



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΒΙΟΙΑΤΡΙΚΗ**

**«ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ  
ΜΕΓΑΛΟΥ ΟΓΚΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ»**

**Δίκτυα 5ης Γενιάς  
Τεχνολογίες Δικτύωσης καθοριζόμενες από το Λογισμικό &  
Εικονικοποίησης δικτυακών λειτουργιών**

**ΚΑΛΥΒΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Επιβλέπων**

**ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**Λαμία, 2018**

«Υπεύθυνη Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης»

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, και γνωρίζοντας τις συνέπειες της λογοκλοπής, δηλώνω υπεύθυνα και ενυπογράφως ότι η παρούσα εργασία με τίτλο **«Δίκτυα 5ης Γενιάς Τεχνολογίες Δικτύωσης καθοριζόμενες από το Λογισμικό & Εικονικοποίησης δικτυακών λειτουργιών – 5G Networks – SDN & NFV Technologies»** αποτελεί προϊόν αυστηρά προσωπικής εργασίας και όλες οι πηγές από τις οποίες χρησιμοποίησα δεδομένα, ιδέες, φράσεις, προτάσεις ή λέξεις, είτε επακριβώς (όπως υπάρχουν στο πρωτότυπο ή μεταφρασμένες) είτε με παράφραση, έχουν δηλωθεί κατάλληλα και ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική ναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο ΔΗΛΩΝ

ΚΑΛΥΒΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Λαμία 20-3-2018

**Τριμελής Επιτροπή:**

Σταμούλης Γεώργιος

Λουκόπουλος Αθανάσιος

Κοζύρη Μαρία

**Επιστημονικός Σύμβουλος:**

Τζιρίτας Νικόλαος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το 5G ήρθε να εκφράσει την ανθρώπινη ανάγκη για σύνδεση με όλους, με τα πάντα, οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Αυτό δημιουργεί πολλές προκλήσεις όσον αφορά την απαιτούμενη χωρητικότητα, τη χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές κρίσιμες στο χρόνο, τη διαχείριση του τεράστιου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών, την ετερογένεια των συστημάτων, τις απαιτούμενες υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων για επαυξημένη πραγματικότητα και καλύτερη QoE, τη διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων, την ενεργειακή απόδοση, καθώς επίσης και τις ανησυχίες για την ασφάλεια και την ιδιωτική ζωή. Ως εκ τούτου, πρέπει να διερευνηθούν νέοι αρχιτεκτονικοί σχεδιασμοί, καθώς οι τρέχουσες υποδομές κινητής επικοινωνίας και Διαδικτύου δεν είναι σε θέση να χειριστούν αυτές τις αυστηρές απαιτήσεις εξαιτίας της ακαμψίας τους, της εξάρτησης από το υλικό και της στατικής διαμόρφωσης.

Οι επερχόμενες προκλήσεις απαιτούν νέες επαναστατικές τεχνολογίες που θα επιτρέπουν την ευελιξία, τη δυναμική και τη δυνατότητα ρύθμισης του δικτύου. Απαιτείται ένας πλήρης μετασχηματισμός που προσθέτει νοημοσύνη και προγραμματισμό σε όλο το νέο δίκτυο.

Το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας αφορά τις κύριες τεχνολογίες που επιτρέπουν την ανάπτυξη του 5G. Περιγράφουμε σε βάθος τις δύο αναδυόμενες αρχιτεκτονικές του SDN σε συνδυασμό με το NFV θεωρώντας ότι έχουν τη δύναμη να υπερκεράσουν και να αντιμετωπίσουν την πρόσθετη πολυπλοκότητα των μελλοντικών δικτύων.

Στην ενότητα 1 παραθέτουμε τις απαιτήσεις των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς καθώς και τις βασικές υπηρεσίες και περιπτώσεις χρήσεις.

Στην ενότητα 2 περιγράφουμε τις υποψήφιες τεχνολογίες που θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην οικοδόμηση των δικτύων 5G. Άλλωστε ένα κράμα τεχνολογιών θα συνδράμει στην ικανοποίηση των απαιτήσεων κατά περίπτωση. Τεχνολογίες όπως massive MIMO, mmWave, επικοινωνία D2D, γνωσιακά δίκτυα, DAS, Femtocells, VLC και Opportunistic networks θα μελετηθούν στην ενότητα αυτή.

Στην ενότητα 3 περιγράφουμε τις αρχιτεκτονικές που υποστηρίζουν τα 5G δίκτυα. Τα Ultra Dense Networks και οι αρχιτεκτονικές βασισμένες στο Cloud, θα συνδράμουν καθοριστικά στο σχεδιασμό των μελλοντικών δικτύων. Επίσης μελετάμε αρχιτεκτονικές με επίκεντρο το χρήστη και τη συσκευή, αρχιτεκτονικές που ενσωματώνουν την έννοια της Τεχνητής Νοημοσύνης καθώς και σχεδιαστικές αρχές που σκοπό έχουν την ενεργειακή απόδοση των 5G δικτύων.

Στην ενότητα 4 γίνεται αναλυτική περιγραφή του πλαισίου λειτουργίας της αρχιτεκτονικής της Εικονικοποίησης των Δικτυακών Λειτουργιών (Network Function Virtualization – NFV) που αποτελεί βασικό πυλώνα στην μείωση των κεφαλαιακών και λειτουργικών δαπανών (CAPEX – OPEX) για τη δημιουργία και λειτουργία των υποδομών των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Στην ενότητα 5 μελετάμε την αρχιτεκτονική των Δικτύων Καθοριζόμενων από Λογισμικό (Software Defined Networks – SDN). Περιγράφουμε τα συστατικά μέρη και τον τρόπο λειτουργίας αυτών. Εκτενής περιγραφή γίνεται στο πρωτόκολλο OpenFlow το οποίο αποτελεί βασικό εργαλείο για τον προγραμματισμό των δικτύων.

Στην ενότητα 6 περιγράφουμε τη σχέση SDN & NFV καθώς και την ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα 5G. Περιγράφουμε και συγκρίνουμε 16 προτάσεις που έχουν κατατεθεί τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από το χώρο της βιομηχανίας της πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην αρχιτεκτονική του SoftAir που αποτελεί ίσως την πιο ολοκληρωμένη πρόταση οικοδόμησης 5G δικτύου τόσο από την άποψη της πρόσβασης όσο και του δικτύου κορμού. Στο τέλος της ενότητας περιγράφουμε και αναλύουμε τη βασική αρχή του τεμαχισμού δικτύου. Εξετάζουμε τόσο το λειτουργικό πλαίσιο όσο και τις περιπτώσεις χρήσεις που θα έχουν καθοριστικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Τέλος στην ενότητα 7 αναφέρουμε τα συμπεράσματα της εργασίας μας.

**Λέξεις κλειδιά:** 5G, Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό (SDN), πρωτόκολλο OpenFlow, Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (NFV), Τεμαχισμός δικτύου (Network slicing)

## ABSTRACT

5G has come to cover the need that has been created in humans for uninterrupted connection with everyone. This creates many challenges. Some of these are: the capacity of the network, the delay of data transmission, the management of the very large number of devices connected to the Internet, as well as the energy efficiency. For this reason, new architectures have to be sought to build the new generation of wireless networks, since today's mobile and Internet infrastructure can't cope with stringent requirements due to their rigidity, material dependency and static configuration.

The upcoming challenges require new revolutionary technologies that allow for flexibility, dynamic and network configurable capabilities. A complete transformation is required that adds intelligence and programmability to the whole new network.

The subject of this master thesis concerns the main technologies that allow the development of 5G. We describe in depth the two emerging architectures, SDN in combination with NFV, considering that they have the power to overcome and address the additional complexity of future networks.

In Section 1 we list the requirements of 5th generation networks as well as basic services and use cases.

In Section 2, we describe the candidate technologies that will play a key role in building 5G networks. Besides, an alloy of technologies will help meet the requirements on a case by case basis. Technologies such as massive MIMO, mmWave, D2D communication, cognitive networks, DAS, femtocells, VLC and Opportunistic networks will be studied in this section.

In Section 3, we describe the architectures that support 5G networks. Ultra Dense Networks and Cloud-based architectures will be critical in designing future networks. We also study user centric and device centric architectures; architectures that incorporate the concept of Artificial Intelligence, and design principles for the energy efficiency of 5G networks.

Section 4 provides a detailed description of the Network Function Virtualization (NFV) architecture framework that is the key pillar of CAPEX-OPEX for the creation and operation of 5th generation network infrastructures.

In Section 5 we study the architecture of Software Defined Networks (SDN). We describe the components and how they work. Extensive description is made to the OpenFlow protocol, which is a basic tool for network programming.

In Section 6 we describe the SDN & NFV relationship as well as their integration into 5G networks. We describe and compare 16 proposals submitted both by the academic community and by the IT and telecommunications industry. Particular emphasis is given to the architecture of SoftAir, which is probably the most complete proposal for building a 5G network in terms of access as well as the core network. At the end of the section, we describe and analyze the basic principle of network slicing. We look at both the operating framework and the use cases that will play a key role in future 5th generation networks.

Finally, in Section 7, we report the conclusions of our work.

**Keywords:** 5G, SDN, NFV, Openflow, Network slicing

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Σταμούλη Γεώργιο για την δυνατότητα την οποία μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο σύγχρονο, ενδιαφέρον και σημαντικό θέμα όπως τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Δρ. Τζιρίτα Νικόλαο ο οποίος μου παρείχε άρτια επιστημονική καθοδήγηση, ενθάρρυνση και πολύτιμες συμβουλές, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Λουκόπουλο Αθανάσιο για τη βοήθειά του και τις χρήσιμες παρατηρήσεις, προτάσεις και συμβουλές του κατά τη φάση ολοκλήρωσης συγγραφής της εργασίας μου.

Άφησα για το τέλος τους δικούς μου ανθρώπους, την οικογένεια μου και τους φίλους μου, των οποίων η προσφορά όλα αυτά τα χρόνια είναι πιθανότατα και η σημαντικότερη όλων.

# Πίνακας περιεχομένων

<b>1. ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ - 5G NETWORKS</b> .....	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα 5ης Γενιάς .....	1
1.2 Περιορισμοί των συμβατικών κυψελοειδών συστημάτων .....	2
1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις για την υλοποίηση του 5G.....	3
1.4 Προκλήσεις στην ανάπτυξη των δικτύων 5G .....	7
1.5 Διαδικασία οικοδόμησης των 5G δικτύων .....	11
1.6 Νέες υπηρεσίες που αναμένεται να ικανοποιηθούν από την 5G τεχνολογία.....	12
1.7 Βασικές χρήσεις και δυνατότητες του 5G .....	15
<b>2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ</b> .....	<b>19</b>
2.1 Massive MIMO .....	20
2.1.1 Ορισμός.....	20
2.1.2 Πλεονεκτήματα Massive MIMO .....	21
2.1.3 Προκλήσεις Massive MIMO .....	21
2.2 mmWave.....	21
2.2.1 Ορισμός και αναγκαιότητα.....	21
2.2.2 Πλεονεκτήματα mmWave.....	22
2.2.3 Προκλήσεις mmWave.....	22
2.3 Επικοινωνία D2D (Device to Device communication) .....	24
2.4 Γνωσιακά Δίκτυα .....	27
2.4.1 Κύρια χαρακτηριστικά γνωσιακού δικτύου .....	28
2.4.2 Αρχιτεκτονική Κύριου και Γνωσιακού Δικτύου.....	28
2.4.3 Τύποι πρόσβασης γνωσιακού χρήστη .....	29
2.5 Distributed Antenna System - DAS .....	30
2.5.1 Τεχνολογία & Αρχιτεκτονική .....	31
2.5.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα .....	32
2.6 Femtocells.....	32
2.6.1 Οφέλη από τη χρήση τους.....	33
2.6.2 Τεχνολογίες Femtocell .....	34
2.7 Ασύρματη Επικοινωνία Ορατού Φωτός (VLC).....	35
2.7.1 Σύγκριση VLC με RF Επικοινωνίες .....	36
2.8 Opportunistic Networks.....	37
2.8.1 Οι φάσεις των OppNets.....	39
2.8.2 Η δομή του OppNet .....	40
2.8.3 Εφαρμογή των OppNets.....	41
<b>3. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ</b> .....	<b>42</b>
3.1 Αρχιτεκτονική Πύκνωσης Δικτύου - Ultra Dense Deployments .....	43
3.1.1 Πύκνωση του δικτύου και αποφόρτιση (Extreme Densification and Offloading).....	45

3.1.2 Περιγραφή αρχιτεκτονικής UDN.....	47
3.1.3 Οφέλη και προκλήσεις των UDN .....	50
3.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στο Cloud – Cloud based architectures .....	51
3.2.1.Mobile Cloud Computing.....	52
3.2.2 Αρχιτεκτονική C-RAN.....	65
3.3 Αρχιτεκτονική βασισμένη στην Τεχνητή Νοημοσύνη - Artificial Intelligence based architecture ...	72
3.4 Αρχιτεκτονική Ενεργειακής Απόδοσης – Energy Efficiency Architecture.....	76
3.5 UDN Αρχιτεκτονική με επίκεντρο το χρήστη - User Centric Ultra Dence Network (UUDN) .....	80
3.6 Αρχιτεκτονική με επίκεντρο τη συσκευή - Device-centric architecture.....	84
<b>4. NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION (NFV).....</b>	<b>86</b>
4.1 Γενικό Πλαίσιο Αρχιτεκτονικής .....	88
4.2 Αναλυτικό Πλαίσιο Αρχιτεκτονικής.....	91
4.3 Ανάλυση των VNFs .....	95
4.4 Πεδία αξιοποίησης της τεχνολογίας NFV .....	100
4.5 NFV & Business Model .....	102
4.6 Τα οφέλη του NFV.....	104
<b>5. SOFTWARE DEFINED NETWORKS.....</b>	<b>106</b>
5.1 Οι περιορισμοί των παραδοσιακών δικτύων.....	106
5.2 Δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό (SDN).....	108
5.3 Δομή του SDN .....	110
5.4 Το πρωτόκολλο Openflow.....	113
5.4.1 Openflow ελεγκτής (controller).....	113
5.4.2 Openflow μεταγωγέας (OF switch) .....	114
5.4.2.1 Θυρες Openflow (Openflow Ports).....	115
5.4.2.2 Ασφαλές Κανάλι.....	116
5.4.2.3 Πίνακες και Κανόνες Openflow (Openflow tables and flow entries) .....	117
5.4.2.4 Matching (Πεδίο ταυτοποίησης πακέτων).....	118
5.4.2.5 Table-Miss (Μη ταυτοποίηση πακέτων) .....	120
5.4.2.6 Group & Meter Tables .....	120
5.4.2.7 Instructions (Οδηγίες) .....	121
5.4.2.8 Actions (Δράσεις) .....	122
5.5 Λειτουργία SDN με τη χρήση Openflow.....	123
5.6 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις του SDN .....	124
5.7 Περιπτώσεις χρήσης του SDN στα mobile δίκτυα.....	126
<b>6. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ SDN &amp; NFV ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ.....</b>	<b>132</b>
6.1 OpenRoads.....	133
6.2 OpenRadio .....	133
6.3 SoftCell.....	134
6.4 CellSDN .....	135

6.5 SoftRAN .....	136
6.6 ADRENALINE.....	138
6.7 DOCOMO .....	139
6.8 SK-Telecom.....	140
6.9 CONTENT.....	141
6.10 OpenRAN .....	142
6.11 Άλλες προτεινόμενες αρχιτεκτονικές .....	144
6.12 SoftAir .....	146
6.12.1 Η Αρχιτεκτονική .....	146
6.12.2 Εικονικοποίηση δικτύου.....	150
6.12.3 SoftAir management tools .....	151
6.13 Network Slicing .....	155
6.13.1 Υλοποίηση του Network Slicing - Ο ρόλος του SDN .....	159
6.13.2 Ενσωμάτωση του SDN στην αρχιτεκτονική αναφοράς NFV.....	163
6.13.3 Συνεργασία SDN-NFV για το Network Slicing .....	165
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>168</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>172</b>

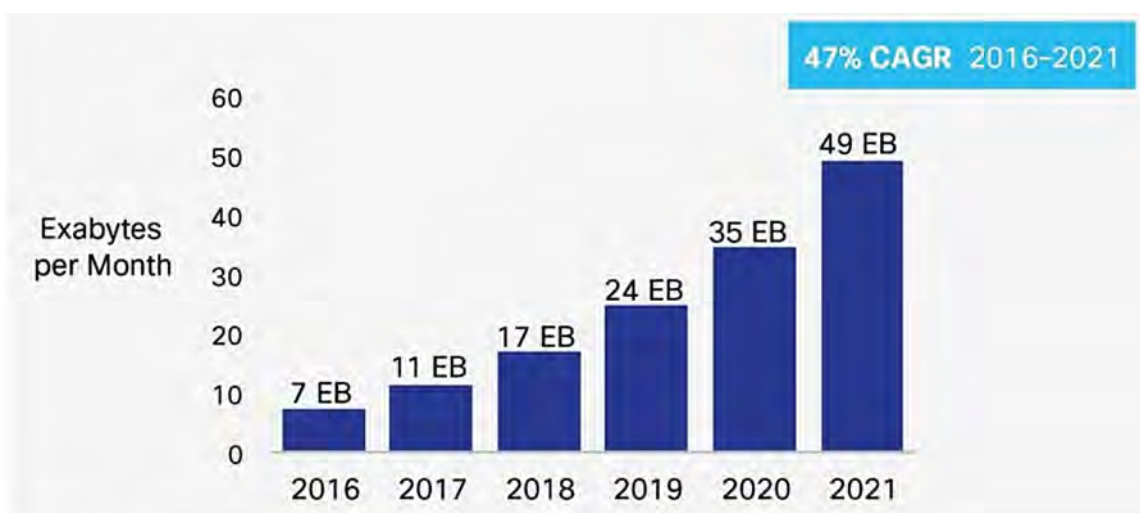


# 1. ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ - 5G NETWORKS

## 1.1 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα 5ης Γενιάς

Ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των κινητών έξυπνων συσκευών (**Devices**), του όγκου δεδομένων (**Data**) και της αύξησης του ρυθμού διακίνησης δεδομένων (**Data transfer rate**) – increase of **3D** - μας υποχρεώνουν να δούμε υπό διαφορετικό πρίσμα τα 5<sup>ης</sup> γενιάς cellular δίκτυα. Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς ή αλλιώς τα 5G δίκτυα, με μια πρώτη ανάγνωση θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από τρία βασικά γνωρίσματα: α) αδιάκοπη συνδεσιμότητα, β) ελάχιστο latency και γ) πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων [1]. Υπολογίζεται ότι το 2021 θα έχουμε περισσότερες από 25 δισεκατομμύρια συσκευές οι οποίες σκοπεύουν να χρησιμοποιούν τα cellular δίκτυα για τη διασύνδεσή τους [2]. Αυτό θα αποτελέσει έκρηξη στον όγκο των διακινούμενων δεδομένων (data traffic) και θα οδηγήσει σε κατάρρευση του δικτύου, αν παραμείνει με τη σημερινή του μορφή.

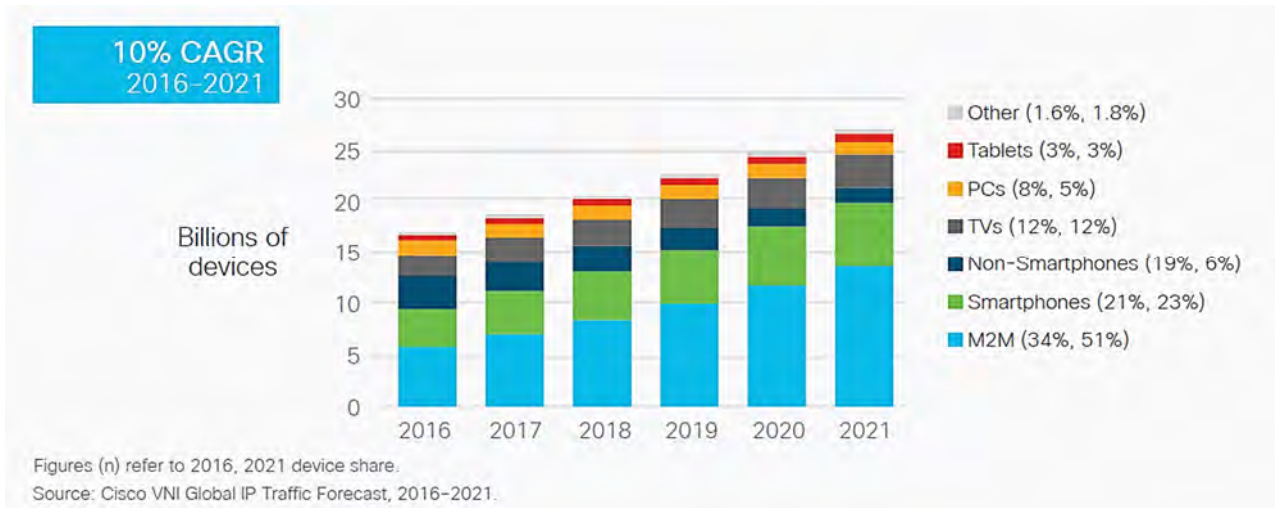
Σύμφωνα με το Cisco Visual Networking Index του Φεβρουαρίου 2017, η κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να αυξηθεί σε 49 exabytes ανά μήνα έως το 2021, δηλαδή επτά φορές μεγαλύτερη από το 2016 και με ετήσιο ρυθμό αύξησης 47% (Σχήμα 1-1).



Source: Cisco VNI Mobile, 2017

*Σχήμα 1-1. Πρόβλεψη της Cisco για την κυκλοφορία Κινητών Δεδομένων ανά μήνα μέχρι το 2021 [3]*

Το παραπάνω γεγονός θα μας οδηγήσει στο να εξετάσουμε διαφορετικές και προσανατολισμένες στο software τεχνικές, για να υλοποιήσουμε τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η ανάγκη αυτή φαίνεται και από το γεγονός ότι το 5G δεν θα είναι απλά μια επέκταση του 4G - όπως οι προηγούμενες γενιές των cellular δικτύων - αλλά θα εισαγάγει πολλές νέες τεχνολογίες όπως τα Network Function Virtualization (NFV), Software Defined Networking (SDN), cloud-based communication κ.α. Η εποχή του 5G αναμένεται να φέρει επαναστατικές αλλαγές στον κόσμο των επικοινωνιών, υποστηρίζοντας πάρα πολύ υψηλές ταχύτητες, πάρα πολύ μικρές καθυστερήσεις, αποδοτική εκμετάλλευση τόσο του φάσματος, όσο και της ενέργειας του δικτύου, ενώ θα κάνει πραγματικότητα και το λεγόμενο Internet of Things (IoT) [4] [5]. Το IoT θα συνδέει τις έξυπνες συσκευές στο Internet. Μπορεί να εγκαθιδρύσει την ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ των συσκευών και πηγαίνει την διασύνδεση των συσκευών σε άλλο επίπεδο. Η Cisco εκτιμά, ότι το IoT θα αποτελείται περίπου από 27,1 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες στο Internet έως το 2021 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-2 [2].



**Σχήμα 1-2. Παγκόσμια αύξηση συσκευών και συνδέσεων**

Το 5G θα αποτελέσει το μέσο το οποίο θα εξασφαλίσει ένα καθολικό περιβάλλον επικοινωνίας και θα ανοίξει το δρόμο για την ενασχόληση με νέες καινοτομίες στο χώρο των μεταφορών, της ενέργειας και των αυτοματισμών. Αυτά θα πραγματοποιηθούν, σχεδιάζοντας τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς με δυνατότητες όπως flexibility, programmability, μειωμένα κεφαλαιακά και λειτουργικά κόστη (CAPEX, OPEX), καθώς και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, σε σχέση με τα 4G cellular δίκτυα, τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, σύμφωνα με τον οργανισμό 5G Infrastructure Public Private Partnership (5GPPP) θα πρέπει να ικανοποιούν [6]:

1. 10-100x πλάσιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών.
2. 1000 φορές υψηλότερο εύρος ζώνης ανά περιοχή.
3. 10-100x φορές υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.
4. Latency 1 millisecond.
5. 99.99% διαθεσιμότητα δικτύου.
6. 100% κάλυψη.
7. 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.



**Σχήμα 1-3. Οι κύριοι στόχοι του 5G PPP (πηγή: <https://www.eurescom.eu>) [7]**

## 1.2 Περιορισμοί των συμβατικών κυψελοειδών συστημάτων

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιήσουν τα 5G cellular δίκτυα είναι μεγάλες. Ωστόσο, τι είναι αυτό που καθιστά αδύνατη την ικανοποίησή τους από τα 4G δίκτυα και γιατί μια επέκταση του δικτύου -κατά τα πρότυπα των προηγούμενων γενεών- δεν είναι ικανή για την ικανοποίηση των στόχων [1];

**Δεν υποστηρίζουν τεράστια διακίνηση δεδομένων (bursty data traffic):** Υπάρχουν πολλές εφαρμογές οι οποίες κατά την εκτέλεσή τους μπορούν να στείλουν σήμα, ζητώντας ένα μεγάλο αριθμό πόρων (π.χ. ρυθμό μετάδοσης) για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Όταν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο κατά τη μετάδοση, έχουμε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας της μπαταρίας της

συσκευής χρήστη και επίσης λόγω του bursting υπάρχει ο κίνδυνος να δημιουργηθούν προβλήματα στο δίκτυο κορμού. Επομένως το γεγονός ότι δεν υπάρχει πρόβλεψη στη σηματοδότηση ελέγχου ανάλογα με την κίνηση που δημιουργείται και η απουσία μηχανισμού για δυναμική δέσμευση πόρων ανάλογα με την κίνηση, αποτελεί ένα πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του 5G.

**Μη-βέλτιστη χρησιμοποίηση της επεξεργαστικής ισχύος του σταθμού βάσης:** Στα σημερινά cellular δίκτυα, η επεξεργαστική ισχύς του σταθμού βάσης χρησιμοποιείται μόνο από τους χρήστες που συνδέονται με αυτόν και διαμοιράζεται ομοιόμορφα σε αυτούς. Έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει διακύμανση στην κίνηση που ανατίθεται στους σταθμούς βάσης π.χ. σε κάποιες ώρες τις μέρες κάποιοι σταθμοί μπορεί να έχουν μεγάλη κίνηση ενώ κάποιοι άλλοι να παρουσιάζουν μηδενική κίνηση. Ωστόσο, ανεξαρτήτως της κίνησης σε ένα σταθμό, όλοι οι σταθμοί, καταναλώνουν το ίδιο ποσό ενέργειας πράγμα το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος δικτύου.

**Παρεμβολές μεταξύ των καναλιών:** Τα συμβατικά cellular δίκτυα, χρησιμοποιούν δύο ξεχωριστά κανάλια, ένα για uplink όπου υπάρχει μετάδοση από το χρήστη στο σταθμό βάσης και ένα για downlink που πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία. Ωστόσο η χρήση δύο διαφορετικών καναλιών για έναν χρήστη, δεν αποτελεί βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης μπάντας συχνοτήτων, ενώ το πρόβλημα με την έλλειψη διαθέσιμου φάσματος στα cellular δίκτυα είναι καίριο. Από την άλλη, αν και τα δύο κανάλια λειτουργούν στην ίδια συχνότητα τότε υπάρχει το πρόβλημα των παρεμβολών, πράγμα το οποίο παρεμποδίζει την εγκατάσταση πολλών σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή, που σκοπό έχουν την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου. Ακόμη και στα σημερινά δίκτυα, το διαθέσιμο φάσμα δεν χρησιμοποιείται με το βέλτιστο τρόπο. Επομένως, είναι απαραίτητο για το 5G να υλοποιήσουμε μια μέθοδο πρόσβασης η οποία θα λαμβάνει υπόψη την βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.

**Latency:** Στα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς, για να αποκτήσει ένας χρήστης πρόσβαση στον “καλύτερο” διαθέσιμο σταθμό βάσης, απαιτούνται μερικές εκατοντάδες milliseconds, γεγονός το οποίο δεν εξυπηρετεί το μηδενικό latency που θέλουμε να πετύχουμε στο 5G. Τα μελλοντικά cellular δίκτυα, προορίζονται για να τρέχουν real-time εφαρμογές και υπηρεσίες με διάφορα επίπεδα QoS (όσο αφορά το bandwidth, το latency, τα χαμένα πακέτα κ.α.). Για το λόγο αυτό, τα 5G δίκτυα πρέπει να σχεδιαστούν με zero-latency προοπτική στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό.

### 1.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις για την υλοποίηση του 5G

Το 5G-PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) αποτελεί μια συνεργασία μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της βιομηχανίας και των ερευνητικών ιδρυμάτων στον τομέα των επικοινωνιών, προκειμένου να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στο χώρο των δικτύων 5ης γενιάς που αποτελεί την εξέλιξη των κινητών δικτύων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, το 5G-PPP θα προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, νέες τεχνολογίες καθώς και πρότυπα. Σύμφωνα λοιπόν με το 5GPPP, τα τεχνικά χαρακτηριστικά ή αλλιώς οι στόχοι των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς αναμένεται να είναι οι εξής [6]:

- Αύξηση του όγκου των δεδομένων που διακινούνται μέσω των κινητών δικτύων ανά γεωγραφική περιοχή. Εκτιμάται ότι το ποσό αυτό θα είναι της τάξης του 10TB/s/km<sup>2</sup>.
- Μεγάλη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο. Υπολογίζεται ότι θα έχουμε 1.000.000 συνδεδεμένα τερματικά ανά km<sup>2</sup>.
- Αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, πιάνοντας ταχύτητες από 1-10 Gb/s.
- 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε σχέση με το 2010.
- 80% μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου (OPEX).
- Σημαντική μείωση του latency σε τιμές από 5ms έως 1ms
- Σημαντική μείωση του απαιτούμενου χρόνου δημιουργίας και εγκατάστασης κάποιας υπηρεσίας. Εκτιμάται ότι θα μπορούμε να δημιουργήσουμε εξ' αρχής μια υπηρεσία και να την παραδώσουμε σε λειτουργική μορφή σε λιγότερο από 90 λεπτά.

Η εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών απαιτεί πλήθος βελτιώσεων της υπάρχουσας τεχνολογίας που αφορά το ρυθμό και την καθυστέρηση μετάδοσης αλλά και την αξιοπιστία του συστήματος. Οι νέες απαιτήσεις σύμφωνα με τα παραπάνω θα είναι τεράστιες καθώς η διαχείριση πρωτόγνωρα μεγάλης ποσότητας δεδομένων θα πρέπει να συνοδεύεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση κόστους.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 5G περιγράφονται παρακάτω:

### **1.Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων**

Η μέτρηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων υπήρξε ο σημαντικότερος παράγοντας αξιολόγησης για όλες τις γενιές των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας. Με την εμφάνιση του κινητού Διαδικτύου και των υπηρεσιών του, όπως η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD), η διαδεδομένη κοινή χρήση βίντεο, η εικονική πραγματικότητα που διατίθεται στα κινητά τηλέφωνα, καθώς και ο πολλαπλασιασμός των tablets και των φορητών υπολογιστών που είναι προσβάσιμα σε ασύρματα δίκτυα, καθιστά την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων του κυψελοειδούς δικτύου αναπόφευκτη κινητήρια δύναμη στην αγορά.

Παρόλο που οι τρέχουσες μέγιστες ταχύτητες δεδομένων υποστηρίζουν ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας, υπάρχουν εφαρμογές όπως ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας 4K, παιχνίδια υψηλής ευκρίνειας και περιεχόμενο 3D, τα οποία απαιτούν ακόμα υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων ώστε να παρέχεται ικανοποιητική εμπειρία στους χρήστες. Με αυτές τις αναδυόμενες εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, τα δίκτυα 5G αναμένεται να έχουν μέγιστο ρυθμό δεδομένων περίπου 10 Gbps, που είναι 100 φορές μεγαλύτερος από τα σημερινά δίκτυα. Εκτός από την αύξηση του μέγιστου ρυθμού δεδομένων, ο ρυθμός δεδομένων στα άκρα των κυψελών (cell-edge data rate) που αποτελεί την χειρότερη περίπτωση που αντιμετωπίζουν οι χρήστες, θα πρέπει επίσης να βελτιωθεί στα 100 Mbps, που είναι 100 φορές βελτιωμένος σε σχέση με τα δίκτυα 4G (στα άκρα των κυψελών). Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων είναι μια βέλτιστη εκτίμηση που μπορεί να βιώσει ένας χρήστης. Στην πραγματικότητα, οι επιπτώσεις της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών και της απώλειας μετάδοσης καθιστούν τη μέγιστη τιμή δύσκολα επιτεύξιμη. Επομένως, το επίπεδο του ρυθμού δεδομένων στα άκρα γίνεται πιο σημαντικό από την άποψη του network engineering, καθώς αυτός ο ρυθμός δεδομένων πρέπει να υποστηρίζει περίπου το 95% των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο.

Μια άλλη μετρική που βασίζεται στον ρυθμό δεδομένων που χαρακτηρίζει το δίκτυο είναι η χωρητικότητα της περιοχής, η οποία καθορίζει το συνολικό ρυθμό δεδομένων που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο ανά μονάδα επιφάνειας (unit area). Σύμφωνα με τον ορισμό της, η μονάδα χωρητικότητας επιφάνειας είναι bits ανά δευτερόλεπτο ανά μονάδα επιφάνειας (π.χ. 10 Tbps ανά Km<sup>2</sup>). Αυτή η μετρική αναμένεται να αυξηθεί 100 φορές στα 5G δίκτυα σε σύγκριση με το δίκτυο 4G. Αυτή η ζήτηση για αύξηση του ρυθμού δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με τεχνικές όπως επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmwaves), μαζικά συστήματα MIMO (massive MIMO), ασύρματη δικτύωση που καθορίζεται από το λογισμικό (wireless software defined networking) και άλλες τεχνολογίες που αναλύονται σε επόμενες ενότητες.

### **2. Χαμηλή καθυστέρηση**

Η καθυστέρηση στο επίπεδο δεδομένων στο δίκτυο LTE είναι περίπου 15 χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms). Ωστόσο, για τις πρόσφατα αναδυόμενες εφαρμογές όπως το tactile Internet (Διαδίκτυο “Αφής”), η εικονική πραγματικότητα, το gaming με πολλούς παίκτες, τη διαδεδομένη κοινή χρήση βίντεο υψηλής ευκρίνειας κ.α. που αναμένεται να υποστηρίξουν τα δίκτυα 5G, η καθυστέρηση θα πρέπει να μειωθεί σημαντικά σε περίπου 1 ms. Για παράδειγμα, το tactile Internet είναι μια πρόσφατα αναπτυγμένη εφαρμογή όπου το ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιείται για εφαρμογές ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Η απαιτούμενη καθυστέρηση για τέτοιες εφαρμογές καθορίζεται από την τυπική αλληλεπίδραση για τη διευθυνσιοδότηση και τον έλεγχο πραγματικών και εικονικών αντικειμένων και πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλή.

Αν και τα σημερινά smartphones έχουν οθόνες αφής ως κύριο interface, οι μελλοντικές συσκευές θα ενσωματώσουν διάφορες άλλες διεπαφές όπως απτική (haptic), οπτική και ακουστική είσοδο και ανατροφοδότηση, οι οποίες θα προσφέρουν έναν νέο τρόπο αλληλεπίδρασης με το online περιβάλλον για εφαρμογές στην εικονική πραγματικότητα, την υγειονομική περίθαλψη, τον αθλητισμό κλπ. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο με τον χρήστη και οποιαδήποτε καθυστέρηση στο σύστημα θα προκαλέσει υποβάθμιση στην εμπειρία του χρήστη, οπότε η καθυστέρηση είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στο 5G.

Μια άλλη εφαρμογή που αναμένεται να υποστηρίξουν τα δίκτυα 5G είναι οι επικοινωνίες τύπου μηχανής (MTC) όπου οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους αυτόματα. Αυτός ο τύπος επικοινωνίας απαιτεί επίσης εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση για εφαρμογές όπως η επικοινωνία οχήματος με όχημα (vehicle-to-vehicle communication). Το METIS project προτείνει ότι η αποτελεσματικότητα και η ασφάλεια της κυκλοφορίας πρέπει να είναι μια τυπική περίπτωση δοκιμής εφαρμογής όπου η καθυστέρηση είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση του συστήματος. Ένα τυπικό σενάριο που παρουσιάζεται στο METIS είναι τα ευφυή συστήματα κυκλοφορίας στα οποία τα οχήματα απαιτούν έγκαιρη ανταλλαγή δεδομένων για την αποφυγή ατυχημάτων. Η απαίτηση για χαμηλή καθυστέρηση θα βελτιώσει επίσης την εμπειρία των χρηστών για τις υπάρχουσες εφαρμογές, όπως το gaming για πολλούς χρήστες. Αυτή η απαίτηση για τη μείωση της καθυστέρησης απαιτεί τεχνολογική καινοτομία στον σχεδιασμό των δικτύων, καθώς και μια ευέλικτη αρχιτεκτονική στα υψηλότερα επίπεδα του δικτύου, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω ασύρματης δικτύωσης καθοριζόμενης από το λογισμικό (SDN).

### **3. Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας**

Τα δίκτυα 5G αναμένεται να υποστηρίξουν τις συσκευές IoT που είναι βασικά μερικοί αισθητήρες που συλλέγουν πληροφορίες σχετικά με ένα περιβάλλον και τις μεταδίδουν σε ένα κεντρικό server. Αυτές οι συσκευές είναι ως επί το πλείστον χαμηλής ισχύος, χαμηλού κόστους και με διάρκεια ζωής αρκετών ετών. Δεδομένου ότι οι συσκευές αυτές δεν συνδέονται πάντοτε με τον σταθμό βάσης (BS) και ενεργοποιούνται μόνο περιστασιακά, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους δεν μπορεί να επιτρέψει τη διαδικασία συγχρονισμού με το σταθμό βάσης κάθε στιγμή, καθώς το βήμα συγχρονισμού κοστίζει περισσότερη ενέργεια από αυτή της πραγματικής μετάδοσης δεδομένων. Αυτή η συγκεκριμένη περίπτωση στο IoT απαιτεί ότι η τεχνική ασύρματης πρόσβασης για το 5G υποστηρίζει μια χαλαρή σύνδεση ή τον μη συνεχή συγχρονισμό. Επιπλέον, αυτός ο τύπος υπηρεσίας θέτει επίσης περιορισμούς στην υπολογιστική ισχύ για αποκωδικοποίηση, το μήκος της κεφαλίδας, το σχήμα προώθησης πακέτων κ.λπ.

Με τον αυξανόμενο αριθμό συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών, ο αριθμός των σταθμών βάσης που απαιτούνται για την υποστήριξη αυτών των συσκευών θα κλιμακωθεί επίσης. Λόγω της ανάπτυξης μικρών κυψελών, οι σταθμοί βάσης θα πυκνώσουν. Αυτή η προβλεπόμενη τάση απαιτεί οι σταθμοί βάσης να είναι ενεργειακά αποδοτικοί, δεδομένου ότι ακόμη και μια μικρή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης θα μεταφραστεί σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα.

### **4. Υψηλή κλιμακωσιμότητα**

Για να υποστηριχτεί ο αυξανόμενος αριθμός των κινητών συσκευών που συνδέονται με το ασύρματο δίκτυο και που επικοινωνούν μεταξύ τους, η επεκτασιμότητα του δικτύου γίνεται ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό της επόμενης γενιάς δικτύου ασύρματης επικοινωνίας. Η αύξηση του αριθμού των συσκευών εντείνεται περαιτέρω από τις μυριάδες συσκευών IoT και τις τεχνολογίες επικοινωνίας οχήματος προς όχημα που αναμένεται να αυξηθούν στο κυψελοειδές δίκτυο 5G.

Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας, αναμένεται ότι ο αριθμός των συσκευών IoT που θα συνδέονται με το κυψελοειδές δίκτυο θα ξεπεράσει τα 27 δισεκατομμύρια μέχρι το 2021. Συνεπώς, απαιτείται ένα εξαιρετικά κλιμακώσιμο δίκτυο που μπορεί να προσαρμόσει αποτελεσματικά αυτήν την έκρηξη σε αριθμό συσκευών. Η υψηλή κλιμακωσιμότητα είναι επίσης

σημαντική για την επίδοση των σημερινών και αναδυόμενων εφαρμογών, όπως οι υπηρεσίες IoT, τα αυτόνομα οχήματα κλπ. Στην περίπτωση αυτόνομων οχημάτων, η άμεση επικοινωνία μεταξύ τους σε μεγάλες πυκνότητες κυκλοφορίας απαιτεί την κλιμακωσιμότητα του κυψελοειδούς δικτύου. Στην πραγματικότητα, η κλιμάκωση ενός δικτύου απαιτεί πλήρη αναβάθμιση σε όλα τα επίπεδα του. Στη φυσική στρώση, θα πρέπει να υπάρχουν αρκετοί πόροι φάσματος συχνοτήτων για τη στήριξη μεγάλου όγκου σηματοδότησης και μετάδοσης δεδομένων. Η υποδομή του δικτύου θα πρέπει επίσης να είναι σε θέση να ελέγχει την μεταδιδόμενη ισχύ προσαρμοστικά για την εκτίμηση του καναλιού και να ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές.

Η κλιμακωσιμότητα επηρεάζει επίσης το σχεδιασμό αποτελεσματικών πρωτοκόλλων ελέγχου πρόσβασης (π.χ. MAC) για την προσαρμογή μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών. Τα πρωτόκολλα προγραμματισμού και πολυεκπομπής που βασίζονται σε γεωγραφικές τοποθεσίες των χρηστών μπορούν να μειώσουν σημαντικά την καθυστέρηση και να αυξήσουν τη φασματική απόδοση. Στα δίκτυα και τα επίπεδα μεταφοράς, η υψηλή κλιμακωσιμότητα απαιτεί από τα δίκτυα να αναπτύξουν αλγόριθμους ευφυούς δρομολόγησης για τεράστιες ομάδες χρηστών για την παροχή γρήγορων και αξιόπιστων συνδέσεων. Για χρήστες με υψηλή κινητικότητα, το δίκτυο οχημάτων θα πρέπει επίσης να ικανοποιεί την κλιμάκωση, παρέχοντας αποτελεσματικές και αξιόπιστες μεταπομπές (handoffs) κατά μήκος των κατευθύνσεων των κινούμενων διαδρομών, καθώς και σχεδιασμό αλγορίθμων δυναμικής δρομολόγησης με βάση την πρόβλεψη κίνησης του χρήστη. Η κλιμακωσιμότητα στα δίκτυα θα επιτευχθεί με αλλαγές σε όλα τα επίπεδα. Από το τμήμα της ασύρματη πρόσβασης μέχρι τα δίκτυα κορμού, χρησιμοποιώντας ασύρματα δίκτυα καθοριζόμενα από το λογισμικό (SDN) και τεχνολογίες εικονικοποίησης (NFV).

## **5. Βελτιωμένη συνδεσιμότητα και αξιοπιστία**

Εκτός από τις προαναφερθείσες απαιτήσεις, η κάλυψη και η αποδοτικότητα της μετάδοσης καθώς και των μεταπομπών (handoffs) θα πρέπει επίσης να βελτιωθούν για καλύτερη εμπειρία χρήστη, ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση και εκμετάλλευση του φάσματος χιλιοστομετρικών κυμάτων. Με την αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών, καθώς και την εισαγωγή των femtocells και των picocells, ο αριθμός των μεταπομπών που θα χειρίζεται ο σταθμός βάσης θα αυξηθεί τουλάχιστον κατά δύο τάξεις μεγέθους. Για να υποστηριχθεί αυτή η απαίτηση, απαιτούνται νέοι αλγόριθμοι μεταπομπών (handover algorithms) και τεχνικές που παρέχουν βελτιωμένη κάλυψη στις περιοχές που βρίσκονται στα άκρα των κυψελών.

Ένα άλλο σχετικό ζήτημα είναι οι ανησυχίες σχετικά με την εξακρίβωση της γνησιότητας και την προστασία της ιδιωτικής ζωής που σχετίζεται με τις μεταπομπές. Η καθυστέρηση επικοινωνίας με τον διακομιστή ελέγχου ταυτότητας για κάθε handover θα είναι κάποια εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου, τα οποία θα ήταν ανεπίτρεπτα για εφαρμογές 5G. Επίσης, δεδομένης της χρήσης ζωνών υψηλότερης συχνότητας σε χιλιοστά κύματος, η περιοχή μετάδοσης σημάτων μειώνεται σημαντικά. Ως εκ τούτου, η διατήρηση της σύνδεσης καθίσταται μια μεγάλη πρόκληση για το 5G. Για υπηρεσίες κρίσιμης σημασίας, οι απαιτήσεις σχετικά με την υψηλή αξιοπιστία καθώς και τη συνδεσιμότητα πρέπει να είναι πάντα εγγυημένες.

## **6. Βελτιωμένη ασφάλεια**

Το θέμα της ασφάλειας του ασύρματου δικτύου προσελκύει πρόσφατα μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα μετά το 2015, όταν οι εφαρμογές των κινητών πληρωμών και του ψηφιακού πορτοφολιού έγιναν πολύ δημοφιλείς και πολλές φορές εξυπηρετικές και αναγκαίες. Από την οπτική γωνία των συστημάτων προηγούμενων γενεών, ο γενικός σκοπός της ασφάλειας είναι η προστασία της βασικής σύνδεσης και η διατήρηση της ιδιωτικής ζωής των χρηστών. Ωστόσο, δεδομένου ότι το 5G θα αντιμετωπίσει τελικά την εντυπωσιακά αυξανόμενη κυκλοφορία δεδομένων σε ολόκληρο το δίκτυο, η απαίτηση ασφάλειας του 5G δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στην παροχή αξιόπιστης συνδεσιμότητας στους χρήστες, αλλά και στη βελτίωση της ασφάλειας σε ολόκληρο το δίκτυο, αντιμετωπίζοντας τις ανησυχίες σχετικά με την πιστοποίηση, την εξουσιοδότηση και τη χρέωση, καθώς και την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και τη διασφάλιση δραστηριοτήτων

διαχείρισης του cloud computing. Για παράδειγμα, οι ανησυχίες για την ασφάλεια αυξάνονται από την καθιέρωση της τεχνολογίας “near field communication” (NFC - επικοινωνία κοντινού πεδίου), η οποία όχι μόνο επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων από κοντά, αλλά μπορεί επίσης να προκαλέσει διαρροές της ταυτότητας. Τα δίκτυα 4G δεν ήταν σε θέση να αναπτύξουν ένα ενιαίο πρότυπο για την προστασία των προσωπικών πληροφοριών των χρηστών, τα οποία θα αντιμετωπιστούν πλήρως στα δίκτυα 5G.

Ειδικότερα, καθώς το IoT θα αποτελεί βασικό συστατικό στα δίκτυα 5G, οι διαδικασίες πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και χρέωσης (AAA - authentication, authorization, accounting) για διασυνδεδεμένες συσκευές θα πρέπει να χορηγούνται με εξαιρετικά σχολαστικούς μηχανισμούς προστασίας. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, οι κατασκευαστές συσκευών, καθώς και οι οργανισμοί τυποποίησης θα πρέπει να συνεργάζονται για τον σχεδιασμό υπηρεσιών, προϊόντων και πρωτοκόλλων που μπορούν να προστατεύσουν ουσιαστικά τους χρήστες που είναι εγγεγραμμένοι στο ασύρματο δίκτυο 5G. Το πιο σημαντικό, καθώς το Διαδίκτυο έχει καταστεί μία από τις απαραίτητες υποδομές της κοινωνίας παρόμοιες με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να ενισχυθούν οι ομοσπονδιακοί κανονισμοί σχετικά με τις ευθύνες και τις υποχρεώσεις όσον αφορά την ασφάλεια του ασύρματου δικτύου.

Οι προαναφερόμενες απαιτήσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 1-1, με τις προδιαγραφές τους και τις συναφείς λύσεις. Διάφορες τεχνολογίες θα συνεργαστούν για τη διαμόρφωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου 5G.

**Πίνακα 1-1: Βασικές απαιτήσεις και υποψήφιες τεχνολογίες των δικτύων 5G**

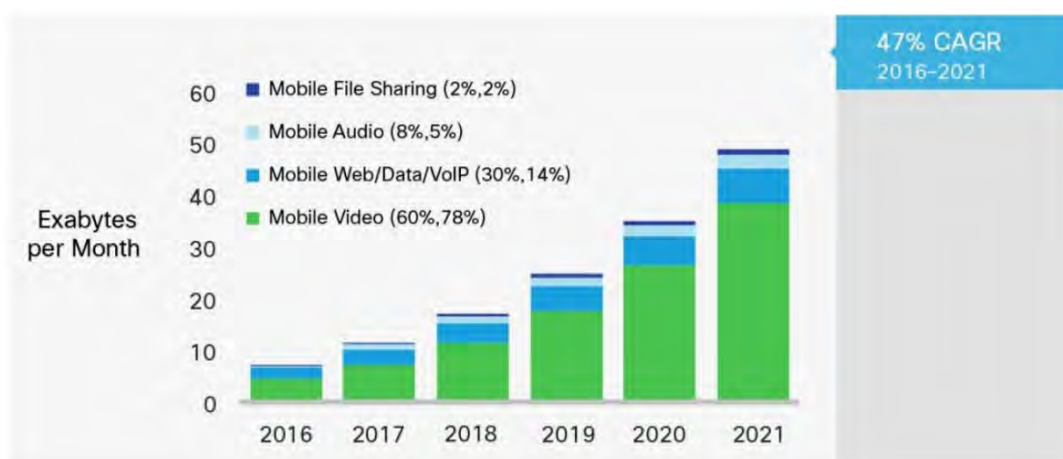
Απαιτήσεις - Χαρακτηριστικά	Προδιαγραφές	Υποψήφιες Τεχνολογίες
Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων	10Gbps μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων 100Mbps ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα άκρα της κυψέλης Ενίσχυση των ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής επικοινωνίας.	Mmwave επικοινωνίες Μαζικό MIMO Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα
Μειωμένη καθυστέρηση	1ms καθυστέρηση από άκρο σε άκρο	Επικοινωνία D2D Big data και mobile cloud computing.
Χαμηλή ενέργεια	1000 φορές μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά bit. Ενίσχυση μαζικών επικοινωνιών τύπου μηχανής.	Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα Επικοινωνία D2D Πράσινες επικοινωνίες
Υψηλή κλιμακωσιμότητα	Υποστήριξη 27 δισεκατομμυρίων συσκευών	Μαζικό MIMO Ασύρματα δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό Mobile cloud computing.
Υψηλή συνδεσιμότητα	Βελτίωση της συνδεσιμότητας των χρηστών στα άκρα της κυψέλης	Εξαιρετικά πυκνά δίκτυα Επικοινωνία D2D Ασύρματα δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό
Υψηλή ασφάλεια	Τυποποίηση της πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και χρέωσης των χρηστών	Ασύρματα δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό Big data και mobile cloud computing.

#### 1.4 Προκλήσεις στην ανάπτυξη των δικτύων 5G

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που οδηγούν στην αύξηση της μελλοντικής κυκλοφορίας του τεράστιου όγκου δεδομένων, όπως αναμένεται. Η υιοθέτηση νέων συσκευών με ενισχυμένες δυνατότητες που απαιτούν αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης και εύρος ζώνης, η αυξημένη χρήση

βίντεο, ο πολλαπλασιασμός συσκευών και η λήψη εφαρμογών είναι οι βασικές αιτίες. Έτσι οι κύριοι παράγοντες που οδήγησαν στην προβλεπόμενη αύξηση της κυκλοφορίας είναι:

**Χρήση βίντεο:** Η χρήση των υπηρεσιών βίντεο κατ' απαίτηση θα συνεχίσει να αυξάνεται τα επόμενα χρόνια καθώς επίσης και η ανάλυση αυτών των βίντεο θα συνεχίσει να μεγαλώνει. Οι χρήστες αναμένεται ότι θα θέλουν να παρακολουθήσουν οπτικοακουστικό περιεχόμενο υψηλής ανάλυσης (HD / UHD), ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο τους παρέχεται το περιεχόμενο αυτό. Επειδή το περιεχόμενο κινητού βίντεο έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο από άλλους τύπους κινητού περιεχομένου, το κινητό βίντεο θα δημιουργήσει μεγάλο μέρος της αύξησης της κίνησης της κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2021 αφού θα αυξηθεί σε σχέση με το 2016 κατά 9 φορές. Άλλωστε σύμφωνα με το Cisco Visual Networking Index του Φεβρουαρίου 2017, το κινητό βίντεο θα δημιουργήσει περισσότερα από τα τρία τέταρτα της κυκλοφορίας δεδομένων κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2021 όπου από τα 49 exabytes το μήνα που θα διασχίζουν το κινητό δίκτυο το 2021, τα 38 exabytes θα οφείλονται σε βίντεο (Σχήμα 1-4). [3]



**Note:** Figures in parentheses refer to 2016 and 2021 traffic share.

Source: Cisco VNI Mobile, 2017

**Σχήμα 1-4. Το κινητό βίντεο θα δημιουργήσει περισσότερα από τα τρία τέταρτα της κυκλοφορίας δεδομένων κινητής τηλεφωνίας μέχρι το 2021**

**Πολλαπλασιασμός συσκευών:** Ο αριθμός των συσκευών που συνδέονται με δίκτυα IP θα είναι τριπλάσιος από τον παγκόσμιο πληθυσμό μέχρι το 2021. Θα υπάρχουν 3,5 συσκευές δικτύου κατά μέσο όρο ανά κάτοικο έως το 2021, από 2,3 δικτυακές συσκευές ανά κάτοικο το 2016. Επίσης θα υπάρξουν 27,1 δισεκατομμύρια δικτυακές συσκευές το 2021, από 17,1 δισεκατομμύρια το 2016 όπως έχει ήδη αναφερθεί. (Σχήμα 1-2).

**Λήψη εφαρμογών:** Ο ρυθμός με τον οποίο υιοθετούνται οι εφαρμογές επιταχύνεται. Το ετήσιο παγκόσμιο downloading των εφαρμογών ανήλθε σε 102 δισεκατομμύρια εφαρμογές το 2013 και έφτασε περίπου στα 270 δισεκατομμύρια το 2017 (139, 180 και 225 δισεκατομμύρια το 2014, το 2015 και το 2016 αντίστοιχα). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες εφαρμογές δεν χρησιμοποιούνται περισσότερο από μία φορά μετά τη λήψη τους. Αυτή η αλόγιστη λήψη εφαρμογών μέσω κινητού τηλεφώνου και η χρήση αυτών, θα συμβάλλουν στην αύξηση της κυκλοφορίας ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και επιπλέον, το ποσό των τακτικών ενημερώσεων / αναβαθμίσεων σε αυτές τις εκατοντάδες δισεκατομμυρίων εφαρμογών θα αυξήσει επιπλέον την κυκλοφορία ευρυζωνικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας.

Εκτός από αυτούς τους σημαντικούς παράγοντες της αύξησης της κυκλοφορίας δεδομένων, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά και τάσεις που αναμένεται να επηρεάσουν τη συνολική ζήτηση κυκλοφορίας κατά την περίοδο 2020-2025 και μετά. Ορισμένες από τις βασικές αυτές τάσεις είναι οι εξής:

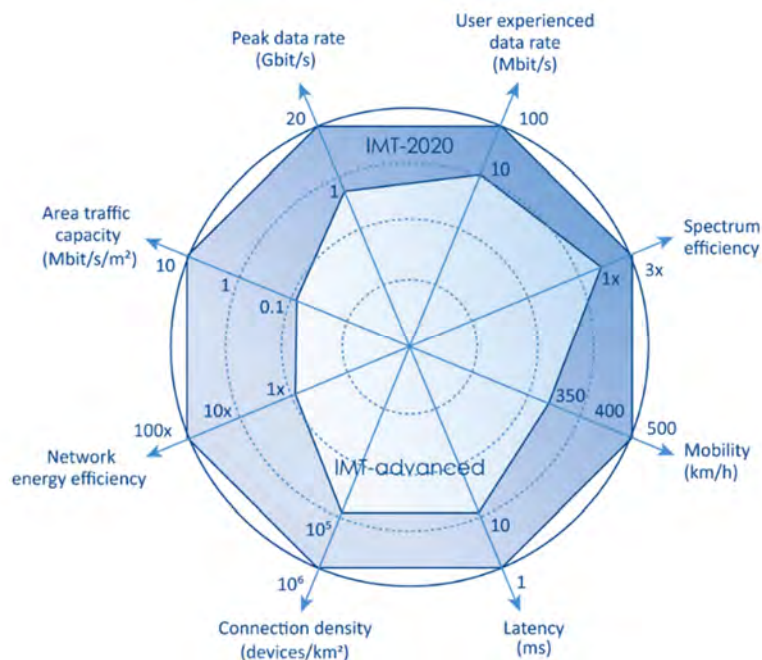


- **Ταχεία ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών:** Οι νέες τεχνολογίες θα αυξήσουν την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ποιότητα της εμπειρίας χρήστη (QoE), η οποία θα αυξήσει επίσης τη ζήτηση των πελατών και θα μειώσει το κόστος ανά MB. Αυτό μειώνει την τιμή για τους τελικούς χρήστες, η οποία με τη σειρά της δημιουργεί μεγαλύτερη ζήτηση (ελαστικότητα τιμής/ζήτηση).
- Οι **Machine-to-machine (M2M)** εφαρμογές και συσκευές, είναι επίσης ένα από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα πεδία για τη χρήση του MBB (mobile broadband) που θα δημιουργήσουν αυξημένη ζήτηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Δισεκατομμύρια μηχανήματα θα χρησιμοποιούν δυνητικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας για να έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρονικές υπηρεσίες καθώς και να συνδέονται μεταξύ τους. Ενώ οι περισσότερες συσκευές M2M θα συνδεθούν με ένα smartphone ή ένα αυτοκίνητο ή άλλη συνδεδεμένη συσκευή για τη δική τους επικοινωνία, κάθε συσκευή θα μπορούσε να έχει ξεχωριστές χρεώσεις / συνδρομές. Το πλήθος των M2M συνδέσεων μπορεί να είναι μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τον παγκόσμιο πληθυσμό.
- **Βελτιωμένη ανάλυση οθόνης / προσφορά περιεχομένου:** Οι βελτιώσεις στις δυνατότητες ανάλυσης οθόνης (π.χ. 4K, UHD κ.λπ.) και η αυξανόμενη ζήτηση για λήψη και ροή βίντεο, οδηγούν σε μεγαλύτερη κίνηση δεδομένων στα κινητά δίκτυα που καταναλώνονται σε συσκευές όπως smartphones ή tablets.
- **Ο πολλαπλασιασμός των οθονών** περιβάλλοντος ή των επιφανειών που μεταδίδουν πληροφορίες και που αποτελούν συσκευές συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο, όπως οθόνες σε ανεγκυστήρες, οθόνες πληροφοριών και ειδήσεων κ.λπ. και οι οποίες βρίσκονται σε διάφορα σημεία (π.χ. στο μετρό, σε τρένα) θα αυξήσουν όλο και περισσότερο την κυκλοφορία.
- **Cloud computing:** Η ζήτηση για υπηρεσίες mobile cloud αναμένεται να αυξηθεί επειδή οι χρήστες υιοθετούν ολοένα και περισσότερες υπηρεσίες που πρέπει να είναι προσβάσιμες από οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Καθώς ο αριθμός των χρηστών που συνδέονται με το cloud μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται, η κίνηση των δεδομένων μεταξύ τερματικών κινητών τηλεφώνων, διακομιστών και χώρου αποθήκευσης στο cloud θα συνεχίσει να αυξάνεται.
- **Η σταθερή ευρυζωνικότητα (FBB - Fixed broadband) αντικαθίσταται από το MBB:** Το γεγονός ότι σε περιοχές και περιβάλλοντα όπου το MBB χρησιμοποιείται ως εναλλακτική λύση των ενσύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων, θα συμβάλει στην αύξηση της κυκλοφορίας IMT (International Mobile Telecommunications). Επίσης ο ρυθμός διείσδυσης του MBB στην συνολικότερη αγορά αυξάνεται ταχύτερα από το ρυθμό διείσδυσης της FBB. Αυτό θα συμβάλει επιπλέον στην αύξηση της κυκλοφορίας IMT.
- **Η συνεχής ανάπτυξη της ροής οπτικοακουστικών μέσων:** Οι χρήστες χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο τις κινητές τους συσκευές για streaming ψυχαγωγία, και για χρήση πολυμέσων λόγω της επέκτασης του DVR στο cloud και της διαθεσιμότητας περιεχομένου συνεχώς και οπουδήποτε.
- **Η εξέλιξη των χαρακτηριστικών της χρήσης και της κυκλοφορίας** των σημερινών υπηρεσιών (περιήγηση στο Internet, φωνή, streaming κ.λπ.) και των αναδύομενων υπηρεσιών, αλλάζοντας τα ποσοστά χρήσης και συνεπώς, την απαίτηση για περισσότερη κίνηση τόσο στο uplink όσο και στο downlink ανά συσκευή.
- Η συνολική μέση αναλογία **ασυμμετρίας κίνησης δεδομένων (UL/DL)**, η οποία σήμερα κυριαρχεί (από 1/4 έως 1/9) υπέρ του downlink (DL) και αναμένεται να αυξηθεί υπέρ του DL (από 1/7 έως 1 / 10) ή περισσότερο, στο μέλλον.

Όλα τα παραπάνω μεταφράζονται σε προκλήσεις και σε μια ανάγκη για αλλαγές στα σημερινά δίκτυα, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι λεγόμενοι δείκτες απόδοσης (*Key Performance Indicators KPIs*). Ακολουθούν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς προκειμένου να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα:

- **QoS:** Προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε την εμπειρία του χρήστη, πρέπει το δίκτυο να προσφέρει τις δυνατότητες που έχει (υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, μικρό latency κλπ.) ανεξαρτήτως της γεωγραφικής θέσης που βρίσκεται ο χρήστης. Στα σημερινά δίκτυα, υπάρχουν περιπτώσεις που η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται σε ένα χρήστη, εξαρτάται από το πόσο κοντά βρίσκεται στο σταθμό βάσης. Αυτό όμως απαιτεί, το δίκτυο να έχει ανθεκτικότητα, διαθεσιμότητα και καλή κάλυψη έχοντας πάντα ως γνώμονα το TCO (Total Cost of Ownership) να μην είναι απαγορευτικά μεγάλο [5].
- **Multi-tenancy:** Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν τις υπηρεσίες τους σε όλες τις φυσικές υποδομές ανεξαρτήτως αν ανήκουν σε έναν ή περισσότερους παρόχους και να μπορούν να εκμεταλλεύονται αποδοτικά τα ήδη υπάρχοντα ετερογενή δίκτυα περιορίζοντας τις μεταξύ τους παρεμβολές.
- **Density:** Οι απαιτήσεις των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς για μεγαλύτερη χωρητικότητα, καθιστούν απαραίτητη την βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η πυκνότητα των κυψελών, παρατηρείται το φαινόμενο των παρεμβολών μεταξύ των cells (inter-cell interference) γεγονός που μειώνει την απόδοση του συστήματος, ειδικά όσο πλησιάζουμε στα όρια του cell. Ο έλεγχος αυτών των παρεμβολών, μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση CoMP, είτε με συντονισμένη κωδικοποίηση πριν την αποστολή ή με άλλους αλγορίθμους συντονισμού των cells που έχουν προταθεί [8].
- **Manageability:** Στο σχεδιασμό του δικτύου πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές οι οποίες θα εξασφαλίζουν τον απομακρυσμένο συντονισμό των λειτουργιών του δικτύου και θα απαιτούν τη λιγότερο δυνατή συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα. Αυτό, πέρα από την ευκολία της κεντρικής διαχείρισης, μας δίνει και τη δυνατότητα να μειώσουμε το λειτουργικό κόστος (OPEX) του δικτύου.
- **Resource management:** Στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς είναι απαραίτητη η δυναμική δέσμευση πόρων (εύρος ζώνης, μνήμη, επεξεργαστική ισχύς) αναλόγως την υπηρεσία (π.χ. network, data κλπ.) και αναλόγως την περίπτωση κάθε φορά (π.χ. σε περίπτωση αυξημένης κίνησης), έτσι ώστε να έχουμε πλήρη εικόνα και έλεγχο για τον βέλτιστο διαμοιρασμό των πόρων.
- **Evolution:** Πρέπει να έχουμε προνοήσει για την εύκολη εγκατάσταση και δημιουργία νέων υπηρεσιών, απαγκιστρώνοντας τους παρόχους από τις μεγάλες επενδύσεις σε συγκεκριμένους παρόχους hardware (lock-in) και ευνοώντας τις open-source λύσεις δημιουργώντας έτσι ευκαιρία για να εισέλθουν νέοι παίκτες στην αγορά, αλλά και να μειώσουμε το κεφαλαιακό μας κόστος (CAPEX).
- **Flexibility:** Οι ετερογενείς συσκευές, υπηρεσίες και τα ετερογενή δίκτυα πρόσβασης που πρέπει το 5G να υποστηρίζει, αναμφισβήτητα θα οδηγήσουν σε δραστικές αλλαγές στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Προκειμένου να μπορέσουμε να ανταπεξέλθουμε σε αυτές τις ετερογενείς παρατάξεις, η ελαστικότητα του δικτύου (flexibility) θα είναι σημείο κλειδί για τα δίκτυα της 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η ελαστικότητα του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί κατά το σχεδιασμό του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνολογίες όπως το Software Defined Networking, το Network Function Virtualization και το Cloud Computing [8] [9].
- **Υποστήριξη των προηγούμενων γενεών δικτύων (backward-compatibility):** Το 5G θα συναθροίζει τις νέες τεχνολογίες κινητών δικτύων και ασύρματης πρόσβασης με τα δίκτυα προηγούμενων γενεών, προκειμένου να επιτυγχάνει την εκ νέου εκμετάλλευσή τους. Η υποστήριξη των προηγούμενων γενεών (legacy support), ανέκαθεν αποτελούσε «πονοκέφαλο» όταν θέλαμε να εγκαταστήσουμε μια νέα τεχνολογία. Όλα αυτά τα συστήματα πρέπει να συνεργάζονται και εξασφαλίζουν αδιάκοπη διαλειτουργικότητα [10]. Στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία Network Virtualization, καθώς νεότερες και προηγούμενες εκδόσεις μπορούν να συνυπάρξουν, βλέποντας τις προηγούμενες εκδόσεις ως ιδεατά δίκτυα μέσα στο δίκτυο αυτό [11].

Στο σχήμα 1-5, παρατίθεται ένα radar chart που απεικονίζει τις θεωρητικές δυνατότητες του 5G.



Σχήμα 1-5: Radar Chart θεωρητικών δυνατοτήτων των 5G δικτύων (πηγή: 5GPPP, 2015) [6]

### 1.5 Διαδικασία οικοδόμησης των 5G δικτύων

Η διαδικασία της οικοδόμησης μιας νέας ασύρματης γενιάς και συγκεκριμένα της 5G, απαιτεί μια συνεργασία μεταξύ τριών διαφορετικών επιπέδων: [12]

**Επίπεδο 1:** Οι στόχοι και οι απαιτήσεις, συχνά πολύ τολμηροί, που τίθενται στα ασύρματα συστήματα σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

**Επίπεδο 2:** Οι έννοιες του συστήματος είναι ευθυγραμμισμένες ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις και παράλληλα δημιουργούν το πλαίσιο για την τεχνική καινοτομία.

**Επίπεδο 3:** Τις λεπτομερείς τεχνολογικές συνιστώσες του νέου ασύρματου συστήματος.

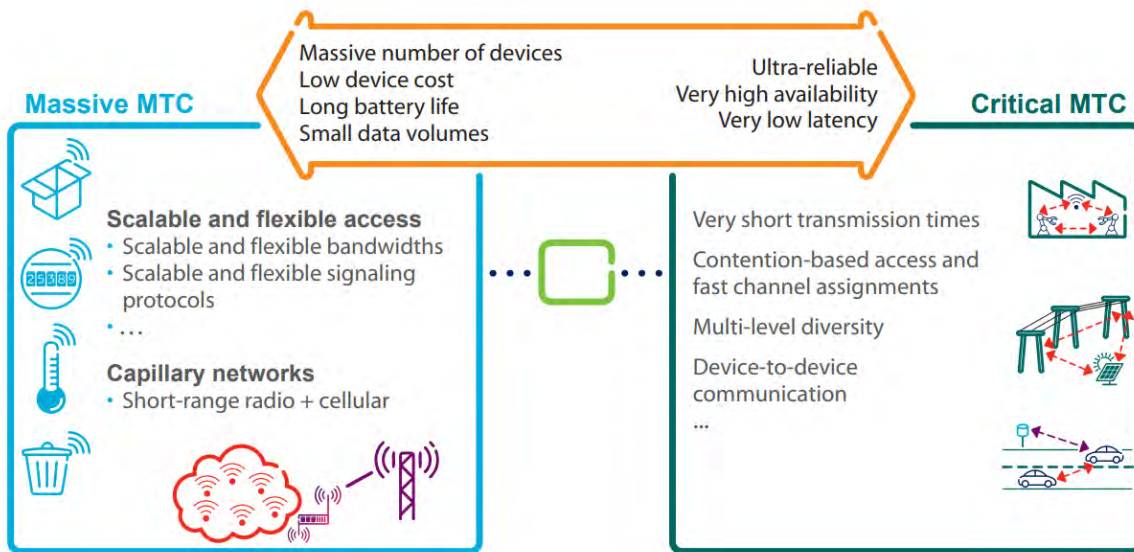
Για το σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί το project METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society), το οποίο είναι μεταξύ των μεγαλύτερων ερευνητικών προσπαθειών στον κόσμο, αφιερωμένο στην 5G ασύρματη τεχνολογία. Στο 1<sup>ο</sup> επίπεδο, το METIS προσδιορίζει πέντε 5G σενάρια: (1) εκπληκτικά γρήγορα (amazingly fast), (2) πολύ καλή εξυπηρέτηση σε ένα πλήθος ατόμων (great service in a crowd), (3) διάχυτη επικοινωνία αντικειμένων (ubiquitous things communicating), (4) καλύτερη εμπειρία (best experience follows you), (5) αξιόπιστες και σε πραγματικό χρόνο συνδέσεις (super real time and reliable connections).

Αναφορικά με το 2<sup>ο</sup> επίπεδο, ο στόχος είναι η μετατροπή των πολύ προχωρημένων στόχων του 1<sup>ου</sup> επιπέδου σε επιχειρησιακές απαιτήσεις που προσδιορίζονται με τη βοήθεια των συνιστωσών της ασύρματης τεχνολογίας. Επιπλέον, δείχνει πως οι τεχνολογικές συνιστώσες μπορούν να συνδυαστούν για να επιτευχθούν οι στόχοι του 1<sup>ου</sup> επιπέδου. Για παράδειγμα, μια από τις απαιτήσεις που προσδιορίζονται στο 1<sup>ο</sup> επίπεδο είναι η χρήση των ασύρματων συνδέσεων για τη βελτίωση της οδικής ασφάλειας. Η αρχή του συστήματος που είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη αξιόπιστης και μικρής καθυστέρησης σύνδεσης, είναι η χρήση επικοινωνίας συσκευής - προς - συσκευή (D2D, Device-to-Device) σε συνδυασμό με την επικοινωνία με κυψέλες (cellular communications). Αυτές οι έννοιες του 2<sup>ου</sup> επιπέδου δημιουργούν ένα πλαίσιο για την ενσωμάτωση και βελτιστοποίηση των τεχνολογικών συνιστωσών του επιπέδου 3 και έτσι υλοποιούν το σενάριο: *Αξιόπιστες και σε πραγματικό χρόνο συνδέσεις*. Στο επίπεδο 3, το METIS λειτουργεί πάνω σε ένα μεγάλο αριθμό καινοτόμων τεχνολογικών συνιστωσών, όπως δομή πλαισίων, πρωτοκόλλων αναμετάδοσης, εκτίμηση καναλιών, που έχουν βελτιστοποιηθεί για να ικανοποιούν διαφορετικές προδιαγραφές, όπως ο μέσος ρυθμός, η καθυστέρηση, η αξιοπιστία για ένα σταθερό ρυθμό κ.λ.π.

## 1.6 Νέες υπηρεσίες που αναμένεται να ικανοποιηθούν από την 5G τεχνολογία

Στη νέα εποχή του 5G, οι νέες απαιτήσεις επικοινωνίας θέτουν προκλήσεις στα υφιστάμενα δίκτυα όσον αφορά τις τεχνολογίες και τα επιχειρηματικά μοντέλα. Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας νέας γενιάς πρέπει να ανταποκρίνεται σε διαφοροποιημένες απαιτήσεις. Εφαρμογές, όπως η κινητή τηλεφωνία και το κινητό εύρος ζώνης στοχεύουν στην παροχή αποτελεσματικών υπηρεσιών επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων. Αντίθετα, πολλές από τις νέες εφαρμογές και περιπτώσεις χρήσης που οδηγούν τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες της 5G τεχνολογία, είναι από άκρο σε άκρο (end – to - end επικοινωνία) μεταξύ μηχανών, με αποτέλεσμα συχνά να αποκαλούνται **επικοινωνία τύπου - μηχανής (MTC – Machine Type Communication)**.

Παρόλο που εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, οι εφαρμογές MTC μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες - **μαζική MTC (massive MTC)** και **κρίσιμη MTC (critical MTC)**, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις τους [13]. Στο Σχήμα 1-6 που ακολουθεί, φαίνονται οι δύο κύριες κατηγορίες MTC.



Σχήμα 1-6. Μαζική MTC (massive MTC) και κρίσιμη MTC (critical MTC)  
(πηγή: Ericsson White paper, 2016) [13]

Η **μαζική MTC** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις κλιμακούμενης και ευέλικτης προσπέλασης (scalable and flexible access) και αναφέρεται σε υπηρεσίες που συνήθως καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο αριθμό συσκευών, συνήθως αισθητήρες (sensors) και ενεργοποιητές (actuators). Οι αισθητήρες έχουν εξαιρετικά χαμηλό κόστος και καταναλώνουν πολύ χαμηλά ποσά ενέργειας, προκειμένου να διατηρήσουν μεγάλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Σαφώς, η ποσότητα των δεδομένων που παράγονται από κάθε αισθητήρα είναι συνήθως πολύ μικρή και συνεπώς η πολύ χαμηλή καθυστέρηση δεν είναι μια κρίσιμη απαίτηση. Οι ενεργοποιητές έχουν επίσης περιορισμένο κόστος και μεγέθη ενέργειας που κυμαίνονται από πολύ χαμηλή έως μέτρια κατανάλωση ενέργειας.

Η **κρίσιμη MTC** χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτούνται πολύ μικροί χρόνοι μετάδοσης, επικοινωνία D2D και ποικιλομορφία πολλαπλών επιπέδων. Αναφέρεται σε εφαρμογές όπως η κυκλοφοριακή ασφάλεια, ο έλεγχος των υποδομών ζωτικής σημασίας και η ασύρματη συνδεσιμότητα για βιομηχανικές διεργασίες. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν πολύ υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα από πλευράς ασύρματης συνδεσιμότητας, καθώς και πολύ χαμηλή καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, το χαμηλό κόστος της συσκευής και η κατανάλωση ενέργειας δεν είναι τόσο κρίσιμη, όπως για μαζικές εφαρμογές MTC. Ενώ ο μέσος όγκος των δεδομένων που μεταφέρονται από και προς τις συσκευές μπορεί να μην είναι μεγάλος, είναι χρήσιμη η ύπαρξη μεγάλων στιγμιαίων ευρών ζώνης που θα είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις χωρητικότητας και χρόνου καθυστέρησης (latency).

Το METIS-I project [14] το Next Generation Mobile Network (NGMN) Alliance [4] και η ITU-R [15] οραματίζουν τρεις γενικές υπηρεσίες [12]:

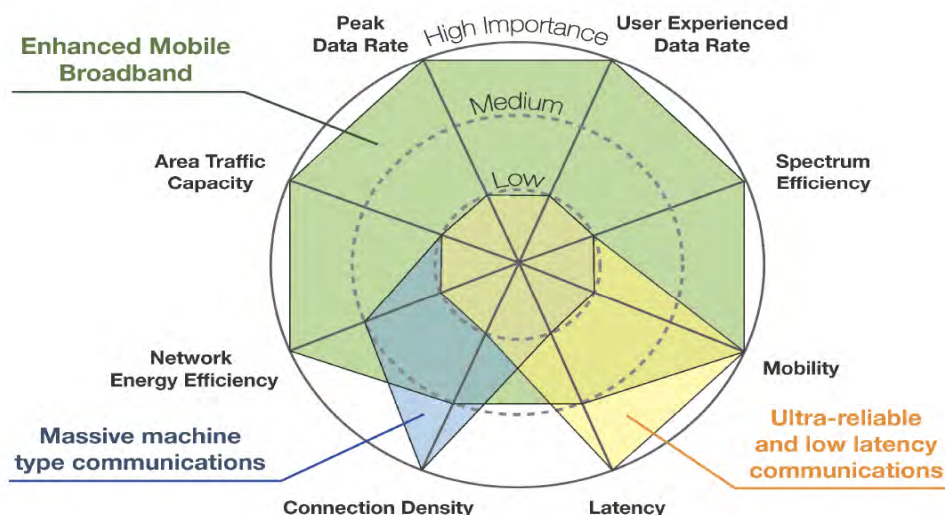
- *extreme Mobile BroadBand* - Ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (*xMBB*),
- *ultrareliable MTC*- εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (*uMTC*), και
- *massive MTC* - και μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (*mMTC*).

Πιο συγκεκριμένα, για την υπηρεσία **xMBB** - συχνά αναφέρεται επίσης ως ενισχυμένη (enhanced) MBB (**eMBB**) - δίνεται έμφαση στους υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και στην αύξηση της αξιοπιστίας καθώς ο ρυθμός μεταφοράς μειώνεται. Το xMBB στοχεύει στην ικανοποίηση της ζήτησης των ανθρώπων για έναν ολοένα και πιο ψηφιακό τρόπο ζωής και επικεντρώνεται σε υπηρεσίες που έχουν υψηλές απαιτήσεις για εύρος ζώνης, όπως βίντεο υψηλής ευκρίνειας - high definition (HD) - εικονική πραγματικότητα - virtual reality (VR) - και επαυξημένη πραγματικότητα - augmented reality (AR).

Στην υπηρεσία **uMTC** ή αλλιώς **uRLLC** (Ultra-reliable low latency communication) δίνεται έμφαση στην πολύ υψηλή αξιοπιστία. Το uRLLC (Ultra-reliable low latency communication) στοχεύει να ανταποκριθεί στις προσδοκίες για την απαιτητική ψηφιακή βιομηχανία και επικεντρώνεται στις ευαίσθητες υπηρεσίες καθυστέρησης, όπως η υποβοηθούμενη και αυτοματοποιημένη οδήγηση και η απομακρυσμένη διαχείριση.

Και τέλος στη υπηρεσία **mMTC** δίνεται έμφαση στο μεγάλο αριθμό των συσκευών. Το mMTC αποσκοπεί στην κάλυψη των αναγκών για μια περαιτέρω αναπτυγμένη ψηφιακή κοινωνία και επικεντρώνεται σε υπηρεσίες που περιλαμβάνουν υψηλές απαιτήσεις για πυκνότητα σύνδεσης, όπως η έξυπνη πόλη και η έξυπνη γεωργία.

Σύμφωνα με την ITU-R, οι 3 παραπάνω υπηρεσίες (ή σενάρια) έχουν ορισμένες βασικές δυνατότητες που σχετίζονται με τα ποσοστά δεδομένων, την καθυστέρηση, την ενεργειακή απόδοση κλπ. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-7, η eMBB επικεντρώνεται στον ρυθμό δεδομένων, στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου, στην απόδοση του φάσματος και στην κινητικότητα. Από την άλλη πλευρά, η επικοινωνία uRLLC επικεντρώνεται σε περιπτώσεις υψηλής κινητικότητας όπου η βασική απαίτηση είναι η χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση. Τέλος, οι mMTC επικοινωνίες στοχεύουν στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου σε συνδυασμό με την υψηλή πυκνότητα σύνδεσης.



