόσθετων συχνοτήτων, όπως επίσης και βελτιώσεις στην απόδοση. Αποτέλεσμα αυτής της εξέλιξης είναι η αύξηση της απαίτησης για επεξεργασία των λειτουργιών δικτύου. Η τεχνολογία ραδιοπρόσβασης του σήμερα δίνει δυνατότητες όπως η εκτέλεση των εργασιών του RAN σε υπολογιστική αρχιτεκτονική γενικής χρήσης βασισμένη σε επεξεργαστές x86, δεδομένου όμως ότι οι πλήρης δυνατότητες του 5G χρειάζονται περισσότερη ισχύ.

### 5.2 Μοντέλο τιμολόγησης

Βασικός συντελεστής για την ανταγωνιστικότητα ενός παρόχου κινητών υπηρεσιών είναι οι τιμές κόστους των υπηρεσιών του που παρέχει. Ερώτημα αποτελεί αν το 5G θα μπορέσει να αυξήσει τα κέρδη των εταιρειών. Η παροχή υπηρεσιών και δεδομένων των δικτύων 5G πρόκειται να αντιμετωπίσει δυσκολίες που αφορούν την τιμολόγηση.

Το 5G κάνει εφικτές νέες υπηρεσίες που απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων. Τα δίκτυα 4G αντιμετώπιζαν δυσκολίες με τέτοιου είδους εφαρμογές και το 5G αναμένεται να λύσει αυτό το πρόβλημα. Ο όγκος δεδομένων που θα μεταδίδεται αναμένεται να είναι μεγαλύτερου μεγέθους. Τα μοντέλα τα οποία λαμβάνονται από το 89% των παρόχων μέχρι τώρα χρησιμοποιούν πακέτα δεδομένων συνδυάζοντας ανώτατα όρια τιμολόγησης. Τέτοια πακέτα είναι του 1 έως 10 GB ανά μήνα και ευνοούν κινητά δίκτυα όπως αυτά του 4G. Σε πιο σύγχρονα δίκτυα αυτά τα πακέτα δεν ικανοποιούν καθώς θα απαιτείται από τον χρήστη να κάνει χρήση περισσότερων δεδομένων.

Για να έχουν όφελος οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας από την εφαρμογή νέων τεχνολογιών και την εξέλιξη της αγοράς κινητής τηλεφωνίας θα γίνει αναφορά σε μελέτη που διεξήγαγε η Ericsson σε καινοτόμα μοντέλα κοστολόγησης, σύμφωνα με την οποία οι καταναλωτές θα έδιναν περισσότερα χρήματα ώστε να τους παρέχονται βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες. Η τιμή από την άλλη αποτελεί το πιο σημαντικό ζήτημα για την αύξηση της κερδοφορίας πράγμα που μπορεί να οδηγήσει τους παρόχους στο μοντέλο τιμολόγησης με βάση την αξία (value-based pricing). Επίσης, τα κέρδη θα μπορούσαν να αυξηθούν με χρήση τεχνικών διαχείρισης αξίας πελατών ώστε να υπολογιστεί η αξία της αγοράς και να φτάσει στην μέγιστη απόδοση.

### 5.3 Εικονικοποίηση δικτύου πρόσβασης επικοινωνίας – Η περίπτωση του C-RAN

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην εικονικοποίηση του δικτύου ραδιοπρόσβασης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας η οποία αναπτύσσεται από την προσέγγιση του C-RAN. Θα αναλυθεί ο σκοπός ανάπτυξης του C-RAN και θα παρουσιαστούν βασικές τεχνικές ανάπτυξης, οικονομική ανάλυση CapEx, OpEx και τελικός υπολογισμός του TCO.

#### **Εικονικοποίηση στο Radio Access Network**

Με έρευνες στο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO) παρατηρήθηκε ότι οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας έρχονται αντιμέτωπες με προβλήματα στην επέκταση της υποδομής Δικτύου Πρόσβασης Ραδιοφώνου (Radio Access Network – RAN) και αυτό οφείλεται κατά μεγάλο ποσοστό στο ότι τα έσοδα δεν αυξάνονται με τον ίδιο τρόπο που αυξάνεται το κόστος που απαιτεί ο εξοπλισμός του RAN. Όμως είναι γνωστό ότι οι υποδομές RAN είναι αναγκαίο να επεκταθούν λόγω της όλο ένα και περισσότερης ζήτησης για νέες υπηρεσίες και μεγαλύτερης χωρητικότητας.

Μία επέκταση υποδομής RAN αφορά την αλλαγή των υπαρχόντων εγκαταστάσεων με νέο και σύγχρονο εξοπλισμό ή με την εγκατάσταση εξοπλισμού σε νέες τοποθεσίες. Η

κάλυψη μιας περιοχής γίνεται από ένα σταθμό βάσης (Base Station - BS) και η χωρητικότητα καθορίζεται από τις παρεμβολές. Όσον αφορά το CapEx, αυτό σχετίζεται με την υποδομή του δικτύου και την δημιουργία της, ενώ το OpEx σχετίζεται περισσότερο με την συνολική διαχείριση και λειτουργία του δικτύου. Οι δύο αυτές τιμές ανεβαίνουν συνεχώς με το υπάρχων μοντέλο RAN, αφού οι δαπάνες για εξοπλισμό, τοποθεσία, κατανάλωση ενέργειας και διαχείριση δεν είναι δυνατόν να μην πραγματοποιηθούν.

Για να υπάρξει εξοικονόμηση στο CapEx και το OpEx έχουν εφαρμοστεί και διαφορετικές αρχιτεκτονικές όπως το Ενιαίο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης (Single Radio Access Network – SRAN) που περιλαμβάνει την εγκατάσταση μιας μονάδας σταθμού βάσης που παρέχει τη λειτουργικότητα ενός νέου σταθμού βάσης LTE. Τα δίκτυα όμως τα οποία λειτουργούσαν ήδη σε μία τεχνολογία (LTE, UMTS, GSM), εξοπλίστηκαν προσθέτοντας μονάδες Baseband Unit (BBU) όπως επίσης και διαφορετικά συστήματα κεραιών. Με αρχιτεκτονικές όπως οι παραπάνω όμως το κόστος παραμένει υψηλό και παρατηρούνται δυσκολίες διαχείρισης και πολυπλοκότητα στον προγραμματισμό λόγω του διαφορετικού τύπου εξοπλισμού.

Επίσης, δεδομένου ότι οι τεχνολογίες RAN εξελίσσονται και κατευθύνονται προς τις τεχνολογίες 5G, προέκυψαν προκλήσεις που αφορούν την απόδοση, το εύρος ζώνης και την περιοχή κάλυψης, κάτι που σημαίνει ανάγκη για περισσότερα χρήματα για υλικό. Η ανάγκη για μία πιο βιώσιμη πολιτική έτοιμη να αντιμετωπίσει τις ανάγκες των επόμενων χρόνων οδήγησε τους παρόχους στην υιοθέτηση του CRAN, με την εικονικοποίηση του τμήματος ραδιοπρόσβασης προκειμένου να καλύψουν τις παραπάνω ανάγκες.

## **C-RAN**

Το C-RAN, που μερικές φορές αναφέρεται και ως Centralized-RAN, είναι μία προσέγγιση που αφορά μεταφορά της βασικής επεξεργασίας του δικτύου από τους σταθμούς βάσης σε κεντρικές μονάδες. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει να γίνεται η επεξεργασία σε ένα κέντρο δεδομένων, μειώνοντας το κόστος του πλεονάζοντα εξοπλισμού δικτύου. Για πρώτη φορά έκανε την εμφάνισή της το 2010 στην Κίνα. Είναι μία αρχιτεκτονική για δι-

κτυα κινητής τηλεφωνίας βασισμένη σε υπολογιστική νέφους (cloud computing) υποστηρίζοντας σχεδόν όλες τις γενιές δικτύων. Το C-RAN μπορεί να δώσει λύσεις στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας όπως:

- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Απλοποίηση διαχείρισης ολόκληρου του δικτύου και ευελιξία
- Κοινόχρηστο υλικό μεταξύ παρόχων υπηρεσιών
- Υποστήριξη πολλαπλών προτύπων
- Εξοικονόμηση CapEx και OpEx
- Χειρισμός παρεμβολών και εξισορρόπηση φορτίου
- Παροχή πλατφόρμας για την υποστήριξη νέων υπηρεσιών
- Φασματική απόδοση και βελτίωση χωρητικότητας

Η αρχιτεκτονική C-RAN επιτρέπει στους χειριστές να συνεκτελούν λειτουργίες RAN μαζί με άλλες λειτουργίες δικτύου σε περιβάλλον κέντρου δεδομένων, δίνοντας την δυνατότητα να παρέχουν ταχύτερα νέες υπηρεσίες μέσω του ευρυζωνικού δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

Έχει την δυνατότητα να μεταφέρει την επεξεργασία κάποιων σταθμών βάσης σε κεντρικές μονάδες, ενώ μπορεί να μειώσει το κόστος εξοπλισμού και διαχείρισης φέρνοντας τον χειρισμό των Απομακρυσμένων Κεντρικών Μονάδων ραδιοφώνου (Remote Radio units) σε ένα μόνο σημείο. Παρέχεται συνολικά υψηλότερη απόδοση φάσματος και οι δυνατότητες υπολογιστικής νέφους (cloud computing) με βάση την εικονικοποίηση ενεργοποιούν χαρακτηριστικά διαχείρισης για κατανομή πόρων και κατανάλωση ενέργειας.

- **Base Station Pool** – Είναι μία κεντρική δεξαμενή υπολογιστικών πόρων για την παροχή της λειτουργικότητας, επεξεργασίας και συντονισμού σήματος που απαιτείται από όλες τις μονάδες εντός της περιοχής.
- **Optical Fronthaul** - Συνδέσεις οπτικών ινών που μεταφέρουν δεδομένα μετάδοση στο RAN.
- **Remote Radio Heads** - Τα RRH είναι μονάδες κεραιών στις οποίες συνδέεται ο εξοπλισμός χρήστη μέσω του RAN. Ο σχεδιασμός των μονάδων σημαίνει ότι μπορούν να



βρίσκονται σχεδόν οπουδήποτε. Τα RRH χρειάζονται μόνο χώρο για την κεραία και πρόσβαση σε κάποια μορφή fronthaul.

### 5.3.1 Βασικά οφέλη C-RAN

Το C-RAN παρουσιάζει αρκετές σημαντικές προκλήσεις, καθώς οι απαιτήσεις χρο-νισμού και επεξεργασίας είναι υψηλές για κάποιες λειτουργίες στα πιο χαμηλά τμήματα του RAN. Η κρισιμότητα αυτών των λειτουργιών δεν μπορεί να παραλειφθεί καθώς πτυ-χές της κάλυψης RAN και της χωρητικότητας καθορίζονται από αυτές. Τα οφέλη όμως που θα αποφέρει η εικονικοποίηση είναι αρκετά σημαντικά [62]. Αυτά θα μπορούσαν να συ-νοψιστούν ως εξής:

1. Εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση εξοπλισμού. Με την είσοδο του C-RAN παρατηρείται μείωση στις ανάγκες ενέργειας ενός σταθμού βάσης και επίσης μειώνονται το κόστος που δαπανάται για τον φυσικό εξοπλισμό του σταθμού.
2. Αύξηση κάλυψης και διαχείριση παρεμβολών. Η παροχή περισσότερων Μονάδων Ανάγνωσης Απομακρυσμένου ραδιοφώνου (Remote Radio Heads – RRH) είναι εφικτή, όπως επίσης και οι παρεμβολές μεταξύ διαφο-ρετικών κυψελών μπορούν να αντιμετωπιστούν με κεντρικό τρόπο.
3. Αποτελεσματικός χειρισμός του ελέγχου χωρητικότητας. Το σήμα έχει την μπορεί να μοιράζεται μεταξύ διαφορετικών τοποθεσιών, η βελτιστοποίηση μπορεί να ελεγχθεί κεντρικά, ενώ ο προγραμματισμός και ο χειρισμός των πόρων για UMTS και LTE μπορούν να αναπτυχθούν αποτελεσματικά από τα στοιχεία καναλιού και τα μπλοκ φυσικών πόρων. Επίσης, οι προμηθευ-τές RAN έχουν δημιουργήσει μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών RAN που μπορούν να κάνουν χρήση για κάθε περίπτωση από έναν κόμβο.
4. Εξοικονόμηση CapEx και OpEx. Αρχιτεκτονικές όπως το C-RAN κάνουν εξοικονόμηση πόρων κυρίως λόγω του ότι δεν χρειάζονται επιπλέον αίθου-σες εξοπλισμού Σταθμού Πομποδέκτη Βάσης (Base transceiver Station -

BTS), δεν απαιτείται άδεια για χρήση τοποθεσίας, έχουν πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, απαιτούν λιγότερες αναβαθμίσεις και ο σχεδιασμός χωρητικότητας και κάλυψης μπορεί να γίνει με πιο αποτελεσματικό τρόπο [63].

### 5.3.2 Τεχνικές προκλήσεις του C-RAN

Το C-RAN προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε ότι αφορά το κόστος, την χωρητικότητα και την ευελιξία σε σύγκριση με το RAN, έχει όμως μερικά τεχνικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν ώστε η ανάπτυξή του να είναι πλήρως εφικτή.

#### **Διασύνδεση Baseband Pool**

Ένα δίκτυο υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης είναι απαραίτητο ώστε να διασυνδέει τα BBU στο κεντρικό pool προκειμένου να υπάρξει επίτευξη αξιοπιστίας στην περίπτωση που υπάρξει αστοχία σε κάποια μονάδα και να επιλυθεί το ζήτημα επιτρέποντας την κατανομή των πόρων του BBU. Με αυτόν τον τρόπο κανένα σφάλμα σε BBU δεν θα επηρεάσει την σωστή λειτουργία του συστήματος.

#### **Τεχνολογία Virtualization BaseStation**

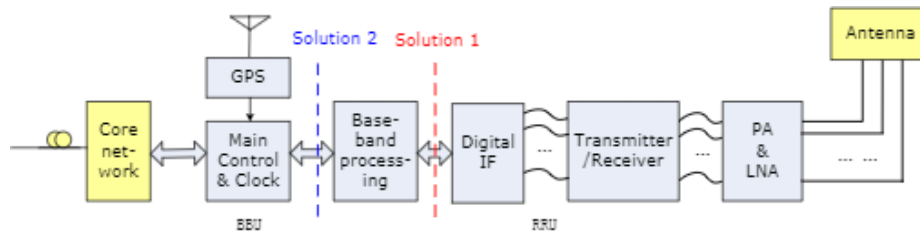
Κρίνονται απαραίτητες [64] τεχνολογίες εικονικοποίησης για διανομή των μονάδων επεξεργασίας σε εικονικές μονάδες σταθμών λόγω της συγκέντρωσής τους σε μία κεντρική μονάδα. Αυτό δημιουργεί κάποιες προκλήσεις όπως την δημιουργία αλγορίθμου επεξεργασίας πραγματικού χρόνου, εικονικοποίηση του συστήματος επεξεργασίας βασικής ζώνης κ.ά.

## Radio over Low Cost Optical Network

Στο C-RAN η σύνδεση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας με το Remote Radio Head (RRH) απαιτεί μεταφορά μεγάλης ποσότητας δεδομένων δειγματοληψίας βασικής ζώνης σε πραγματικό χρόνο. Επειδή το σύστημα LTE και η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών χρειάζεται ευρεία ζώνη, το εύρος ζώνης της οπτικής ζεύξης μεταφοράς για τη μετάδοση δεδομένων δειγματοληψίας βασικής ζώνης πολλαπλών RRH είναι επιπέδου 10 gigabit με αυστηρές απαιτήσεις λανθάνοντος χρόνου μεταφοράς [65].

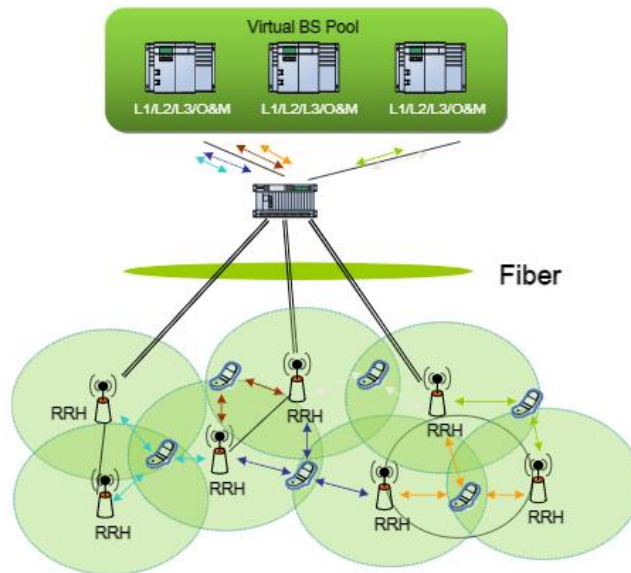
### 5.4 Αρχιτεκτονική C-RAN και Σενάρια Ανάπτυξης

Το C-RAN αποτελεί λύση για αρκετά ζητήματα που προκύπτουν και είναι η επόμενη γενιά στις τυπικές δομές BTS αφού όλο και περισσότερα τμήματα RAN τείνουν να εικονικοποιούνται. Οι αρχιτεκτονικές που κυριαρχούν βασίζονται στην κοινή χρήση των λειτουργιών της Μονάδας Βάσης ζώνης (Baseband unit – BBU) και των απομακρυσμένων κεραιών ραδιοφώνου (RRH).

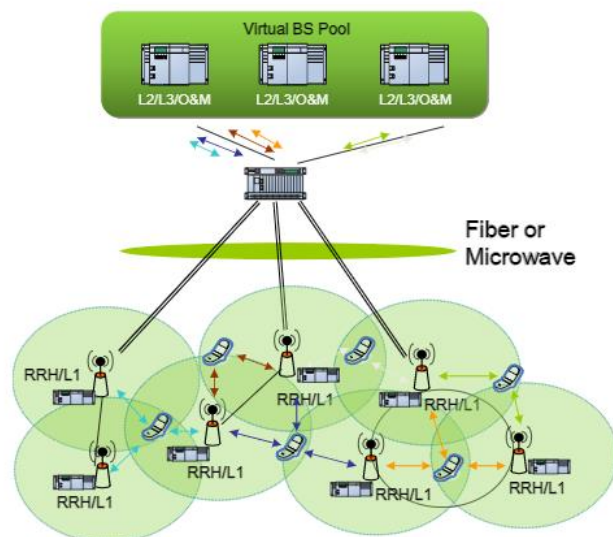


Εικόνα 17 Μέθοδος διαχωρισμού συναρτήσεων BTS [63]

Το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις δύο βασικές λύσεις του C-RAN. Η πρώτη προσέγγιση δίνει πλήρη συγκέντρωση καθώς η μονάδα βασικής ζώνης δίνει λειτουργίες όλων των επιπέδων ενώ στην δεύτερη περίπτωση το RRH παρέχει τις λειτουργίες του BBU που οδηγούν σε μερική συγκέντρωση. Αξίζει να αναφερθεί ωστόσο ότι στην δεύτερη περίπτωση το BBU συνεχίζει να παρέχει λειτουργίες όπως το σημείο διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο όπως επίσης τον κύριο έλεγχο και το ρολόι [63].



Εικόνα 18 C-RAN αρχιτεκτονική 1: Fully Centralized Solution [63]



Εικόνα 19 C-RAN Αρχιτεκτονική 2: Partial Centralized Solution [63]

Και οι δύο αρχιτεκτονικές δίνουν την δυνατότητα στους χειριστές να επεκτείνουν το δίκτυο προσθέτοντας απλώς περισσότερα RRU στο κεντρικό BBU ή διαμορφώνοντας εκ νέου συγκεκριμένες τοποθεσίες και κελιά με αυξημένες απαιτήσεις χωρητικότητας. Η ισχυρή σχέση μεταξύ BBU και RRU σταματάει να υφίσταται αφού ένα RRU μπορεί να ανήκει σε πολλά BBU και εισάγεται η λειτουργία ενός εικονικού BTS. Το γεγονός αυτό συσχετίζει το C-RAN με την εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου NFV [64].

Ένα ολοκληρωμένο κεντρικό C-RAN έχει την δυνατότητα να παρέχει καλύτερη χωρητικότητα και δυνατότητες αναβάθμισης με ευκολότερο χειρισμό πόρων μέσω ενός κεντρικού κόμβου Καθορισμένου από Λογισμικό (Software Defined Radio - SDR) που μπορεί να έχει σημαντικό ρόλο στο δίκτυο μέσω μιας μόνο Κεντρικής Μονάδας (Baseband Unit – BBU). Ωστόσο υπάρχει και το μειονέκτημα του απαιτούμενου υψηλού εύρους ζώνης.

Και η μερική συγκέντρωση όμως έχει το πλεονέκτημα του διαχωρισμού των λειτουργιών του δικτύου, ενώ με καλύτερο τρόπο μπορεί να αντιμετωπιστεί η κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των μονάδων βασικής ζώνης. Το βασικό μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι η απαίτηση ενός μικρού αριθμού μονάδων με φυσικό εξοπλισμό.