Σχήμα 1-7. Η βαρύτητα των βασικών δυνατοτήτων για κάθε υπηρεσία 5G (πηγή: ITU-R M.2083-0 (09/2015))

Στη συνέχεια περιγράφονται διεξοδικά οι συγκεκριμένες υπηρεσίες:

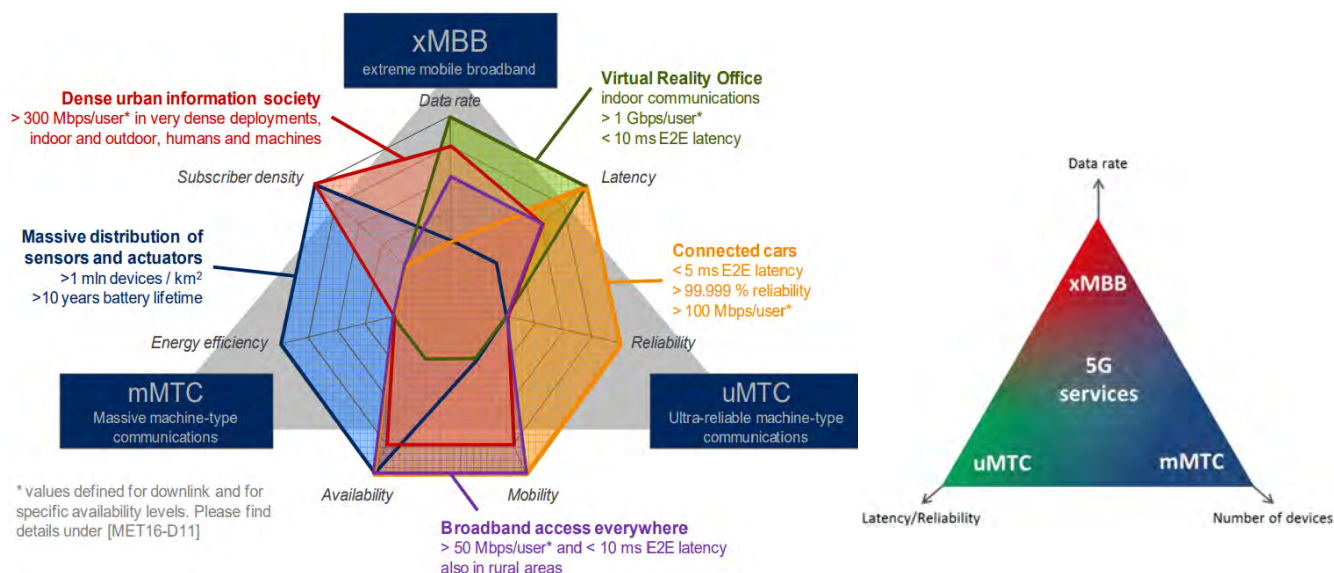
Η υπηρεσία **xMBB** (extreme Mobile Broadband) παρέχει αυξημένες ταχύτητες δεδομένων, αλλά και βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS – Quality of Service) μέσω αξιόπιστων προβλέψεων μεταβαλλόμενων (μέτριων) ρυθμών. Οι ρυθμοί μεγαλύτερων δεδομένων απαιτούνται από εφαρμογές όπως η διευρυμένη πραγματικότητα (σύνθεση εικονικής πραγματικότητας και φυσικού κόσμου) και η απομακρυσμένη παρουσία. Η βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσιών αρχικοποιείται μέσω της απαίτησης παροχής αξιόπιστων μεταβαλλόμενων ποσοστών (μεγαλύτερο του 99%) οπουδήποτε και οποτεδήποτε και της υποβάθμισης της απόδοσης όσον αφορά την ταχύτητα δεδομένων και την καθυστέρηση, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών. Η υπηρεσία xMBB εκτείνεται από ρυθμούς αιχμής της τάξεως των Gbps έως μέτρια ποσοστά - της τάξεως των δεκάδων Mbps, όπου οι τελευταίοι προσφέρονται με πολύ υψηλή αξιοπιστία.

Η υπηρεσία **mMTC** (massive - reliable MTC) παρέχει συνδεσιμότητα για ένα μεγάλο αριθμό συσκευών εξοικονόμησης κόστους και ενέργειας. Η ανάπτυξη αισθητήρων και ενεργοποιητών μπορεί να εκτείνεται σε μια ευρεία περιοχή για την επιτήρηση και τη μέτρηση των περιοχών που καλύπτουν, αλλά και παράλληλα μπορεί να συστέγγεται με ανθρώπους, όπως συμβαίνει στα δίκτυα body-area. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της υπηρεσίας είναι ο μαζικός αριθμός συνδεδεμένων συσκευών.

Η υπηρεσία **uMTC** (ultra-reliable MTC) καλύπτει τις ανάγκες για υπηρεσίες εξαιρετικά αξιόπιστες και χρονικά κρίσιμες εφαρμογές, όπως π.χ. η εφαρμογή V2X (Vehicle-to-Everything) καθώς και βιομηχανικές εφαρμογές. Και στις δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις απαιτείται αξιόπιστη επικοινωνία και επιπρόσθετα η εφαρμογή V2X χρειάζεται γρήγορη εγκαθίδρυση της επικοινωνίας. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η υψηλή αξιοπιστία, ενώ ο αριθμός των συσκευών και οι απαιτούμενες ταχύτητες δεδομένων είναι σχετικά χαμηλές.

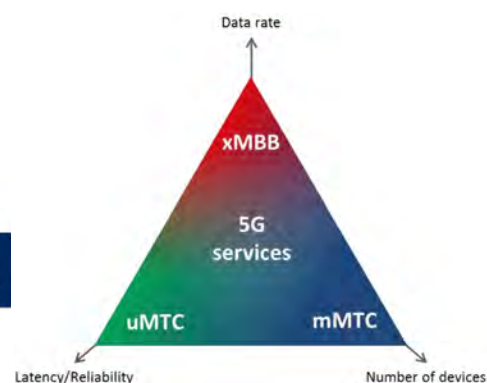
Οι υπηρεσίες αυτές έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τους ελάχιστους ρυθμούς δεδομένων, την κάλυψη, το μέγεθος του πακέτου δεδομένων κλπ. Θα εξακολουθήσουν να μοιράζονται δυναμικά τους ίδιους πόρους χρόνου – συχνότητας, επιτυγχάνοντας αποτελεσματική χρήση του φάσματος. Κατά την εισαγωγή μιας νέας υπηρεσίας, δεν θα είναι αναγκαία η αγορά μιας νέας μπάντας φάσματος συχνοτήτων και η ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης ασύρματης πρόσβασης, διότι με τη χρήση της 5G τεχνολογίας θα μπορούσε να εισαχθεί μια νέα υπηρεσία με επαναχρησιμοποίηση των κοινών συνιστωσών, όπως είναι η διαχείριση της φορητότητας, η λειτουργικότητα και η δυναμική επέκταση ραδιοσυχνοτήτων με την πάροδο του χρόνου.

Τέλος, ο μεγάλος αριθμός των περιπτώσεων χρήσης του METIS-I έκανε την ανάλυσή τους και τη χρήση τους για την αξιολόγηση ιδιαίτερα επίπονη και δύσκολη, υποδεικνύοντας έτσι ότι στο METIS-II πρέπει να ακολουθεί μια πιο συνοπτική προσέγγιση, χωρίς να χάσει τις λεπτομέρειες της η κάθε μια περίπτωση χρήσης (use case - UC). Πέντε περιπτώσεις χρήσης επιλέχθηκαν για να χρησιμοποιηθούν ως βάση των αξιολογήσεων στο METIS-II. Αυτές είναι: UC1: Dense urban information society (Πυκνή αστική κοινωνία της πληροφορίας), UC2: Virtual reality office (Γραφείο εικονικής πραγματικότητας), UC3: Broadband access everywhere (Ευρυζωνική πρόσβαση παντού), UC4: Massive distribution of sensors and actuators (Μαζική κατανομή αισθητήρων και ενεργοποιητών) και UC5: Connected cars (Συνδεδεμένα αυτοκίνητα). Οι KPIs (Βασικοί Δείκτες Απόδοσης) και οι απαιτήσεις των πέντε περιπτώσεων χρήσης στο METIS-II απεικονίζονται στο Σχήμα 1-8. Σε υψηλότερο επίπεδο οι τρεις κύριες υπηρεσίες 5G: xMBB, mMTC, uMTC, χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των προβλεπόμενων μελλοντικών τάσεων.



**Σχήμα 1-8. Οι περιπτώσεις χρήσης METIS-II 5G και η χαρτογράφηση τους στις υπηρεσίες 5G.** [16]

(πηγή: *Salah Eddine Elayoubi et al. 2016*)



**Σχήμα 1-9. Οι τρεις γενικές 5G υπηρεσίες** [12]

(πηγή: *Hugo Tullberg et al. 2016*)

Οι περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με το eMBB επικεντρώνονται στην ικανότητα παροχής ορισμένων ποσοτών δεδομένων στους τελικούς χρήστες, ενώ πληρούν επίσης πρόσθετες απαιτήσεις. Η περίπτωση χρήσης mMTC επικεντρώνεται στον προβλεπόμενο τεράστιο αριθμό συσκευών που θέλουν να επικοινωνήσουν και την ατομική τους ανάγκη για μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η περίπτωση χρήσης uMTC αντιμετωπίζει υψηλή αξιοπιστία σε συνδυασμό με χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση (low latency). (Σχήμα 1-9)

Ένας συνολικός σχεδιαστικός στόχος για το σύστημα 5G είναι να είναι εξαιρετικά ενεργειακά αποδοτικό. Η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από την υποδομή και η κατανάλωση μπαταριών των συσκευών πρέπει να είναι σε χαμηλά επίπεδα παρέχοντας παράλληλα τις υπηρεσίες 5G.

### 1.7 Βασικές χρήσεις και δυνατότητες του 5G

Νέες υπηρεσίες και περιπτώσεις χρήσης έχουν προβλεφθεί για τα δίκτυα 5G. Μία από τις κύριες προκλήσεις για το 5G θα είναι να υποστηρίξει αυτές τις ποικίλες περιπτώσεις χρήσης με ευέλικτο και αξιόπιστο τρόπο. Παρακάτω περιγράφουμε ορισμένες υπηρεσίες και εφαρμογές που θα υποστηρίξει το 5G.

#### Κινητή ευρυζωνικότητα - Mobile broadband

Η κινητή ευρυζωνικότητα είναι σήμερα η βασική περίπτωση χρήσης και αναμένεται να συνεχίσει να αποτελεί μία από τις βασικές περιπτώσεις χρήσης που οδηγούν τις εξελίξεις στα δίκτυα 5G. Πέραν της βασικής κινητής πρόσβασης στο διαδίκτυο, καλύπτει εκτεταμένες διαδραστικές εργασίες, όπως εφαρμογές media και ψυχαγωγίας στο cloud ή εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας κ.α.

Οι κύριοι παράγοντες για τον αυξημένο όγκο της κίνησης δεδομένων είναι η αύξηση του μεγέθους του περιεχομένου και ο αριθμός των εφαρμογών που απαιτούν υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Τέτοιοι παράγοντες είναι η αύξηση της ανάλυσης κάμερας, η αύξηση της ανάλυσης οθόνης με την πρόσφατη εισαγωγή του 4K (8K ήδη αναμένεται μετά το 2020) και οι εξελίξεις στο 3D βίντεο. Οι υπηρεσίες streaming (ήχου & βίντεο), η διαδραστική σύνδεση βίντεο και η σύνδεση μέσω κινητού Internet θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται ευρύτερα, καθώς περισσότερες συσκευές συνδέονται στο Internet. Πολλές από αυτές τις εφαρμογές απαιτούν συνεχή

συνδεσιμότητα για την προώθηση πληροφοριών και ειδοποιήσεων σε πραγματικό χρόνο στους χρήστες.

Η αποθήκευση και οι εφαρμογές Cloud αυξάνονται ραγδαία για τις πλατφόρμες κινητής επικοινωνίας. Αυτό ισχύει τόσο για την εργασία όσο και για την ψυχαγωγία. Η αποθήκευση Cloud είναι μία συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης που οδηγεί στην αύξηση των ρυθμών δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης (εξ' αιτίας του upload) - στο παρελθόν, το περιεχόμενο ως επί το πλείστον απασχολούσε αποκλειστικά τη κατερχόμενη ζεύξη (εξ' αιτίας του download). Το 5G θα χρησιμοποιηθεί επίσης για απομακρυσμένη εργασία στο cloud, η οποία, όταν γίνεται με απτικές διεπαφές (tactile interfaces), απαιτεί πολύ χαμηλότερες καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο για να διατηρηθεί μια καλή εμπειρία χρήστη.

Οι ψυχαγωγικές δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα τα τυχερά παιχνίδια στο cloud (συμπεριλαμβανομένων των «σοβαρών παιγνίων») και η ροή βίντεο, είναι ένας άλλος βασικός μοχλός για την αυξανόμενη ανάγκη κινητής ευρυζωνικότητας. Η διασκέδαση θα είναι πολύ σημαντική για τα έξυπνα τηλέφωνα και τα tablets οπουδήποτε, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλόντων υψηλής κινητικότητας όπως τα τρένα, τα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα.

Μια άλλη πολύ ενδιαφέρουσα αλλά και πολύ απαιτητική περίπτωση χρήσης είναι η επαυξημένη πραγματικότητα για την ψυχαγωγία και την ανάκτηση πληροφοριών, η οποία απαιτεί πολύ χαμηλές καθυστερήσεις και σημαντικούς όγκους άμεσων δεδομένων. Στο μέλλον θα δούμε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών και υπηρεσιών που κάνουν χρήση της επαυξημένης πραγματικότητας, συμπεριλαμβανομένων των σεναρίων όπου η αποθήκευση περιεχομένου στο σταθμό βάσης, όπου σήμερα είναι μια δύσκολη υπόθεση.

### **Αυτοκινητοβιομηχανία**

Ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας αναμένεται να είναι ένας πολύ σημαντικός νέος τομέας εφαρμογής για το 5G, με πολλές περιπτώσεις χρήσης για κινητές επικοινωνίες για οχήματα. Για παράδειγμα, η ψυχαγωγία για τους επιβάτες απαιτεί ταυτόχρονη κινητή ευρυζωνική σύνδεση υψηλής χωρητικότητας και υψηλής κινητικότητας, επειδή οι μελλοντικοί χρήστες αναμένουν να συνεχίσουν την καλής ποιότητας σύνδεση ανεξάρτητα από την τοποθεσία και την ταχύτητά τους. Άλλες περιπτώσεις χρήσης για τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι οι πίνακες ελέγχου της επαυξημένης πραγματικότητας (augmented reality dashboards). Αυτές οι πληροφορίες επικάλυψης εμφανίζονται πάνω από το τι βλέπει ο οδηγός μέσα από το παρμπρίζ του αυτοκινήτου, εντοπίζοντας αντικείμενα στο σκοτάδι και ενημερώνοντας τον οδηγό για τις αποστάσεις και τις κινήσεις των αντικειμένων.

Οι δύο προηγούμενες περιπτώσεις χρήσης σχετίζονται με την παροχή περιεχομένου για τους χρήστες αυτοκινήτων, αλλά επίσης τα ίδια τα αυτοκίνητα θα συνδεθούν μεταξύ τους. Πολλοί κατασκευαστές αυτοκινήτων προσθέτουν ήδη συστήματα υποστήριξης οδηγών που βασίζονται σε τρισδιάστατη απεικόνιση και ενσωματωμένους αισθητήρες. Στο μέλλον, οι ασύρματες μονάδες θα επιτρέψουν την επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων, την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των οχημάτων και της υποστηρικτικής υποδομής μεταξύ οχημάτων και άλλων συνδεδεμένων συσκευών, για παράδειγμα εκείνων των συσκευών που μεταφέρονται από πεζούς. Επιπρόσθετα, οι περιπτώσεις χρήσης για την ασφάλεια της κυκλοφορίας συζητούνται ευρέως στο χρηματοδοτούμενο από την Ε.Ε. έργο METIS. Αυτά περιλαμβάνουν τα αυτοκίνητα που ανιχνεύουν κρίσιμες καταστάσεις ασφάλειας, όπως ο πάγος, τα ατυχήματα που βρίσκονται κοντά στο αυτοκίνητο και άλλες επικίνδυνες οδικές συνθήκες. Τα συστήματα ασφαλείας θα καθοδηγούν τους οδηγούς σε εναλλακτικά στάδια δράσης, ώστε να μπορούν να οδηγούν με μεγαλύτερη ασφάλεια και να μειώνουν τους κινδύνους ατυχημάτων.

Η επόμενη φάση θα είναι τα τηλεχειριζόμενα ή και αυτοτροφοδοτούμενα οχήματα, τα οποία απαιτούν εξαιρετικά αξιόπιστη και πολύ γρήγορη επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών αυτοοδηγούμενων αυτοκινήτων και μεταξύ αυτοκινήτων και υποδομής. Στο απώτερο μέλλον, ένα αυτοοδηγούμενο αυτοκίνητο φροντίζει όλη την οδήγηση, επιτρέποντας στον οδηγό να ξεκουραστεί



και να επικεντρωθεί μόνο στις ανωμαλίες της κυκλοφορίας που το ίδιο το αυτοκίνητο δεν μπορεί να διαγνώσει και να εντοπίσει. Στην ιδανική περίπτωση, θα είναι δυνατή η ανάγνωση της πρωινής εφημερίδας κατά τη διάρκεια της μετακίνησης. Οι τεχνικές απαιτήσεις για αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα απαιτούν εξαιρετικά χαμηλές καθυστερήσεις και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, αυξάνοντας την ασφάλεια της κυκλοφορίας σε επίπεδα που ο άνθρωπος δεν μπορεί να επιτύχει.

### **Έξυπνη κοινωνία - Smart Society**

Οι έξυπνες πόλεις και τα έξυπνα σπίτια, που συχνά αναφέρονται ως έξυπνη κοινωνία, θα ενσωματωθούν με πυκνά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα καταναμεμημένα δίκτυα έξυπνων αισθητήρων θα προσδιορίσουν τις συνθήκες για την οικονομική και ενεργειακή απόδοση της πόλης ή του σπιτιού. Μια παρόμοια ρύθμιση μπορεί να γίνει για κάθε σπίτι, όπου οι αισθητήρες θερμοκρασίας, οι ελεγκτές παραθύρων και θέρμανσης, οι συναγερμοί ασφαλείας και οι οικιακές συσκευές είναι όλα συνδεδεμένα ασύρματα. Πολλοί από αυτούς τους αισθητήρες έχουν ως βασικά χαρακτηριστικά τους χαμηλούς ρυθμούς (όγκους) δεδομένων, τη χαμηλή ισχύ και χαμηλό κόστος, αλλά για παράδειγμα, σε ορισμένα είδη συσκευών παρακολούθησης μπορεί να απαιτηθεί βίντεο σε πραγματικό χρόνο HD. Το έργο για το 5G θα είναι να ενσωματώσει τη διαχείριση αυτών των πολύ διαφορετικών συνδεδεμένων συσκευών.

### **Έξυπνα δίκτυα - Smart grids**

Η κατανάλωση και η διανομή ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της θερμότητας ή του φυσικού αερίου, γίνεται ιδιαίτερα αποκεντρωμένη, δημιουργώντας την ανάγκη για αυτοματοποιημένο έλεγχο ενός πολύ καταναμεμημένου δικτύου αισθητήρων. Ένα έξυπνο δίκτυο διασυνδέει τέτοιους αισθητήρες, χρησιμοποιώντας ψηφιακή τεχνολογία πληροφορικής και επικοινωνιών για να συλλέξει και να δράσει με βάση τις πληροφορίες. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να περιλαμβάνουν τις συμπεριφορές των προμηθευτών και των καταναλωτών, επιτρέποντας στο έξυπνο δίκτυο να βελτιώσει την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, την οικονομία και τη βιωσιμότητα της παραγωγής και της διανομής καυσίμων όπως η ηλεκτρική ενέργεια με αυτοματοποιημένο τρόπο. Ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άλλο δίκτυο αισθητήρων με μικρές καθυστερήσεις.

### **Υγεία**

Ο τομέας της υγείας έχει πολλές εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν από τις κινητές επικοινωνίες. Τα συστήματα επικοινωνιών επιτρέπουν την τηλεϊατρική, η οποία παρέχει κλινική υγειονομική περίθαλψη σε απόσταση. Βοηθά στην εξάλειψη των φραγμών της απόστασης και μπορεί να βελτιώσει την πρόσβαση σε ιατρικές υπηρεσίες που συχνά δεν είναι σταθερά διαθέσιμες σε μακρινές αγροτικές κοινότητες. Χρησιμοποιείται επίσης για τη διάσωση ανθρώπινων ζώων σε καταστάσεις κρίσιμης φροντίδας και έκτακτης ανάγκης. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που βασίζονται στην κινητή επικοινωνία μπορούν να παρέχουν απομακρυσμένη παρακολούθηση χρησιμοποιώντας αισθητήρες για διάφορες παραμέτρους όπως ο καρδιακός ρυθμός και η αρτηριακή πίεση.

### **Βιομηχανία**

Οι ασύρματες και κινητές επικοινωνίες καθίστανται ολοένα και πιο σημαντικές για βιομηχανικές εφαρμογές. Τα καλώδια είναι ακριβά για την εγκατάσταση και τη συντήρηση και η δυνατότητα αντικατάστασης καλωδίων με επαναρρυθμιζόμενους ασύρματους συνδέσμους είναι μια δελεαστική ευκαιρία για πολλές βιομηχανίες. Ωστόσο, η επίτευξη αυτού του στόχου προϋποθέτει ότι η ασύρματη σύνδεση λειτουργεί με παρόμοια καθυστέρηση, αξιοπιστία και χωρητικότητα όπως τα καλώδια και ότι η διαχείριση της απλοποιείται. Χαμηλές καθυστερήσεις και πολύ χαμηλές πιθανότητες σφάλματος είναι νέες απαιτήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν με τα δίκτυα 5G.

### **Logistics και Παρακολούθηση εμπορευμάτων**

Τα logistics και η παρακολούθηση φορτίων αποτελούν σημαντικές περιπτώσεις χρήσης για τις κινητές επικοινωνίες, οι οποίες επιτρέπουν την παρακολούθηση αποθεμάτων και πακέτων οπουδήποτε κι αν βρίσκονται μέσω συστημάτων πληροφοριών με βάση τη θέση τους. Οι

περιπτώσεις των logistics και της μεταφοράς εμπορευμάτων απαιτούν συνήθως χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων, αλλά χρειάζονται ευρεία κάλυψη και αξιόπιστες πληροφορίες θέσης.

### **Διαδίκτυο των πραγμάτων - Internet of Things (IoT)**

Το IoT είναι ένα ιδανικό παράδειγμα για την πλήρη εφαρμογή της τεχνολογίας δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Σε όλα τα κοινωνικά στρώματα, τα ανθρώπινα όντα είναι σε θέση να διαχειρίζονται την παραγωγή και να ζουν με πιο ακριβή και δυναμικό τρόπο μέσω του Διαδικτύου, επιτυγχάνοντας μια «έξυπνη» κατάσταση και βελτιώνοντας τη χρήση των πόρων και το επίπεδο παραγωγικότητας. Το IoT, ως κύριο εργαλείο για τη εφαρμογή και επίτευξη της ευφυούς ζωής, της εργασίας και της παραγωγής, επεκτείνει τις επικοινωνίες από τον άνθρωπο σε άνθρωπο στο επίπεδο άνθρωπος με πράγμα και πράγμα με πράγμα. Η εφαρμογή του IoT είναι εξαιρετικά ευρεία, συμπεριλαμβανομένης της προστασίας του περιβάλλοντος, των ευφών μεταφορών, της δημόσιας ασφάλειας, της οικιακής ασφάλειας, της ευφυούς πυρόσβεσης, της παρακολούθησης του περιβάλλοντος, του ελέγχου φωτισμού, της υγειονομικής περίθαλψης, της ανθοκομίας, της παρακολούθησης συστημάτων ύδρευσης, και πολλούς άλλους τομείς.

Μπορούμε να πούμε ότι το IoT θα είναι η επόμενη "σημαντική παραγωγική δύναμη" που θα προωθήσει την κοινωνική πρόοδο. Ως εκ τούτου, είναι πρωταρχικής σημασίας να προωθηθεί η ανάπτυξη του Διαδικτύου όπου αυτή εξαρτάται από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των επικοινωνιών. Είναι κατανοητό ότι όταν το IoT είναι παντού στη ζωή μας, το οποίο σημαίνει ότι το "όλα είναι συνδεδεμένα" είναι πραγματικότητα, η μετάδοση πληροφοριών θα είναι πολύ συχνή μεταξύ του thing-to-thing, του person-to-thing και του person-to-person, και αυτή η αλλαγή όχι μόνο φέρνει ζωτικότητα και ευκαιρίες αλλά αποτελεί επίσης μεγάλη πρόκληση για τις κινητές επικοινωνίες.

## 2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ

Για να ανταποκριθούμε στις απαιτήσεις του συστήματος 5G, χρειαζόμαστε μια δραματική αλλαγή στο σχεδιασμό της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής. Σε ό,τι αφορά τα κυψελωτά δίκτυα 5G έχει παρατηρηθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των χρηστών βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους για ποσοστά χρόνου που αγγίζουν το 80% [17]. Με την παρούσα σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων, είτε σε εσωτερικό, είτε σε εξωτερικό χώρο, χρησιμοποιείται ένας σταθμός βάσης (Base Station - BS) που βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης. Έτσι αν ο χρήστης βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο, το σήμα θα πρέπει να διεισδύσει στο εσωτερικό του κτιρίου, μέσω των τοίχων με συνέπεια πολύ μεγάλες απώλειες. Οι απώλειες αυτές βέβαια συνεπάγονται μειωμένη φασματική και ενεργειακή απόδοση, καθώς και ρυθμό μετάδοσης. Μία από τις βασικές ιδέες για το σχεδιασμό της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής 5G είναι να διαχωριστούν τα σενάρια εξωτερικού και εσωτερικού χώρου έτσι ώστε να αποφευχθεί η απώλεια διείσδυσης μέσω των τοίχων. Αυτό θα ενισχυθεί από το σύστημα κατανεμημένης κεραιάς (DAS) και την τεχνολογία massive MIMO [18], όπου αναπτύσσονται γεωγραφικά κατανεμημένες συστοιχίες κεραιών με δεκάδες ή εκατοντάδες στοιχεία κεραιάς.

Ενώ τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα MIMO χρησιμοποιούν δύο έως τέσσερις κεραιές, ο στόχος των συστημάτων με τεχνολογία massive MIMO είναι να εκμεταλλευτούν τα δυνητικά μεγάλα κέρδη χωρητικότητας που θα προκύψουν σε μεγαλύτερες σειρές κεραιών. Τα υπαίθρια BSs θα είναι εξοπλισμένα με μεγάλες συστοιχίες κεραιάς με ορισμένα στοιχεία κεραιάς (επίσης μεγάλες σειρές κεραιάς) που διανέμονται γύρω από την κυψέλη και συνδέονται με το BS μέσω οπτικών ινών, επωφελούμενα τόσο από τα συστήματα DAS όσο και από την τεχνολογία massive MIMO.

Έτσι οι εξωτερικοί σταθμοί βάσης θα εξοπλιστούν με μεγάλες στοιχειοκεραίες και κάποιες διεσπαρμένες στην κυψέλη που θα επικοινωνούν μέσω οπτικών ινών. Οι κινητοί χρήστες με τις δικές τους κεραιές σε συνδυασμό με αυτές της κυψέλης θα αποτελούν ένα σύστημα massive-MIMO. Επιπρόσθετα τα κτίρια θα εξοπλίζονται επίσης με στοιχειοκεραίες, ώστε να επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης ως επί το πλείστον μέσω απευθείας οπτικής επαφής (LOS, Line Of Sight). Στο εσωτερικό των κτιρίων θα υπάρχουν ασύρματα σημεία πρόσβασης (APs, Access Points) που θα συνδέονται ενσύρματα με τις εξωτερικές κεραιές του κτιρίου. Αυτό ασφαλώς θα αυξήσει βραχυπρόθεσμα το κόστος των υποδομών, ενώ ταυτόχρονα θα βελτιώσει σημαντικά τη μέση απόδοση των κυψελών, τη φασματική απόδοση, την ενεργειακή απόδοση και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του κυψελωτού συστήματος μακροπρόθεσμα.

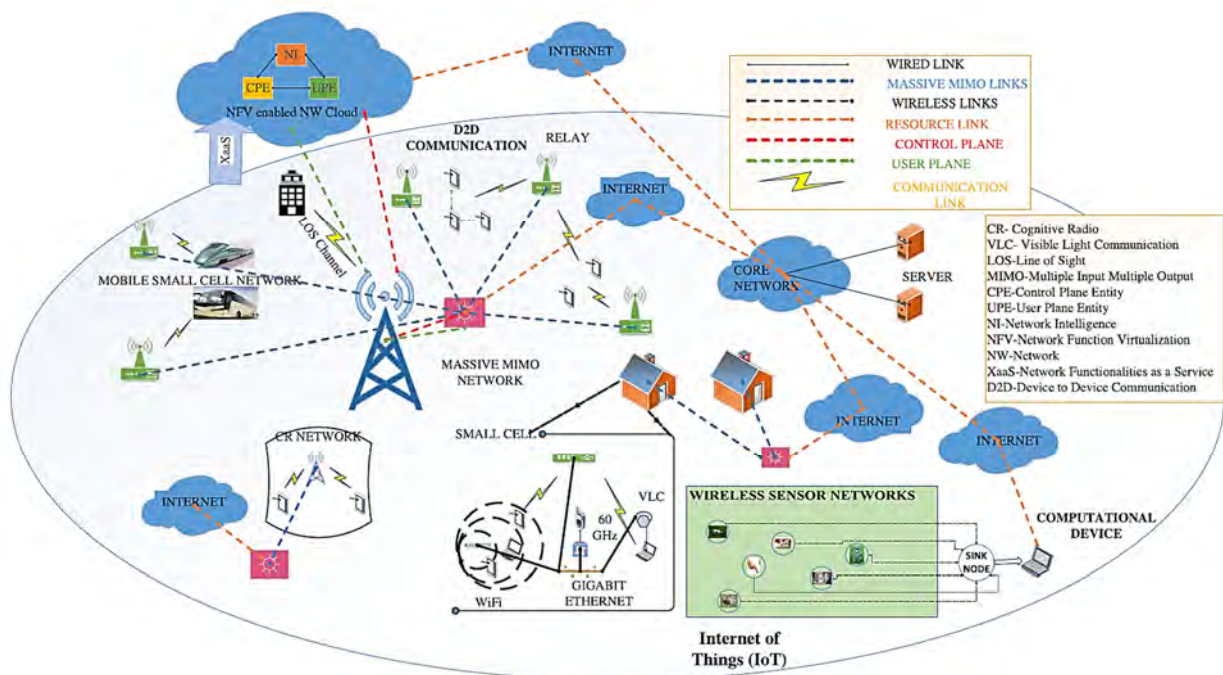
Χρησιμοποιώντας μια τέτοια κυψελοειδή αρχιτεκτονική, οι χρήστες στο εσωτερικό θα επικοινωνούν μόνο με το ασύρματο δίκτυο στο εσωτερικό και οι μεγαλύτερες κεραιές θα βρίσκονται εκτός του κτιρίου. Για την επικοινωνία στο εσωτερικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν υφιστάμενες τεχνολογίες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, όπως Wi-Fi, femtocells, mm-Wave (3-300 GHz) [19], ασύρματη επικοινωνία μέσω του ορατού φωτός (Visible Light Communications VLC, 400-490 THz) [20].

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες mm-wave και VLC χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες που δεν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για κυψελοειδείς επικοινωνίες. Αυτά τα κύματα υψηλής συχνότητας δεν διαπερνούν πολύ καλά στα στερεά υλικά και μπορούν εύκολα να απορροφηθούν ή να διασκορπιστούν από τον αέρα ή και τη βροχή. Επομένως, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν αυτά τα κύματα για εφαρμογές σε υπαίθριες και μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, με τα διαθέσιμα μεγάλα εύρη ζώνης, οι τεχνολογίες mmwave και VLC μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για εσωτερικά σενάρια.

Για την επίλυση του προβλήματος της έλλειψης φάσματος, εκτός από την εύρεση νέου φάσματος που δεν χρησιμοποιείται παραδοσιακά για ασύρματες υπηρεσίες (π.χ. επικοινωνίες με mmwaves και VLC), μπορούμε επίσης να προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε τη χρήση του ραδιοφάσματος με τη χρήση των γνωστικών δικτύων επικοινωνίας (Cognitive Radio Networks) [21].

Γενικά η αρχιτεκτονική ενός κυψελωτού συστήματος 5G είναι ετερογενής, καθώς περιλαμβάνει κυψέλες διαφορετικού μεγέθους όπως macrocells, microcells, small cells (femtocells), και αναμεταδότες (relays). Ένα mobile small cell είναι μια έννοια ενσωματωμένη στο 5G και συνδυάζει την έννοια του κινητού αναμεταδότη (mobile relay) και της μικρής κυψέλης (small cell). Εισάγεται για να εξυπηρετήσει ιδιαίτερα κινητικούς χρήστες όπως αυτοί μέσα σε οχήματα και ταχείες αμαξοστοιχίες. Έτσι οι χρήστες επικοινωνούν ασύρματα με το small cell στο εσωτερικό του οχήματος, ενώ μεγάλες στοιχειοκεραίες τοποθετούνται στο εξωτερικό.

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζονται ενδεικτικά διάφορες τεχνολογίες που υπόσχονται να δώσουν λύσεις σε διάφορες περιπτώσεις χρήσης στα δίκτυα 5G, όπως massive-MIMO, mmwaves, Cognitive Radio Network, mobile-static small cells, D2D (device to device), DAS, IoT (Internet of Things), femtocells, VLC.



Σχήμα 2.1 Υποψήφιες τεχνολογίες δικτύου 5G (πηγή: A. Gupta, 2015) [22]

## 2.1 Massive MIMO

### 2.1.1 Ορισμός

Τα massive MIMO συστήματα προϋποθέτουν την χρήση πολλαπλών στοιχείων κεραίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη [23] [24]. Ενώ τα περισσότερα σημερινά συστήματα MIMO χρησιμοποιούν δύο με τέσσερις κεραίες, ο στόχος των massive MIMO συστημάτων είναι να εκμεταλλευτούν τα δυνητικά μεγάλα κέρδη σε χωρητικότητα που θα προκύψουν από την χρήση μεγαλύτερων συστοιχιών κεραιών. Στο single-user MIMO (SU-MIMO), ο αριθμός των κεραιών που μπορούν να φιλοξενηθούν από μια φορητή συσκευή του χρήστη είναι μικρός. Ωστόσο οι σταθμοί βάσεις πρέπει να επικοινωνούν με πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, γεγονός στο οποίο μπορούν να ανταπεξέλθουν αποτελεσματικά με την χρήση της multiuser έκδοσης του MIMO (MUMIMO). Από τη στιγμή που αναπτύχθηκε το LTE, η MIMO τεχνολογία αποτέλεσε βασικό συστατικό του με δύο έως τέσσερις κεραίες να τοποθετούνται σε κάθε κινητή συσκευή και οκτώ σε κάθε σταθμό βάσης. Ωστόσο για να καταφέρουν τα συστήματα της πέμπτης γενιάς δικτύων να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των χρηστών τους, έπρεπε η MIMO τεχνολογία να πάει ένα βήμα παραπέρα. Σε αυτό το πλαίσιο άρχισε να διερευνάται η εκδοχή να εξοπλίζεται κάθε BS (base station) με μια σειρά από κεραίες, πολύ περισσότερες από τον αριθμό των ενεργών χρηστών,

τοποθετώντας τον αριθμό των κεραιών ανά σταθμό βάσης σε εκατοντάδες. Έτσι καταλήξαμε στα συστήματα κεραιών ευρείας κλίμακας πιο γνωστά πλέον ως massive MIMO.

### 2.1.2 Πλεονεκτήματα Massive MIMO

Προσθέτοντας πολλαπλές κεραιές, μπορούμε να επιτύχουμε ένα μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας, πέρα από τα πλαίσια του χρόνου και του φάσματος και στα ασύρματα κανάλια, ούτως ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων [23] [24]. Ως εκ τούτου, μια σημαντική βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί όσον αφορά την αξιοπιστία, φασματική απόδοση και την ενεργειακή απόδοση των δικτύων. Χρησιμοποιώντας την massive MIMO τεχνολογία μπορούμε να πετύχουμε τεράστιες βελτιώσεις στη φασματική και ενεργειακή απόδοση, χωρίς να είναι αναγκαία η αυξημένη πυκνωση των σταθμών βάσης. Φυσικά όπως είναι εύκολο να καταλάβουμε, ένας συνδυασμός αυτών των δύο θα έδινε μεγάλη ευελιξία στα δίκτυα πέμπτης γενιάς ως προς το ζήτημα της φασματικής αποδοτικότητας. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση της massive MIMO τεχνολογίας οι επιπτώσεις του θορύβου και της γρήγορης εξασθένησης του σήματος εξαφανίζονται, ενώ οι παρεμβολές στα πλαίσια μιας κυψέλης μπορούν να μετριαστούν χρησιμοποιώντας μεθόδους απλής γραμμικής προκωδικοποίησης και ανίχνευσης [24].

### 2.1.3 Προκλήσεις Massive MIMO

Για να εφαρμοστεί το massive MIMO και στην πραγματικότητα, πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετές μείζονες προκλήσεις [23] [24]. Μια σοβαρή πρόκληση για την πραγματοποίηση του massive MIMO έχει να κάνει με αρχιτεκτονική του. Απαιτούνται ριζικά διαφορετικές δομές σταθμών βάσης, όπου αντί των λίγων και υψηλής ισχύος σε τροφοδοσία ενισχυτών για τις κεραιές, θα έχουμε ένα πολύ μεγάλο πλήθος από μικροσκοπικές κεραιές τροφοδοτούμενες από ενισχυτές χαμηλής ισχύος. Πιθανότατα κάθε κεραία θα χρειαστεί να έχει το δικό της ενισχυτή. Η επεκτασιμότητα, οι συσχετίσεις κεραιών και το κόστος, είναι μερικά από τα θέματα που πρέπει να διευθετηθούν, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να υπάρξουν καινοτόμες μορφές τοπολογιών.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα οι σταθμοί βάσης που χρησιμοποιούν το massive MIMO θα πρέπει να συνυπάρχουν με τις μικρές κυψέλες του δικτύου. Καθώς τα δίκτυα γίνονται πυκνά και η κίνηση όλο μεγαλύτερη, ο αριθμός των ενεργών χρηστών ανά κυψέλη θα μειωθεί και έτσι η ανάγκη για μαζική MIMO μπορεί να μειωθεί. Πτυχές όπως το κόστος και το backhaul θα καθορίσουν τελικά την ισορροπία μεταξύ αυτών των συμπληρωματικών ιδεών.

Επίσης, η επικοινωνία με mmWave απαιτεί την χρήση πολλών κεραιών που μπορούν να στρίβουν και να ορίζουν την κατεύθυνση του κύματος. Οι κεραιές είναι πολύ μικρότερες σε αυτές τις συχνότητες και ως εκ τούτου πολύ μεγάλος αριθμός αυτών μπορεί θεωρητικά να χωρέσει σε φορητές συσκευές.