Και με τις δύο αυτές αρχιτεκτονικές C-RAN, οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας μπορούν να αναπτύξουν το δικό τους και να πραγματοποιήσουν αναβαθμίσεις στο δίκτυό τους πολύ γρήγορα. Αρκεί μόνο να εγκατασταθεί μια νέα Απομακρυσμένη Κεραία ραδιοφώνου (RRH) και να συνδεθεί στη Κεντρική Μονάδα (BBU pool) για να επεκταθεί η κάλυψη του δικτύου ή για να γίνει ο διαχωρισμός της κυψέλης και να βελτιωθεί η χωρητικότητα. Στην περίπτωση που το δίκτυο υπερφορτωθεί, αρκεί μόνο η αναβάθμιση του υλικού του BBU pool από τον πάροχο ώστε να παρέχει μεγαλύτερη ικανότητα επεξεργασίας. Επίσης, η πλήρης προσέγγιση παρέχει εύκολη ανάπτυξη και αναβάθμιση του RAN. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική, το RRH δεν ανήκει σε συγκεκριμένο BBU. Σήματα από και προς κάποιο RRH μπορούν να υποστούν επεξεργασία από ένα εικονικό σταθμό βάσης, που προέρχεται από την ικανότητα επεξεργασίας που δίνεται από τη φυσική BBU με την τεχνολογία εικονικοποίησης σε πραγματικό χρόνο.

Για να γίνει ένας υπολογισμός των συνδρομητών που υπάρχουν ανά κεραία μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

$$N_{\text{Συνδρομητές}} = \frac{T_{\text{τομέα}}}{(T_{\text{μέση τιμή Λήψης}} + T_{\text{μέση τιμή Αποστολής}})} * C$$

όπου,  $N_{\text{Συνδρομητές}}$  είναι ο μέγιστος αριθμός συνδρομητών ανά τομέα,  $T_{\text{τομέα}}$  είναι ο ρυθμός της μετάδοσης δεδομένων ανά τομέα,  $T_{\text{μέση τιμή Λήψης}}$  είναι η μέση τιμή του ρυθμού λήψης δεδομένων των συνδρομητών,  $T_{\text{μέση τιμή Αποστολής}}$  είναι η μέση τιμή ρυθμού αποστολής δεδομένων των συνδρομητών και  $C$  ο δείκτης υπερφόρτωσης (overbooking factor).

Στη συγκεκριμένη ανάλυση θα θεωρηθεί ότι ο *overbooking factor* είναι 20 . Όσον αφορά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κάθε κεραίας για τη συχνότητα των 3.5 GHz με ένα εύρος ζώνης καναλιού 7 MHz μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι 15 Mbps. Κάθε συνδρομητής κάνει λήψη με ταχύτητα 1 Mbps ενώ στέλνει δεδομένα με ταχύτητα 0.2 Mbps. Αν γίνει αντικατάσταση των στοιχείων στον τύπο υπολογίζεται ότι κάθε κεραία έχει την δυνατότητα να εξυπηρετήσει περίπου 250 συνδρομητές. Κάθε σταθμός βάσης περιέχει 6 κεραίες, οπότε ένας σταθμός βάσης έχει την δυνατότητα εξυπηρέτησης μέχρι και 1500 συνδρομητών.

### 5.4.1 C-RAN έναντι παραδοσιακού RAN

Το C-RAN και η εφαρμογή του NFV μπορεί να παρέχει μια οικονομικά αποδοτικότερη λύση προς τις δαπάνες CapEx και OpEx, αφού οι απαιτήσεις ενέργειας, σχεδιασμού, συντήρησης, πόρων και εξοπλισμού θα βελτιωθούν και θα οδηγηθούν σε μια προσέγγιση κεντρικής διαχείρισης.

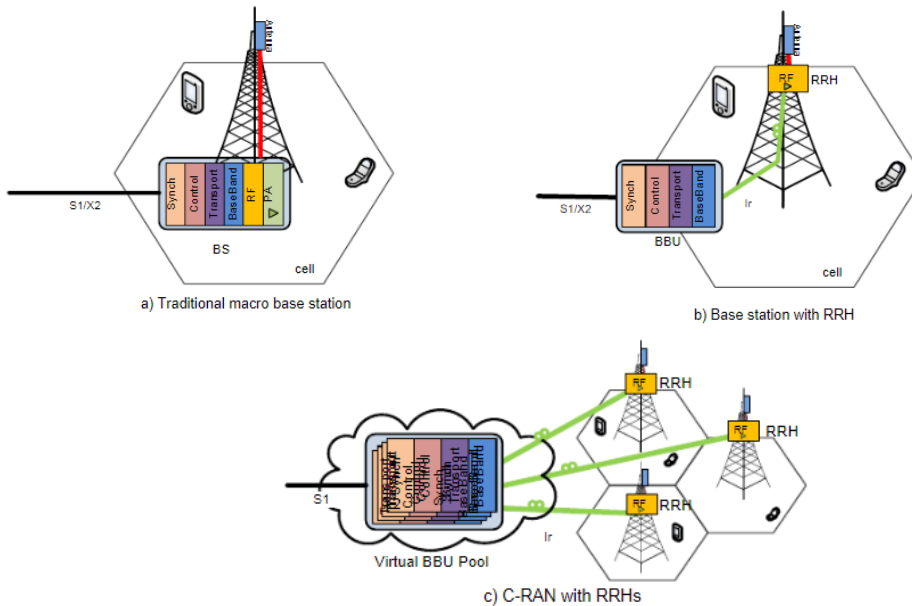
## RAN

Καθώς απαιτείται όλο και μεγαλύτερη επέκταση του RAN, στο δίκτυο εισάγονται περισσότερα αυτόνομα BTS το οποίο οδηγεί σε αυξημένα έσοδα που έχουν να κάνουν με την κατανάλωση ενέργειας που αυξάνουν το OpEx και προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Προφανώς, ο καλύτερος τρόπος εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι να μειωθεί ο αριθμός των σταθμών βάσης. Ωστόσο, για το παραδοσιακό RAN, αυτό θα έχει ως συνέπεια χειρότερη κάλυψη δικτύου και χαμηλότερη χωρητικότητα. Ως εκ τούτου, οι φορείς εκμετάλλευσης αναζητούν νέες τεχνολογίες για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να μειώσουν την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου.

Οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας πρέπει μακροπρόθεσμα να σχεδιάσουν την ενεργειακή απόδοση από την προσέγγιση της αρχιτεκτονικής του δικτύου ραδιοπρόσβασης. Οι

νέες τεχνολογίες απαιτούν νέες υποδομές για την παροχή καλύτερων υπηρεσιών. Λόγω των παραπάνω, γίνεται σαφές ότι είναι απαραίτητο να μεταβούν σε νέες τεχνολογίες. Το C-RAN και το NFV μπορούν να χαρακτηριστούν ως λύση για πολλά ζητήματα ενέργειας και κάλυψης [66]. Η παραδοσιακή προσέγγιση RAN για να μετατραπεί σε C-RAN πρέπει να ακολουθήσει κάποια βήματα. 1) συγκεντροποίηση της προσέγγισης DU και cloud DU. 2) Συγκέντρωση DU και κεντρική κοινή χρήση πόρων. 3) εικονικοποίηση RAN. Πιο συγκεκριμένα, η συγκέντρωση DU έχει ως στόχο την συγκέντρωση όλων των βασικών συναρτήσεων του RAN που βρίσκονται στο BBU κάθε τοποθεσίας σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία που μια BBU ή περισσότερες θα εξυπηρετούν. Με το να συγκεντρωθεί το DU δίνεται η δυνατότητα του να υπάρξει εξισορρόπηση στο φορτίο μεταξύ των DU και το να μπορεί να υπάρξει διαχείριση με κεντρικό τρόπο. Το να εικονικοποιηθεί το RAN αφορά κατά κύριο λόγο την εικονικοποίηση των προσφερόμενων υπηρεσιών. Η σύγκριση μεταξύ των δύο προσεγγίσεων, του RAN και του C-RAN περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα. [67]



Εικόνα 20 Traditional RAN vs C-RAN [67]

## Ανάλυση κόστους RAN - CRAN

Σε ένα παραδοσιακό δίκτυο RAN, περιλαμβάνονται δαπάνες που σχετίζονται με τα μονάδες ενός υπερσταθμού βάσης (SBS) όπως επίσης δαπάνες που αφορούν την κατασκευή ενός σταθμού βάσης. Για την μελέτη υποθέτουμε ότι ο αριθμός παρόχων κινητής τηλεφωνίας είναι συγκεκριμένος. Σε μελλοντικά δίκτυα την θέση των BS παίρνουν τα SBS, που μπορούν να αποσυνδέσουν τις λειτουργίες λογισμικού από το υλικό των BS. Ο κάθε πάροχος δικτύου αποκτά ένα συνολικό αριθμό από BS. Στην περίπτωση που αναφέρεται, το κόστος κεφαλαίου που απαιτείται επιβαρύνει αποκλειστικά τον πάροχο.

Μπορεί κανείς να θεωρήσει τον αριθμό NBBU των απαιτούμενων τοποθεσιών BBU ως την αναλογία μεταξύ του συνολικού αριθμού των τοποθεσιών RRH στο σενάριο που ορίζεται ως NRRH, και του αριθμού των RRH που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα μόνο BBU και ορίζεται ως N<sub>SRRH</sub>:

$$N_{BBU} = \left\lceil \frac{N_{RRH}}{N_{SRRH}} \right\rceil$$

Για τους υπολογισμούς θεωρείται ότι το C<sub>BSTOTAL</sub> είναι το συνολικό κόστος για να δημιουργία όλης της υποδομής των σταθμών βάσης, το n είναι ο συνολικός αριθμός των απαιτούμενων σταθμών και το C<sub>BS</sub> το κόστος δημιουργίας του καθενός. Επομένως το συνολικό CapEx της παραδοσιακής RAN προσέγγισης δίνεται από τη σχέση:

$$C_{BSTOTAL} = n * C_{BS} + L_{FIBER} * (C_{INST})$$

όπου L<sub>FIBER</sub> είναι το μήκος του εξοπλισμού σύνδεσης και C<sub>INST</sub> είναι το κόστος εγκατάστασής τους.

Το OpEx για την υποδομή RAN συμπεριλαμβάνει τις δαπάνες λειτουργίας για όλο τον απαιτούμενο εξοπλισμό. Στο συνολικό κόστος θα συνυπολογιστεί η ενέργεια E<sub>BS</sub> που καταναλώνεται από τέτοιου είδους εξοπλισμό.

$$E_{BS} = E_{TRANSMITER} * E_{RECT} * E_{DSP} * E_{PA} * E_{MW} * E_{AC}$$

όπου τα E<sub>TRANSMITER</sub>, E<sub>RECT</sub>, E<sub>DSP</sub>, E<sub>PA</sub>, E<sub>MW</sub>, E<sub>AC</sub> αναφέρονται στην ενέργεια που απαιτείται από τον πομποδέκτη, τον ανορθωτή, τον επεξεργαστή ψηφιακού σήματος, τον ενισχυτή ισχύος, για την μετάδοση και τον κλιματισμό αντίστοιχα.



Το συνολικό OpEx για την προσέγγιση RAN, προκύπτει υπολογίζοντας την κατα-  
νάλωσης ενέργειας ανά σταθμό βάσης ως  $E_{BS}$  και το κόστος ανά Kwh ως  $EL_{PRICE}$ . Αυτό υ-  
πολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{ENERGY} = E_{BS} * EL_{PRICE}$$

Αν θεωρηθεί ότι το κόστος OPEX στην υποδομή (εκτός του ενεργειακού εξοπλι-  
σμού) για ένα έτος λειτουργίας δικτύου αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό  $\alpha$  του κόστους  
CAPEX και ότι το ενεργειακό κόστος OPEX αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό  $\beta$  του ενεργεια-  
κού CAPEX[32], προκύπτει

$$C_{OPEX} = \alpha (C_{CAPEX}) + \beta (C_{ENERGY})$$

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι με τη χρήση του εξοπλισμού το σύστημα βελτιστοποιεί-  
ται, θα μειωθούν και οι λειτουργικές δαπάνες. Υποθέτουμε ότι μειώνεται κάθε χρόνο κατά  
ένα ποσοστό  $r$ .

$$C_{OPEX} = \alpha (C_{CAPEX}) \Rightarrow C_{OPEX2} = (1-r) * C_{OPEX1} \Rightarrow C_{OPEX3} = (1-r) * C_{OPEX2} = (1-r)^2 * C_{OPEX1} \Rightarrow C_{OPEXk} \\ = (1-r)^{k-1} * C_{OPEX1}$$

Το συνολικό TCO για  $T$  χρόνια υπολογίζεται από την σχέση:

$$TCO = CAPEX_{TR} + OPEX_{TR}$$

$$TCO_{TR} = n (C_{BSTOTAL} + C_{RRH} + C_{SITE}) * (1 + \alpha \sum_{k=1}^T (1-r)^{k-1}) + (1+\beta*T)*n*C_{ENERGY}$$

Εκτός από τα κύρια στοιχεία κόστους που αναλύονται παραπάνω, απαιτούνται πε-  
ραιτέρω λειτουργικά έξοδα που αφορούν το κόστος διαχείρισης προσωπικού και εγκατα-  
στάσεων. Το επίπεδο αυτοματοποίησης στην διαχείριση πρόκειται να ανέβει στο μέλλον  
με αποτέλεσμα λιγότερα έξοδα. Τα έξοδα προσωπικού δεν περιλαμβάνονται στην μοντε-  
λοποίηση αφού περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το κόστος υποδομής εικονικοποίη-  
σης. Οι τιμές των πινάκων είναι θεωρητικές και προκύπτουν από έρευνα [57]. Σύμφωνα  
με αυτές προκύπτουν τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

$C_{BS}$	[15.500] Κόστος ανά σταθμό βάσης
$E_{TRANSMITER}$	[100 W] Ισχύς πομποδέκτη
$E_{RECT}$	[100 W] Ισχύς ανορθωτή
$E_{DSP}$	[100 W] Ισχύς για επεξεργαστή ψηφιακού σήματος
$E_{PA}$	[10.4 W] Ισχύς για ενισχυτή ισχύος
$E_{MW}$	[80 W] Ισχύς για μετάδοσης MW
$E_{AC}$	[225 W] Ισχύς για κλιματισμού

Πίνακας 3 Βασικά κόστη, παραμέτροι και τιμές για την λειτουργία παραδοσιακού σταθμού βάσης [58]

## C-RAN

Το CapEx της ανάπτυξης του C-RAN ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους κατασκευής βάσης, εξοπλισμού, κόστος ινών και ανάπτυξης. Το OpEx ορίζεται ως το άθροισμα κόστους λειτουργίας και συντήρησης, ενοικίασης χώρου pool, μίσθωση ινών και λογαριασμών ηλεκτρικού ρεύματος. Η ενέργεια που θα καταναλώσει μία υλοποίηση C-RAN θα εξαρτηθεί από την κατανάλωση ενέργειας του σταθμού βάσης, την κατανάλωση ενέργειας εξοπλισμού και της BBU Pool.

$$C_{BBU} = (C_{BUILD-POOL} + C_{EQ}) + L_{FIBER} * C_{INST}$$

$$C_{ENERGY\_CLOUD} = EL_{PRICE} * (E_{DU} + E_{EQ})$$

Παράμετρος	Τιμή[€]-Ανάλυση
$C_{BUILD-POOL}$	[75.000] Κόστος κατασκευής DU Pool
$E_{EQ}$	Κατανάλωση ενέργειας μονάδων εξοπλισμού
$E_{DU}$	[50 W] Κατανάλωση ενέργειας μιας DU Pool για κάθε DU
$N_{DU}$	Αριθμός DU ανά Pool
$EL_{PRICE}$	[0.25 €/ KWH] Τιμή ενέργειας ηλεκτρισμού
$C_{EQ}$	[8.500] Κόστος συμπληρωματικού εξοπλισμού
$L_{FIBER}$	Μήκος απαιτούμενου εξοπλισμού δικτύου
$C_{INST}$	Κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού

$C_{SUP}$	[10.000] Ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας
$EL_{PRICE}$	[0,25 e/KWH] Κόστος κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος

Πίνακας 4 Βασικά κόστος, παραμέτροι και τιμές για την λειτουργία του DU Pool [58]

Το TCO του C-RAN εκφράζεται ως το άθροισμα του CapEx και του OpEx για T έτη λειτουργίας. Το n εκφράζει τον αριθμό των απαιτούμενων BBU, το  $C_{BBU}$  εκφράζει το κόστος για την δημιουργία BBU και το  $C_{RRH}$  εκφράζει το κόστος δημιουργίας ενός RRH. Το  $C_{SUP}$  είναι το πρόσθετο κόστος που δημιουργείται για την χρήση του νέφους (cloud) και αντιστοιχεί στην υποδομή του cloud και στο fronthaul. Οι παράμετροι αναγράφονται στον Πίνακα 4 , οπότε το TCO μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$TCO = CAPEX_{CRAN} + OPEX_{CRAN}$$

$$TCO_{C\_RAN} = (n C_{BBU} + m C_{RRH}) * (1 + a \sum_{k=1}^T (1 - r)^{k-1}) * (1 + b * T) * n * C_{ENERGY\_CLOUD} + C_{SUP}$$

Κατά τη δημιουργία ενός συστήματος με συνολικό κόστος όπως ορίζεται παραπάνω, ο πάροχος ρυθμίζει την χωρητικότητα και την περιοχή κάλυψης του σταθμού βάσης. Η διαχείριση του φάσματος έχει σημασία ώστε να είναι κερδοφόρο ένα σύστημα και να είναι εξασφαλισμένη η απόδοση της επένδυσης [68].

## 5.5 TCO

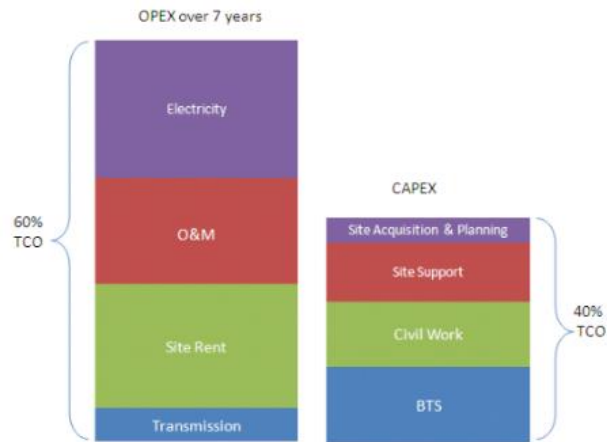
Το TCO του C-RAN εκφράζεται ως το άθροισμα του CapEx και του OpEx και υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### Υπολογισμός

Οι τελικές δαπάνες TCO διαμορφώνονται ως εξής:

Για το TCO(Traditional):  $TCO = CapEx + OpEx = 2.100.000€$

Για το TCO(CapEx):  $TCO = CapEx + OpEx = 807.000€$

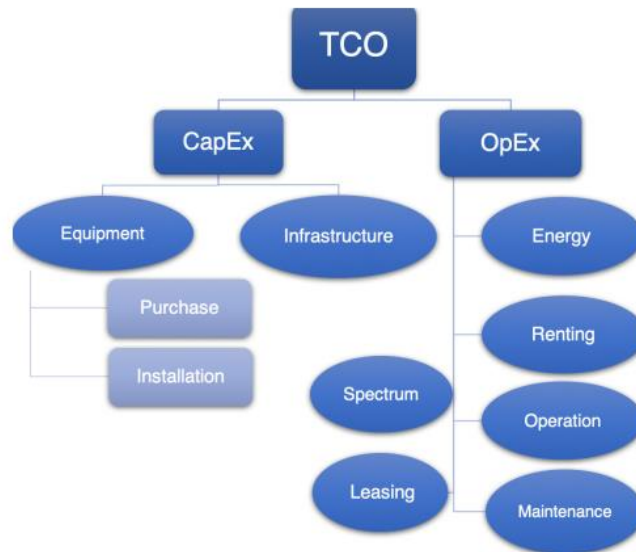


Εικόνα 21 Ανάλυση TCO μιας τοποθεσίας

TCO items	CapEx	OpEx	Μεταβλητό κόστος	Σταθερό κόστος
Εξοπλισμός	×		×	
Κατασκευή	×			×
Εγκατάσταση και εκκίνηση λειτουργίας	×			×
Λειτουργία και συντήρηση		×		×
Δαπάνες ηλεκτρικής ενέργειας		×	×	
Δαπάνες τοποθεσίας		×	×	
Δαπάνες χρήσης λοιπού εξοπλισμού		×	×	

Πίνακας 5 Κατανομή στοιχείων TCO

Το OpEx έχει το υψηλότερο αντίκτυπο στο TCO, καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι για 7ετή ανάπτυξη, το OpEx περιλαμβάνει περισσότερο από το 60% του TCO και το υπόλοιπο πηγαίνει στο CapEx [69]. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα του TCO, το OpEx αντιπροσωπεύει πάνω από το 60% του TCO, ενώ το CapEx αντιστοιχεί μόνο στο περίπου 40%. Το OpEx πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη από τους παρόχους για την ανάπτυξη των μελλοντικών RAN. Μειώνοντας τον αριθμό των σταθμών βάσεων θα μειωθεί το κόστος για την κατασκευή του κύριου εξοπλισμού και θα ελαχιστοποιηθούν τα έξοδα για εγκατάσταση και ενοικίαση εξοπλισμού. Άρα, είναι ανάγκη να χρησιμοποιείται ο πιο οικονομικός τρόπος για να μειωθεί σημαντικά το μη παραγωγικό μέρος του TCO, διατηρώντας όμως καλή κάλυψη δικτύου.