## 2.2 mmWave

### 2.2.1 Ορισμός και αναγκαιότητα

Τα επίγεια συστήματα ασύρματης επικοινωνίας έχουν σε μεγάλο βαθμό περιορίσει τη λειτουργία τους στο σχετικά λεπτό εύρος των μικροκυμάτων συχνοτήτων που εκτείνεται από αρκετές εκατοντάδες MHz σε μερικά GHz και αντιστοιχεί σε μήκη κύματος μερικών εκατοστών μέχρι περίπου ένα μέτρο [23] [25]. Μέχρι τώρα όμως αυτή η φασματική ζώνη, που συχνά αποκαλείται και "beachfront spectrum", έχει γίνει σχεδόν πλήρως απασχολημένη, ιδίως σε ώρες αιχμής. Με την εκρηκτική αύξηση της κίνησης από την κινητή μετάδοση δεδομένων, η αντίφαση μεταξύ της ανάγκης για μεγάλη χωρητικότητα του δικτύου και η έλλειψη φάσματος γίνεται ολοένα και πιο έντονη. Το εμπόδιο αυτής της έλλειψης γίνεται ένα βασικό πρόβλημα για τα 5G δίκτυα, αφού απαιτείται πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Αν και με την χρήση καινούργιων ρυθμιστικών διαδικασιών θα μπορούσε να γίνει καλύτερη αξιοποίηση του beachfront εύρους ζώνης, ένας ακόμη πιο αποδοτικός τρόπος θα ήταν να προσθέσουμε νέες ζώνες φάσματος στο ήδη υπάρχον.

Η ζώνη συχνοτήτων από 30 GHz έως 300 GHz, γνωστή και ως millimeter wave (mmWave) έχει προταθεί να γίνει ένα σημαντικό μέρος της πέμπτης γενιάς δικτύων, για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας multi-gigabit, για τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και για υπέρ-υψηλής ευκρίνειας βίντεο (UHDV). Η βασικής εστίαση γίνεται στη ζώνη λειτουργίας του WiFi (με το πρότυπο WiGiG στα 60 GHz), όπως και στη ζώνη 28 GHz, τη ζώνη 38 GHz και το E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz).

### 2.2.2 Πλεονεκτήματα mmWave

Για να συμβαδίσουν τα δίκτυα νέας γενιάς με την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης έξυπνων συσκευών, εξετάζεται η μαζική πύκνωση των κυψελών προκειμένου να επιτευχθεί η μέχρι και 10.000 φορές αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου μέχρι το 2030 [23] [25]. Κάθε μακροκυψέλη θα αποτελείται από πολλές μικρότερες, όπως WLAN (wireless local area networks) ή WPAN (wireless personal area networks). Αυτό είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ενίσχυση της χωρητικότητας των 5G δικτύων και σε συνδυασμό με τις mmWave ζώνες, ιδίως των 28 GHz, 38 GHz, 71-76 GHz και 81-86 GHz ενισχύεται κατά πολύ η τοπική πρόσβαση. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε πολλές μικρές κυψέλες με τεράστιο εύρος ζώνης, ικανές να παρέχουν στον χρήστη ρυθμούς πολλών gigabits για εφαρμογές πολυμέσων, όπως υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ συσκευών, π.χ. φωτογραφικών μηχανών, laptops, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας σε πραγματικό χρόνο (HDTV), ασύρματο gigabit Ethernet, ασύρματο gaming και βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) σε ρυθμούς έως και 3 Gb/s.

Επίσης πέρα από την πύκνωση του δικτύου, εξακριβώθηκε ότι η χωρητικότητα του μπορεί να βελτιωθεί και από τη χρήση εξελιγμένων και κατευθυντικών κεραιών στην ζώνη των mmWave. Μελέτες έδειξαν πως με τη χρήση αυθαίρετων γωνιών σε κατευθυντικές κεραίες πετυχαίνουμε 20 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ό, τι στα δίκτυα 4G, ενώ υπάρχουν ακόμα περισσότερα περιθώρια βελτίωσης όταν χρησιμοποιηθούν πλήρως κατευθυντικές κεραίες από και προς τα σημεία μετάδοσης και λήψης [26].

Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D) είναι μια πολύ οικονομική λύση, από πλευράς ενέργειας και προσφέρει μια πολύ καλή ευκαιρία για την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας των κυψελών. Τα δίκτυα μπορούν να αξιοποιήσουν αυτή την ευκαιρία και να χρησιμοποιήσουν τις D2D επικοινωνίες στις ζώνες των mmWave, επιτρέποντας σε κάθε συσκευή να βρίσκει και να επικοινωνεί με κάποια κοντινή της, δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα μέσα από αυτή την επικοινωνία να κάνει χρήση εφαρμογών ακόμα και ευαίσθητου περιεχομένου.

Σε ένα τόσο πυκνό δίκτυο, η σύνδεση των σταθμών βάσης μεταξύ τους με τη χρήση οπτικών ινών βασισμένων στο backhaul είναι αρκετά δαπανηρή. Κάπου εδώ έρχονται τα mmWave για να δώσουν λύση. Στις ζώνες των 60 GHz και E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz) μπορεί να επιτευχθεί υψηλής ταχύτητας ασύρματο backhaul πιο αποδοτικό, ευέλικτο και πιο εφαρμόσιμο. Παρέχει μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης, καθώς και μια πολλά υποσχόμενη λύση για backhaul σε μικρές κυψέλες. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε μια αρχιτεκτονική τέτοιου τύπου.

### 2.2.3 Προκλήσεις mmWave

Αν και στο παρελθόν είχε εξεταστεί η εκδοχή της χρήσης των mmWave ζωνών για τις κινητές επικοινωνίες, εν τέλει απορρίφθηκε και κρίθηκε ακατάλληλη κυρίως λόγω της χαμηλής ποιότητας διάδοσης [23] [25]. Πλέον όμως η ανάγκη για περισσότερους πόρους φάσματος προκειμένου τα δίκτυα της πέμπτης γενιάς να πετύχουν τους στόχους τους, σε χωρητικότητα και ρυθμούς μετάδοσης, επέφερε την αναγκαστική στροφή στις mmWave ζώνες. Έτσι προκύπτει ένα πλήθος προκλήσεων που πρέπει να υπερκεραστούν συμπεριλαμβανομένων του ισχυρού pathloss, της υψηλής κατευθυντικότητας των κυματομορφών, της ατμοσφαιρική σκέδασης, της απορρόφησης από τη βροχή, της χαμηλής περιθλάσης γύρω από τα εμπόδια, της χαμηλής διείσδυση μέσα από αντικείμενα, λόγω του ισχυρού θορύβου φάσης και τέλος λόγω του υπέρογκου κόστους εξοπλισμού. Επιπλέον προκλήσεις προστίθενται λόγω των θεμελιωδών διαφορών μεταξύ των

mmWave επικοινωνιών και των ήδη υφιστάμενων συστημάτων επικοινωνίας, που λειτουργούν στη μικροκυμματική ζώνη (π.χ. 2.4 GHz και 5 GHz). Για να επιτευχθεί επίσης υψηλή απόδοση του δικτύου, χρειάζεται να υιοθετήσουμε αποτελεσματικούς και αποδοτικούς μηχανισμούς για τη διαχείριση των παρεμβολών, το προγραμματισμό της μετάδοσης, τη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών και την διαμόρφωση του σήματος. Βλέπουμε λοιπόν πως απαιτούνται νέες σκέψεις και ιδέες σε αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις.

Οι mmWave επικοινωνίες υποφέρουν από τεράστιες απώλειες μετάδοσης, σε σχέση με άλλα συστήματα επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας χαμηλότερες συχνότητες φορέα. Η εξασθένηση από τη βροχή, την ατμοσφαιρική σκέδαση και την μοριακή απορρόφηση περιορίζουν το εύρος το εύρος τους. Η Non-line-of-sight (NLOS) επικοινωνία υποφέρει από υψηλότερη εξασθένηση σε σχέση με την line-of-sight (LOS). Επίσης μελέτες έδειξαν πως υλικά στον εξωτερικό χώρο, όπως φιμέ τζάμια ή τούβλα προκαλούν πολύ περισσότερες απώλειες σε σχέση με υλικά εσωτερικού χώρου, όπως απλό τζάμι και γυψοσανίδα, ενώ και η ανθρώπινη δραστηριότητα σε έναν εσωτερικό χώρο συμβάλει στην αύξηση των παρεμβολών.

Λόγω της υψηλής συχνότητα φορέα και του μεγάλου εύρους ζώνης, υπάρχουν αρκετές τεχνικές προκλήσεις στο σχεδιασμό στις κεραίες για τις mmWave επικοινωνίες. Στην ζώνης των 60 GHz, η μετάδοση υψηλής ισχύος και το τεράστιο εύρος ζώνης προκαλέσει σοβαρή μη γραμμική παραμόρφωση των ενισχυτών. Ωστόσο με την πύκνωση του δικτύου και τα μικρότερα μεγέθη κυψελών που εφαρμόζονται για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης, η εξασθένηση από τη βροχή και την ατμοσφαιρική σκέδαση δεν δημιουργούν σημαντική πρόσθετη απώλεια διαδρομής για μεγέθη κυψελών της τάξεως των 200m. Για την καταπολέμηση των σοβαρών απωλειών διάδοσης και του multipathing χρησιμοποιούνται συστοιχίες κατευθυντικών κεραιών κυκλικής πόλωσης και μικρού πλάτους δέσμης που έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται, τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, με στόχο την επίτευξη ενός υψηλού gain κεραίας. Για να κάνουμε τον πομπό και το δέκτη να κατευθύνουν τις κεραίες τους ένας προς τον άλλο είναι απαραίτητοι πολύπλοκοι αλγόριθμοι δέσμης που θα μειώνουν την χρονική διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Στην LOS επικοινωνία προτείνεται από την IEEE το πρότυπο 802.11ad, όπου η άμεση διαδρομή περιέχει σχεδόν όλη την ενέργεια και σχεδόν εξαλείφεται το φαινόμενο του multipathing. Στην NLOS επικοινωνία δεν υπάρχει άμεση διαδρομή και έτσι ο αριθμός των διαδρομών με σημαντική ενέργεια είναι μικρός. Η επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων και η μεγιστοποίηση της απόδοσης ισχύος στις mmWave επικοινωνίες βασίζονται κυρίως στις LOS μετάδοση.

Οι παρεμβολές στο δίκτυο μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μέρη: τις παρεμβολές από χρήστες του δικτύου που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη και τις παρεμβολές από χρήστες που βρίσκονται σε άλλες κυψέλες. Είναι λοιπόν απαραίτητο να εφαρμοστούν μηχανισμοί διαχείρισης παρεμβολών, όπως ο έλεγχος της ισχύος μετάδοσης και ο συντονισμός μετάδοσης, προκειμένου να αποφευχθεί η σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης. Με την αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών, η ταυτόχρονη μετάδοσης (spatial reuse) θα πρέπει να υποστηρίζεται τόσο μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης όσο στο χώρο που εξυπηρετεί ένας σταθμός βάσης.

Η κινητικότητα των χρηστών θέτει επίσης πολλές προκλήσεις στην mmWave επικοινωνία. Κατ' αρχήν η κινητικότητα των χρηστών θα επιβαρύνει με σημαντικές αλλαγές την κατάσταση του καναλιού. Όταν οι χρήστες μετακινούνται, η απόσταση μεταξύ του πομπού (TX) και του δέκτη (RX) ποικίλλει και η κατάσταση του καναλιού ποικίλλει επίσης αντίστοιχα. Επίσης η χωρητικότητα του καναλιού ποικίλει σημαντικά ανάλογα με την απόσταση. Ως εκ τούτου η επιλογή διαφορετικών συστημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) θα πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με την κατάσταση του καναλιού, ούτως ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της mmWave επικοινωνίας. Επιπλέον λόγω των μικρών περιοχών κάλυψης των σταθμών βάσης, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους, η κινητικότητα των χρηστών θα προκαλέσει σημαντικές και ταχείες διακυμάνσεις του φόρτου απασχόλησης σε κάθε BS. Έτσι είναι πολύ σημαντικό να γίνεται έξυπνη αντιστοίχιση των χρηστών με τους σταθμούς βάσης και αποδοτικό handover. Τα υπάρχοντα

standards για τις mmWave επικοινωνιών, όπως το IEEE 802.11ad και IEEE 802.15.3c, αντιστοιχίζουν τους χρήστες με τους σταθμούς βάσης με γνώμονα την Ένδειξη Έντασης Σήματος (RSSI - Received Signal Strength Indicator) γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική χρήση των πόρων.

Τα mmWave συστήματα επικοινωνιών πρέπει να συνυπάρχουν με άλλα συστήματα, όπως το LTE και το WiFi. Η μεγάλη χωρητικότητα που προσφέρουν οι mmWave επικοινωνίες μπορεί να μειώσει την κυκλοφορία από τις μακροκυψέλες και να κάνει εφικτή την παροχή καλύτερων υπηρεσιών διακίνησης των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, τα handover μεταξύ σταθμών βάσης (BSs) της μακροκυψέλης και των και APs στην mmWave ζώνη εγείρει προβλήματα όπως η εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης, η διαχείριση της κινητικότητας και των παρεμβολών. Η αλληλεπίδραση και η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ειδών δικτύων είναι το κλειδί για να διευρυνθούν οι δυνατότητες των ετερογενών δικτύων. Το επίπεδο ολοκλήρωσης μεταξύ τους έχει σημαντικό αντίκτυπο σχετικά με την απόδοση του συστήματος. Έντονη σύζευξη (strong coupling) σημαίνει καλύτερη απόδοση, ενώ η χαλαρή σύζευξη (weak coupling) έχει λιγότερη περιπλοκότητα. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης σε ετερογενή δίκτυα.

### **2.3 Επικοινωνία D2D (Device to Device communication)**

Τα κυψελοειδή δίκτυα 5ης γενιάς (5G), με δυνατότητα επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (D2D), θεωρούνται δίκτυα δύο επιπέδων (two-tier networks). Τα δύο επίπεδα σε αυτά τα δίκτυα αναφέρονται στο επίπεδο μακροκυττάρων (macro cell tier) και στο επίπεδο συσκευής (device tier) [27].

Η βαθμίδα των μακροκυψελών περιλαμβάνει το σταθμό βάσης (BS) στις επικοινωνίες της συσκευής όπως σε ένα συμβατικό κυψελοειδές σύστημα. Το επίπεδο της συσκευής περιλαμβάνει επικοινωνίες D2D. Εάν ένα τερματικό (συσκευή) συνδέεται στο κυψελοειδές δίκτυο μέσω ενός BS, αυτή η συσκευή λέγεται ότι λειτουργεί στο επίπεδο των μακροκυψελών. Εάν μια συσκευή συνδέεται απευθείας σε άλλη συσκευή ή πραγματοποιεί τη μετάδοσή της μέσω της βοήθειας άλλων συσκευών, αυτές οι συσκευές μπορούμε εύκολα να πούμε ότι λειτουργούν στη βαθμίδα της συσκευής.

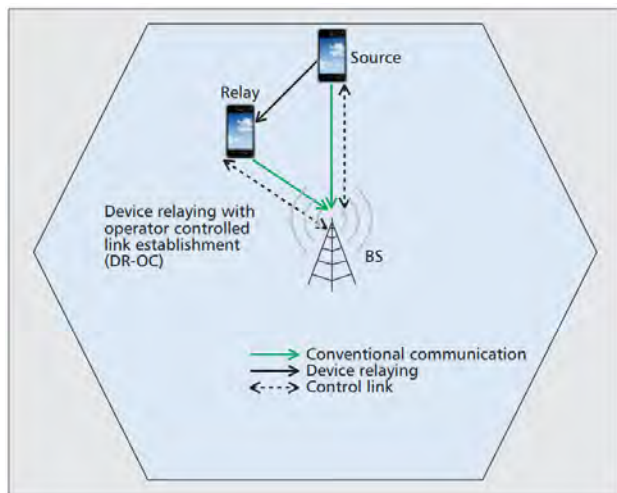
Σε αυτό το είδος συστήματος, το BS θα συνεχίσει να εξυπηρετεί τις συσκευές όπως σε ένα συμβατικό δίκτυο. Ωστόσο, σε περιοχές με συμφόρηση ή στα άκρα των κυψελών, οι συσκευές θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα ad hoc mesh δίκτυο.

Κατά την πραγματοποίηση επικοινωνιών επιπέδου συσκευής, ο operator μπορεί να έχει διαφορετικά επίπεδα ελέγχου. Με βάση το επιχειρηματικό μοντέλο, είτε ασκεί πλήρη / μερικό έλεγχο της κατανομής των πόρων μεταξύ των πηγών, των προορισμών και των συσκευών αναμετάδοσης, είτε προτιμά να μην έχει κανέναν έλεγχο. Ως εκ τούτου, μπορούμε να ορίσουμε τους ακόλουθους τέσσερις κύριους τύπους επικοινωνιών επιπέδου συσκευής:

#### **Αναμετάδοση συσκευής με ελεγχόμενη σύνδεση από τον operator - Device relaying with operator controlled link establishment (DR-OC)**

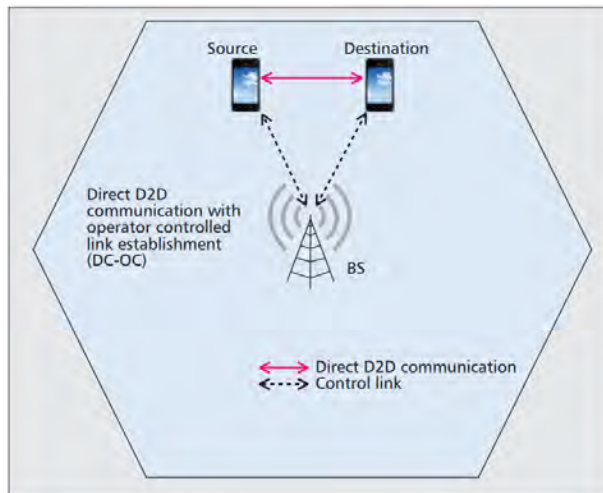
Μια συσκευή στην άκρη μιας κυψέλης ή σε μια περιοχή κακής κάλυψης μπορεί να επικοινωνήσει με το BS μέσω της αναμετάδοσης των πληροφοριών της μέσω άλλων συσκευών. Αυτό επιτρέπει στη συσκευή να επιτύχει υψηλότερο QoS ή μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ο operator επικοινωνεί με τις συσκευές αναμετάδοσης για τη δημιουργία μερικής ή πλήρους σύνδεσης ελέγχου (Σχήμα 2-2).





**Σχήμα 2-2:** Απεικόνιση της επικοινωνίας αναμετάδοσης της συσκευής με την εγκατάσταση ελεγχόμενης σύνδεσης του operator (DR-OC). Μία συσκευή επικοινωνεί με την BS μέσω της αναμετάδοσης των πληροφοριών της μέσω άλλων συσκευών.

(πηγή: Mohsen Nader Tehrani et al., 2014)



**Σχήμα 2-3:** Απεικόνιση της άμεσης επικοινωνίας D2D με εγκατάσταση ελεγχόμενης σύνδεσης από τον operator (DC-OC). Οι συσκευές (source – destination devices) μπορούν να μιλούν και να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους χωρίς την ανάγκη για BS, αλλά βοηθούνται από το BS μέσω ενός συνδέσμου ελέγχου.

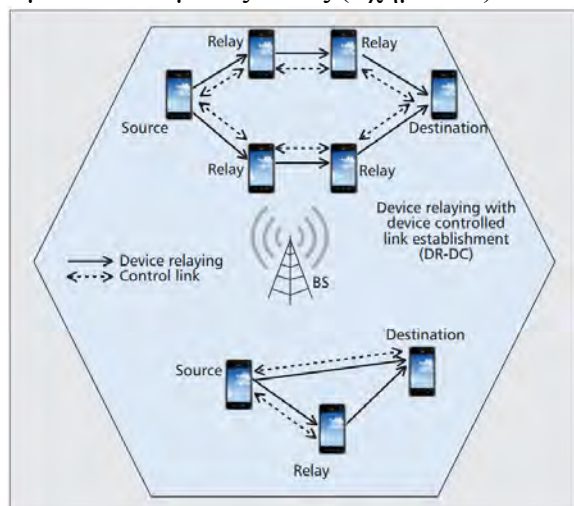
(πηγή: Mohsen Nader Tehrani et al., 2014)

### Άμεση επικοινωνία D2D με ελεγχόμενη σύνδεση από τον operator - Direct D2D communication with operator controlled link establishment (DC-OC)

Οι συσκευές προέλευσης (source) και προορισμού (destination) μιλούν και ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους χωρίς να χρειάζονται ένα BS, αλλά βοηθούνται από τον operator για τη δημιουργία συνδέσμων (Σχήμα 2-3)

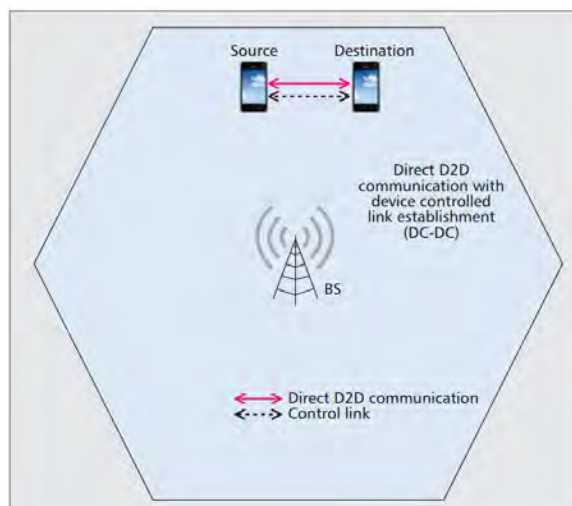
### Αναμετάδοση συσκευής με ελεγχόμενη σύνδεση μέσω συσκευής - Device relaying with device controlled link establishment (DR-DC)

Ο operator δεν συμμετέχει στη διαδικασία δημιουργίας συνδέσμων. Επομένως, οι συσκευές προέλευσης και προορισμού είναι υπεύθυνες για τον συντονισμό της επικοινωνίας με τη χρήση αναμεταδοτών μεταξύ τους (Σχήμα 2-4).



**Σχήμα 2-4:** Απεικόνιση της αναμετάδοσης συσκευής με ελεγχόμενη σύνδεση μέσω συσκευής (DR-DC). Οι συσκευές (source – destination devices) μπορούν να μιλούν άμεσα και δεν χρησιμοποιούν κανέναν σύνδεσμο ελέγχου από τον operator.

(πηγή: Mohsen Nader Tehrani et al., 2014)



**Σχήμα 2-5:** Απεικόνιση της άμεσης επικοινωνίας D2D με ελεγχόμενη σύνδεση μέσω συσκευής (DC-DC). (πηγή: Mohsen Nader Tehrani et al., 2014)

## Άμεση επικοινωνία D2D με ελεγχόμενη σύνδεση μέσω συσκευής - Direct D2D communication with device controlled link establishment (DC-DC)

Οι συσκευές προέλευσης και προορισμού έχουν άμεση επικοινωνία μεταξύ τους χωρίς κανένα έλεγχο από τον operator. Επομένως, οι συσκευές προέλευσης και προορισμού θα πρέπει να χρησιμοποιούν τους πόρους με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν περιορισμένη παρεμβολή σε άλλες συσκευές της ίδιας βαθμίδας και της βαθμίδας μακροκυττάρων (macrocell tier) (Σχήμα 2-5).

Όλα τα παραπάνω θα πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά προκειμένου να έχουμε ένα αξιόπιστο και προηγμένο δίκτυο. Με τη λέξη "αξιόπιστο" αναφέρουμε τις τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως η διαχείριση της ασφάλειας και των παρεμβολών.

Ένα κυψελωτό σύστημα δύο επιπέδων, εάν έχει σχεδιαστεί προσεκτικά, μπορεί να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με την αρχιτεκτονική κλασσικού κυψελοειδούς συστήματος. Στην επικοινωνία D2D, η δρομολόγηση των δεδομένων των χρηστών γίνεται μέσω των συσκευών των άλλων χρηστών, οπότε ο κύριος τομέας ανησυχίας είναι η ασφάλεια, επειδή πρέπει να διατηρηθεί η ιδιωτικότητα.

Η κλειστή πρόσβαση (*closed access*) θα διασφαλίσει την ασφάλεια των συσκευών που επιθυμούν να λειτουργήσουν σε επίπεδο συσκευής. Στην κλειστή πρόσβαση, μια συσκευή διαθέτει μια λίστα με "αξιόπιστες" συσκευές και οι συσκευές που δεν βρίσκονται σε αυτή τη λίστα πρέπει να χρησιμοποιούν τη βαθμίδα των μακροκυψελών για να επικοινωνούν μαζί τους. Για παράδειγμα, οι χρήστες σε μια γειτονιά ή στο χώρο εργασίας που γνωρίζουν ο ένας τον άλλον ή οι χρήστες που έχουν πιστοποιηθεί μέσω ενός αξιόπιστου μέρους, όπως ένας οργανισμός, μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, ικανοποιώντας ένα επίπεδο προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Οι συσκευές μιας ομάδας μπορούν να ορίσουν μια κατάλληλη κρυπτογράφηση μεταξύ τους για να αποφύγουν τη διάδοση των πληροφοριών τους σε άλλες συσκευές.

Στην ανοικτή πρόσβαση (*open access*), από την άλλη πλευρά, κάθε συσκευή μπορεί να λειτουργήσει ως αναμεταδότης (relay) για άλλες συσκευές χωρίς περιορισμούς. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένας τύπος εποπτείας, η ασφάλεια σε μια τέτοια περίπτωση είναι ένα δύσκολο ανοιχτό ερευνητικό πρόβλημα. Τα ζητήματα ασφάλειας στην επικοινωνία D2D περιλαμβάνουν τον εντοπισμό δυνητικών επιθέσεων, απειλών και ευπάθειας του συστήματος.

Μια άλλη σημαντική ανησυχία σε ένα σύστημα δύο επιπέδων είναι η διαχείριση παρεμβολών. Στις κατηγορίες DR-OC και DC-OC, η κατανομή των πόρων και η ρύθμιση κλήσεων εκτελούνται από το BS. Ως εκ τούτου, το BS μπορεί να ανακουφίσει το πρόβλημα της διαχείρισης παρεμβολών σε κάποιο βαθμό χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικές μεθόδους. Από την άλλη πλευρά, στα συστήματα DR-DC και DC-DC, δεν υπάρχει κεντρική οντότητα που να εποπτεύει την κατανομή των πόρων μεταξύ των συσκευών. Λειτουργώντας στην ίδια ζώνη με άδεια χρήσης, οι συσκευές θα επηρεάσουν αναπόφευκτα τους χρήστες της μακροκυψέλης.

Για να εξασφαλιστεί η ελάχιστη επίδραση στην απόδοση των υπαρχόντων BSs, πρέπει να σχεδιαστεί ένα δίκτυο δύο επιπέδων με στρατηγικές διαχείρισης έξυπνων παρεμβολών με κατάλληλα συστήματα κατανομής πόρων.

Στο DR-OC, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-2, αφού το BS είναι ένα από τα μέρη που συμμετέχουν στην επικοινωνία, μερικές από τις προαναφερθείσες προκλήσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν από τον έλεγχο της BS χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες μεθόδους [28]. Το BS μπορεί να επικυρώσει τις συσκευές αναμετάδοσης και να χρησιμοποιήσει την κατάλληλη κρυπτογράφηση για να διατηρήσει επαρκές το προσωπικό απόρρητο για τις πληροφορίες των συσκευών. Το BS μπορεί επίσης να διαχειρίζεται την κατανομή φάσματος μεταξύ των συσκευών αναμετάδοσης για να τις εμποδίσει να παρεμβαίνουν σε άλλες συσκευές.

Στο DC-OC, που φαίνεται στο Σχήμα 2-3, οι συσκευές επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους με την εγκατάσταση ελεγχόμενης σύνδεσης του operator. Συγκεκριμένα, ο operator ασχολείται με τον έλεγχο ταυτότητας πρόσβασης, τον έλεγχο σύνδεσης, την κατανομή πόρων μεταξύ συσκευών. Έχει

πλήρη έλεγχο στις συνδέσεις D2D, συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών επιπέδου ελέγχου (π.χ., ρύθμισης και συντήρησης σύνδεσης) και λειτουργιών επιπέδου δεδομένων (π.χ. κατανομή πόρων).

Οι συνδέσεις D2D στο επίπεδο της συσκευής (device tier) μοιράζονται την κυτταρική άδεια ζώνης με τις κανονικές κυψελοειδείς συνδέσεις στη βαθμίδα macrocell. Το δίκτυο μπορεί είτε να εκχωρεί δυναμικά τους πόρους σε κάθε σύνδεση D2D με τον ίδιο τρόπο όπως σε μια κανονική κυψελοειδής σύνδεση είτε με τη μορφή μιας ειδικής ομάδας πόρων σε όλες τις συνδέσεις D2D.

Στις κατηγορίες DR-DC και DC-DC, δεν υπάρχει BS ή διακομιστής για τον έλεγχο της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4 και στο Σχήμα 2-5, οι πολλαπλές συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας συνεργατική ή μη συνεργατική επικοινωνία και μία ή περισσότερες συσκευές μπορούν να παίξουν το ρόλο του αναμεταδότη (relay) για τις άλλες συσκευές. Αυτός ο τύπος επικοινωνίας είναι πιο δύσκολος από τους προηγούμενους, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κεντρική εποπτεία της αναμετάδοσης. Επομένως, η ρύθμιση σύνδεσης, η διαχείριση παρεμβολών και η κατανομή πόρων πρέπει να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας κατανομημένες μεθόδους. Πριν από τη φάση μετάδοσης δεδομένων, δύο συσκευές πρέπει να βρουν η μία την άλλη και τους γειτονικούς αναμεταδότες (δηλαδή, ανακάλυψη ομότιμων και ρύθμιση σύνδεσης D2D). Οι συσκευές μπορούν να εκπέμπουν περιοδικά πληροφορίες ταυτότητας έτσι ώστε οι άλλες συσκευές να γνωρίζουν την ύπαρξή τους και να αποφασίσουν εάν μπορούν να ξεκινήσουν μια άμεση επικοινωνία D2D ή μια επικοινωνία με τη βοήθεια συσκευών αναμετάδοσης. [29]

## 2.4 Γνωσιακά Δίκτυα

Το **Cognitive Radio** σύμφωνα με τον ορισμό του FCC (Federal Communications Commission) [30] [31] είναι ένα σύστημα που ανιχνεύει το λειτουργικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του και μπορεί δυναμικά και αυτονόμα να προσαρμόζει τις ραδιοπαραμέτρους λειτουργίας του για να τροποποιεί τη λειτουργία του συστήματος, όπως π.χ. να μεγιστοποιεί την ρυθμοαπόδοση, να μετριάξει την παρεμβολή, να διευκολύνει την διαλειτουργικότητα και να έχει πρόσβαση στα δευτερεύοντα δίκτυα. Ως εκ τούτου, κύριος σκοπός ενός Cognitive Radio αποτελεί η αυτόνομη εκμετάλλευση του τοπικά αχρησιμοποίητου κομματιού του φάσματος με στόχο την παροχή νέων μονοπατιών πρόσβασης στο φάσμα.

Τα **Γνωσιακά Δίκτυα** είναι μια απόπειρα/λύση στο πρόβλημα της συμφόρησης συχνοτήτων εισάγοντας την *ευκαιριακή* (opportunistic) εκμετάλλευση *φασματικών οπών* (spectrum holes ή white spaces), δηλαδή υποζωνών του ραδιοφάσματος, οι οποίες δεν καταλαμβάνονται μια δεδομένη χρονική στιγμή και εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής από τους έχοντες την αντίστοιχη άδεια χρήσης. Στα συγκεκριμένα δίκτυα απαντώνται εξ ορισμού δυο διαφορετικά είδη χρηστών: οι *Πρωτεύοντες Χρήστες* (Primary Users, PUs) και οι *Δευτερεύοντες Χρήστες* (Secondary Users, SUs). Ως Πρωτεύοντες θεωρούνται οι χρήστες οι οποίοι κατέχουν την άδεια αποκλειστικής εκμετάλλευσης συγκεκριμένων φασματικών υποζωνών, την οποία έχουν αποκτήσει κατόπιν νομίμων διαδικασιών και συνεννόησης με τους αντίστοιχους κανονιστικούς φορείς. Ως Δευτερεύοντες, αντίθετα, θεωρούνται οι χρήστες οι οποίοι δύνανται να χρησιμοποιούν χωρίς σχετική άδεια τις ήδη ανατεθειμένες στους Πρωτεύοντες Χρήστες φασματικές υποζώνες, αρκεί βέβαια να έχουν πρώτα σιγουρευτεί ότι (1) οι τελευταίοι δεν πραγματοποιούν μεταδόσεις πάνω από αυτές, (2) οι μεταδόσεις τους δεν πρόκειται να προκαλέσουν *παρεμβολές* (interference) στις μεταδόσεις άλλων Πρωτευόντων ή Δευτερευόντων Χρηστών, και (3) σε περίπτωση επιστροφής των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών θα τερματίσουν άμεσα οποιαδήποτε μετάδοσή τους, επιστρέφοντας τις δεσμευμένες φασματικές οπές στους έχοντες την υψηλότερη προτεραιότητα χρήσης. Καθίσταται λοιπόν προφανές ότι οι Δευτερεύοντες Χρήστες θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελούν νέες, πολύ πιο σύνθετες ενέργειες συγκριτικά με αυτές των χρηστών των συμβατικών ασύρματων δικτύων.

Τα Γνωσιακά Δίκτυα όμως παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες, οι οποίες προέρχονται από την συνεχή μεταβολή της διαθεσιμότητας του φάσματος και από τις διαφορές στην απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) των διαφόρων υπηρεσιών. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, κάθε δευτερεύων χρήστης στα Γνωσιακά Δίκτυα πρέπει να διατελέσει τις εξής λειτουργίες [30] [32]:

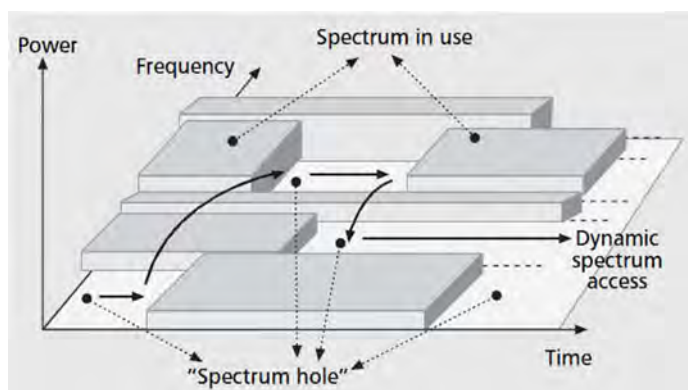
- Να καθορίσει ποια τμήματα του φάσματος είναι ελεύθερα και διαθέσιμα.
- Να επιλέξει το καλύτερο δυνατό κανάλι.
- Να συντονίσει την πρόσβαση σε αυτό το κανάλι με τους άλλους δευτερεύοντες χρήστες.
- Να ελευθερώσει το κανάλι όταν ένας πρωτεύων χρήστης εντοπιστεί.
- Να εκμεταλλευτεί αυτόνομα το τοπικά αχρησιμοποίητο φάσμα για να παρέχει μονοπάτια πρόσβασης σε αυτό.
- Μετρά, ανιχνεύει, μαθαίνει και γνωρίζει της παραμέτρους που σχετίζονται με χαρακτηριστικά του ραδιοκαναλιού, την διαθεσιμότητα φάσματος και ισχύος, τη λειτουργία του ραδιοπεριβάλλοντος, τις απαιτήσεις χρηστών και εφαρμογές, διαθέσιμα δίκτυα (υποδομές) και κόμβους, τοπικές πολιτικές και άλλους λειτουργικούς περιορισμούς.

Αυτές οι ικανότητες μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω λειτουργιών διαχείρισης του φάσματος που απευθύνονται σε τέσσερις κύριες διαδικασίες: α) την ανίχνευση φάσματος, β) την επιλογή φάσματος, γ) την κατανομή φάσματος, δ) την μετακίνηση στο φάσμα.

#### 2.4.1 Κύρια χαρακτηριστικά γνωσιακού δικτύου

**Δυναμικότητα:** Μέσω της αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο με το περιβάλλον του δικτύου, μπορούν να καθοριστούν ποια τμήματα του φάσματος δεν χρησιμοποιούνται σε ένα καθορισμένο χώρο ή χρόνο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-6, το Γνωσιακό Δίκτυο επιτρέπει την χρήση του προσωρινά αχρησιμοποίητου φάσματος, το οποίο ονομάζουμε οπή φάσματος. Επομένως, εκμεταλλεύεται αυτόνομα το τοπικά αχρησιμοποίητο φάσμα για να μπορεί να επιλεγεί το καλύτερο δυνατό κενό κομμάτι του φάσματος, χωρίς να προκαλεί παρεμβολές στον πρωτεύοντα χρήστη.

**Επαναπροσδιορισμός:** Ένα Γνωσιακό Δίκτυο μπορεί να προγραμματιστεί να εκπέμπει και να λαμβάνει σε ένα πλήθος διαφορετικών συχνοτήτων και να χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης ανάλογα με τον σχεδιασμό του υλικού. Με αυτήν την ικανότητα, για κάθε εύρος συχνοτήτων μπορούν να επιλεγούν οι καταλληλότερες παράμετροι λειτουργίας και σε περίπτωση αλλαγής της συχνότητας να επαναπροσδιοριστούν, έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη δυνατή χρησιμοποίηση του φάσματος.



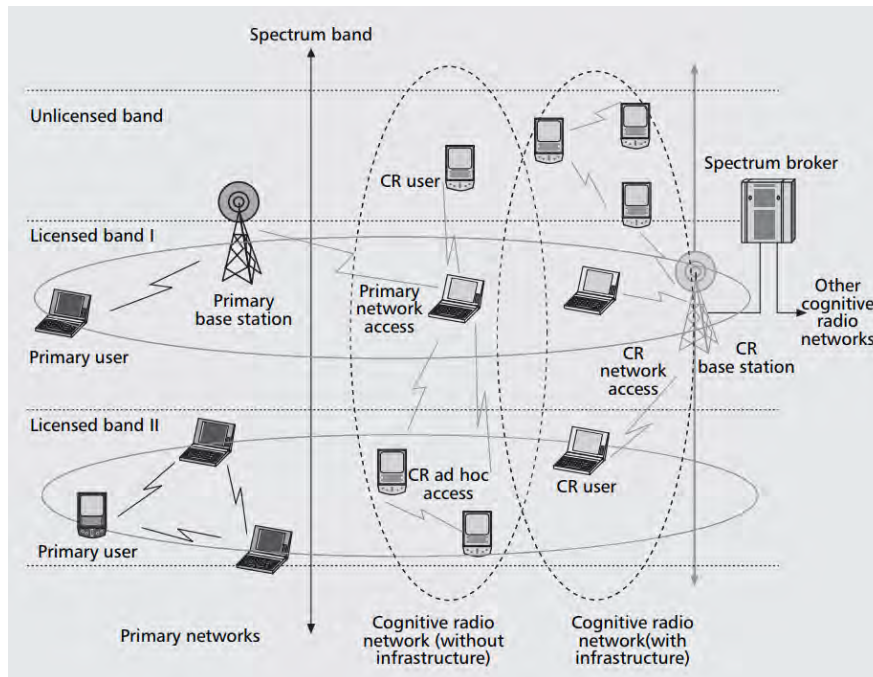
Σχήμα 2-6: Άποψη Όπών Φάσματος (πηγή: Ian F. Akyildiz et al., 2008) [32]

#### 2.4.2 Αρχιτεκτονική Κύριου και Γνωσιακού Δικτύου

Τα μέρη του δικτύου μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-7: το πρωτεύον δίκτυο και το γνωσιακό (ή δευτερεύον) δίκτυο [32]. Ως πρωτεύον δίκτυο ορίζουμε το ήδη υπάρχον δίκτυο, στο οποίο ανήκουν οι πρωτεύοντες χρήστες οι οποίοι είναι εξουσιοδοτημένοι να λειτουργούν σε συγκεκριμένη συχνότητα με καθορισμένο εύρος. Εάν το

πρωτεύον δίκτυο έχει υποδομή, τότε οι διαδικασίες προερχόμενες από πρωτεύοντες χρήστες ελέγχονται από τους πρωτεύοντες σταθμούς βάσης. Εξαιτίας της προτεραιότητας που έχουν οι πρωτεύοντες χρήστες στην πρόσβαση του φάσματος, οι λειτουργίες τους δεν θα πρέπει να επηρεάζονται από τους μη εξουσιοδοτημένους (δευτερεύοντες) χρήστες.