Εικόνα 22 Σύνοψη κόστους δικτύου [62]

## 5.6 Net Present Value (NPV)

Αρκετά συχνά χρησιμοποιούμενο εργαλείο αξιολόγησης κάποιας επενδυτικής απόφασης είναι η μέθοδος NPV και υπολογίζεται ως:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{TCO_t}{(1+b)^t}$$

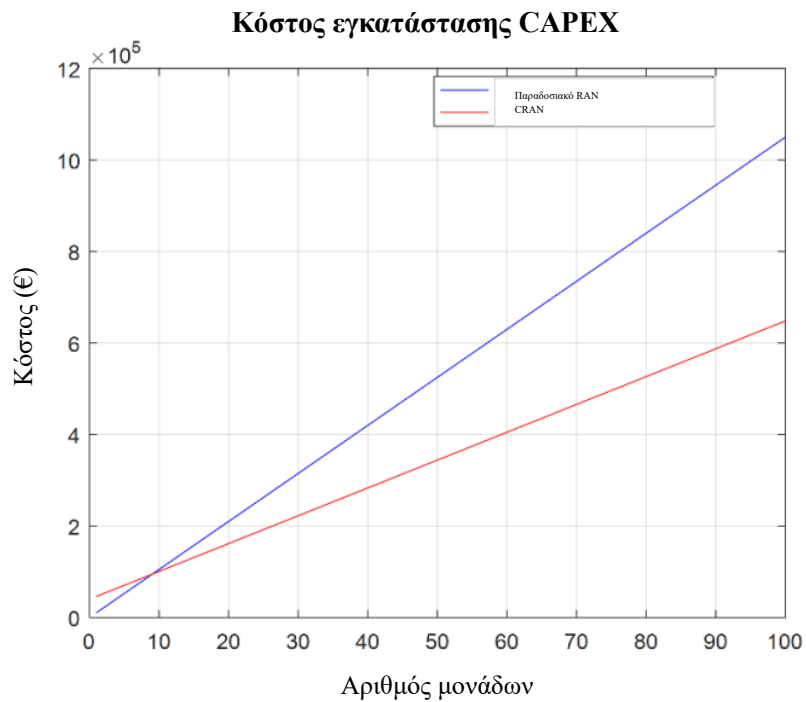
Όπου το  $b$  δηλώνει το προεξοφλητικό επιτόκιο,  $T$  είναι η περίοδος της αξιολόγησης και στην θέση του  $TCO$  υπολογίζεται η ταμειακή ροή στο τέλος του έτους  $t$ , δηλαδή η ροή ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ  $TCO$  και εισοδήματος της ίδιας χρονιάς. Στην περίπτωση που το NPV είναι θετικό, η ανάπτυξη είναι επικερδής. Εάν είναι αρνητικό, δημιουργείται νομισματική απώλεια στην περίοδο αξιολόγησης. Στην μελέτη συγκρίνεται το συνολικό κόστος του δικτύου για την περίοδο  $T$  ετών για τις προσεγγίσεις. Δεδομένου του εισοδήματος για κάθε έτος, είναι δυνατό να αξιολογηθεί η κερδοφορία του κάθε δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγιστοποίηση του NPV αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση του  $TCO$  που είναι βασικός στόχος. [66]

## 5.7 Ανάλυση CapEx και OpEx και πειράματα

Κόστος σε €

BBU	RRH	Ενέργεια	Κόστος εξοπλισμού και τοποθεσίας	Κόστος χρήσης Cloud
1000	500	5000	4000	40000

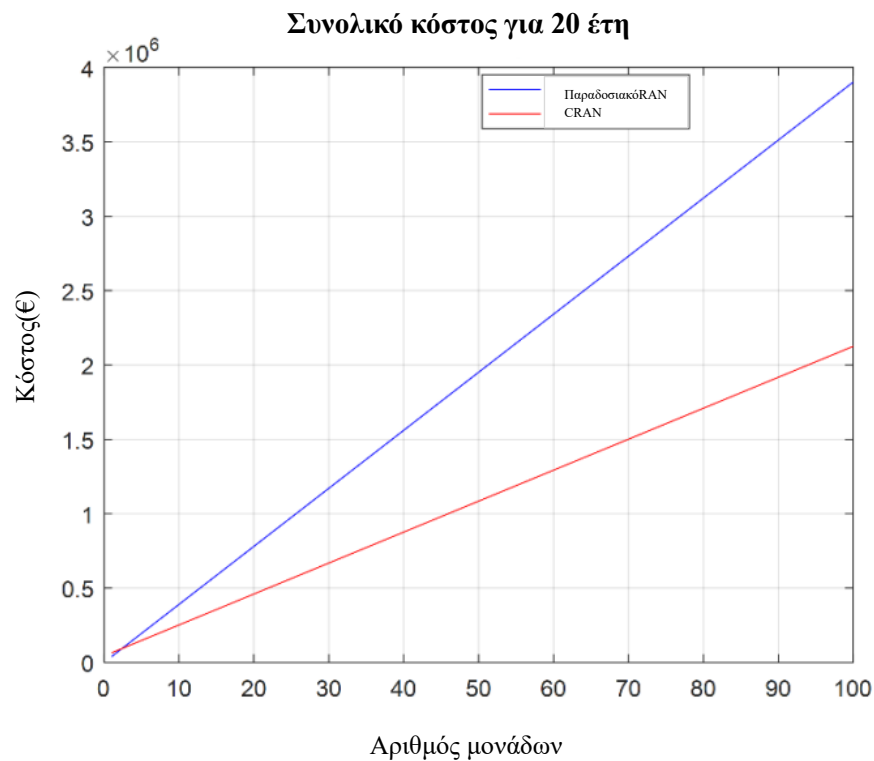
Επίσης, με το Cloud-RAN, θα υπάρξει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά το ένα τρίτο.  $\alpha=0.05$ ,  $\beta=0.25$ ,  $r=0.05$ ,  $m= 1/4 n$ .



Σχήμα 5.7.1 Εξέλιξη του κόστους εγκατάστασης CAPEX ως συνάρτηση του αριθμού των τοποθεσιών

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.1, το παραδοσιακό δίκτυο είναι πιο ωφέλιμο για την ανάπτυξη δικτύου κινητής τηλεφωνίας περίπου 0 έως 10 τοποθεσιών από το Cloud-RAN.

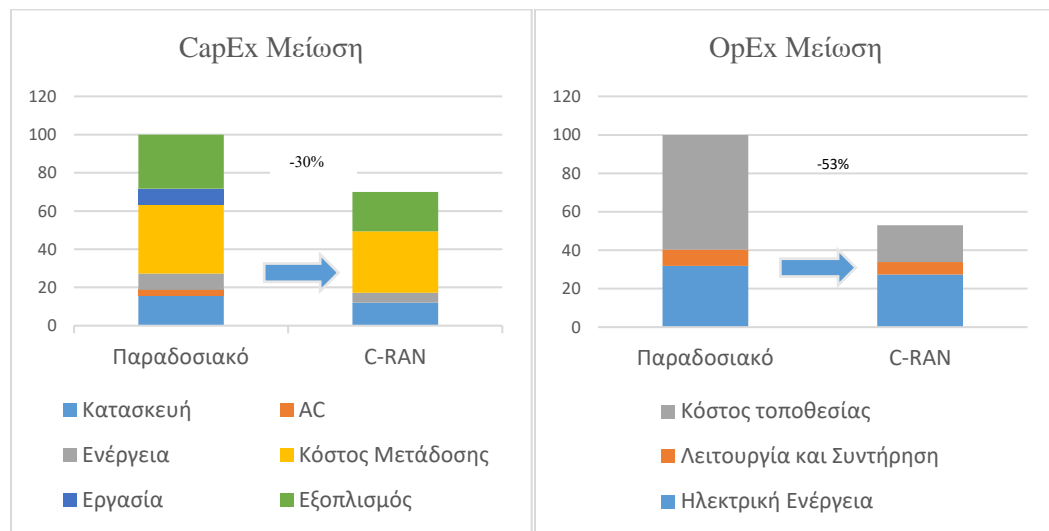
Ωστόσο, η επιλογή Cloud-RAN γίνεται αρκετά πιο οικονομική από ένα παραδοσιακό δίκτυο όταν πρόκειται για μαζική ανάπτυξη 10 ή περισσότερων τοποθεσιών. Επιπλέον, μπορεί να φανεί ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των τοποθεσιών που έχουν εγκατασταθεί στο cloud, τόσο μεγαλύτερο είναι το όφελος.



Σχήμα 5.7.2 Εξέλιξη της συνολικής δαπάνης σε 20 χρόνια χρήσης ανάλογα με τον αριθμό των τοποθεσιών

Στο σχήμα 5.7.2 παρουσιάζονται οι συνολικές δαπάνες ενός παραδοσιακού δικτύου και ενός δικτύου Cloud-RAN για 20 χρόνια. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι, ανεξάρτητα από τον αριθμό των τοποθεσιών που εξετάζονται, η λύση Cloud-RAN είναι καλύτερη όταν γίνεται ένας μακροπρόθεσμος ισολογισμός. Αυτό είναι απαραίτητο για έναν πάροχο καθώς η διασφάλιση της απόδοσης της επένδυσης με την πάροδο του χρόνου είναι πρωταρχικής σημασίας. Έτσι απεικονίζεται η συνολική δαπάνη που θα έχει προκύψει σε 20 χρόνια για μια ομάδα 60 τοποθεσιών.

Το CapEx και το OpEx είναι σημαντικές παράμετροι όταν αναπτύσσεται ένα δίκτυο. Αναλύοντας τη σύγκριση μεταξύ της κεντρικής προσέγγισης C-RAN και της παραδοσιακής προσέγγισης RAN και σύμφωνα με δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί προκύπτει ότι μπορεί να υπάρξει μείωση στο κόστος CapEx και OpEx του δικτύου. Στο σχήμα 5.7.3 παρατηρείται ότι σημαντικό ποσοστό του ποσού που απαιτείται καταλαμβάνει ο εξοπλισμός και το κόστος μετάδοσης. Στον υπολογισμό των δαπανών του C-RAN φαίνεται η μείωση που υπάρχει συγκριτικά με την παραδοσιακή υλοποίηση. Αυτό συμβαίνει λόγω των λιγότερων μερών εξοπλισμού που χρειάζεται και της αποφυγής ανθρώπινης εργασίας. Δικαιολογείται επίσης από το γεγονός ότι το BS είναι ο πιο ακριβός παράγοντας μιας υποδομής ασύρματου δικτύου. Παρόμοια για το OpEx παρατηρείται η σημαντική μείωση του απαιτούμενου κόστους τοποθεσίας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω το CapEx μπορεί να μειωθεί μέχρι και 30% ενώ το OpEx μέχρι και 53% για νέα υλοποίηση.



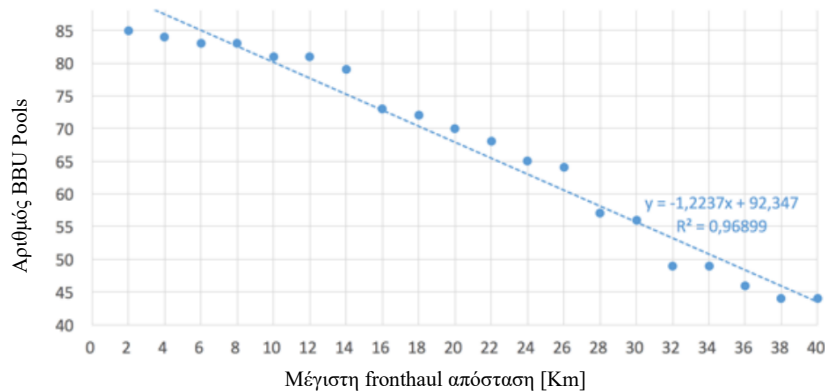
Σχήμα 5.7.3 Οικονομική ανάλυση C-RAN

Η συνολική αποτίμηση της ανάλυσης μπορεί να δείξει οφέλη σε πολλούς τομείς. Στα λειτουργικά έξοδα η μείωση προκύπτει κυρίως από την μείωση της κατανάλωσης του ρεύματος, από τα τέλη ενοικίασης των τοποθεσιών, από τις απαιτήσεις αναβαθμίσεως και την συντήρηση. Ο κύριος παράγοντας είναι ότι το C-RAN χρειάζεται μόνο RRH σε απομακρυσμένη τοποθεσία χωρίς την απαίτηση δωματίου εξοπλισμού BTS. Όσον αφορά τις κεφαλαιουχικές δαπάνες, η μείωση τους οφείλεται κυρίως στην απουσία αιθουσών BTS,



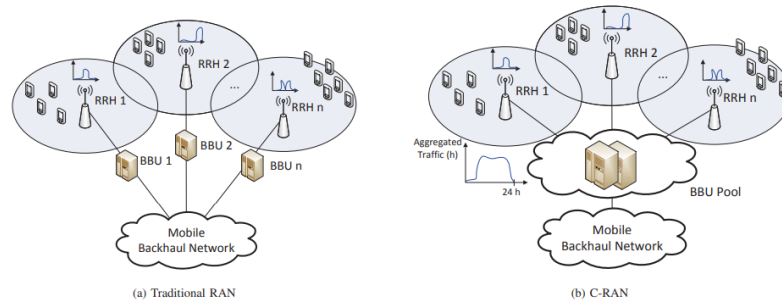
σε λιγότερες συσκευές μετάδοσης και την κατάργηση πολλών υποστηρικτικών συσκευών. Επίσης, η προσαρμογή της BBU pool μπορεί να μειώσει τα έξοδα και την διαμόρφωση των BTS. Η ανάπτυξη σε διαφορετικές πόλεις μπορεί να δημιουργήσει διαφορετικές εξοικονομήσεις καθώς οι απαιτήσεις δεν είναι οι ίδιες.

Λαμβάνοντας υπόψιν πείραμα από την [70], στο σχήμα 5.7.4 απεικονίζεται αριθμός των BBU Pools που χρησιμοποιούνται για διαφορετικές τιμές της μέγιστης απόστασης fronthaul. Ο αριθμός των BBU Pools που απαιτούνται στο δίκτυο μειώνεται καθώς αυξάνεται η μέγιστη απόσταση fronthaul. Αυτό συμβαίνει επειδή καθώς αυξάνονται οι περιοχές κάλυψης, οι επικαλυπτόμενες περιοχές αυξάνονται επίσης, καθιστώντας ορισμένες τοποθεσίες BBU Pools περιττές για την κάλυψη της ίδιας περιοχής. Ο συνολικός αριθμός των BBU Pools δεν φτάνει ποτέ τον μέγιστο και χρησιμοποιώντας λιγότερα BBU Pools, το κόστος τόσο σε CapEx όσο και σε OpEx θα αυξηθεί λόγω της αύξησης του μήκους των συνδέσμων fronthaul.



Σχήμα 5.7.4 Αριθμός BBU Pools για διαφορετικά όρια απόστασης

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι το RRH χρειάζεται λιγότερη ενέργεια και μπορεί να αλλάξει εύκολα τοποθεσία.

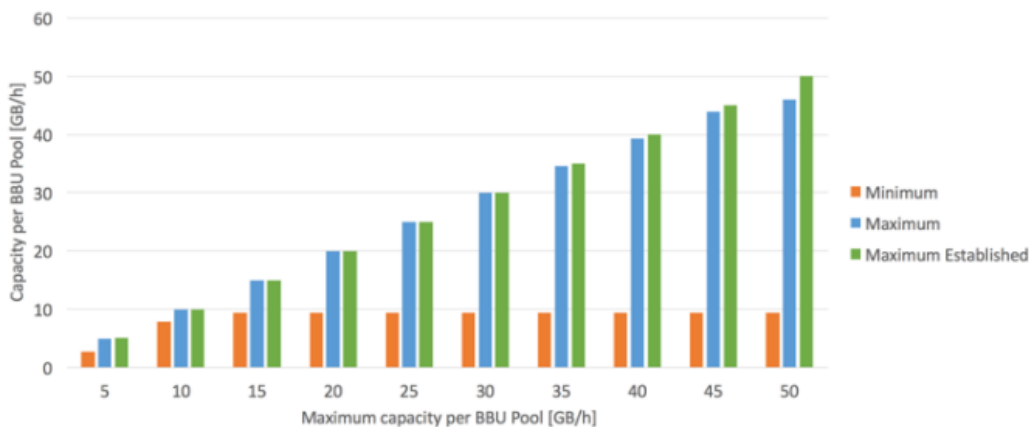


Εικόνα 23 Στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας στην αρχιτεκτονική C-RAN για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Για να γίνει αξιολόγηση της απόδοσης της αρχιτεκτονικής C-RAN σε ό,τι αφορά τις διακυμάνσεις της κυκλοφορίας, στο [5] προτείνεται μια μέτρηση για τη στάθμιση του οφέλους από την άποψη του στατιστικού κέρδους πολυπλεξίας. Το στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας συγκρίνει τους πόρους που απαιτούνται σε ένα παραδοσιακό RAN με τους πόρους που απαιτούνται σε ένα C-RAN. Έτσι, συγκρίνεται το άθροισμα των κορυφών κίνησης σε ένα παραδοσιακό RAN με το μέγιστο μιας BBU pool σε ένα CRAN.

$$\text{Κέρδος πολυπλεξίας} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{rrh}} T_{peak,i} [MB/H]}{\sum_{j=1}^{N_{bbu}} T_{peak,j} [MB/h]}$$

Όπου  $N_{rrh}$  είναι το πλήθος των RRHs και  $T_{peak}$  είναι μέγιστη κίνηση δικτύου κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 5.7.5 Ελάχιστη και μέγιστη κίνηση για διαφορετικά όρια χωρητικότητας ανά BBU Pool

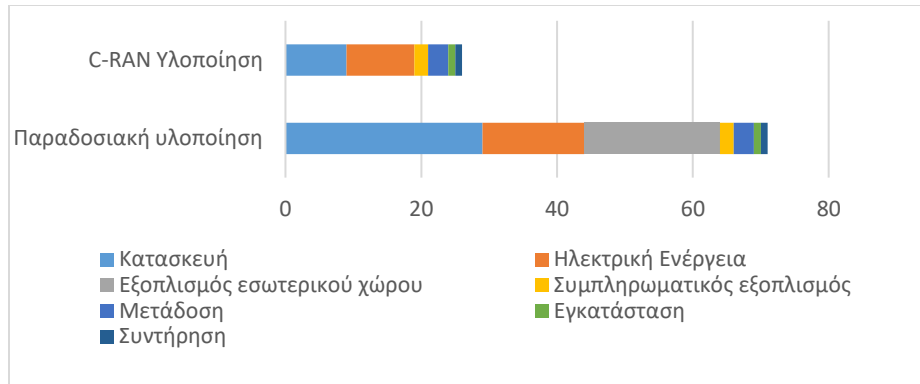
Στο σχήμα 5.7.5, φαίνεται ότι καθορίζοντας ένα όριο χωρητικότητας ανά BBU Pool, το δίκτυο μπορεί να φτάσει στην μέγιστη τιμή αξιοποίησης της. Από 5 GB/h έως 30 GB/h μέγιστης χωρητικότητας για κάθε BBU Pool, η μέγιστη χωρητικότητα είναι σχεδόν ίση με την μέγιστη καθορισμένη, αλλά μετά τα 50 GB/h το περιθώριο γίνεται 8%. Αυτό σημαίνει ότι το C-RAN έχει την δυνατότητα κλιμάκωσης με βάση την χρήση όλων των BBU Pool, αντί για την χρήση όλων των RRH. [62]

### Κατασκευή σταθμών βάσης

Το C-RAN απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τις απαιτήσεις και τον χρόνο κατασκευής που απαιτούνται για νέους σταθμούς βάσης. Αυτό ωφελεί στην ταχύτητα ανάπτυξης του δικτύου. Το σχήμα 5.5.3 δείχνει τη σύγκριση της διαδικασίας κατασκευής μεταξύ του παραδοσιακού σταθμού βάσης και της κεντρικής προσέγγισης C-RAN στην ανάπτυξη του δικτύου. Το πλεονέκτημα προκύπτει από τον χρόνο ανάπτυξης, αφού η εξοικονόμηση πόρων προέρχεται κατά κύριο λόγο από την κατασκευή και τον εξοπλισμό του σταθμού. Στον Πίνακα 6 αναγράφονται οι βασικές διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων ως προς την κατασκευή.