Το γνωσιακό (ή δευτερεύον) δίκτυο δεν έχει άδεια να λειτουργήσει στην επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων. Για αυτόν τον λόγο οι δευτερεύοντες χρήστες πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με περισσότερες ικανότητες και λειτουργίες προκειμένου να μπορέσουν να μοιραστούν το φάσμα με τους πρωτεύοντες. Το δευτερεύον δίκτυο μπορεί επίσης να περιέχει σταθμούς βάσης καθώς επίσης και διαμοιραστές φάσματος, οι οποίοι ελέγχουν τον διαμοιρασμό του φάσματος μεταξύ των δευτερεύοντων χρηστών ή ακόμα και υποδικτύων.



Σχήμα 2-7. Αρχιτεκτονική Γνωσιακού Δικτύου ((πηγή: Ian F. Akyildiz et al., 2008) [32])

Οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν την δυνατότητα πρόσβασης τόσο στο κομμάτι του φάσματος που είναι κατειλημμένο από πρωτεύοντες χρήστες, όσο και σε μέρος του φάσματος που είναι ελεύθερο και δεν έχει αποδοθεί ακόμη σε κάποια υπηρεσία. Επομένως τα είδη λειτουργίας για τα Γνωσιακά Δίκτυα είναι: **1)** η λειτουργία σε κατειλημμένο φάσμα και **2)** η λειτουργία σε ελεύθερο φάσμα [32]. Αναλυτικότερα:

**Κατειλημμένο φάσμα:** Χρησιμοποιείται κυρίως από το πρωτεύον δίκτυο, επομένως τα Γνωσιακά Δίκτυα στην περίπτωση αυτή εστιάζουν στον εντοπισμό των πρωτευόντων χρηστών. Η χωρητικότητα του καναλιού εξαρτάται από την παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες και επιπλέον εάν πρωτεύοντες χρήστες εμφανιστούν σε φάσμα το οποίο είναι κατειλημμένο από δευτερεύοντες χρήστες, τότε οι δευτερεύοντες χρήστες πρέπει να εγκαταλείψουν το συγκεκριμένο κομμάτι του φάσματος και να μετακινηθούν άμεσα.

**Ελεύθερο φάσμα:** Το φάσμα αυτό δεν έχει αποδοθεί κάπου, άρα οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν ίσα δικαιώματα πρόσβασης στο φάσμα με τους υπόλοιπους χρήστες. Απαιτούνται λοιπόν έξυπνοι μέθοδοι διαμοιρασμού του φάσματος, έτσι ώστε οι δευτερεύοντες χρήστες να είναι ανταγωνιστικοί ως προς την πρόσβαση τους σε αυτό.

### 2.4.3 Τύποι πρόσβασης γνωσιακού χρήστη

Οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν την δυνατότητα τριών διαφορετικών τύπων πρόσβασης:

- **Πρόσβαση στο Γνωσιακό Δίκτυο:** Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση στον δικό τους σταθμό βάσης, είτε λειτουργούν σε κατειλημμένο είτε σε ελεύθερο φάσμα.

Επειδή όλες οι αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μέσα στο δευτερεύον δίκτυο, η πολιτική που θα ακολουθήσουν για τον διαμοιρασμό του φάσματος μπορεί να είναι ανεξάρτητη από αυτήν του πρωτεύοντος δικτύου.

- **Adhoc πρόσβαση:** Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω adhoc σύνδεσης και σε κατειλημμένο και σε ελεύθερο φάσμα.
- **Πρόσβαση στο πρωτεύον δίκτυο:** Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να έχουν επίσης πρόσβαση στον σταθμό βάσης του πρωτεύοντος δικτύου όταν λειτουργούν σε κατειλημμένο κομμάτι του φάσματος. Αντίθετα με τους άλλους τύπους πρόσβασης, οι δευτερεύοντες χρήστες χρειάζονται ένα προσαρμόσιμο MAC πρωτόκολλο, που να επιτρέπει την μετάβαση σε πολλά πρωτεύοντα δίκτυα.

Για την διαχείριση του φάσματος στα Γνωστικά Δίκτυα απαιτούνται τα ακόλουθα σημαντικά βήματα:

1. **Ανίχνευση Φάσματος:** Ένας δευτερεύων χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο ένα κενό κομμάτι του φάσματος, άρα θα πρέπει να ελέγχει το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων, να συλλέγει τις πληροφορίες και να εντοπίζει τα κενά φάσματα.
2. **Επιλογή Φάσματος:** Ανάλογα με την διαθεσιμότητα του φάσματος, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να καταλάβουν ένα κανάλι. Αυτό δεν εξαρτάται μόνο από την διαθεσιμότητα του φάσματος αλλά καθορίζεται επίσης από εσωτερικές (πιθανόν και εξωτερικές) πολιτικές.
3. **Κατανομή Φάσματος:** Επειδή μπορεί να υπάρχουν πολλοί δευτερεύοντες χρήστες οι οποίοι προσπαθούν να έχουν πρόσβαση στο φάσμα, η πρόσβαση στο δευτερεύον δίκτυο πρέπει να συντονίζεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η συνύπαρξη πολλών χρηστών στο ίδιο κομμάτι του φάσματος.
4. **Μετακίνηση στο Φάσμα:** Οι δευτερεύοντες χρήστες είναι “επισκέπτες” στο Η/Μ φάσμα. Για αυτόν τον λόγο, όταν ένας πρωτεύων χρήστης χρειαστεί το τμήμα του φάσματος το οποίο χρησιμοποιεί ο δευτερεύων χρήστης, η επικοινωνία θα πρέπει να συνεχιστεί σε κάποιο άλλο κενό τμήμα του φάσματος.

## 2.5 Distributed Antenna System - DAS

Ένα καταναμημένο σύστημα κεραίας, Distributed Antenna System ή DAS, είναι ένα δίκτυο, που δομείται στο χώρο και χωρίζει κόμβους κεραίας, που είναι συνδεδεμένοι με μια κοινή πηγή μέσω ενός μέσου μεταφοράς. Το DAS παρέχει ασύρματη υπηρεσία σε μια γεωγραφική περιοχή, δηλαδή ένα μεγάλο χώρο γεωγραφικά καθορισμένο ή μία κτηριακή εγκατάσταση, όπως για παράδειγμα ένα μεγάλο κτίριο, γραφείο, νοσοκομείο, βιβλιοθήκη, στάδιο, γήπεδο, συνεδιακό κέντρο κ.α. Ένα καταναμημένο σύστημα κεραίας μπορεί να αναπτυχθεί σε εσωτερικούς χώρους (indoors-iDAS) ή σε εξωτερικούς χώρους (outdoors-oDAS). Και στις δύο περιπτώσεις η βασική ιδέα παραμένει η ίδια. [33]

Η ιδέα είναι να διαχωριστεί η μεταδιδόμενη ισχύς, μεταξύ των διαφόρων στοιχείων κεραίας και με μορφή καταναμημένη στο χώρο, να παρέχουν κάλυψη πάνω από την ίδια περιοχή ως μία ενιαία κεραία, αλλά με μειωμένη συνολική ισχύ και βελτιωμένη αξιοπιστία. Μία ενιαία κεραία, που ακτινοβολεί σε υψηλή ισχύ αντικαθίσταται από μία ομάδα κεραιών χαμηλής ισχύος για να καλύψει την ίδια περιοχή. Το DAS χρησιμοποιείται συχνά σε σενάρια, όπου εναλλάσσονται τεχνολογίες και είναι ανέφικτο λόγω της μορφολογίας τους να οριοθετηθούν σε συγκεκριμένα όρια. Η ιδέα λειτουργεί, επειδή λιγότερη ενέργεια σπαταλιέται, υπερνικούνται οι απώλειες διείσδυσης και σκίασης και επειδή ένα κανάλι line-of-sight υπάρχει πιο συχνά, οδηγώντας σε μειωμένα βάρη, συνεπώς, δεν ξεθωριάζει και αποφεύγεται η εξάπλωση της καθυστέρησης. [33]

Χρησιμοποιώντας ένα καταναμημένο σύστημα κεραίας για τη δημιουργία ενός χώρου ασύρματης κάλυψης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσει την τεχνική αυτή για να διαδώσει εσωτερικά το WiFi για εμπορικές χρήσεις. Εκτιμάται ότι μόνο περίπου 5% των εμπορικών WiFi χρησιμοποιούν ένα

καταναμημένο σύστημα κεραίας. Κάτι τέτοιο γίνεται για λόγους κόστους αφού για περιορισμένους χώρους το κόστος του DAS είναι αυξημένο.

Τα καταναμημένα συστήματα κεραίας μπορεί να τοποθετηθούν στο εσωτερικό των κτιρίων για την αύξηση ασύρματων σημάτων στο εσωτερικό τους. Συχνά, τοποθετούνται μέσα σε μεγάλες δομές, όπως γήπεδα, σε μία εταιρική έδρα, σε εμπορικό κέντρο, σε κέντρο μίας πόλης, σε νοσοκομεία, σε πανεπιστήμια και σε άλλες περιοχές, που έχουν ανάγκη από μεγάλη κάλυψη δεδομένων μέσα στην ημέρα. Τα εξωτερικά DAS δίκτυα έχουν υλοποιηθεί σε συγκεκριμένες τοποθεσίες μέσα σε μία περιοχή, που ήδη έχει κάλυψη από μακροκυψέλες, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα.

### 2.5.1 Τεχνολογία & Αρχιτεκτονική

Κάθε σύστημα DAS, αποτελείται από ένα πλήθος κεραιών που υπάρχουν στο δίκτυο και κατανέμουν το εύρος ζώνης, έτσι ώστε να διαμοιράζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου και να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι διάφοροι χρήστες, που υπάρχουν σταθεροί ή διακινούμενοι στη συγκεκριμένη περιοχή, που έχει καθοριστεί να εξυπηρετείται από αυτό, κάθε χρονική στιγμή.

Οι θεμελιώδεις δομές ενός συστήματος DAS υλοποιούνται με βασικό στόχο να παρέχουν μεγάλη χωρητικότητα σε συγκεκριμένες περιοχές, που είναι απαραίτητο, μεταφέροντας τη συχνότητα εγγύτερα στο χρήστη και παρέχοντας επιπλέον, χωρητικότητα για κλήσεις, μεταφορά δεδομένων σε περιοχές με υψηλές ανάγκες για ασύρματες δικτυακές υπηρεσίες κλπ.

Ένα δίκτυο DAS αποτελείται από 3 βασικά συστατικά [34] [35]:

- **έναν αριθμό από κόμβους επικοινωνίας**, όπου ο καθένας περιέχει τουλάχιστον μία κεραία για την εκπομπή και μία άλλη για τη λήψη ενός ασύρματου δικτύου. Ανάλογα με τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική και το περιβάλλον είναι πιθανό να συμπεριλαμβάνεται επιπρόσθετος εξοπλισμός, εκτός από τις κεραίες, όπως ενισχυτές, κεφαλές, μετατροπείς σήματος και πάροχοι ισχύος.
- **ένα μέσο μετάδοσης σήματος υψηλής συχνότητας**, που επιτρέπει την επικοινωνία των επί μέρους κόμβων με ένα κεντρικό - συνήθως, επιδιώκεται η χρήση οπτικής ίνας, αλλά συχνά ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν πιο οικονομικές λύσεις λόγω αυξημένου κόστους.
- **Πομποδέκτες ή άλλος εξοπλισμός**, που βρίσκεται στον κεντρικό σταθμό και εκπέμπει ή μετατρέπει τις διαδικασίες ή σε άλλες περιπτώσεις ελέγχει τα μεταδιδόμενα σήματα επικοινωνίας.

Το δίκτυο DAS μπορεί να υλοποιηθεί εντός ή εκτός μεγάλων κτιρίων και μερικώς εσώκλειστων δομών. Ένα δίκτυο DAS ποικίλει από 2 έως 100 κόμβους DAS. Κάθε κόμβος DAS εκπέμπει σήματα σε χαμηλότερη ισχύ από ότι οι μεγαλύτερες κεραίες, σε επίπεδα παρόμοια με αυτά, που παρέχονται από τις μακροκυψέλες. Οι εξωτερικοί DAS κόμβοι είναι συνδεδεμένοι σε στύλους από επιχειρήσεις δημόσιας ωφέλειας, σε φωτεινούς σηματοδότες, ή παρόμοιες δομές σε σχετικά χαμηλά ύψη, συγκριτικά με τις μεγαλύτερες κεραίες, ώστε να παρέχεται μικρή χωρητικότητα σε κάθε DAS κόμβο [33] [36] [37].

Το DAS δίκτυο είναι ελκυστική λύση, διότι είναι ευέλικτο και εύκολα επεκτάσιμο. Όπως και οι μακροκυψέλες, τα δίκτυα DAS μπορεί να εξασφαλίσουν ότι υποστηρίζεται μεγάλο πλήθος παρόχων κινητής επικοινωνίας, αφού υπάρχουν πολλές συχνοτικές ζώνες και ασύρματες υπηρεσίες και τεχνολογίες σε ένα μικρό τομέα. Ενώ τα δίκτυα DAS συχνά χρησιμοποιούν τον ίδιο εξοπλισμό που απαιτείται για τις μακροκυψέλες, εντούτοις τα DAS επιτρέπουν στις πηγές να λειτουργούν σε συγκεκριμένο χώρο, που υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για κάλυψη από μεγάλη χωρητικότητα, με αποτέλεσμα να αλλάζουν σε διαφορετικά τμήματα του DAS δικτύου. Κάθε δίκτυο DAS χρησιμοποιείται ως μέθοδος διανομής του εκπεμπόμενου σήματος από ένα κεντρικό hub σε συγκεκριμένες περιοχές με φτωχή κάλυψη ή μη επαρκή χωρητικότητα και επιστρέφουν τα σήματα πίσω στον κόμβο, ώστε να επιτευχθεί επικοινωνία με το αρχικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Γενικά, πλήθος πολιτών επιδιώκει υπηρεσίες υψηλής χωρητικότητας, αφού έχουν στην κατοχή τους ψηφιακές συσκευές, όπως έξυπνα τηλέφωνα, υπολογιστές και tablets. Τα DAS δίκτυα εφαρμόζονται ως ένα μέσο μεγάλου φόρτου δεδομένων, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο να εξαπλωθούν τα δεδομένα στο σύνολο της χωρητικότητας, ώστε να παρέχεται περισσότερο ανομοιόμορφη κάλυψη. Τα πιο πολλά DAS δίκτυα δε γνωρίζουν την τεχνολογία που θα συνυπάρξει μαζί τους στο συνολικό δίκτυο. Άρα, οι λύσεις επικοινωνίας με χρήση DAS είναι ιδιαίτερα ελκυστικές στον ασύρματο πάροχο που διατηρεί την άδεια για το φάσμα εκπομπής RF ανάμεσα σε πολλές συχνοτικές ζώνες και χρησιμοποιεί πολλαπλές τεχνολογίες μετάδοσης. Ένα DAS δίκτυο ενδέχεται να υλοποιείται και να ανήκει σε έναν συγκεκριμένο ασύρματο πάροχο, σε ένα τρίτο ουδέτερο DAS δίκτυο του παρόχου υπηρεσίας, ή σε ένα πελάτη επιχειρήσεων ή σε έναν ιδιοκτήτη κτιριακών εγκαταστάσεων.

### 2.5.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Τα DAS συστήματα είναι πολύ σημαντικά, διότι περιλαμβάνουν θεμελιώδη πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ασύρματες λύσεις, τα οποία τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά για τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, καθώς και για τους χρήστες. Ένα DAS περιλαμβάνει πλεονεκτήματα, όπως:

- Ορίζει υψηλότερη κάλυψη.
- Επιτρέπει στον πάροχο πρόσβαση στην κυψέλη σε όλες τις εφαρμογές.
- Εξαλείφει τα νεκρά σημεία κάλυψης στα κτίρια.
- Είναι Carrier Agnostic, δηλαδή δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζει κάποιον συγκεκριμένο πάροχο ή τεχνολογία, που λειτουργεί συνδυαστικά.
- Παρέχει ίδια κάλυψη χρησιμοποιώντας χαμηλότερη συνολική ισχύ.
- Αυξάνει το εσωτερικό σήμα σε όλους τους τομείς εντός της εμβέλειας του DAS

Από την άλλη μεριά, η χρήση ενός κατανεμημένου συστήματος κεραιών περιλαμβάνει και μειονεκτήματα, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται σε κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές. Μερικά από τα προβλήματα, που επιφέρει είναι:

- Το υψηλότερο κόστος, ως αποτέλεσμα των πρόσθετων υποδομών, που απαιτούνται για την υλοποίηση του. Τα δίκτυα απαιτούν υψηλά επενδυτικά κεφάλαια, λόγω του σχεδιασμού, της εγκατάστασης και της διατήρησης πολλαπλών κόμβων και εγκατάστασης καλωδίωσης οπτικής ίνας.
- Η πιθανά μεγαλύτερη οπτική επίδραση για μερικές εφαρμογές, ως αποτέλεσμα του μεγαλύτερου αριθμού των κεραιών, αν και είναι πιθανό να είναι πολύ χαμηλότερη σε ύψος.
- Ο σχεδιασμός των DAS είναι διαφορετικός σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα και χρειάζεται ιδιαίτερη διαχείριση.

Από τα παραπάνω, συνεπάγεται πώς μπορεί κανείς να διαλέξει ανάλογα με το δίκτυο που έχει, να υλοποιήσει το DAS για τα πλεονεκτημάτα του, αλλά και να αξιολογήσει τα μειονεκτήματα του, έτσι ώστε να διαχειριστεί κατάλληλα τη δικτυακή υποδομή του.

## 2.6 Femtocells

Η χρήση των Femtocells είναι μέρος μίας γενικότερης τάσης, που επικρατεί στα κινητά δίκτυα, σε σχέση με τη μείωση του μεγέθους των κυψελών, αφού εστιάζουν στην ιδέα ότι μειώνοντας το μέγεθος της βασικής κυψέλης, μπορεί να αναλαμβάνεται από κάθε κυψέλη εξυπηρέτηση κάποιου τμήματος του εύρους ζώνης. Ενώσω, υπάρχουν μειονεκτήματα σε αυτές τις προσεγγίσεις, είναι σημαντικά τα πλεονεκτημάτα τους για μικρούς χώρους, όπως τα σπίτια ή τα μικρά γραφεία, όπου πλέον θα συνδέονται ολοένα και περισσότερες συσκευές.

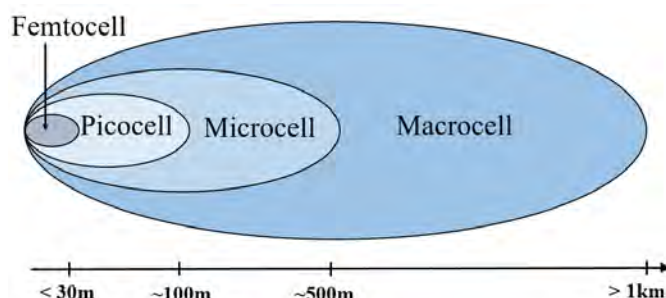
Ένα Femtocell είναι η μικρότερη μονάδα ως τώρα, που μπορεί να συναντήσει κανείς σε ένα κυψελοειδές δίκτυο. Σχεδιάστηκε για να τοποθετείται σε κάθε σπίτι και επιτρέπει σε άλλες κινητές συσκευές να επικοινωνούν μέσα από ευρυζωνικές συνδέσεις μέσω καλωδίου ή διαφόρων τύπων



DSL. Τα Femtocells λειτουργούν με το ίδιο αδειοδοτούμενο φάσμα, όπως οι μικροκυψέλες και οι μακροκυψέλες, όμως είναι δυνατό να καλύψουν μόνο κάποιες δεκάδες μέτρα και να καλύψουν μία μικρή περιοχή εντός της οικίας.

Στα ασύρματα δίκτυα, η τεχνολογία femtocell αναφέρεται ως Home Enhanced NodeB (HeNB). Οι σταθμοί βάσης Femtocells ή αλλιώς Femto Base Station (FBS) είναι μικροί σε μέγεθος, χαμηλής ισχύος σταθμοί βάσης ή Access Points (APs) που είναι εγκατεστημένα έτσι ώστε να ενισχύουν την υπάρχουσα δομή της συμβατικής κινητής επικοινωνίας σε μία μεγάλη περιοχή βελτιώνοντας την χωρητικότητα σε όλα τα κυψελοειδή δίκτυα [38]. Πολλές φορές οι FBS αναφέρονται και ως ασύρματες διεπαφές που έχουν την ικανότητα να συνδέουν τον κύριο macro σταθμό βάσης με τους τερματικούς χρήστες σε μη πυκνοκατοικημένες περιοχές ή κτίρια.

Η ανάπτυξη των femtocells βοήθησε σημαντικά στην μείωση του μεγέθους των κυψελών και στην αύξηση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Ωστόσο πολύ έμφαση δίνεται στη μείωση της μέγιστης ισχύος με την οποία μεταδίδεται με χρήση femtocells έναντι των macrocells. Το Σχήμα 2-8 μας δείχνει μία απεικόνιση της περιοχής κάλυψης των διαφόρων κυψελοειδών δομών [39].



Σχήμα 2-8 Σύγκριση εμβέλειας των διαφόρων κυψελωτών δομών. [40]

Ένας από τους παράγοντες κλειδιά υπέρ των Femtocells είναι ότι είναι σχεδιασμένα να αγοράζονται και να εγκαθίστανται από τον καταναλωτή, που δεν έχει τεχνικές γνώσεις. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη επαρκούς ευφυίας από τα Femtocell, ώστε να ενημερώνονται και να ρυθμίζονται στο περιβάλλον πριν την εγκατάσταση, να προσαρμόζονται σε οτιδήποτε αλλαγές συμβαίνουν στο περιβάλλον με την καθημερινή χρήση και να προσαρμόζονται σε κάθε ελαττωματική κατάσταση, που ενδέχεται να συμβεί κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε λειτουργίας με το να αποτρέπουν σφάλματα. Ένα Femtocell πρέπει να μπορεί να αυτορυθμίζεται να αυτοβελτιστοποιείται και να αναγνωρίζει και να διορθώνει τα σφάλματα, ώστε να είναι εύκολη η εγκατάστασή του. Αυτά είναι άλλωστε τα σημαντικότερα από τα θέματα που έχουν ήδη προβλεφθεί, εφόσον, περιλαμβάνονται εντός της αρχιτεκτονικής τους αρκετοί αλγόριθμοι αυτοοργάνωσης.

### 2.6.1 Οφέλη από τη χρήση τους

Η χρήση των femtocells εισάγει θα λέγαμε αρκετά οφέλη στο τηλεπικοινωνιακό κομμάτι, μερικά από τα οποία είναι:

- **Κάλυψη και χωρητικότητα.** Τα femtocells έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε να καλύπτουν μικρές αποστάσεις, οι οποίες με τη σειρά τους βοηθούν στο να έχουμε χαμηλή ισχύ εκπομπής και υψηλότερο SINR. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει άριστη λήψη σήματος κατά τη διαδικασία λήψης οδηγώντας σε καλύτερη κάλυψη και ταυτόχρονα μεγαλύτερη χωρητικότητα.
- **Αξιοποίηση των μακροκυψελών.** Η χρήση των femtocells βοηθά στη μείωση του φόρτου εργασίας που καλούνται να εκπληρώσουν οι μακροκυψέλες. Οι μακροκυψέλες έχουν την ιδιότητα να χρησιμοποιούν ορισμένους από τους πόρους που έχουν στην διάθεσή τους για καλύτερη λήψη και μεγαλύτερη εξυπηρέτηση χρηστών κινητών τηλεφώνων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα femtocells μπορούν να απορροφήσουν ένα μέρος της εσωτερικής κυκλοφορίας.

- **Κόστος.** Από την άποψη της μείωσης του κόστους, η χρήση των femtocells, έχει οδηγήσει στη μείωση του κόστους των υπηρεσιών πολλών ευρυζωνικών υπηρεσιών που προσφέρονται από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας.

Συνοπτικά θα λέγαμε ότι τα femtocells, εισάγουν οφέλη τόσο για τους παρόχους όσο και για τους χρήστες:

- Για τους **παρόχους**, τα δεδομένα απαλλάσσονται πλέον από τη χρήση macrocells, αυξάνουν τα έσοδα τους με χαμηλότερο κόστος για backhaul ενώ αυξάνεται ή μένει σχεδόν ίδιος ο αριθμός των πελατών που έχουν συνδρομή στην εταιρεία τους.
- Από την άλλη μεριά, **οι χρήστες** απολαμβάνουν καλύτερη εσωτερική κάλυψη, εξαιρετικά ταχύτητα δεδομένων και βελτίωση στην κατανάλωση ενέργειας.

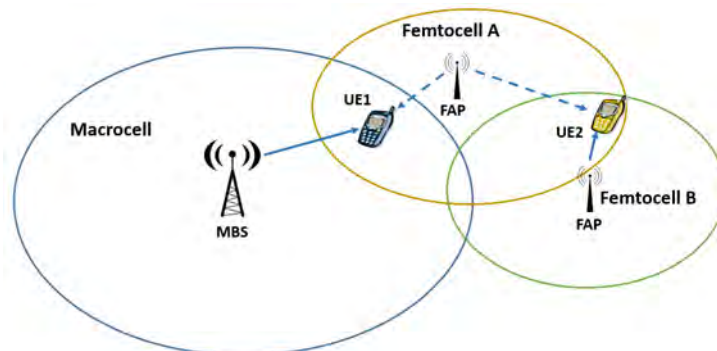
### 2.6.2 Τεχνολογίες Femtocell

Εκτός από τα οφέλη που εισάγει η χρήση των femtocells στα ασύρματα δίκτυα 5G, είναι και η χρήση επιπλέον φάσματος, σε συνδυασμό με την χρήση των συνδέσεων που διαθέτουν ήδη οι χρήστες στο σπίτι ή το γραφείο τους. Η υποδομή των femtocells απαιτεί σχεδιασμό τεχνολογιών που θα μπορούν να προσαρμοστούν στα ήδη υπάρχοντα κυψελοειδή δίκτυα. Η δομή των femtocells θα λέγαμε ότι είναι τέτοια ώστε να είναι ικανή να αλληλεπιδρά εύκολα με τα ήδη υπάρχοντα κυψελοειδή δίκτυα σε οποιοδήποτε στρώμα δικτύου. Η διαχείριση των handsoffs (μεταπομπών), των παρεμβολών μεταξύ κυψελών και του κόστους, έχει κάνει πολλούς από τους παρόχους να προσαρμόζουν την χρήση τους στις ανάγκες των χρηστών βασιζόμενοι πάντα στην κυψελοειδή δομή που έχουν στη διάθεσή τους.

#### Προκλήσεις από τη χρήση Femtocell

Παρά το γεγονός ότι τα femtocells εισάγουν σημαντικά οφέλη στις τεχνολογίες που εφαρμόζονται από τους παρόχους ευρυζωνικών υπηρεσιών, υπάρχουν κάποιες προκλήσεις τις οποίες πρέπει να λάβουμε υπόψη. Κάποιες από αυτές είναι:

- **Οι παρεμβολές.** Το θέμα των παρεμβολών είναι ίσως το πιο σημαντικό ζήτημα κατά τη διαδικασία σχεδιασμού τεχνολογιών που υποστηρίζουν femtocells υποδομή. Η εισαγωγή ενός femtocell σε ένα κυψελοειδές δίκτυο μεταβάλλει ουσιαστικά την τοπολογία ολόκληρου του δικτύου. Παρεμβολές μπορεί να υπάρξουν μεταξύ femtocells και macrocells (UE1 στο Σχήμα 2-9) ή και μεταξύ femtocells (UE2 στο Σχήμα 2-9). Οι παρεμβολές μεταξύ macrocells και femtocells οφείλονται στην ισχύ εκπομπής και σε απώλεια δεδομένων. Το Σχήμα 2-9 δείχνει μία τέτοια παρεμβολή.



Σχήμα 2-9 Παρεμβολές macro & femto cells

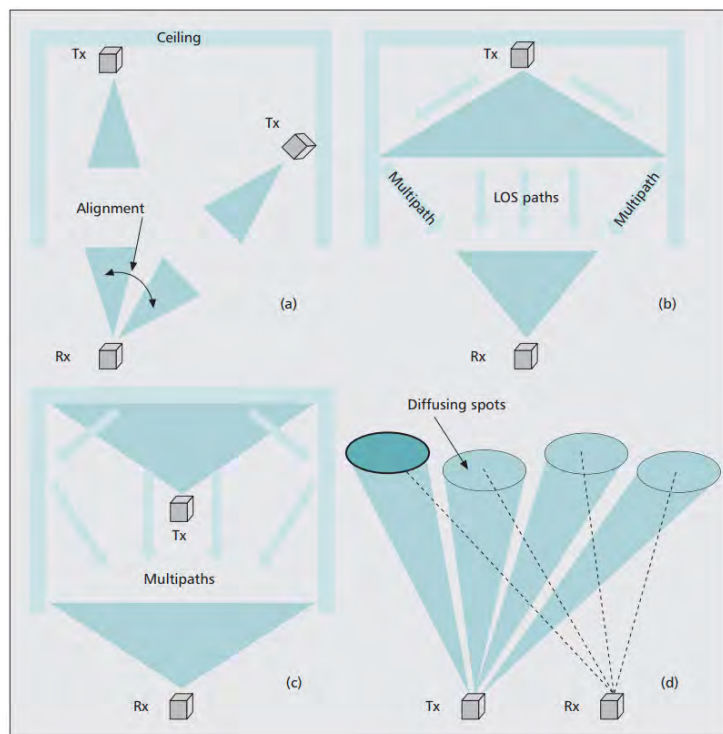
- **Κινητικότητα χρηστών και διαπομπές.** Οι τερματικοί χρήστες έχουν την ιδιότητα να μετακινούνται εναλλάσσοντας πολλές φορές κυψέλες. Σε μια “ιδανική” τοποθεσία εντός μιας μακροκυψέλης υπάρχει πάντα ικανοποιητική εξυπηρέτηση από τον σταθμό βάσης στον τερματικό χρήστη. Ωστόσο ζητήματα διαπομπών από femtocells σε macrocells ή και femtocells μεταξύ τους πολλές φορές δημιουργούν ζητήματα στην παροχή υπηρεσιών.
- **Backhaul.** Πολλές φορές όσον αφορά τη σχεδίαση συστημάτων με χρήση femtocells, εντοπίζονται θέματα ασφάλειας της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Αυτός είναι και ο

βασικός λόγος που έχουμε αμφιβολίες κατά τη σχεδίαση συστημάτων όσον αφορά το QoS και το περιορισμένο εύρος ζώνης [41] [42].

## 2.7 Ασύρματη Επικοινωνία Ορατού Φωτός (VLC)

Η ασύρματη επικοινωνία μέσω του ορατού φωτός (Visible Light Communication - VLC) είναι μια ιδιαίτερα καινοτόμα τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση συσκευών κυρίως σε εσωτερικούς χώρους αλλά και σε εξωτερικό χώρο (σπανιότερα). Συνδυάζει τον φωτισμό μιας περιοχής με την ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων (data, φωνή, video). Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η έρευνα πάνω στην τεχνολογία VLC και στη χρήση συσκευών τόσο για φωτισμό, όσο και για μετάδοση δεδομένων. Κύριος λόγος είναι το γεγονός πως με τη μεγάλη αύξηση των νέων εφαρμογών και τεχνολογιών που είναι πλέον διαθέσιμες στην αγορά, υπάρχει αυξημένη ανάγκη για περισσότερο αξιοποιήσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων, κάτι που οι κλασσικές ραδιοεπικοινωνίες (RF) δεν μπορούν να προσφέρουν. Επιπλέον, η πρόοδος στην έρευνα για συσκευές που μπορούν να υποστηρίξουν την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας με τον φωτισμό (πχ LEDs-Light Emitting Diodes) και για συσκευές που μπορούν να δεχτούν και να αποκωδικοποιήσουν το παραπάνω σήμα (πχ φωτοανιχνευτές, φωτοδιόδοι, ενισχυτές), έχουν κάνει ακόμα πιο πρόσφορο το έδαφος για την περαιτέρω μελέτη και χρησιμοποίηση της VLC.

Κατά τη διάδοση της πληροφορίας από τους Σταθμούς Βάσης (OAPs-Optical Access Points) προς τους δέκτες, αλλά και κατά την αντίστροφη διαδικασία, αφού και οι δέκτες στέλνουν σήματα προς τους OAPs, το φως ακολουθεί τόσο την ευθεία πορεία (LOS-Line-Of-Sight), αλλά φτάνει στον προορισμό του και μέσω άλλων διαδρομών (NLOS-Non-Line-Of-Sight) λόγω των φαινομένων διάδοσης (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση κλπ), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-10. [43]



**Σχήμα 2-10. a) Directed-LOS link b) non-directed-LOS link c) diffuse link d) quasi-diffuse link. (πηγή: H. Elgala et al., 2011)**

Οι συνηθέστερες διαμορφώσεις συνδέσεων φαίνονται στο Σχήμα 2-10 (a-c). [44]

Ένας σχεδόν διάχυτος σύνδεσμος βασισμένος στη διάχυση πολλαπλών σημείων (multispot diffusing - MSD), που προτάθηκε αρχικά από τους Yun και Kavehrad το 1993, φαίνεται στο Σχήμα 2-10d. Ο σύνδεσμος χρησιμοποιεί πολλαπλούς πομπούς στενής δέσμης και δέκτες γωνιακής πολυμορφίας (angle diversity receiver - ADR) οι οποίοι είναι αρκετοί στενοί ανιχνευτές του οπτικού πεδίου (field of view – FOV) που στοχεύουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Το σύστημα αυτό

εκτίθεται σε λιγότερες διαδρομές και επιτυγχάνει χαμηλότερες απώλειες διαδρομής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης από τους συμβατικούς διάχυτους συνδέσμους μεγάλης ακτίνας (Σχήμα 2-10c), αλλά αυτές οι βελτιώσεις επιδόσεων είναι εις βάρος της αυξημένης πολυπλοκότητας. Επιτρέπει ένα υψηλότερο επίπεδο κινητικότητας χρηστών από τους συνδέσμους LOS (a και b), αλλά απαιτεί περισσότερη ισχύ σε αυτή την περίπτωση.

### 2.7.1 Σύγκριση VLC με RF Επικοινωνίες

Είναι δεδομένο πως όταν έχουμε να κάνουμε με επικοινωνία σε εξωτερικό χώρο με μεγάλες αποστάσεις και σε εσωτερικούς χώρους με τους χρήστες να έχουν μεγάλη κινητικότητα, οι RF επικοινωνίες είναι αυτήν την στιγμή προτιμότερες καθώς μπορούν εγγυώνται σε μεγάλο βαθμό την κάλυψη των χρηστών (ενσύρματα ή ασύρματα). Με τη δημιουργία όμως πολλών νέων τεχνολογιών και εφαρμογών έχουν αυξηθεί και οι ανάγκες των χρηστών για καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας (ασύρματη κάλυψη, περισσότερο εύρος ζώνης για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, λιγότερες παρεμβολές κ.α.). Για όλους αυτούς τους λόγους έχει ενταθεί η έρευνα πάνω στις VLC επικοινωνίες, που μπορούν να καλύψουν κάποια από τα παραπάνω ζητήματα αφού έχουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα απέναντι στην κλασική RF μετάδοση. [45]

Οι διαφορές και τα πλεονεκτήματα της VLC έναντι των RF επικοινωνιών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

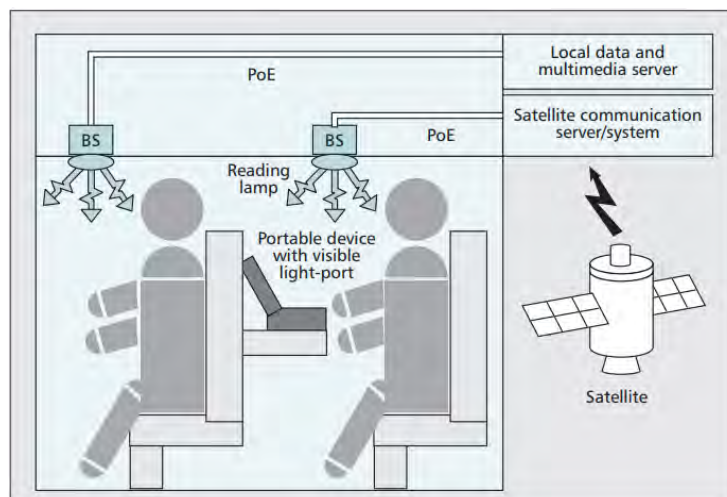
**Πίνακας 2-1. Σύγκριση VLC με RF επικοινωνίες.**

Ιδιότητα	VLC	RF	Σχολιασμός
Εύρος ζώνης	400THz-800THz	3kHz-300GHz	Πρακτικά το εύρος ζώνης για VLC είναι απεριόριστο, ενώ στις RF είναι περιορισμένο.
Ρυθμός μετάδοσης	Έως 10Gbps	Έως 200Mbps	Το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης που διαθέτει η VLC σε συνδυασμό με τις μικρές αποστάσεις που έχει να καλύψει το σήμα, αφού αναφερόμαστε σε εσωτερικού χώρου εφαρμογές κυρίως, δίνουν τη δυνατότητα για επίτευξη πολύ μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης από τις RF.
Παρεμβολές	Όχι	Ναι	Οι RF ζεύξεις υφίστανται μεγάλη παρεμβολή, καθώς λειτουργούν πολλές εφαρμογές σε κοντινές συχνότητες, κάτι που δεν συμβαίνει στην VLC όπου έχουμε απεριόριστο εύρος ζώνης
Κίνδυνος για την υγεία	Όχι	Ναι	Η VLC λειτουργώντας σε συχνότητες ορατού φωτός δεν προκαλούν ζημιές στον άνθρωπο σε αντίθεση με τις RF συχνότητες όπου υπάρχουν κίνδυνοι από την ακτινοβολία.
Line Of Sight	Ναι	Όχι	Η VLC βασίζεται στην LOS ζεύξη, σε αντίθεση με την RF.
Απόσταση κάλυψης	Μικρή	Μικρή έως αρκετά μεγάλη	Η VLC προτιμάται κυρίως για εφαρμογές εσωτερικού χώρου και μικρής απόστασης, ενώ η RF μπορεί να εξυπηρετήσει πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις.
Ασφάλεια δεδομένων	Καλή	Μέτρια έως κακή	Στην VLC η ασφάλεια της ζεύξης είναι αυξημένη καθώς για να κλαπούν τα δεδομένα χρειάζεται κάποιος δέκτης ευθυγραμμισμένος με την πηγή, σε αντίθεση με την RF που είναι εκτεθειμένη.
Πρότυπα	Σε εξέλιξη	Ολοκληρωμένα	Τα πρότυπα για VLC δεν έχουν ολοκληρωθεί ακόμα, ενώ για τις RF έχουμε αυστηρά πρότυπα και κανονισμούς.
Προσφερόμενες υπηρεσίες	Φωτισμός και επικοινωνία	Επικοινωνία	Η VLC συνδυάζει τον ταυτόχρονο φωτισμό μιας περιοχής με τη μετάδοση πληροφορίας, που είναι και ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά της σε σχέση με την RF.
Εστίες θορύβου	Ηλιακό φως και φως του περιβάλλοντος	Ηλεκτρονικές εφαρμογές σε παραπλήσιες συχνότητες	Στην VLC μοναδική πηγή θορύβου είναι το φως πέραν αυτού των LEDs, ενώ στην RF κάθε συσκευή που λειτουργεί σε κοντινές συχνότητες προκαλεί θόρυβο.
Κατανάλωση ισχύος	Σχετικά χαμηλή	Μέτρια	Στην RF η ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του σήματος, ενώ στην VLC ανάλογη της απόλυτης τιμής του.
Κινητικότητα χρηστών	Περιορισμένη	Ελεύθερη	Στην VLC δεν είναι εύκολο να υπάρχει μεγάλη κίνηση των χρηστών καθώς πρέπει να διατηρείται η ευθυγράμμιση με κάποιον σταθμό βάσης. Αντίθετα στην RF υπάρχει κάλυψη παρά την κίνηση των χρηστών.
Κάλυψη	Στενή	Ευρεία	Τα LEDs που χρησιμοποιούνται στην VLC έχουν μικρή επιφάνεια κάλυψης, έτσι να εξυπηρετηθεί μια μεγαλύτερη περιοχή χρειάζονται περισσότερα και κατάλληλα τοποθετημένα. Στην RF έχουμε ευρύτερη κάλυψη από μια κεραία εκπομπής.