	Παραδοσιακός σταθμός βάσης	Κεντρική Base Pool
Επιλογή τοποθεσίας	Αυστηρή	Ευέλικτη
Αίθουσα εξοπλισμού	Κατασκευή αίθουσας	Καμία κατασκευή για RRH
Εξοπλισμός για την τοποθεσία	Απαιτείται εγκατάσταση	Καμία απαίτηση
Transmission	Απαιτείται εγκατάσταση και επαλήθευση	Απαιτείται μόνο επαλήθευση
Εγκατάσταση εξοπλισμού	Ραδιοσύστημα και BBU	RRH και κεντρικό BBU

Πίνακας 6 Επίδραση του C-RAN ως προς την κατασκευή



Σχήμα 5.5.3 Σύγκριση κύκλου κατασκευής των υλοποιήσεων

## Ανάλυση κατανάλωσης ενέργειας

RAN αρχι-τεκτονική	Εξοπλισμός σταθμού βάσης	Κλιματισμός	Switching supply	Μπαταρία αποθήκευσης	Σύστημα μεταφοράς	Συνολικό
Παραδοσιακό RAN	0.65 KW	2.0 KW	0.2 KW	0.2 KW	0.2 KW	3.45 KW
C-RAN	0.55 KW	0 KW	0.2 KW	0.10 KW	0	0.85 KW

Πίνακας 7 Κατανάλωση ισχύος παραδοσιακού έναντι C-RAN για μία αστική περιοχή

Το C-RAN RRH απαιτεί λιγότερο εξοπλισμό σε σχέση με την παραδοσιακή προσέγγιση και αυτό σημαίνει μειωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εξοικονομηθεί μέχρι και 75% κατανάλωσης ενέργειας για την ανάπτυξη δικτύου σε μία αστική περιοχή.

## 6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική έγινε προσπάθεια ώστε να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα της ανάπτυξης των δικτύων 5G και της τεχνολογίας NFV στα σύγχρονα κινητά δίκτυα. Λόγω του εύρους φάσματος του θέματος αναλύθηκαν τα βασικότερα και απαραίτητα πεδία, προκειμένου στο πλαίσιο της έρευνας που πραγματοποιήθηκε να γίνει δυνατό να παρουσιαστούν οι πιο σημαντικοί τομείς της οικονομικής πλευράς που σχετίζεται με την εφαρμογή των τεχνολογιών όπως το NFV και το SDN.

Η σύγχρονη αγορά της εικονικής δικτύωσης έχει ήδη κάνει την εμφάνιση της με την εμφάνιση των δικτύων πέμπτης γενιάς. Φαίνεται ότι η NFV θα αποτελέσει το μέλλον της αρχιτεκτονικής δικτύων. Αυτό σημαίνει ότι η βαθύτερη κατανόηση αυτών των τεχνολογιών είναι απόλυτη ανάγκη της αγοράς. Με την είσοδο του NFV, το κόστος μπορεί να μειωθεί και να υπάρξει παράλληλα βελτιστοποίηση των υπηρεσιών.

Αρχικά, έγινε αναφορά στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας μέχρι και σήμερα. Αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις που αφορούν την ανάπτυξη των 5G δικτύων, τα οποία αποτελούν την τελευταία εξέλιξη της τεχνολογίας δίνοντας υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και συνδεσιμότητα χωρίς διακοπές, προσφέροντας στους χρήστες εξαιρετική ποιότητα παροχής υπηρεσιών. Επίσης έγινε επισκόπηση τεχνολογιών αιχμής όπως NFV, SDN και νέφους (Cloud Computing), οι οποίες εκτιμάται ότι παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία 5G.

Σήμερα, τόσο η βιομηχανία όσο και η ερευνητική κοινότητα αναζητούν έντονα στρατηγικές για μείωση του κόστους και αξιοποίηση όλων των εργαλείων, όπως για παράδειγμα αυτών που παρέχει το NFV. Μέσω των μελετών που πραγματοποιούνται μπορούν να εμφανιστούν θετικές οικονομικές επιπτώσεις και να εκτιμηθούν τα ποσοστά κέρδους ώστε να μπορέσει ο κάθε πάροχος υπηρεσιών να εκσυγχρονίσει τις τεχνολογίες του και να αποκομίσει οφέλη.

Σε ότι αφορά τον τομέα των σταθερών τηλεπικοινωνιών, το NFV μπορεί να αντικαταστήσει τις τυπικές λειτουργίες μεταγωγής, δρομολόγησης και εξισορρόπησης φορτίου, ενώ στην κινητή τηλεφωνία μέσω του NFV αναπτύχθηκαν λύσεις όπως το LTE EPC και RAN. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις αρχιτεκτονικές virtual EPC και εικονικοποίηση στο τμήμα ραδιοπρόσβασης μέσω C-RAN, με το δεύτερο να είναι πιθανώς από τα πιο σημαντικά στο τομέα της τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης.

Στην μελέτη που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάστηκε η σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών προσεγγίσεων για την ανάπτυξη και λειτουργία ενός δικτύου ασύρματων επικοινωνιών. Αναλύθηκε η σύγκριση μιας υλοποίησης του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (RAN) σχεδιασμένης με τεχνικές εικονικοποίησης και μίας πιο παραδοσιακής υλοποίησης δικτύου με σταθμούς βάσης. Παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα που μπορεί να προσφέρει μια εικονικοποιημένη αρχιτεκτονική σε συνδυασμό με τις περισσότερες δυνατότητες που

αποδίδει. Με την προσέγγιση του C-RAN που προτείνεται αποφεύγονται σημαντικά μειονεκτήματα και συνοψίζονται τα οικονομικά οφέλη μέσω πειραμάτων. Επομένως, μπορεί να αξιολογηθεί ότι η τεχνολογία NFV δίνει δυνατότητες παροχής δικτύων υψηλής απόδοσης με μεγάλες προοπτικές κλιμάκωσης και προσαρμοστικότητας σε χαμηλό κόστος αν τη συγκρίνουμε με δίκτυα κατασκευασμένα με πιο παραδοσιακές μεθόδους.

Αναλύονται εξισώσεις των ποσοτήτων CapEx, OpEx και TCO. Μέσα από τις γραφικές παραστάσεις των πειραμάτων εξάγονται συμπεράσματα για το κόστος που απαιτεί η χρήση των εναλλακτικών τεχνολογιών.

Ο βασικός σκοπός της C-RAN προσέγγισης είναι ότι μέσω της υψηλότερης απόδοσης φάσματος και της κεντρικής διαχείρισης που προκύπτει, μειώνεται ο εξοπλισμός και το κόστος λειτουργίας, ενώ οι δυνατότητες αξιοποίησης της Υπολογιστικής Νέφους (Cloud Computing) που βασίζονται στην εικονικοποίηση ενεργοποιούν πολλές δυνατότητες διαχείρισης όπως κατανομή πόρων και κατανάλωση ενέργειας. Η πιο σημαντική προσέγγιση σχεδίασης αφορά την τοποθέτηση διεπαφών και λειτουργιών που στις παραδοσιακές υλοποιήσεις βρίσκονται είτε στο RRU είτε στο BBU, ενώ το βασικό σημείο είναι η αξιολόγηση του αντίκτυπου στην καθυστέρηση και στην απόδοση.

Συμπερασματικά λοιπόν, από την ανάλυση και τα ευρήματα που αναφέρθηκαν, διαπιστώνουμε ότι η αρχιτεκτονική NFV είναι ιδανική για τηλεπικοινωνιακούς φορείς, αφού η μεγάλη κίνηση δεδομένων που σημειώνεται δεν μπορεί να υποστηριχθεί από την τυπική υποδομή δικτύου, ενώ σημαντική είναι και η εξοικονόμηση στις δαπάνες OpEx και CapEx. Τέτοιες τεχνολογίες μπορούν να δώσουν τη λύση για την βέλτιστη διαχείριση και διαμοιρασμό των προς το παρόν διαθέσιμων πόρων. Οι τεχνολογίες που αξιολογήθηκαν ερευνώνται συνεχώς και δίνουν την δυνατότητα στους παρόχους κινητών υπηρεσιών να τις ενσωματώνουν στις αρχιτεκτονικές των δικτύων 5G.

## **7. Μελλοντική έρευνα**

Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω έρευνα μπορεί να γίνουν αντιληπτοί οι λόγοι για τους οποίους η χρήση του NFV είναι τόσο διαδεδομένη και όπως οι εκτιμήσεις δείχνουν, θα επεκταθεί σημαντικά στο προσεχές μέλλον. Η προσαρμοστικότητά του και οι

λύσεις που μπορεί να προσφέρει σε συνδυασμό με τα οικονομικά οφέλη το αναδεικνύουν ως μια προσέγγιση που θα συνεχίσει να αξιοποιείται και να αναπτύσσεται. Τα δίκτυα αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς και τεχνολογίες όπως το NFV μπορούν να προσφέρουν ακόμη περισσότερες βελτιώσεις στο μέλλον.

Έρευνες οι οποίες αναδεικνύουν τα σημαντικά οφέλη που μπορούν να αποδοθούν είναι αρκετά σημαντικές για να μπορούν οι εταιρείες να αξιολογήσουν το κάθε κόστος και να σχεδιάσουν την αύξηση των κερδών με χρήση τέτοιων τεχνολογιών. Η αρχιτεκτονική NFV διατηρεί μεγάλα επίπεδα ευελιξίας και προσαρμοστικότητας με επιπλέον πλεονεκτήματα διαμόρφωσης ανάλογα με την χρήση και τις απαιτήσεις που πρόκειται να καλύψει, χωρίς την απαίτηση περεταίρω εξοπλισμού.

Στο μέλλον, νέες εργασίες αναμένεται να δώσουν περισσότερα δεδομένα σχετικά με το NFV και το πώς αυτό μπορεί να υλοποιηθεί και να προσαρμοστεί σε ένα νέο δίκτυο. Κριτήρια που μπορούν να ληφθούν υπόψη είναι το πόσο γρήγορα μπορεί να επεκταθεί το δίκτυο στις αντίστοιχες προσεγγίσεις αλλά και το απαιτούμενο κόστος, η συντήρηση, οι πρακτικές.

Όπως προκύπτει από τις εξελίξεις, οι επόμενες γενιές δικτύων θα είναι πιο πολύπλοκες, με περισσότερες υποστηριζόμενες υπηρεσίες που θα εξαρτώνται άμεσα από αυτά. Τεχνολογίες όπως αυτή της εικονικοποίησης αναμένεται να αποτελέσουν ουσιαστικό κομμάτι των δικτύων που έρχονται, κάνοντάς τα πιο ασφαλή και αποδοτικά.

Από την άλλη, συνεχώς ανακύπτουν νέα ζητήματα και προκλήσεις σχετικά με το NFV και το 5G. Για αυτό τον λόγο, οι νέες προτάσεις για την εφαρμογή του NFV είναι πολύ σημαντικές για την εξέλιξη. Όπως φαίνεται η επιστημονική κοινότητα δείχνει ενδιαφέρον στην ανάπτυξη του NFV και των δικτύων μέσω των διάφορων ερευνών που διεξάγονται τα τελευταία χρόνια. Οι τεχνολογίες αυτές καινοτομούν και δίνουν συνεχώς νέες δυνατότητες για μελέτες.