<b>Αδειοδότηση</b>	Ελεύθερη	Περιορισμένη και ακριβή	Γενικά, είναι αρκετά δύσκολο να δοθεί άδεια σε κάποιον να χρησιμοποιήσει συχνότητες στο RF φάσμα, ενώ στην περίπτωση της VLC και του ορατού φωτός το φάσμα είναι ελεύθερο.
<b>Κόστος εξοπλισμού</b>	Σχετικά χαμηλό	Σχετικά υψηλό	Το κόστος για του πομποδέκτες σε μια ζεύξη VLC είναι γενικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο για RF. Αναμένεται δε να γίνει και μικρότερο όσο βελτιώνεται η έρευνα σε LEDs και φωτοανιχνευτές.
<b>Υποδομές</b>	Αυτόνομος εξοπλισμός	Μεγάλες κεραίες και καλώδια	Στην VLC ο μόνος εξοπλισμός που χρειάζεται είναι κατάλληλοι πομποδέκτες και ένα έξυπνο σύστημα συντονισμού, ενώ στην RF μεγάλες κεραίες λήψης και εκπομπής, ακόμα και καλώδια σε ορισμένες περιπτώσεις.

Είναι φανερό πως τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η VLC σε σχέση με την RF επικοινωνία, την καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για το μέλλον. Ο συνδυασμός του φωτισμού ενός δωματίου, με την ταυτόχρονη μετάδοση πληροφορίας σε πολύ υψηλούς ρυθμούς και μάλιστα με ασφάλεια των δεδομένων και χωρίς να προκαλεί βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό, είναι ιδιότητες ιδιαίτερα χρήσιμες και σημαντικές. Τα πρότυπα και οι κανονισμοί δεν έχουν ωριμάσει ακόμα, αλλά μπορεί ήδη να χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα ανεξάρτητων εφαρμογών, αλλά και συμπληρωματικά ως προς τις RF εφαρμογές.

Ένα πιθανό σενάριο μελλοντικής ασύρματης επικοινωνίας σε αεροπλάνα απεικονίζεται στο Σχήμα 2-11. Η υπηρεσία δημιουργείται μέσω ενός συνδυασμού ενσύρματων, ασύρματων και δορυφορικών τεχνολογιών. Οι ενσύρματοι σταθμοί βάσης (BSs) συγχωνεύονται με εξοπλισμό φωτισμού WLED (λάμπες ανάγνωσης) για να παρέχουν στους επιβάτες πρόσβαση στο Internet και μια σειρά από υπηρεσίες πολυμέσων. Η τεχνολογία Power over Ethernet (PoE) χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων και για την τροφοδοσία των BS καθώς και των λαμπών ανάγνωσης με την απαιτούμενη ισχύ. [44]



**Σχήμα 2-11** Μελλοντικό σενάριο ευρυζωνικής ασύρματης δικτύωσης σε αεροπλάνο. (πηγή: H. Elgala et al., 2011)

Οι κλασικές RF εφαρμογές προσφέρουν υψηλό ποσοστό κάλυψης στους χρήστες και αρκετά καλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Παρόλα αυτά, δεν αρκούν για να ανταπεξέλθουν στις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών για περισσότερο εύρος ζώνης και ασύρματες εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων. Η VLC μπορεί να λειτουργήσει συνδυαστικά σε αυτόν τομέα και να βελτιώσει την κατάσταση.

## 2.8 Opportunistic Networks

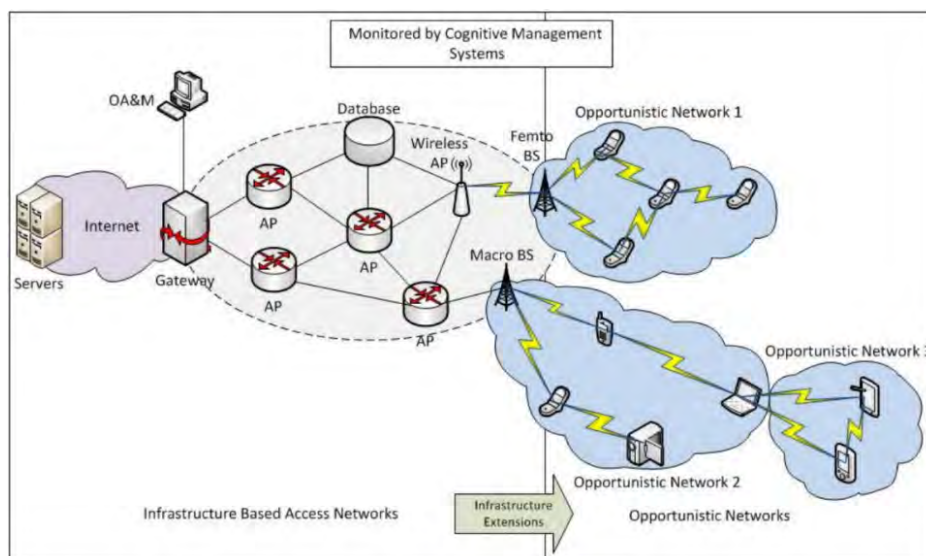
Στη μελλοντική εποχή του διαδικτύου, θα απαιτηθούν μηχανισμοί για την επέκταση της κάλυψης της υποδομής ασύρματης πρόσβασης και της παροχής υπηρεσιών σε τοποθεσίες που δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν με άλλο τρόπο. Τα Opportunistic networks - Oppnets (ON) αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση προς αυτήν την κατεύθυνση. Τα Oppnets δημιουργούνται, διαχειρίζονται και τερματίζονται με δυναμικό τρόπο. Κατά τη διάρκεια της φάσης δημιουργίας, οι κόμβοι που θα απαρτίζουν το ON, επιλέγονται και συνδέονται με τα κατάλληλα πρότυπα ραδιοφάσματος και δρομολόγησης. Ο αναδυόμενος ασύρματος κόσμος θα είναι μέρος του μέλλοντος διαδικτύου (FI-

Future Internet). Όλα τα είδη συσκευών και δικτύων θα έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης. Έτσι, οποιοδήποτε αντικείμενο ή στοιχείο δικτύου θα έχει ενσωματωμένες δυνατότητες επικοινωνίας και πολλά αντικείμενα σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον θα είναι σε θέση να δημιουργήσουν ένα δίκτυο επικοινωνίας. Διάφορες προκλήσεις προκύπτουν όπως η επέκταση της κάλυψης της υποδομής ή η επέκταση της χωρητικότητας της υποδομής.

Το Opportunistic networking φαίνεται να αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση στο πρόβλημα της επέκτασης της κάλυψης της υποδομής, προκειμένου να παρέχεται εξυπηρέτηση σε κόμβους που κανονικά δεν θα καλύπτονται από την υποδομή ή να παρέχουν αποσυμφόρηση της υπάρχουσας υποδομής επεκτείνοντας την χωρητικότητά της. Σε γενικές γραμμές, τα Opprnets περιλαμβάνουν κόμβους (nodes) και τερματικά (terminals) που εμπλέκουν την περιστασιακή κινητικότητα και τα δυναμικά διαμορφωμένα μοτίβα δρομολόγησης [46]. Θεωρείται ότι τα Opprnets διαχειρίζονται από τους operators, αποτελώντας συντονισμένες επεκτάσεις της υποδομής προκειμένου να τη βοηθήσουν και όχι να την υποκαταστήσουν. Η διαχείριση των ONs από τους φορείς εκμετάλλευσης, επιτυγχάνεται μέσω πολιτικών που παρέχονται από τη διαχείριση του δικτύου των operators.

Επιπλέον, τα Opprnets υφίστανται προσωρινά, δηλ. για το χρονικό πλαίσιο που είναι απαραίτητο για την υποστήριξη συγκεκριμένων υπηρεσιών δικτύου και την υποδοχή νέων εφαρμογών που ζητούνται σε συγκεκριμένη τοποθεσία και ώρα. Μια περιοχή θα μπορούσε να εξυπηρετηθεί από περισσότερα από ένα ONs, τα οποία θα μπορούσαν να συνυπάρχουν, υπό τον συντονισμό του φορέα εκμετάλλευσης. Στα χαμηλότερα στρώματα, ο operator καθορίζει το φάσμα που θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία των κόμβων του ON (π.χ. το φάσμα προέρχεται από το συντονισμό με την υποδομή).

Από την άλλη πλευρά, το επίπεδο δικτύου αξιοποιεί το περιβάλλον, την πολιτική, το προφίλ και τη γνώση για τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης και της παροχής υπηρεσιών και περιεχομένου. Επιπρόσθετα, πρέπει να αναπτυχθούν μηχανισμοί για την αποτελεσματική, δυναμική δημιουργία Opprnets, οι οποίοι θα πρέπει να συμμορφώνονται με την επιλογή κόμβων σύμφωνα με συγκεκριμένα και προκαθορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Από την άποψη αυτή, τα ONs μπορούν να θεωρηθούν ως μέρος του Δικτύου Γνωσιακού Ελέγχου (Cognitive Control Network - CCN) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-12 και προτείνεται από το ETSI. Το CCN περιλαμβάνει μια αναδυόμενη ομάδα λειτουργιών που στοχεύει στην εισαγωγή cognition μηχανισμών στον εξελισσόμενο ασύρματο κόσμο. Η αυθόρμητη δημιουργία των ONs μπορεί να περιλαμβάνει το αποτέλεσμα της προηγμένης λήψης αποφάσεων που παρέχεται από τέτοιους γνωστικούς μηχανισμούς. [47]



Σχήμα 2-12. Opportunistic Networks υπό τον έλεγχο των Cognitive Management Systems.

(πηγή: Demestichas et al., 2010, <http://www.ict-onefit.eu/>)

### 2.8.1 Οι φάσεις των OrpNets

Τέσσερις διακριτές φάσεις χαρακτηρίζουν τα OrpNets. Αυτές οι φάσεις περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό καταλληλότητας ON, τη δημιουργία ON, τη συντήρηση ON και τον τερματισμό ON. Από την άποψη αυτή, κάθε φάση παρουσιάζεται στις ακόλουθες υποενότητες.

#### 1. Προσδιορισμός καταλληλότητας (ON Suitability Determination)

Συγκεκριμένα, η φάση καθορισμού της καταλληλότητας είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, διότι με βάση το παρατηρούμενο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων, τις ικανότητες του κόμβου, τις πολιτικές του διαχειριστή δικτύου και τα προφίλ των χρηστών, το αποτέλεσμα αυτής της φάσης θα είναι να αποφασιστεί εάν είναι κατάλληλη ή όχι, η εγκατάσταση ενός Orpnet, σε συγκεκριμένο χρόνο και τόπο. Προκειμένου να αξιολογηθεί η καταλληλότητα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ως βασικά inputs η ανίχνευση ευκαιριών για εγκατάσταση ενός ON σε σχέση με το σύνολο των κόμβων και τις ενδεχόμενες ασύρματες διαδρομές. Ως αποτέλεσμα, ο διαχειριστής του δικτύου πρέπει να γνωρίζει (με διαδικασίες εντοπισμού) τις σχετικές πληροφορίες των κόμβων [48]. Κάθε κόμβος διακρίνεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά των κόμβων θα περιλαμβάνουν τις δυνατότητες (συμπεριλαμβανομένων των διαθέσιμων διεπαφών, των υποστηριζόμενων RATs, των υποστηριζόμενων συχνοτήτων, της υποστήριξης πολλαπλών συνδέσεων, των δυνατοτήτων αναμετάδοσης / γεφύρωσης) και της κατάστασης κάθε υποψήφιου κόμβου όσον αφορά τους πόρους για μετάδοση (κατάσταση των ενεργών συνδέσεων) και της ενέργειας [49].

Επιπλέον, ο operator πρέπει να γνωρίζει τη θέση και το επίπεδο κινητικότητας κάθε κόμβου. Προϋπόθεση κάθε περίπτωσης (π.χ., επέκταση κάλυψης ή επέκταση χωρητικότητας) είναι ότι οι κόμβοι πρέπει να έχουν κάποιου είδους πρόσβαση στην υποδομή ή κάποιου είδους πρόσβαση σε ένα αποσυμφορημένο Access Point (AP).

Τέλος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις της εφαρμογής και το επίπεδο ομοιότητας των αιτούμενων εφαρμογών καθορίζοντας τις εφαρμογές που εμπλέκονται, τις ανάγκες τους σε πόρους και την πιθανή ακαταλληλότητά τους για παροχή μέσω των OrpNets. Επίσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα οφέλη από μια πιθανή δημιουργία ON για να παρασχεθεί το κύριο output αυτής της φάσης, η οποία θα είναι το αίτημα για τη δημιουργία ON.

#### 2. Δημιουργία (ON Creation)

Η επόμενη φάση του κύκλου ζωής του ON είναι η δημιουργία του. Η φάση δημιουργίας είναι υπεύθυνη για την παροχή μηχανισμών και αποφάσεων για την αποτελεσματική δημιουργία του ON βάσει του output που λαμβάνεται από τη φάση προσδιορισμού της καταλληλότητας. Επικεντρώνεται στην επιλογή των κόμβων που θα συμμετάσχουν σύμφωνα με το προηγούμενο σύνολο χαρακτηριστικών και στην επιλογή βέλτιστων ασύρματων διαδρομών προκειμένου να εξασφαλιστεί η βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Τέλος, εκτελεί όλες τις απαιτούμενες διαδικασίες για να συνδέσει αποτελεσματικά τα μέλη του ON μεταξύ τους και να διασφαλίσει τη συνέχεια της υπηρεσίας των μελών όσον αφορά την υποδομή. Το κύριο output της φάσης δημιουργίας ON θα είναι οι επιλεγμένοι κόμβοι και οι επιλεγμένοι σύνδεσμοι - διεπαφές- RATs - φάσμα.

#### 3. Συντήρηση (ON Maintenance)

Μόλις δημιουργηθεί το ON, θα πρέπει να προσαρμόζεται δυναμικά κατά τη διάρκεια όλης της επιχειρησιακής διάρκειας ζωής του σε μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. περιβάλλον, πολιτικές χειριστή, προφίλ χρηστών). Για να επιτευχθεί αυτό, μετά την επιτυχή ολοκλήρωση της φάσης δημιουργίας, πρέπει να ξεκινήσει η φάση συντήρησης.

Γενικά, η φάση συντήρησης θα πρέπει να παρακολουθεί συχνότερα τους κόμβους, το φάσμα, τις πολιτικές του operator, το QoS και να αποφασίζει κατά πόσον είναι κατάλληλο να προχωρήσει σε μια αναδιάταξη του ON. Επομένως, η φάση συντήρησης είναι υπεύθυνη για την διαχείριση του δικτύου και την αναδιάταξη – αναδιαμόρφωσή του. Οι μηχανισμοί παρακολούθησης κατά τη

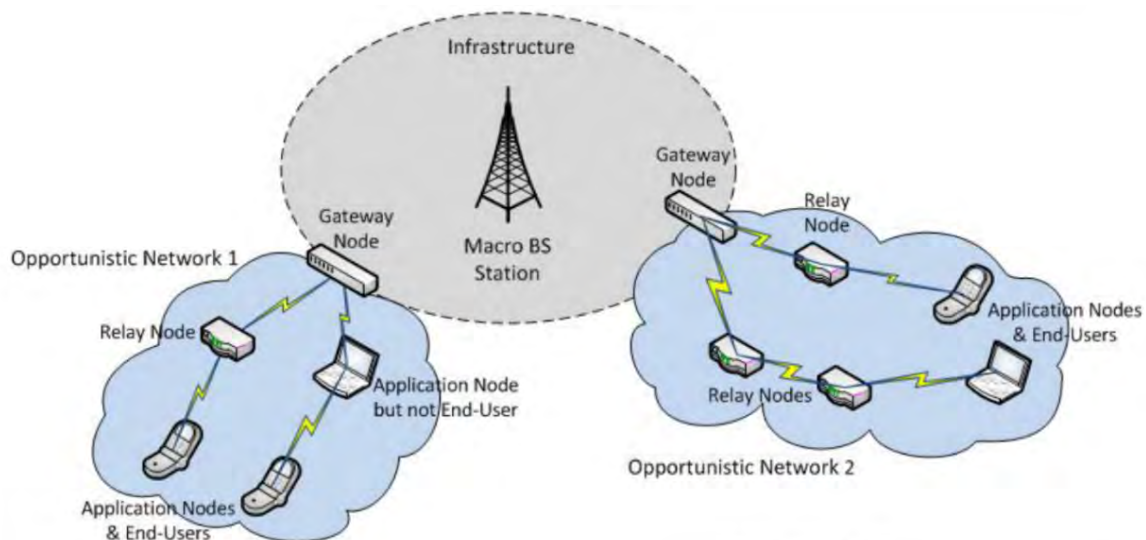
διάρκεια της λειτουργίας του ON θα εισαχθούν για να προσαρμοστούν σε τυχόν αλλαγές που γίνονται στο ON και να ενεργήσουν αναλόγως.

#### 4. Τερματισμός (ON Termination)

Στη φάση τερματισμού θα ληφθεί η απόφαση να απελευθερωθεί το ON, ενεργοποιώντας έτσι όλες τις απαραίτητες διαδικασίες και τη σχετική σηματοδότηση. Υπάρχουν διακρίσεις ανάλογα με τον λόγο τερματισμού. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να υπάρξει τερματισμός του ON λόγω διακοπής της παροχής της εφαρμογής, τερματισμού λόγω ανεπαρκών κερδών από τη χρήση του ON και της αναγκαστικής λήξης.

##### 2.8.2. Η δομή του OppNet

Προκειμένου να είναι σε θέση το OppNet να δημιουργήσει και να ενεργοποιήσει την παροχή υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες, είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε την κατάσταση των υποψηφίων, των κόμβων αναμετάδοσης (relay nodes, δηλαδή των κόμβων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δρομολογητές, ακόμη και όταν δεν χρειάζεται να χρησιμοποιούν μια εφαρμογή) και τους κόμβους εφαρμογής (application nodes, δηλαδή τους κόμβους που χρησιμοποιούν μια συγκεκριμένη εφαρμογή). Επιπλέον, οι κόμβοι πύλης (gateway nodes) πρέπει να οριστούν ώστε να παρέχουν συνδεσιμότητα μεταξύ του ON και της υποδομής (π.χ. Macro Base Station - MBS), κατόπιν αιτήματος. (Σχήμα 2-13)



Σχήμα 2-13. Οι τύποι των κόμβων σε ένα O.N. (πηγή: Demestichasetal., 2010)

Από την άποψη αυτή, έχουν εντοπιστεί ορισμένα ενδεικτικά επιχειρηματικά σενάρια προκειμένου να αναπτυχθεί το πρότυπο ON. Το Σχήμα 2-13 απεικονίζει το σενάριο της ευκαιριακής επέκτασης κάλυψης (opportunistic coverage extension). Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, ένας κόμβος ο οποίος λειτουργεί ως πηγή κυκλοφορίας, όπως ένας φορητός υπολογιστής ή μια κάμερα, είναι εκτός της κάλυψης της υποδομής. Ως αποτέλεσμα, μια λύση θα περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός ON προκειμένου να εξυπηρετεί τον κόμβο κάλυψης υποδομής. Ο ευκαιριακός ρόλος έγκειται κατά κύριο λόγο στην επιλογή συμμετοχής στο ON του κατάλληλου υποσυνόλου κόμβων, μεταξύ των υποψηφίων κόμβων που τυχαίνει να βρίσκονται στην περιοχή, με βάση τις πληροφορίες προφίλ και πολιτικής του φορέα εκμετάλλευσης και τη χρήση του φάσματος που θα καθοριστεί από τον ίδιο operator για την επικοινωνία των κόμβων του ON. Μέσω της ευκαιριακής προσέγγισης προκύπτουν πολλαπλά οφέλη για βασικούς φορείς όπως ο τελικός χρήστης ο οποίος αποκτά πρόσβαση στην υποδομή σε καταστάσεις όπου κανονικά δεν θα ήταν δυνατή, ενώ ο πάροχος πρόσβασης μπορεί να έχει αυξημένα οικονομικά οφέλη καθώς υποστηρίζονται περισσότεροι χρήστες.

Ένα άλλο ενδεικτικό σενάριο περιλαμβάνει την έννοια της ευκαιριακής επέκτασης της χωρητικότητας (opportunistic capacity extension). Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, μια συγκεκριμένη περιοχή αντιμετωπίζει προβλήματα κυκλοφοριακής συμφόρησης και δημιουργείται ένα ON για να



κατευθύνει την κυκλοφορία σε Access Points τα οποία δεν έχουν συμφόρηση. Οι πάροχοι πρόσβασης επωφελούνται από το γεγονός ότι μπορούν να υποστηριχθούν περισσότεροι χρήστες δεδομένου ότι μπορούν να εξυπηρετηθούν νέοι εισερχόμενοι χρήστες που διαφορετικά θα ήταν μπλοκαρισμένοι, ενώ οι τελικοί χρήστες έχουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας QoS δεδομένου ότι οι καταστάσεις συμφόρησης μπορούν να επιλυθούν.

Στο πλαίσιο αυτό, προκειμένου να αποκτηθεί η επίγνωση της κατάστασης των υποψήφιων κόμβων στην περιοχή, απαιτείται μηχανισμός παρακολούθησης, ο οποίος θα είναι σε θέση να παρακολουθεί τις πτυχές και τους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, τις σχετικές πληροφορίες κάθε κόμβου, προκειμένου να είναι σε θέση υπολογιστεί μια κατάλληλη λειτουργία. Οι παρακολουθούμενες πτυχές είναι:

- Ενεργειακό επίπεδο του κόμβου.
- Επίπεδο διαθεσιμότητας του κόμβου - λαμβάνοντας υπόψη τις δυνατότητες του κόμβου (συμπεριλαμβανομένων των διαθέσιμων διεπαφών, των υποστηριζόμενων RATs, των υποστηριζόμενων συχνοτήτων, της υποστήριξης πολλαπλών συνδέσεων, δυνατοτήτων αναμετάδοσης / γεφύρωσης, δυνατοτήτων πύλης - όπου χρειάζεται), κατάσταση κάθε κόμβου όσον αφορά τους πόρους για τη μετάδοση (κατάσταση των ενεργών συνδέσεων), αποθήκευση, επεξεργασία, επίπεδα κινητικότητας - θέση, υποστηριζόμενες εφαρμογές (σύμφωνα με τις δυνατότητες των κόμβων και τις απαιτήσεις της εφαρμογής).
- Πιθανότητα παράδοσης του κόμβου.

### **2.8.3 Εφαρμογή των OppNets**

Τα Oppnets αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την κάλυψη ή την επέκταση της υποδομής, παρέχοντας επιπλέον κάλυψη ή χωρητικότητα οπουδήποτε και όποτε χρειάζεται, χωρίς να χρειαστεί ο φορέας εκμετάλλευσης να επενδύσει σε ακριβό εξοπλισμό υποδομής, προκειμένου να εξυπηρετήσει προσωρινή αύξηση φορτίου σε μια περιοχή. Για την αποτελεσματική δημιουργία του ON, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά των κόμβων για να διασφαλιστεί η άψογη ροή των εφαρμογών. Ως αποτέλεσμα, οι συμμετέχοντες κόμβοι δεν επιλέγονται τυχαία αλλά σύμφωνα με ένα σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης όπως αναφέραμε παραπάνω.

Εν κατακλείδι, παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή των OppNets επιτυγχάνονται οι στόχοι των δικτύων 5ης γενιάς, όπως καλύτερη και αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων, εξυπηρέτηση συσκευών και χρηστών που βρίσκονται εκτός της εμβέλειας της βασικής υποδομής του δικτύου επικοινωνίας, αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας και υψηλό QoS. Επίσης καλύπτει τις ανάγκες των αναπτυσσόμενων περιοχών του πλανήτη για επικοινωνία εκπληρώνοντας την πρόκληση των δικτύων 5ης γενιάς για κάλυψη παντού [50].

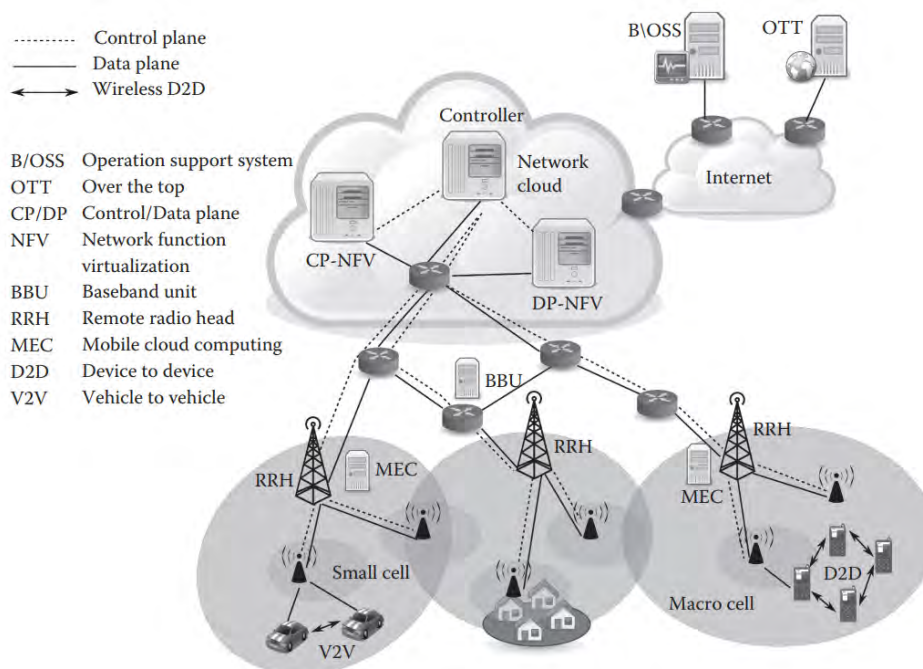
### 3. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ

Οι αναδυόμενες κινητές εφαρμογές δημιουργούν νέες προκλήσεις για τα μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Απαιτούνται νέες αρχιτεκτονικές, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι νέες απαιτήσεις. Μία από αυτές τις προκλήσεις είναι η χωρητικότητα του δικτύου. Η άνοδος του IoT έχει ως αποτέλεσμα έναν τεράστιο αριθμό συσκευών που πρέπει να συνδεθούν μέσω κινητών δικτύων. Τα παραγόμενα δεδομένα πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ των δικτύων, μεταξύ συσκευών και υπηρεσιών δεδομένων σε clouds, για χρήστες κινητών τηλεφώνων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν τεράστιο αριθμό συνδέσεων και σήματα κυκλοφορίας σε δίκτυα δεδομένων.

Άλλες προκλήσεις προκύπτουν από το υψηλότερο επίπεδο και τη δυναμική των αιτημάτων των υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα υψηλότερος βαθμός κινητικότητας, QoE, ρυθμός δεδομένων και χαμηλός χρόνος καθυστέρησης (E2E latency). Ο αυξανόμενος αριθμός έξυπνων συσκευών που παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας δεδομένων, η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών και η διατήρηση παράλληλα μεγάλο εύρος ζώνης και ανεπαίσθητη καθυστέρηση θα αποτελούν μερικά από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά των μελλοντικών δικτύων [3]. Αυτές οι απαιτήσεις δεν μπορούν να καλυφθούν από τις τρέχουσες υποδομές δικτύων λόγω τόσο του μονολιθικού σχεδιασμού όσο και του υψηλού κόστους επέκτασης των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών.

Με στόχο μια πιο επίπεδη και πιο ευέλικτη αρχιτεκτονική, διάφορα σχέδια για τα μελλοντικά δίκτυα 5G έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, τα οποία εξαλείφουν τα όρια των τρεχόντων τμημάτων του δικτύου. Η βάση για τέτοια σχέδια παρέχεται από τεχνολογίες αιχμής, για παράδειγμα, πύκνωση δικτύου (Ultra Dense Networks), SDN, NFV, cloud computing, έξυπνη διαχείριση (τεχνητή νοημοσύνη) κ.ο.κ.

Μια μελλοντική αρχιτεκτονική κινητού δικτύου απεικονίζεται στο Σχήμα 3-1. [51]



Σχήμα 3-1. Μια άποψη αρχιτεκτονικής 5G. (πηγή: P. K. Agyarong et al., 2014)

Η νοημοσύνη των μελλοντικών δικτύων είναι πιο ευαίσθητη στο περιβάλλον και οδηγείται από τα δεδομένα. Η συγκέντρωση των λειτουργιών του control plane (CP) στην πλατφόρμα του cloud επιτρέπει την εφαρμογή περισσότερων υπολογιστικών πόρων και σύνθετων αλγορίθμων. Οι πολιτικές δικτύου και οι αποφάσεις ελέγχου βασίζονται σε πληροφορίες που βασίζονται στην υπηρεσία, στο επίκεντρο του δικτύου και στο περιβάλλον των χρηστών. Για παράδειγμα, προσεγγίσεις προληπτικής διαχείρισης της κινητικότητας βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και την καθυστέρηση μετάδοσης, με αποτέλεσμα η πρόβλεψη κινητικότητας να προκύπτει από

σύνθετους αλγορίθμους μάθησης σχετικά με τη συμπεριφορά των χρηστών, το ιστορικό χρήσης του δικτύου και τη διαθεσιμότητα υπηρεσιών. Ομοίως, μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες επιδόσεις για τη διαχείριση πόρων, την εκφόρτωση δεδομένων (offloading), τη δρομολόγηση και την παροχή υπηρεσιών. Επιπλέον, η συγκέντρωση πληροφοριών δικτύου επιτρέπει την ενοποίηση με τις υπηρεσίες OTT και το BSS/OSS, επιτρέποντας ευέλικτες και γρήγορες πολιτικές δικτύωσης με επίκεντρο τις υπηρεσίες.

Συνοπτικά, οι αναδυόμενες κινητές εφαρμογές δημιουργούν νέες προκλήσεις για τα μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Οι προτεινόμενες μελλοντικές αρχιτεκτονικές δικτύων επωφελούνται από τις εξελίξεις στον τομέα του cloud computing, του virtualization του δικτύου και του προγραμματισμού, για παράδειγμα τα SDN, NFV, MEC. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν πιο επίπεδη, απλούστερα στρώματα δικτύου, αυξημένη ευελιξία και χωρητικότητα, έξυπνες λειτουργίες δικτύου και επέκταση του Internet με επικοινωνίες M2M και V2V.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τις παρακάτω αρχιτεκτονικές:

1. Πύκνωση Δικτύου (Ultra Dense Networks)
2. Αρχιτεκτονικές βασισμένες στο Cloud (Cloud based architectures)
  - α. MCC - MEC - CLOUDLET - FOG
  - β. C-RAN
3. Αρχιτεκτονική Βασισμένες στην Τεχνητή Νοημοσύνη (AI in 5G Networks)
4. Αρχιτεκτονική Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Architecture)
5. Αρχιτεκτονική με επίκεντρο το χρήστη (Use-centric Architecture)
6. Αρχιτεκτονική με επίκεντρο τη συσκευή (Device-centric Architecture)

### 3.1 Αρχιτεκτονική Πύκνωσης Δικτύου - Ultra Dense Deployments

Σύμφωνα με τον Martin Cooper [52], η αύξηση της χωρητικότητας των ασύρματων δικτύων εξαρτιόταν ανέκαθεν από τους εξής τρεις παράγοντες:

1. Αύξηση του αριθμού των ασύρματων κόμβων του δικτύου.
2. Βέλτιστη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.
3. Βελτίωση της αποδοτικότητας των συνδέσεων.

Ακόμη και σήμερα (και δεν γνωρίζουμε μέχρι πότε) αυτά τα τρία συστατικά συνεχίζουν να είναι οι κυριότεροι οδηγοί της ανάπτυξης ασύρματης χωρητικότητας. Για μια απλή απεικόνιση των βασικών παραγόντων που διέπουν την απόδοση ενός κυψελοειδούς συστήματος, έχουμε την ακόλουθη εξίσωση [52]:

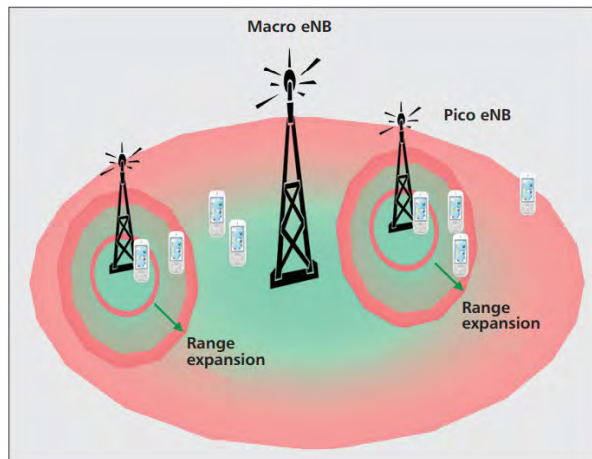
$$R < C = m \left( \frac{W}{n} \right) \log_2 \left( 1 + \frac{S}{I+N} \right)$$

όπου το  $W$  υποδηλώνει το εύρος ζώνης σήματος του σταθμού βάσης, η ακέραια παράμετρος  $n$  (συντελεστής φορτίου) δηλώνει τον αριθμό των χρηστών που μοιράζονται τον συγκεκριμένο σταθμό βάσης, η ακέραιη παράμετρος  $m$  (συντελεστής χωρικής πολυπλεξίας) υποδηλώνει τον αριθμό των χωρικών ρευμάτων (spatial streams) μεταξύ ενός σταθμού βάσης και της συσκευής του χρήστη και το  $S$  που υποδηλώνει την επιθυμητή ισχύ σήματος, ενώ  $I$  και  $N$  υποδηλώνουν τη δύναμη παρεμβολής και θορύβου, αντίστοιχα, στον δέκτη.

Είναι σαφές, ότι το εύρος ζώνης σήματος  $W$ , κάθε σταθμού βάσης, μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας πρόσθετο φάσμα, το οποίο οδηγεί σε γραμμική αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων. Ο συντελεστής φορτίου  $n$  ( $\geq 1$ ) μπορεί να μειωθεί μέσω της διαίρεσης των κυψελών, πράγμα που συνεπάγεται την ανάπτυξη ενός μεγαλύτερου αριθμού σταθμών βάσης ώστε να εξασφαλίζει ότι η κυκλοφορία του χρήστη κατανέμεται όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα μεταξύ όλων των σταθμών βάσης. Ο συντελεστής χωρικής πολυπλεξίας  $m$  μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας έναν μεγαλύτερο αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης και στις συσκευές των χρηστών. Η διάσπαση των κυψελών έχει την ευνοϊκή παρενέργεια της μείωσης της απώλειας διαδρομής μεταξύ μιας συσκευής χρήστη και των σταθμών βάσης, η οποία αυξάνει τόσο τα

επιθυμητά όσο και τα παρεμβατικά επίπεδα σήματος  $S$  και  $I$ , πράγμα που επηρεάζει ουσιαστικά και την επίδραση του θορύβου  $N$ . Ως αποτέλεσμα, η μείωση των παρεμβολών είναι πρωταρχικής σημασίας για τη βελτίωση της απόδοσης των συνδέσεων στα σύγχρονα κυψελοειδή συστήματα. Αυτό απαιτεί συνδυασμό προσαρμοστικού συντονισμού πόρων μεταξύ πομπών και προηγμένης επεξεργασίας σημάτων στους δέκτες.

Τα παραπάνω συστατικά για την ενίσχυση της ασύρματης χωρητικότητας μπορούν να προβληθούν κάτω από μια κοινή ομπρέλα που ονομάζεται “**Network Densification**” (πύκνωση δικτύου). Η τεχνική network densification περιλαμβάνει τη χωρική πυκνότητα (densification over space) όπου εγκαθιστούμε σε μεγάλη πυκνότητα νέα Small Cells (Picocells, Femtocells) και τη συχνотική πυκνότητα (densification over frequency ή spectral aggregation) όπου χρησιμοποιούμε μεγαλύτερες περιοχές του ραδιοφάσματος σε διαφορετικές συχνότητες. Στο Σχήμα 3-2 που ακολουθεί, απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο επεκτείνουμε την κάλυψη ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification. Κατά την χωρική πυκνωση (spatial densification) αυξάνουμε τον αριθμό των κεραιών ανά κόμβο, αυξάνουμε την πυκνότητα των εγκατεστημένων σταθμών βάσης σε μια γεωγραφική περιοχή και προσπαθούμε να διανέμουμε ομοιόμορφα τους χρήστες στους σταθμούς βάσης. Κατά την συχνотική πυκνωση – φασματική συνάθροιση (spectral aggregation) χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από τα 500 Mhz ως τις υπερχαμηλές συχνότητες (30-300Ghz) [52].



**Σχήμα 3-2: Επέκταση της κάλυψης ενός cell με τη χρήση της τεχνολογίας Network Densification [52]**  
(πηγή: N. Bhushan et al., 2014)

Ακολουθώντας την τακτική network densification θα δημιουργήσουμε πολύ πυκνά cells εγκαθιστώντας πολλούς σταθμούς βάσης επιτυγχάνοντας υψηλό εύρος ζώνης, μικρό latency κ.α. Η πυκνή τοποθέτηση cells έχει ήδη αποφέρει πολλά κέρδη στις συχνότητες κάτω από τα 6 GHz. Οι πάροχοι αποφασίζουν πού θα εγκαταστήσουν τα νέα cells με γνώμονα το κόστος προετοιμασίας της περιοχής που θα εγκατασταθεί το συγκεκριμένο cell για την κάλυψη μιας γεωγραφικής περιοχής, να σταθμίζεται με το όφελος που θα δημιουργείται από την κάλυψη που θα παρέχει στη γεωγραφική περιοχή το cell αυτό [53].

Η χωρική πυκνωση (spatial densification) και η φασματική συσσώρευση (spectral aggregation) μεταξύ των σταθμών βάσης και των χρηστών κινητής τηλεφωνίας έχει ελάχιστες συνέπειες, εκτός και εάν συμπληρωθεί από την πυκνότητα του backhaul, ο οποίος συνδέει τους σταθμούς βάσης με το κεντρικό δίκτυο. Η πυκνή ανάπτυξη των κόμβων υποδομής αποτελεί προϋπόθεση για τη μείωση του συντελεστή φορτίου  $\eta$  στην εξίσωση χωρητικότητας και για την ενίσχυση της επιθυμητής ισχύος σήματος  $S$  (μέσω μειωμένης απώλειας διαδρομής). Ωστόσο, η ανάπτυξη πρόσθετων σταθμών βάσης συνεπάγεται σημαντικό κόστος και σύνθετο σχεδιασμό της χωροταξίας. Κόμβοι μικρής ισχύος (δηλ. μικρές κυψέλες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς χώρους) προσφέρουν μια απλούστερη από πλευράς κόστους εναλλακτική λύση από τον συμβατικό διαχωρισμό των κυψελών.

### 3.1.1 Πύκνωση του δικτύου και αποφόρτιση (Extreme Densification and Offloading)

Ένας απλός αλλά εξαιρετικά αποτελεσματικός τρόπος για να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου είναι να γίνουν οι κυψέλες πιο μικρές [23]. Αυτή η προσέγγιση έχει καταδειχθεί σε αρκετές γενιές κυψελοειδών δικτύων. Η πρώτη τέτοια γενιά, στις αρχές της δεκαετίας του 1980, είχε μεγέθη κυψελών της τάξεως των εκατοντάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων. Έκτοτε, αυτά τα μεγέθη έχουν συρρικνωθεί προοδευτικά και τώρα είναι συχνά κλάσματα τετραγωνικών χιλιομέτρων σε αστικές περιοχές. Στην Ιαπωνία, για παράδειγμα, η απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης μπορεί να είναι τόσο μικρή όσο διακόσια μέτρα, δίνοντας μια περιοχή κάλυψης κάτω από το ένα δέκατο του τετραγωνικού χιλιομέτρου. Τα δίκτυα εξελίσσονται ταχύτατα ώστε να περιλαμβάνουν μικρές κυψέλες, όπως τα picocells (κάτω από τα 100 μέτρα) και τα femtocells (περιοχή που μοιάζει με WiFi), καθώς και κατανομημένα συστήματα κεραιών που είναι λειτουργικά παρόμοια με τα picocells από την άποψη της χωρητικότητας και της κάλυψης, αλλά έχουν όλη την επεξεργασία βασικής ζώνης τους σε μια κεντρική τοποθεσία.

Η τάση συρρίκνωσης των κυψελών έχει πολλά οφέλη, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος σε μια γεωγραφική περιοχή και η συνακόλουθη μείωση του αριθμού των χρηστών που ανταγωνίζονται για πόρους σε κάθε σταθμό βάσης. Αυτό επιτρέπει σε κάθε BS να αφιερώνει τους πόρους του, καθώς και την backhaul σύνδεσή του, σε ολοένα και μικρότερο αριθμό χρηστών.

Καθώς η πύκνωση γίνεται όλο και μεγαλύτερη, προκύπτουν ορισμένες προκλήσεις:

- Διατήρηση των αναμενόμενων κερδών από τη διάσπαση των κυψελών, καθώς κάθε BS φέρει λιγότερο φόρτο, και αποτελούν κόμβους ιδιαίτερα χαμηλής ισχύος.
- Καθορισμός των κατάλληλων συνδέσεων μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης σε πολλαπλές τεχνολογίες ραδιοεπικοινωνίας (RATs), που είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης στα άκρα του δικτύου.
- Υποστήριξη της κινητικότητας μέσα σε ένα τόσο ανομοιογενές δίκτυο.
- Το αυξανόμενο κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και επισκευής.

#### Κέρδη από την πύκνωση των BSs

Μπορούμε να ορίσουμε ότι: το κέρδος από την πυκνότητα των BSs ( $k$ ) είναι η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με την αύξηση της πυκνότητας των σταθμών βάσης που βρίσκονται στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, αν επιτευχθεί ένας ρυθμός μετάδοσης  $P_1$  (μπορεί να είναι οποιοδήποτε μέτρο αυτού, π.χ. ρυθμός μετάδοσης στα άκρα ή ο συνολικός) όταν η πυκνότητα των σταθμών βάσης είναι  $\mu_1$  BSs / km<sup>2</sup> και στη συνέχεια θεωρούμε υψηλότερη πύκνωση των BSs σε  $\mu_2$  με αντίστοιχο ρυθμό  $P_2$ , τότε το κέρδος πυκνότητας καθορίζεται ως εξής:

$$k = \frac{P_2 \cdot \mu_1}{P_1 \cdot \mu_2}$$

Για παράδειγμα: αν η πυκνότητα του δικτύου διπλασιαστεί ( $\mu_2=2\cdot\mu_1$ ) και ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης διπλασιαστεί ( $P_2=2\cdot P_1$ ) τότε ο συντελεστής παραμένει αμετάβλητος  $k = 1$ . Αυτό σημαίνει ότι αύξηση της πυκνότητας του σταθμού βάσης ( $\mu_2$ ) έχει μια αναλογική αύξηση του επιτευχθέντος ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ( $P_2$ ).

Σε ένα ακραίο σενάριο όπου το  $P_1$  και το  $\mu_1$  τα θεωρούμε σταθερά και το  $\mu_2 \rightarrow \infty$ , τότε τα μικρά αυτά κελιά ανταγωνίζονται για μια πεπερασμένη ομάδα συσκευών χρηστών (UE) και το κέρδος από την πύκνωση εκμηδενίζεται ( $k \rightarrow 0$ ).

Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων [54] έχουν δείξει ότι υπάρχει ένα κατώφλι πυκνότητας (density threshold) μικρών κυψελών σε UDN (Ultra Dense Networks). Όταν η πυκνότητα των UDN είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι πυκνότητας, η χωρητικότητα του δικτύου backhaul και η ενεργειακή αποδοτικότητα των UDN θα μειωθούν με μια περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας των

small cells. Σε αυτό ακριβώς το σημείο μπορούμε να αναρωτηθούμε και να προβληματιστούμε αν κατά πόσο νόμος του Cooper (Cooper's Law) μπορεί και να έχει πάνω όριο, όπως και ο νόμος του Moore. Μια παρατήρηση που μερικές φορές αναφέρεται ως "Νόμος του Cooper", τον πρωτοπόρο κινητής τηλεφωνίας Martin Cooper είναι ότι, τα ποσοστά δεδομένων ασύρματης επικοινωνίας (ανά σύνδεση) διπλασιάζονται περίπου κάθε δύο χρόνια από την εμφάνιση του κινητού τηλεφώνου. Θα φτάσει η στιγμή όπου η περαιτέρω πυκνωση δεν θα επιτρέπει πλέον (σημαντική) περαιτέρω επαναχρησιμοποίηση του φάσματος και τα συνοδευτικά κέρδη απόδοσης; Τι θα προκαλέσει αυτό το κορεσμό και τι μπορούμε να κάνουμε για να παρατείνουμε το νόμο του Cooper όσο το δυνατόν περισσότερο, βελτιστοποιώντας το σχεδιασμό του ασύρματου δικτύου υπό το πρίσμα αυτών των θεμελιωδών ορίων; Είναι αυτό ακόμη κάτι που πρέπει να ανησυχούμε; Αυτά τα ερωτήματα ήδη έχουν αρχίσει να αναδύονται και μάλλον θα χρειαστούν απαντήσεις στο μέλλον. [55]

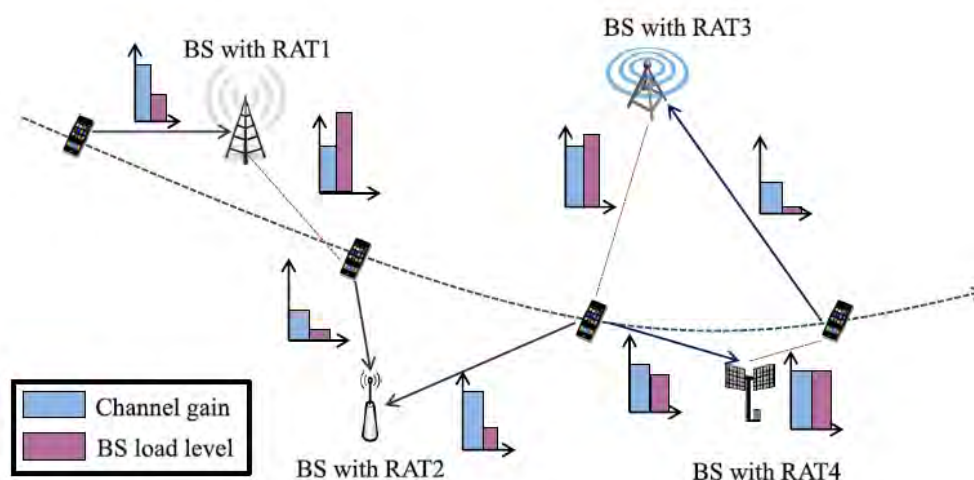
Ως εντυπωσιακό παράδειγμα αυτού, πρόσφατα αποδείχθηκε ότι [53], με βάση μια εύλογη αστική δικτύωση, η αύξηση του αριθμού BSs σε μια δεδομένη περιοχή από 36 σε 96, η οποία μείωσε την απόσταση μεταξύ τους από 170 μέτρα σε 85 μέτρα, αύξησε το ρυθμό από 24,5 Mbps σε 1396 Mbps, δίνοντας:

$$k = \frac{1396 \cdot 36}{24.5 \cdot 96} = 21.3$$

Αν και έγινε παραδεκτό ότι αυτό το τεράστιο κέρδος συμπύκνωσης αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη διάταξη και μοντέλο, είναι εντούτοις αξιοσημείωτο. Σε γενικές γραμμές, η ποσοτικοποίηση και η βελτιστοποίηση της αύξησης της πυκνότητας σε μια μεγάλη ποικιλία σεναρίων ανάπτυξης και μοντέλων δικτύων αποτελεί βασικό τομέα για τη συνεχή έρευνα σε μικροκυψέλες (small cells).

### Ένωση πολλαπλών δικτύων ραδιοπράσβασης

Τα δίκτυα θα συνεχίσουν να γίνονται ολοένα και πιο ετερογενή καθώς προχωρούμε προς την κατεύθυνση της 5ης γενιάς. Ένα βασικό χαρακτηριστικό είναι η αυξημένη ενσωμάτωση μεταξύ διαφορετικών RATs, με μια τυπική συσκευή με δυνατότητες 5G που έχει την ικανότητα να υποστηρίξουν όχι μόνο ένα δυναμικά νέο πρότυπο 5G (π.χ. σε συχνότητες mmWave), αλλά και 3G, πολυάριθμες εκδόσεις 4G LTE, LTE-Unlicensed, πολλούς τύπους WiFi και ίσως άμεση επικοινωνία συσκευής σε συσκευή (D2D), σε πολλές ζώνες φάσματος [56]. Ως εκ τούτου, ο καθορισμός ποιο πρότυπο και ποια ζώνη φάσματος θα χρησιμοποιηθεί καθώς και με ποιο σταθμό βάσης θα συνδεθούν οι χρήστες θα είναι μια πραγματικά περίπλοκη εργασία για το δίκτυο. (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-3: Σύνδεση χρηστών σε ένα δίκτυο πολλαπλών RATs (πηγή: Jeffrey G. Andrews et al., 2014)

## Υποστήριξη κινητικότητας

Είναι προφανές ότι η συνεχιζόμενη πυκνωση του δικτύου και η αυξημένη ετερογένεια αποτελούν προκλήσεις για την υποστήριξη της κινητικότητας. Παρόλο που ένα μεγάλο μέρος των δεδομένων εξυπηρετεί χρήστες που βρίσκονται σε σταθερές θέσεις σε εσωτερικούς χώρους, η υποστήριξη της κινητικότητας και η συνεχής συνδεσιμότητα είναι αναμφισβήτητα το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των κυψελοειδών δικτύων σε σχέση με το WiFi. Επειδή η μοντελοποίηση και η ανάλυση της επίδρασης της κινητικότητας στις επιδόσεις του δικτύου είναι δύσκολη, αναμένουμε να δούμε λύσεις όπου συγκεκριμένες εικονικές κυψέλες καθορίζονται για να διακρίνουν τη φυσική κυψέλη από μια ευρύτερη περιοχή όπου ο χρήστης μπορεί να περιπλανηθεί χωρίς την ανάγκη μεταπομπής, επικοινωνώντας με οποιοδήποτε σταθμό βάσης ή υποσύνολο BSs σε αυτή την περιοχή.

Μια άλλη προσέγγιση αφορά τις χιλιοστομετρικές επικοινωνίες (mmWave), όπου περιορίζοντας τους χρήστες υψηλής κινητικότητας σε μακροκυψέλες και συχνότητες μικροκυμάτων, αναγκάζοντάς τους έτσι να ανεχθούν χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Οι μεταπομπές θα είναι ιδιαίτερα δύσκολες στις συχνότητες mmWave, καθώς οι ακτίνες εκπομπής και λήψης πρέπει να ευθυγραμμιστούν για να επικοινωνήσουν. Πράγματι, ολόκληρη η διαδικασία μιας μεταπομπής που ξεκίνησε και διαχειρίζεται στο επίπεδο 3 από το δίκτυο κορμού, πιθανότατα δεν θα υπάρχει στα δίκτυα 5G. Αντίθετα, οι μεταπομπές μπορεί να είναι ευκαιριακές, με βάση τις ευθυγραμμίσεις δέσμης mmWave ή δεν θα διακρίνονται από τεχνικές διαχείρισης παρεμβολών PHY / MAC, όπου οι χρήστες επικοινωνούν με πολλαπλούς συντονισμένους σταθμούς βάσης.

### Κόστος

Η εξέλιξη και η τάση για ολοένα και μικρότερες κυψέλες απαιτεί πάντα μικρότερους, χαμηλότερης ισχύος και φθηνότερους σταθμούς βάσης εξαλείφοντας τους λόγους για τους οποίους ο BS πρέπει να είναι ακριβότερος από μια συσκευή χρήστη ή έναν κόμβο WiFi. Παρόλα αυτά, η απόκτηση αδειών, η εξασφάλιση γρήγορων και αξιόπιστων συνδέσεων backhaul και η καταβολή μεγάλων μηνιαίων τελών ενοικίασης για δημιουργία μικρών κυψελών ελεγχόμενες από τον operator έχουν αποδειχθεί ότι αποτελούν σημαντικό εμπόδιο στην ανάπτυξη των picocell, των καταναμημένων κεραιών και των άλλων τεχνολογικών μεθόδων ανάπτυξης μικρών κυψελών. Από αυτά, μόνο το backhaul είναι πρωτίστως μια τεχνική πρόκληση. Οι κανονιστικές αναμορφώσεις και η κοινή χρήση των υποδομών μπορεί να συμβάλουν στην αντιμετώπιση των άλλων προκλήσεων.

### 3.1.2 Περιγραφή αρχιτεκτονικής UDN

Με την ανάπτυξη τεχνολογιών επικοινωνίας massive MIMO και χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmwaves) σε συστήματα κινητών επικοινωνιών 5G, θα αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μικρών κυψελών για να σχηματιστούν τα Ultra Dense 5G δίκτυα. Ως εκ τούτου, η πρώτη πρόκληση είναι πώς θα σχεδιαστεί η αρχιτεκτονική των UDN. Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε μια αρχιτεκτονική UDN μιας πύλης (one gateway) και πολλαπλών πυλών (multiple gateways). [54]

#### Συμβατική αρχιτεκτονική κυψελοειδούς δικτύου

Η συμβατική κυψελωτή αρχιτεκτονική δικτύου είναι ένας τύπος αρχιτεκτονικής δικτύου που ακολουθεί τη δέντροειδή δομή, όπου κάθε macrocell BS ελέγχεται από τους διαχειριστές BS στο κεντρικό δίκτυο και όλη η κυκλοφορία backhaul προωθείται στο κεντρικό δίκτυο από μια δεδομένη πύλη. Προκειμένου να υποστηριχθεί η ανάπτυξη μικρών κυψελών π.χ., ανάπτυξη femtocells, picocells και hotspots, παρουσιάζεται μια υβριδική αρχιτεκτονική για συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα με ανάπτυξη microcells. Σε αυτή την υβριδική δικτυακή αρχιτεκτονική, το δίκτυο microcells είναι επίσης διαμορφωμένο ως ένας τύπος αρχιτεκτονικής δικτύου δομής δέντρου, όπου κάθε σταθμός βάσης του microcell ελέγχεται από διαχειριστές των microcell BSs στο κεντρικό δίκτυο και η κυκλοφορία backhaul των microcell BSs, προωθείται στο κεντρικό δίκτυο από το ευρυζωνικό Internet ή συνδέσεις οπτικών ινών. Η κάλυψη των μικροκυττάρων επικαλύπτεται από την κάλυψη των μακροκυττάρων. Σε σύγκριση με τα BSs macrocells, τα microcells BSs μπορούν να παρέχουν

υψηλής ταχύτητας ασύρματη μετάδοση σε σενάρια εσωτερικών χώρων και hotspots. Τόσο το macrocell BS όσο και το microcell BS μπορούν να μεταδώσουν ανεξάρτητα τα δεδομένα χρήστη (user data) και τα δεδομένα διαχείρισης (management data) στους συνδεδεμένους χρήστες. Επιπλέον, η διαδικασία handover (μεταπομπή) ελέγχεται από τους διαχειριστές των macrocell και microcell στο κεντρικό δίκτυο. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική δικτύου, το δίκτυο μικροκυττάρων αποτελεί συμπλήρωμα για το συμβατικό δίκτυο μακροκυττάρων για να ικανοποιήσει την ασύρματη μετάδοση υψηλής ταχύτητας σε μερικές περιοχές, π.χ. σε σενάρια εσωτερικών χώρων και σημείων hotspot.

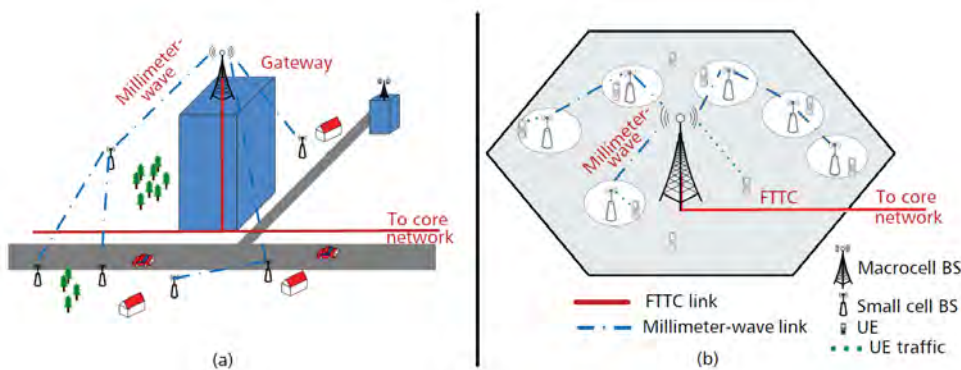
### Distribution Architecture of Ultra-Dense Cellular Networks

Με βασικό κινητήριο μοχλό τις τεχνολογίες massive MIMO και των τεχνολογιών επικοινωνίας χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmwave communications), η ανάπτυξη μικρών κυψελών και γενικότερα η πύκνωση του δικτύου αναδύεται ως μια βασική αρχιτεκτονική για τα δίκτυα 5G. Ωστόσο, είναι δύσκολο να προωθηθεί η κυκλοφορία backhaul για κάθε micro cell BS μέσω του ευρυζωνικού Internet ή των οπτικών ινών, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και τις γεωγραφικές προκλήσεις ανάπτυξης σε αστικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το micro cell BS συνήθως δεν μπορεί να μεταδώσει απευθείας την ασύρματη κίνηση backhaul στη δεδομένη πύλη, δεδομένου ότι τα microcell BSs που υιοθετούν την τεχνολογία χιλιοστομετρικού κύματος περιορίζουν την απόσταση ασύρματης μετάδοσης. Σε αυτή την περίπτωση, η ασύρματη κίνηση backhaul πρέπει να μεταδοθεί στη δεδομένη πύλη μέσω συνδέσεων πολλαπλών hop (multi hop links). Κατά συνέπεια, η αρχιτεκτονική του δικτύου διανομής είναι μια λογική λύση για τα πολύ πυκνά κυψελοειδή δίκτυα 5G. Στα σενάρια των ultra-dense 5G δικτύων, για να επιλυθεί το πρόβλημα του συχνού handover του κινητού χρήστη από ένα cell στο άλλο, το macrocell BS διαμορφώνεται μόνο για να μεταδώσει τα δεδομένα διαχείρισης (management data) για τον έλεγχο του handover του χρήστη και το microcell BS αναλαμβάνει τη μετάδοση των δεδομένων του χρήστη (user data).

Επομένως, το δίκτυο των microcell δεν αποτελεί συμπλήρωμα του δικτύου των macrocell. Τα 5G UDN αποτελούνται από microcells και macrocells. Με βάση τη διαμόρφωση της πύλης backhaul, προτείνονται δύο αρχιτεκτονικές διανομής UDN ως εξής.

#### 3.1.2.1 Ultra-Dense Cellular Networks with Single Gateway

Στο σχήμα 3-4 απεικονίζονται το σενάριο όταν χρησιμοποιείται μόνο μία πύλη στο macrocell. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, η πύλη διαμορφώνεται στο macrocell BS το οποίο συνήθως έχει αρκετό χώρο για να εγκαταστήσει μαζικές κεραίες MIMO χιλιοστομετρικού κύματος (massive MIMO millimeter wave antennas) για τη λήψη ασύρματα της Backhaul κυκλοφορίας από τα small cells στο macrocell. Η κίνηση backhaul του small cell BS μεταδίδεται στο παρακείμενο small cell BS με συνδέσεις χιλιοστομετρικών κυμάτων (multi-hop millimeter wave links). Όλη η backhaul κυκλοφορία των small cells προωθείται τελικά στο macrocell BS μέσω συνδέσεων πολλαπλών χιλιοστομετρικών κυμάτων. Στο τέλος, η backhaul κυκλοφορία συγκεντρώνεται στο macrocell BS και προωθείται στο κεντρικό δίκτυο με οπτικές ίνες (FTTC - fiber to the cell).

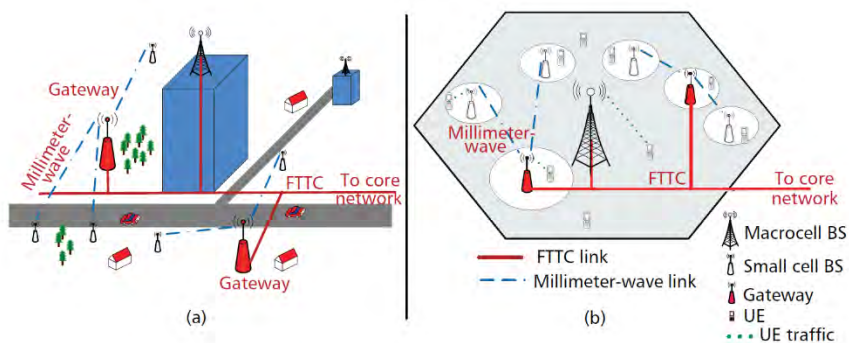


Σχήμα 3-4. Κατανεμημένο UDN με μια ενιαία πύλη: a) το σενάριο ανάπτυξης με μία μόνο πύλη b) λογική αρχιτεκτονική με μια ενιαία πύλη. (πηγή: Xiaohu Ge et al., 2015)



### 3.1.2.2 Ultra-Dense Cellular Networks with Multiply Gateways

Στην κατακεκομημένη αρχιτεκτονική UDN, η ανάπτυξη πολλαπλών πύλων είναι ευέλικτη για την προώθηση της κυκλοφορίας backhaul στο κεντρικό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση, οι πύλες αναπτύσσονται σε πολλαπλά small cells BSs σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κυκλοφορίας backhaul αλλά και της γεωγραφίας του χώρου. Στο Σχήμα 3-5, η κυκλοφορία backhaul του small cell BS αναμεταδίδεται στο παρακείμενο small cell BS με συνδέσεις χλιοστομετρικών κυμάτων. Διαφορετικά με τη διαμόρφωση μιας ενιαίας πύλης, η κίνηση backhaul των small cells θα κατακεκομηθεί σε πολλαπλές πύλες στο macrocell. Η backhaul κυκλοφορία που συγκεντρώνεται στο συγκεκριμένο small cell BS π.χ. στη πύλη (gateway), τελικά προωθείται στο κεντρικό δίκτυο μέσω συνδέσεων FTTC. Το λεπτομερές σενάριο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-5 (α),(β).



Σχήμα 3-5. Κατακεκομημένο UDN με με πολλαπλές πύλες. α) το σενάριο ανάπτυξης με πολλαπλές πύλες. β) λογική αρχιτεκτονική με πολλαπλές πύλες. (πηγή: Xiaohu Ge et al., 2015)

Πίνακα 3-1. Σύγκριση μεταξύ των συμβατικών κυψελοειδών δικτύων και των 5G UDN

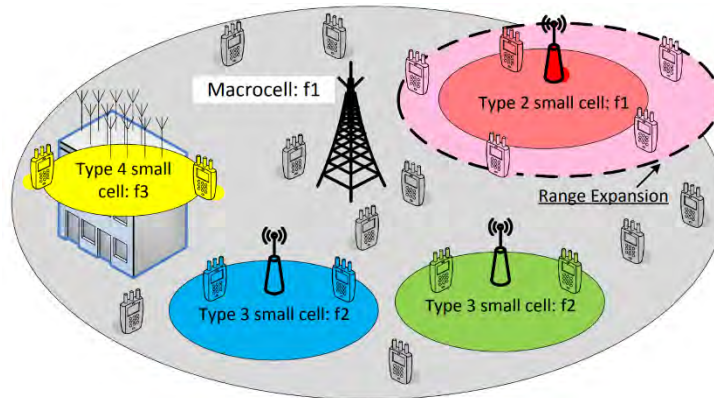
Τύποι δικτύων	Συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα	UDN με μία ενιαία πύλη	UDN με πολλαπλές πύλες
Αρχιτεκτονική δικτύου	Κεντρικοποιημένη	κατακεκομημένη [57]	κατακεκομημένη
Ανάπτυξη πύκνωσης - στόχοι	Macrocells [58]	small cells	small cells
Λόγοι ανάπτυξης της πύκνωσης	Να ικανοποιήσει τις ανάγκες των ανθρώπων για επικοινωνία σε αστικές περιοχές	Τεχνολογίες massive MIMO antennas και millimeter wave communication	Τεχνολογίες massive MIMO antennas και millimeter wave communication
Κάλυψη μεταξύ macrocells και microcells	επικάλυψη [59]	Όχι επικάλυψη	Όχι επικάλυψη
Λειτουργίες των macrocell και microcell	ίδια [59]	Macrocells μεταδίδουν management data, microcells μεταδίδουν user data	Macrocells μεταδίδουν management data, microcells μεταδίδουν user data
Ανάπτυξη Microcells/small cells	Σε μερικές περιοχές	Για όλα τα σενάρια	Για όλα τα σενάρια
Backhaul method	Η backhaul κίνηση προωθείται απευθείας στο κεντρικό δίκτυο από την πύλη [57]	Η κυκλοφορία backhaul μεταδίδεται στην πύλη μέσω ασύρματων συνδέσεων πολλαπλών συνδέσεων	Η κυκλοφορία backhaul μεταδίδεται στην πύλη μέσω ασύρματων συνδέσεων πολλαπλών συνδέσεων

Αριθμός backhaul πυλών σε ένα macrocell	μία	μία	πολλαπλές
Πλεονεκτήματα	Ευέλικτη ανάπτυξη και χαμηλό κόστος [60]	Πανταχού παρούσα (ubiquitous) και υψηλής ταχύτητας μετάδοσης [58]	Πανταχού παρούσα (ubiquitous) και υψηλής ταχύτητας μετάδοσης
Μειονεκτήματα	Μερική ανάπτυξη μικρών κελιών, χαμηλή χωρητικότητα δικτύου, άνιση κατανομή των επιτεύξιμων ρυθμών μετάδοσης [58]	Χαμηλή κινητικότητα και υπάρχει η συμφόρηση της χωρητικότητας του backhaul	Χαμηλή κινητικότητα και υψηλό κόστος

Με βάση τα αποτελέσματα σύγκρισης του Πίνακα 3-1, οι διαφορές μεταξύ των συμβατικών κυψελοειδών δικτύων και των UDN 5G με πύλες (απλή / πολλαπλή) εξηγούνται ως εξής: η αρχιτεκτονική των συμβατικών κυψελοειδών δικτύων είναι μια κεντροκοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου και ορισμένα microcells αναπτύσσονται πυκνά σε μερικές περιοχές, π.χ. αστικές περιοχές, για την ικανοποίηση των αυξημένων απαιτήσεων επικοινωνίας των χρηστών. Όταν τα 5G small cell BSs εξοπλίζονται με μαζικές κεραιές MIMO και τεχνολογίες επικοινωνίας χιλιομετρικών κυμάτων, η κάλυψη small cells πρέπει να μειωθεί προφανώς (coverage area). Για να επιτευχθεί η απρόσκοπτη κάλυψη, τα 5G κυψελοειδή δίκτυα πρέπει να αναπτυχθούν βασισμένα σε μια αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό πυκνών μικρών κυψελών. Στην περίπτωση αυτή, τα εξαιρετικά πυκνά κυψελοειδή δίκτυα 5G (UDN) μπορούν να παρέχουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε όλη την περιοχή κάλυψης. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική των εξαιρετικά πυκνών κυψελοειδών δικτύων είναι μια αρχιτεκτονική κατανομημένου δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ανάπτυξης και γεωγραφικής κάλυψης. Κάθε BS σε συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα έχει την ίδια λειτουργία και έτσι υπάρχει επικάλυψη μεταξύ macrocell και microcell. Για τα UDN, οι macrocell BSs μεταδίδουν τα δεδομένα διαχείρισης (management data) και οι small cell BSs αναλαμβάνουν τη μετάδοση των δεδομένων των χρηστών (user data). Δεν υπάρχει η αλληλοεπικάλυψη για τη λειτουργία των macrocell BSs και των small cell BSs. Εκτός αυτού, τα 5G UDN με ενιαία πύλη είναι οικονομικά αποδοτικά, αλλά υστερούν στην περίπτωση κυκλοφοριακή συμφόρηση στο backhaul (bottleneck). Τα 5G UDN με πολλαπλές πύλες έχουν υψηλό κόστος για την ανάπτυξη των small cells. Σε σύγκριση με τα συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα, η απόδοση των UDN θα προσφέρει χαλαρή υποβάθμιση (graceful degradation) καθώς αυξάνεται ο βαθμός κινητικότητας. Για να ξεπεραστεί αυτή η πρόκληση, η επικοινωνία πολλαπλών cells είναι μια πιθανή λύση για 5G UDN.

### 3.1.3 Οφέλη και προκλήσεις των UDN

Συνοψίζοντας, τα Ultra Dense Networks (UDNs), αντιμετωπίζουν την υψηλή κίνηση στη μετάδοση δεδομένων μέσω της πυκνότητας της υποδομής. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα, να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα των ραδιοσυνδέσεων και να υπάρξει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Έτσι, από τα βελτίωση της χωρητικότητας των μελλοντικών δικτύων, προσδοκούμε ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα αποτελούνται από διαφορετικές μικρές κυψέλες με διαφορετικούς τύπους από small cell BSs. Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι των small cell BSs θα στοχεύουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και κίνηση. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 3-6, όπου παρουσιάζονται οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων cells [61].



Cell Type No.	Cell Type	Spectrum	Relationship with the Macrocell Tier	Typical Use Case
1	low-frequency macrocell tier	around 1~2GHz, licensed	-	umbrella coverage
2	low-frequency small cell tier	around 1~2GHz, licensed	co-channel deployment, CRE & ABS	capacity enhancement in hotspots
3	mid-frequency small cell tier	around 5GHz, unlicensed	non-co-channel deployment, dual connectivity	high traffic offloading
4	high-frequency small cell tier	>10GHz, unlicensed	non-co-channel deployment, dual connectivity	very high traffic offloading

**Σχήμα 3-6: Τύποι κυψελών καθώς και τα χαρακτηριστικά αυτών (πηγή: David Lopez-Perez et al., 2015)**

Η πυκνωση λοιπόν, των δικτύων θα παίξει σημαντικό ρόλο καθώς δίνει την δυνατότητα άμεσων και αποτελεσματικών επικοινωνιών. Παρόλα αυτά, τα UDNs θα γίνονται όλο και πυκνότερα, γεγονός το οποίο θα αυξήσει τις μεταξύ τους παρεμβολές αλλά και το κόστος για κάθε κόμβο πρόσβασης [62].

Εφαρμόζοντας την κλασική τεχνική του network densification, μπορούμε να λύσουμε το θέμα της αυξημένης κίνησης στη μετάδοση δεδομένων, όμως αυτό θα σήμαινε πολύ μεγάλο κόστος για την επένδυση σε υποδομές. Ακόμη, οι επιπλέον σταθμοί βάσης θα συνεπάγονταν και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, η οποία αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του λειτουργικού κόστους (OPEX) του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας του δικτύου είναι ανάλογη του αριθμού των εγκατεστημένων σταθμών βάσης. Ένα ακόμα πρόβλημα που παρουσιάζεται με την τεχνική αυτή, είναι το γεγονός ότι η μεγάλη εύρους μετάδοση των Macrocells, συρρικνώνει σημαντικά την κάλυψη των Small Cells (Picocells, Femtocells) οδηγώντας σε μη-βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων τους. Ακόμα και αν τα Small Cells έχουν τοποθετηθεί μέσα στο δίκτυο με το βέλτιστο τρόπο, είναι πιθανό να μην χρησιμοποιούνται αντίστοιχα, με το βέλτιστο τρόπο λόγω διακυμάνσεων στην κίνηση των δεδομένων. Επομένως εγκαθιστώντας νέους σταθμούς βάσης και πυκνώνοντας ακόμα περισσότερο τα υπάρχοντα cells αυξάνεται η ενεργειακή κατανάλωση [63], οι εκπομπές CO<sub>2</sub> και το συνολικό κόστος επενδύσεων πράγμα το οποίο αντιτίθεται στους στόχους του 5G [64]. Αυτός ο διαμοιρασμός πόρων που περιγράφουμε πιο πάνω απαιτεί ένα μηχανισμό συγχρονισμού και σηματοδότησης ελέγχου μεταξύ των σταθμών, πράγμα το οποίο θα μας οδηγήσει αργότερα να εισάγουμε “νοημοσύνη” στο δίκτυο μας.

### 3.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες στο Cloud – Cloud based architectures

Τα 5G δίκτυα, όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα, αναμένεται να είναι αρκετά πυκνά προκειμένου να επιτύχουν την απαραίτητη χωρητικότητα στο δίκτυο η οποία επιτυγχάνεται με τη εγκατάσταση Small Cells. Ωστόσο αυτό πρέπει να γίνει προσέχοντας το κεφαλαιακό κόστος της επένδυσης και λαμβάνοντας υπόψιν την παρεμβολή μεταξύ των σημάτων των επικαλυπτόμενων cells, καθώς και την επικοινωνιακή συνεργασία των cells. Επιπλέον, λόγω των ανεξάρτητων σταθμών βάσης που υπάρχουν και λόγω του συντονισμού που απαιτείται μεταξύ τους δημιουργείται το πρόβλημα των καθυστερήσεων [65]. Για να μπορέσουμε να ελαττώσουμε το κόστος αυτό, θα μπορούσαμε να μοιράζουμε με αποδοτικό τρόπο την διαθέσιμη υποδομή/πόρους του δικτύου σε διαφορετικούς πελάτες, πράγμα το οποίο δεν είναι δυνατό με τους σημερινούς μηχανισμούς διαμοιρασμού δικτυακών πόρων. Οι υποδομές Cloud, προσφέρουν στους χρήστες εύκολη on-demand πρόσβαση σε ένα κοινό σύνολο παραμετροποιήσιμων πόρων, χωρίς να χρειάζεται οι χρήστες να ασχοληθούν με τη διαχείριση των πόρων αυτών. Τα κεντροποιημένα ομογενή cellular

δίκτυα, βασίζουν βασικές λειτουργίες όπως ο χειρισμός των συνδέσεων, η σηματοδότηση, η δέσμευση πόρων κ.α., στην υπόθεση πως πραγματοποιούνται ομοίμορφα για κάθε σταθμό βάσης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι εφικτό. Η χρήση ετερογενών συσκευών με αυξημένες υπολογιστικές δυνατότητες, προσμετρώντας παράλληλα τη ανάγκη για μικρές καθυστερήσεις και για QoS, απαιτούν να φέρουμε τους υπολογιστικούς πόρους πιο κοντά στον τελικό χρήστη [66].

Η προσαρμοστικότητα και η εξάπλωση του Cloud Computing σε συνδυασμό με την ταχεία ανάπτυξη των κινητών τηλεφώνων, των εφαρμογών και των υπηρεσιών, οδήγησε στην εφαρμογή και υλοποίηση της έννοιας του Cloud στις κινητές επικοινωνίες αντιμετωπίζοντας τα παραπάνω ζητήματα. Η ιδέα της ανάπτυξης μικρών κέντρων δεδομένων κοντά στους χρήστες ήρθε μετά την ανάγκη των χρηστών για μεγαλύτερες ταχύτητες, περισσότερη υπολογιστική ισχύ και χαμηλή καθυστέρηση για την εξυπηρέτηση των εφαρμογών τους. Ένα βασικό και πρωταρχικής σημασίας πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι το χαμηλό κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας.

Επίσης, με το virtualization του δικτύου ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network – RAN), προσφέρονται ιδεατά απομονωμένα κομμάτια των υποδομών πρόσβασης του δικτύου σε ξεχωριστούς πελάτες, δίνοντας τους τη δυνατότητα να χειρίζονται αυτά τα ιδεατά κομμάτια σαν να ήταν πραγματικοί σταθμοί βάσης (BSs). Γενικά, το Cloud Computing, συχνά αναφέρεται ως ένα μέσο που προσφέρει μηχανισμούς στους παρόχους με τους οποίους μπορούν να δίνουν πρόσβαση στους χρήστες σε έναν απεριόριστο αριθμό εικονικών πόρων.

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε την αρχιτεκτονική του Mobile Cloud Computing και πως αυτό θα παίξει ρόλο στα δίκτυα 5G και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την αρχιτεκτονική C-RAN (Cloud RAN) η οποία θα είναι από τις κυρίαρχες τεχνολογίες – αρχιτεκτονικές (σε συνδυασμό με NFV και SDN) στην εξέλιξη των 5G Networks.

### **3.2.1. Mobile Cloud Computing**

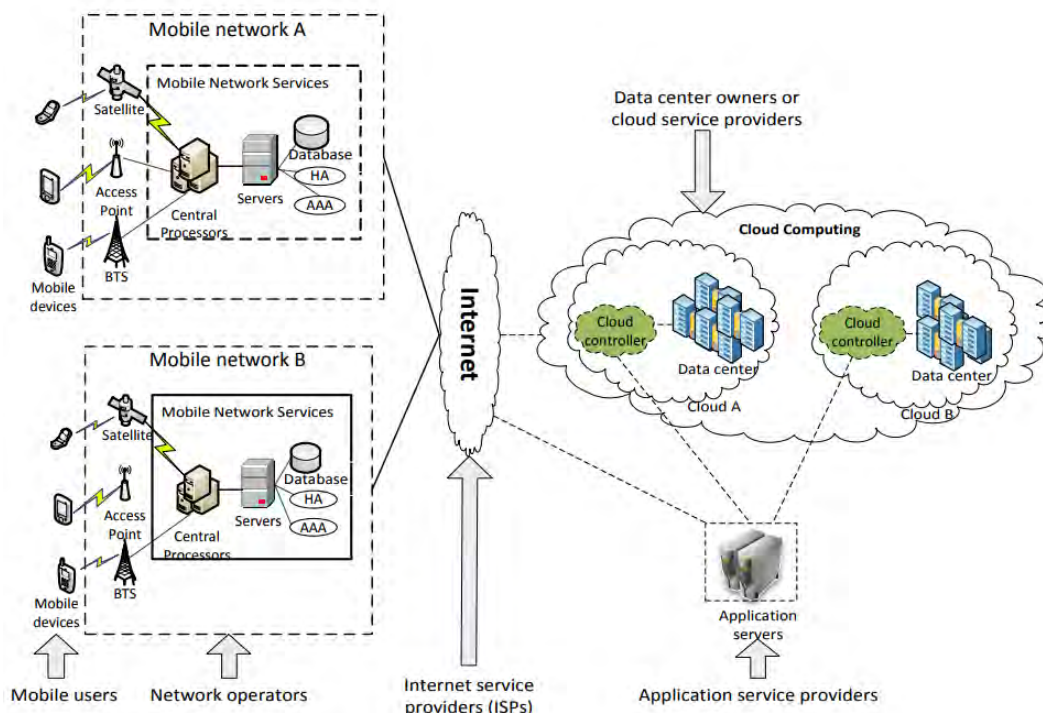
Η μεγάλη ανάγκη των χρηστών για εφαρμογές στις κινητές συσκευές τους, όπως επίσης και η έκρηξη του πλήθους των συσκευών που αναμένεται να είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο οδήγησαν στο να γεννηθεί το Mobile Cloud Computing (MCC) που αποτελεί το πάντρεμα του Cloud Computing, του Mobile Computing και των Wireless Networks. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι απαιτήσεις των χρηστών σχετικά με τη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων και την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) αυξάνονται εκθετικά. Επιπλέον, η τεχνολογική εξέλιξη των smartphones, των φορητών υπολογιστών και των tablet επιτρέπει την εμφάνιση νέων απαιτητικών υπηρεσιών και εφαρμογών. Παρόλο που οι καινούργιες κινητές συσκευές είναι όλο και πιο ισχυρές από την άποψη της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU), ακόμη και αυτές ενδέχεται να μην είναι σε θέση να χειριστούν τις εφαρμογές που απαιτούν τεράστια επεξεργασία σε σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, η υψηλή κατανάλωση μπαταριών εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό εμπόδιο που περιορίζει τους χρήστες να απολαμβάνουν πλήρως απαιτητικές εφαρμογές στις δικές τους συσκευές.