Επίσης, πολύ σημαντική θα ήταν η έρευνα για την εισαγωγή πράσινων τεχνικών στην δημιουργία των δικτύων, όπως και για τις αλλαγές που μπορούν να γίνουν στα δίκτυα που χρησιμοποιούνται ώστε να ανταποκριθούν στις ανάγκες της εποχής. Τέτοιες μελέτες θα ήταν πολύ χρήσιμες και θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να αναζητηθεί η εναρμόνισή τους και με τις πράσινες πηγές ενέργειας.

Ακόμα, μπορεί να ερευνηθούν και άλλα πρότυπα καθώς θεωρείται κρίσιμο να μειωθούν ακόμη περισσότερο οι δαπάνες και οι τεχνικές εικονικοποίησης αποτελούν βάση ώστε να γίνει αυτό εφικτό. Ζητήματα όπως η ασφάλεια χρήζουν βελτίωσης και η έρευνα επικεντρώνεται σε αυτόν τον τομέα. Η μελλοντική ερευνητική ενασχόληση είναι σημαντική, ώστε να αναπτυχθούν νέοι τρόποι προσέγγισης και εφαρμογής του NFV σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες.

Τέλος, γίνεται φανερό πως με την έλευση των δικτύων 5G και τεχνολογιών όπως το NFV μπορούν να λυθούν σημαντικά προβλήματα και να βελτιωθούν σημαντικοί τομείς των σύγχρονων δικτύων, πράγμα που ωφελεί τόσο τους παρόχους κινητών επικοινωνιών όσο και τους χρήστες. Πολλές καινούργιες ιδέες μπορούν να ερευνηθούν από την επιστημονική κοινότητα και να βελτιώσουν ακόμη περισσότερο τον συγκεκριμένο τομέα. Είναι βέβαιο ότι τέτοιου είδους προσεγγίσεις εμπεριέχουν μεγάλο ενδιαφέρον και θα είναι βάση για την εξέλιξη της τεχνικής της εικονικοποίησης.

## Βιβλιογραφία

- [1] M. A. U. Gawas, «An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G,» May 2015.
- [2] R. Z. S. R. M. Z. M. A. M. S. Azar Abid Salih, «Evolution of Mobile Wireless Communication to 5G Revolution,» *Technology Reports of Kansai University*, June 2020.
- [3] Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>.
- [4] J. R. Churi, S. A. Tigdi, S. Yewale και T. S. Srendran, «Evolution of Networks (2G-5G)».
- [5] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/2G>.
- [6] «Wikipedia,» 12 November 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/3G>.
- [7] A. K. Mogal, «Wireless Mobile Communication - A Study of 3G Technology,» 16 December 2011.
- [8] «Wikipedia,» 15 November 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/4G>.



- [9] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://5glearning.org/evolution-of-mobile-generation-from-1g-to-6g/>.
- [10] M. N. O. S. S. M. M. Kelechi G.Eze, «5G Wireless Technology: A Primer,» 1 July 2018.
- [11] «Wikipedia,» 16 November 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>.
- [12] «Timeline of 5G,» wiki, [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://timelines.issarice.com/wiki/Timeline\\_of\\_5G](https://timelines.issarice.com/wiki/Timeline_of_5G).
- [13] D. Marabissi, L. Muchi, R. Fantacci και M. R. Spada, «A Real Case of Implementation of the Future 5G City,» 22 December 2018.
- [14] «Thalesgroup,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/mobile/inspired/5G>.
- [15] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.juniper.net/us/en/research-topics/what-is-5g.html>.
- [16] Intel. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/wireless-network/5g-benefits-features.html>.
- [17] X. Emma και L. Peng , «5G Network: An Overview of the Pros and Cons,» 2020.
- [18] A. GUPTA και R. KUMAR JHA, «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,» 7 August 2015.
- [19] «Viasolutions,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-architecture>.
- [20] A. Guptha και R. Kumar jha, «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,» July 2015.
- [21] [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/General-5G-Cellular-Network-Architecture-7\\_fig2\\_299865743](https://www.researchgate.net/figure/General-5G-Cellular-Network-Architecture-7_fig2_299865743).
- [22] I. Ahmad, T. Kumar, J. Okwuibe και M. Liyanage, «Overview of 5G Security Challenges and Solutions,» March 2018.
- [23] T. Zinner, T. Hossfeld, M. Jarschel και P. Tran-Gia, «A Compass Through SDN Networks,» October 2013.
- [24] [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined\\_networking](https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking).
- [25] researchgate.net. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-5G-optical-wireless-SDN-based-architecture\\_fig1\\_318827251](https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-5G-optical-wireless-SDN-based-architecture_fig1_318827251).
- [26] «wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>.

- [27] «news.samsung.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://news.samsung.com/global/samsung-shares-massive-mimo-roadmap-in-new-whitepaper>.
- [28] «wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Device-to-device>.
- [29] Z. Li, F. Gabor και K. Koufos , «Device-to-device (D2D) communications,» June 2016.
- [30] «ericsson.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2014/7/d2d-communications---what-part-will-it-play-in-5g>.
- [31] «wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive\\_radio](https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio).
- [32] «TechTarget,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/radio-access-network-RAN>.
- [33] [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://wiki.cas.mcmaster.ca/index.php/Cloud\\_Computing](http://wiki.cas.mcmaster.ca/index.php/Cloud_Computing).
- [34] «semanticsscholar.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/TelcoFog%3A-A-Unified-Flexible-Fog-and-Cloud-for-5G-Vilalta-L%C3%B3pez/bfa25fd2dae1aaeba18bce2857b6d7d893b93fb5/figure/0>.
- [35] «ScienceDirect,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/millimeter-wave>.
- [36] «EETT,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic\\_Communications/Antennas\\_EMR/health/BaseStationRdt/GRNetworks/](https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Antennas_EMR/health/BaseStationRdt/GRNetworks/).
- [37] «openbusiness,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://openbusiness.ellak.gr/2020/05/13/meleti-gia-tin-antagonistikotita-tis-psifiakis-ikonomias-stin-ellada-apo-tin-epitropi-antagonismou/>.
- [38] «EETT,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic\\_Communications/Telecoms/Numbering/Portablenumbers/statistics.html](https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Telecoms/Numbering/Portablenumbers/statistics.html).
- [39] «Η σημασία των κινητών επικοινωνιών και της ευρυζωνικότητας στο νέο αναπτυξιακό πρότυπο,» FOUNDATION FOR ECONOMIC & INDUSTRIAL RESEARCH, 2019.
- [40] «acci,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://acci.gr/wp-content/uploads/2022/02/5G\\_15012021\\_SYNOPSISMELETIS\\_PROSCHEIDIO\\_F-1286115354.pdf](https://acci.gr/wp-content/uploads/2022/02/5G_15012021_SYNOPSISMELETIS_PROSCHEIDIO_F-1286115354.pdf).

- [41] «adminportal,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
[http://adminportal.acci.gr/images/5G\\_15012021\\_SYNOPSISMELETIS\\_PROSCHE\\_DIO\\_F-1286115354.pdf](http://adminportal.acci.gr/images/5G_15012021_SYNOPSISMELETIS_PROSCHE_DIO_F-1286115354.pdf).
- [42] «wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/6G\\_\(network\)](https://en.wikipedia.org/wiki/6G_(network)).
- [43] W. Saad, M. Bennis και M. Chen, «A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems,» July 2019.
- [44] H. Tataria, A. F. Molisch και H. Sjoland, «6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights and opportunities,» July 2021.
- [45] «telecomtv.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.telecomtv.com/content/6g/the-most-popular-6g-stories-of-2021-43216/>.
- [46] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_function\\_virtualization](https://en.wikipedia.org/wiki/Network_function_virtualization).
- [47] «Etsi.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.etsi.org/technologies/nfv>.
- [48] «techplayon.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.techplayon.com/network-function-virtualization-nfv-architecture/>.
- [49] «Geeksforgeeks.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-sdn-and-nfv/>.
- [50] «sdxcentral.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.sdxcentral.com/articles/contributed/nfv-and-sdn-whats-the-difference/2020/03/>.
- [51] «techtargget.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.techtargget.com/searchnetworking/definition/NFV-MANO-network-functions-virtualization-management-and-orchestration>.
- [52] «Networkcomputing,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.networkcomputing.com/networking/5-nfv-benefits-trends-driving-them>.
- [53] «optanix,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.optanix.com/pros-and-cons-of-network-function-virtualization-in-a-nutshell/>.
- [54] «semanticsscholar.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Network-Slicing-for-5G-with-SDN%2FNFV%3A-Concepts%2C-and-Ordonez-Lucena-Ameigeiras/5c61431e479245b1235b30de20aa89ebc188189c>.
- [55] «Capital expenditure,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Capital\\_expenditure](https://en.wikipedia.org/wiki/Capital_expenditure).
- [56] «Operating expense,» [Ηλεκτρονικό]. Available:

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Operating\\_expense](https://en.wikipedia.org/wiki/Operating_expense).
- [57] C. Bouras, P. Ntarzanos και A. Papazois , «Cost Modeling for SDN/NFV Based Mobile 5G,» 2016.
- [58] C. Bouras, S. Kokkalis , A. Kollia και A. Papazois, «Techno-economic analysis of MIMO & DAS in 5G,» 2018.
- [59] C. Bouras, A. Kollia και A. Papazois, «Techno-economic analysis of cognitive radio models in 5G networks,» 2020.
- [60] «greece,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1>.
- [61] «EETT,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
[https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic\\_Communications/Telecoms/Numbering/Portablenumbers/statistics.html](https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Telecoms/Numbering/Portablenumbers/statistics.html).
- [62] M. Masoudi, S. Sofia Lisi και C. Cavdar, «Cost-effective Migration towards Virtualized,» March 2020.
- [63] C. M. R. Institute, «C-RANThe Road Towards Green RAN,» October 2011.
- [64] A. Marotta και L. Correia, «Cost-effective joint optimisation of BBU placement and fronthaul deployment in brown-field scenarios».
- [65] S. Saeed Jaffer, A. Hussain και Mirza Jawad, «A low cost PON-FSO based fronthaul solution for 5G CRAN architecture».
- [66] M. Masoudi\*, S. Lisi\* και C. Cavdar\*, «Cost-effective Migration towards Virtualized».
- [67] A. Checko, H. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. Berger και L. Dittmann, «Cloud RAN for Mobile Networks - a TechnologyOverview,» 2014.
- [68] I. S. TOGNISSE, A. D. KORA και J. DEGILA, «Cloud-RAN And Coverage Gap in Rural Areas».
- [69] «Ericsson,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-nr-ran-and-transport-choices-that-minimize-tco>.
- [70] H. da Silva και L. M. Correia, «Design of C-RAN Fronthaul for Existing LTE».
- [71] «Blueplanet,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.blueplanet.com/resources/What-is-NFV-prx.html>.
- [72] «telecomtv.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.telecomtv.com/content/6g/the-most-popular-6g-stories-of-2021-43216/>.