Αυτή η κατάσταση έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της έννοιας του κινητού υπολογιστικού νέφους (MCC) που επιτρέπει την υπολογιστική του cloud για χρήστες κινητών τηλεφώνων. Στο MCC, ένας εξοπλισμός χρήστη (UE) μπορεί να εκμεταλλευτεί πόρους υπολογιστών και αποθήκευσης ισχυρών μακρινών συγκεντρωτικών σύννεφων (CC), τα οποία είναι προσβάσιμα μέσω ενός κεντρικού δικτύου (CN) ενός φορέα εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και του Διαδικτύου. Το MCC φέρνει αρκετά πλεονεκτήματα. 1) επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας με εκφόρτωση υπολογισμών που καταναλώνουν ενέργεια για τις εφαρμογές στο cloud (Green Computing [67]), 2) ενεργοποίηση εξελιγμένων εφαρμογών στους χρήστες κινητών τηλεφώνων και 3) παροχή υψηλότερων δυνατοτήτων αποθήκευσης δεδομένων στους χρήστες.

#### **Αρχιτεκτονική**

Η αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στις υπηρεσίες του MCC αποτελείται από τρία στρώματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7.

1. Mobile network - Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας
2. Internet service - Υπηρεσία Διαδικτύου
3. Cloud service - Υπηρεσία Cloud



Σχήμα 3-7. Η αρχιτεκτονική του MCC (πηγή: Hoang T. Dinh et al., 2013) [68]

**Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας:** Ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας περιλαμβάνει φορητές συσκευές και φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου. Οι κινητές συσκευές μπορεί να είναι smartphones, PDAs, δορυφορικά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, tablets κ.α. Συνδέονται με τον πάροχο δικτύου μέσω των σταθμών βάσης BTS (base transceiver stations), των σημείων πρόσβασης ή των δορυφόρων. Δημιουργούν και ελέγχουν τη σύνδεση μεταξύ της λειτουργικής διασύνδεσης μεταξύ της κινητής συσκευής και του operator του δικτύου. Το αίτημα και οι πληροφορίες μιας κινητής συσκευής, όπως το αναγνωριστικό και η τοποθεσία, μεταδίδονται στον κεντρικό επεξεργαστή και στους διακομιστές των παρόχων δικτύου. Εδώ, οι φορείς εκμετάλλευσης παρέχουν διάφορες υπηρεσίες όπως AAA (έλεγχος ταυτότητας, εξουσιοδότηση και χρέωση) βάσει του HA (home agent) και των δεδομένων συνδρομητών που είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων.

**Υπηρεσία Διαδικτύου:** Η υπηρεσία Διαδικτύου παίζει το ρόλο μιας γέφυρας μεταξύ του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και του cloud. Τα αιτήματα συνδρομητών παραδίδονται στο cloud μέσω της υπηρεσίας Internet υψηλής ταχύτητας. Χρησιμοποιώντας ενσύρματες συνδέσεις ή προηγμένες τεχνολογίες ο χρήστης μπορεί να πάρει απρόσκοπτη υπηρεσία από το cloud.

**Υπηρεσία Cloud:** Αφού ληφθούν όλα τα αιτήματα από τους χρήστες, ο ελεγκτής του cloud (cloud controller) επεξεργάζεται τις αιτήσεις και τους παρέχει υπηρεσίες σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους. Το cloud έχει μερικά στρώματα παροχής υπηρεσιών, όπως: Data center, Infrastructure as a service (IaaS), Platform as a service (PaaS) και Software as a service (SaaS).

Με αυτόν τον τρόπο, στο mobile cloud computing (MCC), η αποθήκευση δεδομένων και οι υπολογισμοί μετακινούνται στο cloud και ο χρήστης παίρνει απρόσκοπτη υπηρεσία κατ'απαίτηση χωρίς να χρειάζεται να ανησυχεί για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ή την επεξεργαστική ισχύ των κινητών συσκευών.

### Περιορισμοί και πλεονεκτήματα

Ο κύριος στόχος του mobile cloud computing είναι να παρέχει μια βολική και γρήγορη μέθοδο για τους χρήστες να έχουν πρόσβαση και να λαμβάνουν δεδομένα από το cloud. Μια τέτοια βολική

και γρήγορη μέθοδος σημαίνει την αποτελεσματική πρόσβαση σε πόρους CC χρησιμοποιώντας κινητές συσκευές. Η σημαντικότερη πρόκληση του MCC προέρχεται από τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο λειτουργίας τόσο των κινητών συσκευών όσο και των ασύρματων δικτύων, καθώς και από τους περιορισμούς τους. Η πρόκληση, αυτή καθιστά τον σχεδιασμό εφαρμογών, τον προγραμματισμό και την ανάπτυξη σε κινητές και καταναλωμένες συσκευές πιο περίπλοκη διαδικασία. Στο MCC, οι περιορισμοί των κινητών συσκευών, η ποιότητα της ασύρματης επικοινωνίας, οι τύποι εφαρμογών και η υποστήριξη από το cloud computing στο κινητό είναι όλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αξιολόγηση από το cloud computing. Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότεροι **περιορισμοί** [69]:

- **Περιορισμοί των κινητών συσκευών**

Ενώ συζητάμε για τις κινητές συσκευές στο cloud, το πρώτο πράγμα είναι ο περιορισμός των πόρων. Αν και τα smartphones έχουν βελτιωθεί, προφανώς σε διάφορες πτυχές όπως η ικανότητα της CPU και της μνήμης, της αποθήκευσης, του μεγέθους της οθόνης, της ασύρματης επικοινωνίας, της τεχνολογίας ανίχνευσης και των λειτουργικών συστημάτων, εξακολουθούν να υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί, όπως η περιορισμένη ικανότητα computing και η ενεργειακή αυτάρκεια, ώστε να αναπτυχθούν πολύπλοκες εφαρμογές. Σύμφωνα με τις τάσεις ανάπτυξης στην αγορά, η αυξημένη ικανότητα mobile computing και η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας στις οθόνες θα οδηγήσουν σε όλο και πιο πολύπλοκες εφαρμογές που αναπτύσσονται σε smartphones. Εάν η τεχνολογία της μπαταρίας δεν μπορεί να βελτιωθεί στο άμεσο προσεχές μέλλον, τότε το πώς θα εξοικονομηθεί αποτελεσματικά η ισχύς της μπαταρίας στο έξυπνο τηλέφωνο είναι ένα σημαντικό θέμα που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί. Η ικανότητα επεξεργασίας, η αποθήκευση, ο χρόνος φόρτισης των μπαταριών και η επικοινωνία αυτών των smartphones θα πρέπει να βελτιωθούν με συνέπεια στην ανάπτυξη του Mobile Computing.

- **Ποιότητα επικοινωνίας**

Σε αντίθεση με το ενσύρματο δίκτυο που χρησιμοποιεί φυσική σύνδεση για να διασφαλίσει τη συνεκτικότητα του εύρους ζώνης, ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων στο περιβάλλον του CC συνεχώς μεταβάλλεται και η σύνδεση είναι ασυνεχής λόγω της υπάρχουσας εκκαθάρισης στην επικάλυψη δικτύου. Επιπλέον, το κέντρο δεδομένων του παρόχου υπηρεσιών Διαδικτύου είναι συνήθως μακριά από τους τελικούς χρήστες, ειδικά σε χρήστες κινητών συσκευών. Στο ασύρματο δίκτυο, η καθυστέρηση του δικτύου μπορεί να φτάσει τα 200 ms στο 'last mile', αλλά μόνο σε 50 ms στο παραδοσιακό ενσύρματο δίκτυο. Ορισμένα άλλα ζητήματα όπως η δυναμική αλλαγή της απόδοσης της εφαρμογής, η κινητικότητα των χρηστών ακόμη και ο καιρός θα οδηγήσουν σε αλλαγές στο εύρος ζώνης και την επικάλυψη δικτύου. Ως εκ τούτου, η καθυστέρηση μετάδοσης στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας είναι υψηλότερη από ότι στο ενσύρματο δίκτυο.

- **Κατάτμηση των υπηρεσιών και των εφαρμογών**

Προκειμένου να μετατοπιστεί δυναμικά ο υπολογισμός μεταξύ της κινητής συσκευής και του cloud, οι εφαρμογές χρειάζονται να διασπαστούν σε χαλαρά συζευγμένες μονάδες - ενότητες (modules) που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι ενότητες μετατοπίζονται δυναμικά μεταξύ των κινητών συσκευών και του cloud ανάλογα με τις διάφορες μετρικές παραμέτρους που έχουν διαμορφωθεί στο μοντέλο κόστους. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να περιλαμβάνουν τον χρόνο εκτέλεσης της ενότητας, την κατανάλωση πόρων, το επίπεδο μπαταρίας, το οικονομικό κόστος, την ασφάλεια ή το εύρος ζώνης του δικτύου. Ο χρόνος αναμονής του χρήστη, αποτελεί βασική πτυχή π.χ. ο χρόνος που ένας χρήστης περιμένει από την κλήση ορισμένων ενεργειών στη διεπαφή της συσκευής έως ότου επιστραφεί στον χρήστη η επιθυμητή έξοδος.

Πέρα από τους περιορισμούς που μόλις αναφέρθηκαν υπάρχουν και τα **πλεονεκτήματα** που μας παρέχει η αρχιτεκτονική του MCC όπως περιγράφουμε παρακάτω:

- **Παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας**

Στο MCC, η αποθήκευση και η επεξεργασία δεδομένων πραγματοποιούνται εκτός της συσκευής αλλά στο cloud, αυξάνοντας έτσι αυτόματα τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής. Οποιοσδήποτε μεγάλος υπολογισμός αδειάζει την μπαταρία πολύ γρήγορα καθώς καταναλώνει

πολλή ισχύ. Έχει παρατηρηθεί ότι η εκφόρτωση των εργασιών στο cloud, μπορεί έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας κατά 45%. Έτσι, η εκφόρτωση και η αποστολή εργασιών στο cloud αποτελούν αποτελεσματικές λύσεις για την παράταση της διάρκειας ζωής των μπαταριών των κινητών συσκευών.

- **Επέκταση της χωρητικότητας αποθήκευσης**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αποθήκευση ήταν ένας μεγάλος περιορισμός για μια κινητή συσκευή. Αλλά το MCC παρέχει τεράστιο αποθηκευτικό χώρο. Η απλή υπηρεσία αποθήκευσης του Amazon και το Dropbox είναι παραδείγματα του cloud που παρέχει αποθήκευση στον χρήστη. Το Flickr είναι μια εφαρμογή για κοινή χρήση φωτογραφιών με βάση το MCC. Ακόμα και η εφαρμογή Facebook είναι ένα παράδειγμα κοινής χρήσης εικόνων που βασίζεται στο MCC.

- **Επεκτείνει την επεξεργαστική ισχύ**

Πολλές εφαρμογές όπως η μετατροπή αρχείων video (transcoding), η αναπαραγωγή παιχνιδιών, η μετάδοση υπηρεσιών πολυμέσων κ.λπ. απαιτούν υψηλή επεξεργαστική ισχύ, η οποία μπορεί να διατεθεί με εκφόρτωση εργασιών στο cloud.

- **Υψηλή αξιοπιστία**

Στο MCC, τα δεδομένα και οι εφαρμογές αποθηκεύονται σε πολλούς υπολογιστές, επομένως εκμηδενίζεται η πιθανότητα απώλειας δεδομένων. Η διαχείριση καταστροφών έχει γίνει ταχύτερη λόγω της διαθεσιμότητας σε πολλές περιοχές. Πολλές φορές, το cloud παρέχει δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας σε ψηφιακό περιεχόμενο, όπως μουσική και βίντεο, εμποδίζοντας έτσι τη μη εξουσιοδοτημένη διανομή. Εκτός από αυτό, το cloud παρέχει υπηρεσίες ασφαλείας όπως ανίχνευση ιών, έλεγχος ταυτότητας, ανίχνευση κακόβουλου κώδικα κ.ο.κ. Με αυτόν τον τρόπο, το MCC έχει βελτιώσει κατά πολύ μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία.

- **Υπηρεσία κατ'απαίτηση**

Στο MCC, ο χρήστης παίρνει κατ'απαίτηση, απρόσκοπτη υπηρεσία από το cloud. Λόγω της ελαστικής φύσης του cloud, οι χρήστες δεν χρειάζεται να εγκαταστήσουν αποκλειστικό υλικό ή λογισμικό στη συσκευή τους. Όλα μπορούν να ληφθούν από το cloud.

### **Καθυστέρηση μετάδοσης (Latency)**

Η καθυστέρηση είναι μια κρίσιμη απαίτηση για πολλές εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας. Καθώς οι τεχνολογίες έχουν γίνει πιο εξειδικευμένες, η χαμηλή καθυστέρηση είναι περισσότερο επιθυμητή. Οι υπηρεσίες που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση (π.χ. εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, βίντεο συνεχούς ροής, αυτόνομη οδήγηση και επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή) παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον και η ζήτηση αυξάνεται έντονα. Τέτοιες υπηρεσίες υπόσχονται να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης κοινωνίας, για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να ελέγξουμε την κυκλοφορία αυτοκινήτων και να αποτρέψουμε τα ατυχήματα μέσω επικοινωνίας οχήματος με μηχανή ή θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την επανζημένη πραγματικότητα (AR) για την παροχή εικονικών πληροφοριών σε πραγματικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο.

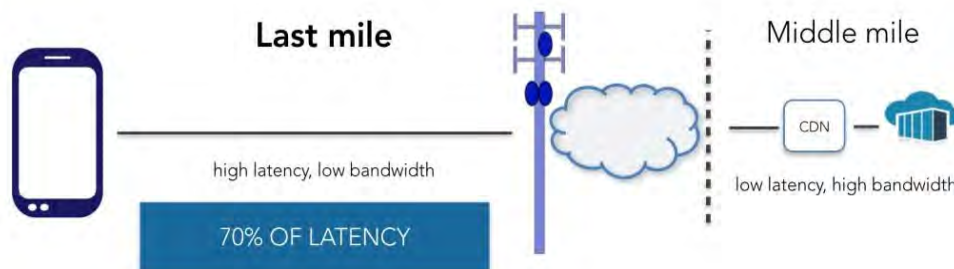
Η επίτευξη εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης λειτουργίας θα οδηγήσει σε πολλές νέες υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Το Tactile Internet είναι ένα παράδειγμα. Θα επιτρέψει σε μια εφαρμογή να αλληλεπιδρά με αντικείμενα είτε σε πραγματικό είτε σε εικονικό περιβάλλον από απόσταση μέσω του Διαδικτύου και να το κάνει αυτό με ένα πολύ σύντομο χρόνο απόκρισης. Αυτή η γρήγορη αλληλεπίδραση θα πρέπει να είναι συνεπής με τις φυσικές αισθητικές αντιλήψεις των ανθρώπων. Για παράδειγμα, όταν μια υπηρεσία σε πραγματικό χρόνο βασισμένη στην όραση θα απαιτήσει την απόδοση κάθε νέου frame μέσα σε 10 ms για να αποφευχθεί οποιαδήποτε έλλειψη συνεχούς όρασης, μια εικονική αντίδραση θα πρέπει να ολοκληρωθεί μέσα σε περίπου 10 ms αλλιώς θα υπάρχει πρόβλημα.

Προκειμένου να ικανοποιηθεί η προϋπόθεση της καθυστέρησης, το κινητό δίκτυο 5ης γενιάς, θα πρέπει να παρέχει μια αρχιτεκτονική δικτύου χαμηλής καθυστέρησης για το Tactile Internet. Το

δίκτυο 5G τυποποιείται τώρα για την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου QoS και θα πρέπει να είναι σε θέση να επιτύχει καθυστέρηση περίπου στο 1 ms. Μια τέτοια φιλοδοξία αποτελεί σημαντική πρόκληση για τους προγραμματιστές και τους ερευνητές του δικτύου, όπου αν μια αρχιτεκτονική 5G επιτύχει την απαίτηση αυτή της τάξης καθυστέρησης, οι χρήστες κινητών θα μπορούν να έχουν εύκολη πρόσβαση σε υπηρεσίες Tactile Internet.

Ωστόσο, για να τεθούν σε ισχύ τέτοιες εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης, το δίκτυο 5G πρέπει να αντιμετωπίσει την απόσταση επικοινωνίας για να εξυπηρετεί αυτές τις εφαρμογές. Οι περισσότερες εφαρμογές στο Tactile Internet βασίζονται σε υπηρεσίες cloud computing για να ολοκληρώσουν τα βαριά τους καθήκοντα όσον αφορά την υπολογιστική πολυπλοκότητα. Για παράδειγμα, μια εφαρμογή AR για κινητά πρέπει να στείλει δύσκολες και βαριές εργασίες επεξεργασίας (όπως αναγνώριση αντικειμένου ή επεξεργασία εικόνας) σε cloud-based servers. Παρόλα αυτά, ένα cloud data center μπορεί μερικές φορές να απέχει από έναν κινητό χρήστη (π.χ. σε μια μακρινή χώρα), ώστε να υπάρχει μεγάλη απόσταση μετάδοσης και επομένως υψηλή καθυστέρηση στην επικοινωνία.

Η καθυστέρηση παραμένει η κρίσιμη μετρική όσον αφορά τις εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση και το συνολικό latency αποτελείται κυρίως από δύο είδη. Το ένα είναι η καθυστέρηση της επικοινωνίας, ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται για να μεταφερθεί ένας φόρτος εργασίας από μια πηγή στον προορισμό (και προς την αντίθετη κατεύθυνση) μέσω της ενσύρματης και ασύρματης επικοινωνίας στα δίκτυα. Το άλλο είναι η υπολογιστική καθυστέρηση, δηλαδή ο χρόνος που δαπανάται για τον υπολογισμό σε ένα διακομιστή. Η υπερβολική καθυστέρηση υπολογισμών είναι σίγουρα κάτι το μη αποδεκτό για την υπηρεσία χαμηλού latency. Ωστόσο, σε τέτοιες περιπτώσεις, υπάρχουν συχνά άλλοι διακομιστές στα άκρα του δικτύου που υποστηρίζουν μόνο λίγους χρήστες στις γύρω περιοχές. Η επιλογή μιας ελαφρώς μεγαλύτερης διαδρομής σε έναν λιγότερο επιφορτισμένο διακομιστή θα μπορούσε να μειώσει τον χρόνο υπολογισμού. Για αυτό είναι πολύ κρίσιμο να εξετάζονται και οι δύο τύποι καθυστέρησης που θα πρέπει να ικανοποιούν τα όρια χρόνου της υπηρεσίας.



**Σχήμα 3-8: Η καθυστέρηση στο MC**

(πηγή: <http://www.convergedigest.com/2015/03/twin-prime-raises-95m-for-mobile-data.html>)

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται ιδιαίτερα κατανοητό ότι βασική προτεραιότητα του MCC είναι η μείωση του latency στο last mile όπως αποκαλείται, δηλαδή στο τμήμα του δικτύου που βρίσκεται κοντά στον τελικό χρήστη όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-8. Στο τμήμα που αναφέρεται και ως ‘middle mile’ τα ζητήματα αντιμετωπίζονται με τη χρήση δικτύων παροχής περιεχομένου (CDNs) καθώς επίσης και με τη βελτίωση των αποτελεσματικότητας των WANs στο επονομαζόμενο επίσης ‘lasthop’ [70].

Με βάση αυτή την προτεραιότητα της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης - στο ‘last mile’- κινείται τόσο ο ακαδημαϊκός όσο και ο χώρος της βιομηχανίας όπου μελετώνται τεχνολογίες οι οποίες θα ωθήσουν το CC πιο κοντά στην άκρη του δικτύου ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη για χαμηλή καθυστέρηση. Τέτοιες τεχνολογίες είναι το Fog Computing, το Mobile Edge Computing και τα Cloudlets, τις οποίες περιγράφουμε συνοπτικά παρακάτω.



### 3.2.1.1 Fog Computing (FC)

Το Fog Computing (FC) αποτελεί μια πρόταση στο πεδίο του edge computing, υποστηρίζοντας τις συνδεδεμένες συσκευές παντού και πάντα. Ο όρος "Fog Computing" εισήχθη από τη Cisco Systems ως ένα νέο μοντέλο για να διευκολύνει την ασύρματη μεταφορά δεδομένων σε καταναμημένες συσκευές στο πρότυπο του δικτύου Internet of Things (IoT) [71] [72]. Αποτελεί ένα καταναμημένο μοντέλο υπολογιστών που λειτουργεί ως ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ των κέντρων δεδομένων Cloud και των συσκευών / αισθητήρων του IoT όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-9. Δεδομένου ότι τα datacenters του Cloud είναι γεωγραφικά συγκεντρωμένα, συχνά αποτυγχάνουν να αντιμετωπίσουν τις απαιτήσεις αποθήκευσης και επεξεργασίας των δισεκατομμυρίων γεωγραφικά καταναμημένων συσκευών / αισθητήρων IoT. Το αποτέλεσμα είναι, το δίκτυο να υποφέρει από συμφόρηση, από υψηλή καθυστέρηση στην παροχή υπηρεσιών, καθώς και κακή ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) και εμπειρία του χρήστη (QoE).

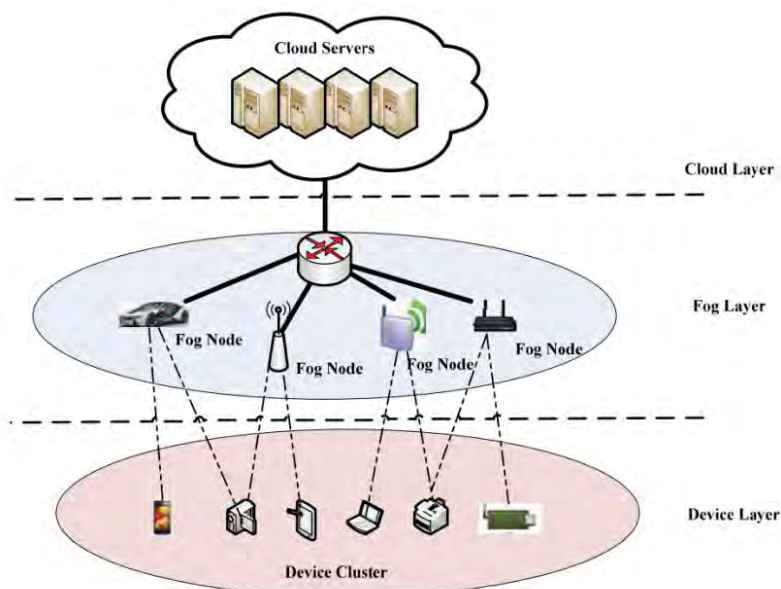
Το FC προσφέρει υπηρεσίες υπολογιστών, δικτύωσης και αποθήκευσης, ώστε οι υπηρεσίες που βασίζονται στο cloud να μπορούν να επεκταθούν πιο κοντά στις συσκευές / αισθητήρες IoT [73]. Η επεξεργασία πραγματοποιείται κυρίως στο τοπικό δίκτυο και σε πύλες του IoT ή σε ένα fog node (FCN - "κόμβο ομίχλης"). Το FC προσφέρει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει σε συσκευές ενιαίας επεξεργασίας να συλλέγουν δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες και να ενεργούν ανάλογα. Για παράδειγμα, μια έξυπνη ρομποτική ηλεκτρική σκούπα λαμβάνει δεδομένα από πολλούς αισθητήρες εγκατεστημένους σε ένα σπίτι, οι οποίοι είναι ικανοί να ανιχνεύουν τυχόν ακαθαρσίες και να στέλνουν τις κατάλληλες εντολές στην ηλεκτρική σκούπα για να αντιδρούν ανάλογα.

Το FC προσφέρει πολύ χαμηλή καθυστέρηση σε σύγκριση με το cloud computing, το οποίο βρίσκεται μακριά από τον τελικό χρήστη [74]. Εκτός αυτού, το FC διευκολύνει την ευαισθητοποίηση σχετικά με την τοποθεσία, την υποστήριξη της κινητικότητας, τις αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο, την επεκτασιμότητα και τη διαλειτουργικότητα. Έτσι, μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά όσον αφορά την καθυστέρηση εξυπηρέτησης, την κατανάλωση ρεύματος, την κυκλοφορία και συμφόρηση του δικτύου, τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά έξοδα, τη διανομή περιεχομένου, του QoS κλπ. Υπό αυτή την έννοια, το FC ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις όσον αφορά τις εφαρμογές του Διαδικτύου σε σχέση με την αποκλειστική χρήση του Cloud computing.

Ωστόσο, το FC έχει ορισμένους περιορισμούς λόγω της εξάρτησης από την ασύρματη σύνδεση, η οποία πρέπει να είναι ζωντανή (συνεχής) για να εκτελεί πολύπλοκες ενέργειες. Οι όροι FC και MEC χρησιμοποιούνται ευρέως εναλλάξ αλλά διαφέρουν κατά κάποιο τρόπο. Για παράδειγμα, σε ένα περιβάλλον FC, η νοημοσύνη βρίσκεται στο επίπεδο του τοπικού δικτύου, το οποίο επεξεργάζεται στον fog node ή στην πύλη IoT. Επίσης, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση στα ασύρματα δίκτυα για το IoT και επικοινωνίες μηχανή με μηχανή (M2M). Ωστόσο, στα περιβάλλοντα κινητής τηλεφωνίας, η ευφυΐα, η ικανότητα επικοινωνίας και η επεξεργαστική ισχύς ωθούνται στο RAN, οπότε το MEC γίνεται πιο δημοφιλής στα δίκτυα 5G.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του Fog Computing είναι:

1. Οι κόμβοι του Fog computing (Fog computing nodes - FCN) βρίσκονται συνήθως στα άκρα του δικτύου και μακριά από τα κεντρικά datacenters.
2. Οι FCN είναι ευρέως διαδεδομένοι και γεωγραφικά διαθέσιμοι σε μεγάλο πλήθος.
3. Το Cloud Computing στα fog nodes επιτρέπει χαμηλή και επιπλέον προβλέψιμη καθυστέρηση.
4. Οι FCN παρέχουν εφαρμογές με επίγνωση της γεωγραφικής θέσης της συσκευής και γενικότερα του περιβάλλοντος των συσκευών.
5. Οι FCN μπορούν να αντεπεξέλθουν στην κινητικότητα των συσκευών. Για παράδειγμα, εάν μια συσκευή κινείται τόσο μακριά από ένα fog node ώστε η καθυστέρηση της υπηρεσίας να μην είναι η επιθυμητά χαμηλή, το fog node μπορεί να ανακατευθύνει την εφαρμογή στην κινητή συσκευή ώστε να συνδεθεί με ένα νέο fog node που είναι πλέον πιο κοντά στη συσκευή αυτή.



Σχήμα 3-9. Αρχιτεκτονική Fog Computing. (πηγή: ShuoWangetal., 2017) [75]

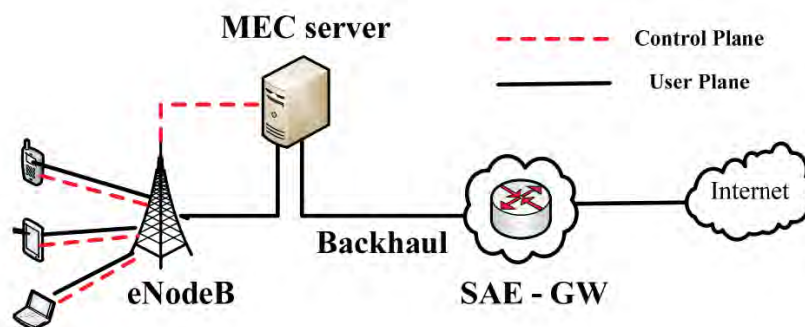
Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια σύγκριση κάποιων κρίσιμων παραμέτρων μεταξύ του Fog Computing και του Cloud Computing [65] [76].

Παράμετροι	Cloud Computing	Fog Computing
Τελικός χρήστης	Γενικοί χρήστες του διαδικτύου	Χρήστες κινητών συσκευών
Τύπος υπηρεσίας	Παγκόσμιες πληροφορίες που συλλέγονται από τον κόσμο	Περιορισμένες υπηρεσίες τοπικής πληροφόρησης σε συγκεκριμένες τοποθεσίες ανάπτυξης
Hardware	επαρκής και κλιμακώσιμος χώρος αποθήκευσης και υπολογιστική ισχύ	Περιορισμένη αποθήκευση και υπολογιστική ισχύ - ασύρματη διασύνδεση
Απόσταση από τον χρήστη	μακριά από τους χρήστες – επικοινωνία μέσω δικτύων IP	Στη φυσική εγγύτητα όπου επικοινωνούν μέσω ασύρματης σύνδεσης single-hop
Ανάπτυξη	Κεντροποιημένη	Κατανεμημένη
Τύπος σύνδεσης 'last mile'	Μισθωμένη γραμμή	Ασύρματη
Πλήθος διακομιστών	Μικρό	Μεγάλο
Καθυστέρηση	Μεγάλη	Μικρή
Υποστήριξη κινητικότητας	Περιορισμένη	Υποστηρίζεται
Γνώση της τοποθεσίας	Όχι	Ναι
Επίθεση στα δεδομένα εν κινήσει	Υψηλή πιθανότητα	Πολύ χαμηλή πιθανότητα
Ασφάλεια	Λιγότερη	Περισσότερη
Διακύμανση καθυστέρησης	Μεγάλη	Πολύ μικρή
Αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο	Όχι πλήρης υποστήριξη	Πλήρης υποστήριξη
Τοποθεσία κόμβων διακομιστή	Στο Διαδίκτυο	Στην άκρη του LAN
Ευπάθεια (vulnerability)	Υψηλή πιθανότητα	Πολύ χαμηλή πιθανότητα

### 3.2.1.2 Mobile Edge Computing (MEC)

Όπως αναφέραμε παραπάνω, υπάρχουν τα πλεονεκτήματα του MCC, αλλά ένα από τα βασικά μειονεκτήματά του είναι ότι επιβάλλει τεράστιο πρόσθετο φορτίο τόσο στο ασύρματο όσο και στο backhaul δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, εισάγοντας υψηλό latency, γνωρίζοντας ότι τα δεδομένα αποστέλλονται σε ισχυρούς servers οι οποίοι, όσον αφορά την τοπολογία του δικτύου, είναι πολύ μακριά από τους χρήστες.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μεγάλης καθυστέρησης (long latency), οι υπηρεσίες cloud θα πρέπει να μετακινούνται πιο κοντά στον εξοπλισμό των χρηστών (UE), δηλ. στην άκρη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας όπως προστάζει η νέα τεχνολογία του Mobile Edge Computing. Το MEC μπορεί να γίνει κατανοητό ως μια ειδική περίπτωση του MCC. Στο συμβατικό MCC, οι υπηρεσίες cloud γίνονται προσπελάσιμες μέσω της σύνδεσης στο Internet ενώ στην περίπτωση του MEC, οι πόροι (υπολογιστικοί και αποθήκευσης) βρίσκονται κοντά στα UEs (με την έννοια της τοπολογίας του δικτύου). Ως εκ τούτου, το MEC μπορεί να προσφέρει σημαντικά χαμηλότερες καθυστερήσεις και jitter (διακύμανση καθυστέρησης) σε σύγκριση με το MCC. Επιπλέον, ενώ το MCC έχει μια προσέγγιση πλήρως συγκεντρωτική με ένα σύνολο υπολογιστών που συνήθως τοποθετούνται σε μία ή σε λίγες θέσεις, το MEC έχει την τάση να αναπτυχθεί με πλήρως καταναμημένο τρόπο. Από την άλλη πλευρά, το MEC παρέχει περιορισμένους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους σε σχέση με το MCC. Το Σχήμα 3-10 δείχνει την αρχιτεκτονική του MEC [75]. Οι διακομιστές MEC βρίσκονται κοντά σε σταθμούς βάσης. Μπορούν είτε να χειριστούν ένα αίτημα χρήστη και να απαντήσουν απευθείας στο UE είτε να διαβιβάσουν το αίτημα σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων και δίκτυα διανομής περιεχομένου (CDNs)



Σχήμα 3-10. Αρχιτεκτονική MEC (πηγή: Shuo Wang et al., 2017)

Η σύγκριση των βασικών τεχνικών πτυχών του MCC και του MEC περιγράφονται στον Πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3. Σύγκριση υψηλού επιπέδου των εννοιών MCC και MEC

Τεχνικές πτυχές	MCC	MEC
Ανάπτυξη	Κεντροποιημένη	Καταναμημένη
Απόσταση από τον εξοπλισμό χρήστη (UE)	Υψηλή	Χαμηλή
Καθυστέρηση (Latency)	Υψηλή	Χαμηλή
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	Υψηλή	Χαμηλή
Υπολογιστική ισχύ	Επαρκής	Περιορισμένη
Δυνατότητα αποθήκευσης	Επαρκής	Περιορισμένη

Ένα άλλο concept που ενσωματώνει το edge computing στην αρχιτεκτονική του δικτύου κινητής τηλεφωνίας αναπτύχθηκε το 2014 από το Industry Specification Group (ISG) στο πλαίσιο του

Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) [77]. Οι προσπάθειες τυποποίησης που σχετίζονται με το MEC οδηγούνται από εξέχοντες φορείς κινητής τηλεφωνίας (π.χ. DOCOMO, Vodafone, TELECOM Italia) και κατασκευαστές (π.χ. IBM, Nokia, Huawei, Intel). Ο κύριος σκοπός του ομίλου ISG MEC είναι να επιτρέψει την αποτελεσματική και απρόσκοπτη ενσωμάτωση των λειτουργιών του cloud computing στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και να συμβάλει στην ανάπτυξη ευνοϊκών συνθηκών για όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς (φορείς κινητής τηλεφωνίας, πάροχοι υπηρεσιών, προμηθευτές και χρήστες).

Το MEC αποτελεί μια φυσική εξέλιξη στην εξέλιξη των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας και τη σύγκλιση του IT και των δικτύων τηλεπικοινωνιών. Η εφαρμογή της πολλαπλής πρόσβασης στο Edge Computing θα επιτρέψει τη δημιουργία νέων κάθετων επιχειρηματικών τομέων και υπηρεσιών για τους τελικούς χρήστες. Οι περιπτώσεις χρήσης περιλαμβάνουν:

- ανάλυση βίντεο,
- υπηρεσίες εντοπισμού θέσης,
- Internet-of-Things (IoT),
- επαυξημένη πραγματικότητα,
- βελτιστοποιημένη κατανομή τοπικού περιεχομένου και
- προσωρινή αποθήκευση δεδομένων.

Επιτρέπει με μοναδικό τρόπο στις εφαρμογές λογισμικού να αξιοποιούν πληροφορίες τοπικού περιεχομένου και σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις συνθήκες του τοπικού. Με την ανάπτυξη διάφορων υπηρεσιών και caching content στην άκρη του δικτύου, τα δίκτυα κορμού κινητών επικοινωνιών ανακουφίζονται από την περαιτέρω συμφόρηση και μπορούν να εξυπηρετήσουν αποτελεσματικά τους τοπικούς σκοπούς.

### **Σενάρια χρήσης MEC**

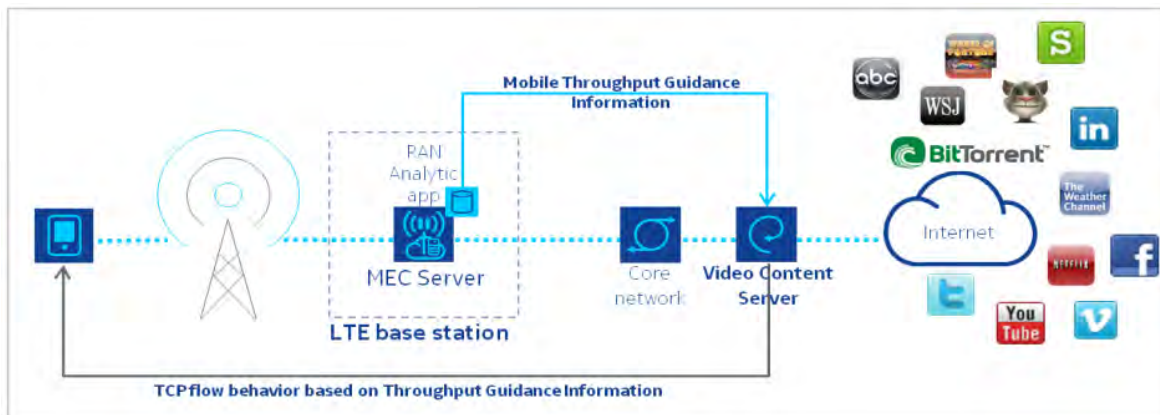
Οι ακόλουθες ενότητες περιγράφουν έναν αριθμό σεναρίων υπηρεσιών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο του ETSI ISG MEC. Αυτά απεικονίζουν διάφορα σενάρια που μπορούν να αξιοποιήσουν το Mobile Edge Computing είτε για να αυξήσουν την απόδοση σε σύγκριση με την παροχή τέτοιων υπηρεσιών μέσω του cloud είτε μέσω κεντρικών διακομιστών δικτύου ή για να αξιοποιήσουν τις μοναδικές δυνατότητες που προσφέρουν οι πλατφόρμες MEC όπως η εγγύτητα με το χρήστη και το άκρο του δικτύου, εξυπηρετώντας μια εξαιρετικά τοπική περιοχή με βασικό πλεονέκτημα το εξαιρετικά χαμηλό latency.

#### **• Έξυπνη επιτάχυνση Video - Intelligent Video Acceleration**

Η ποιότητα εμπειρίας (QoE) του τελικού χρήστη και η αξιοποίηση των ραδιοπόρων του δικτύου μπορούν να βελτιωθούν, μέσω της έξυπνης επιτάχυνσης video. Τα διαδικτυακά media και η μεταφορά αρχείων τυπικά μεταφορτώνονται σήμερα χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο HTTP μέσω του πρωτοκόλλου TCP. Η διαθέσιμη χωρητικότητα μπορεί να μεταβληθεί κατά πολύ μέσα σε δευτερόλεπτα π.χ. ως αποτέλεσμα αλλαγών στις συνθήκες του καναλιού ή των συσκευών που εισέρχονται / εξέρχονται από το δίκτυο. Το TCP ενδέχεται να μην είναι σε θέση να προσαρμοστεί αρκετά γρήγορα σε συνθήκες ταχείας μεταβολής στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή αξιοποίηση πολύτιμων πόρων και σε υποβάθμιση της εμπειρίας χρήστη (QoE). [78]

Το Σχήμα 3-11 δείχνει ένα παράδειγμα του σεναρίου υπηρεσίας έξυπνης επιτάχυνσης βίντεο το οποίο επιχειρεί να ξεπεράσει τις προκλήσεις που περιγράφονται παραπάνω. Σε αυτό το σενάριο, μια εφαρμογή ραδιοανάλυσης, η οποία βρίσκεται σε έναν εξυπηρετητή MEC, παρέχει στον διακομιστή βίντεο μια ένδειξη σχετικά με τη διέλευση που εκτιμάται ότι είναι διαθέσιμη στη διασύνδεση downlink ραδιοσυχνότητας. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποβοήθηση των αποφάσεων ελέγχου της συμφόρησης TCP. Οι πληροφορίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να διασφαλιστεί ότι η κωδικοποίηση σε επίπεδο εφαρμογής αντιστοιχεί στην εκτιμώμενη χωρητικότητα στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink). Ο διακομιστής βίντεο μπορεί

να χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες για να βοηθήσει τις αποφάσεις ελέγχου της συμφόρησης. Ο χρόνος εκκίνησης του περιεχομένου καθώς και ο χρόνος που θα σταματήσει μπορούν να μειωθούν (έχοντας μια γρήγορη και ομαλή μετάδοση, χωρίς τα γνωστά buffering), επιτρέποντας βελτιωμένη ποιότητα και απόδοση βίντεο.

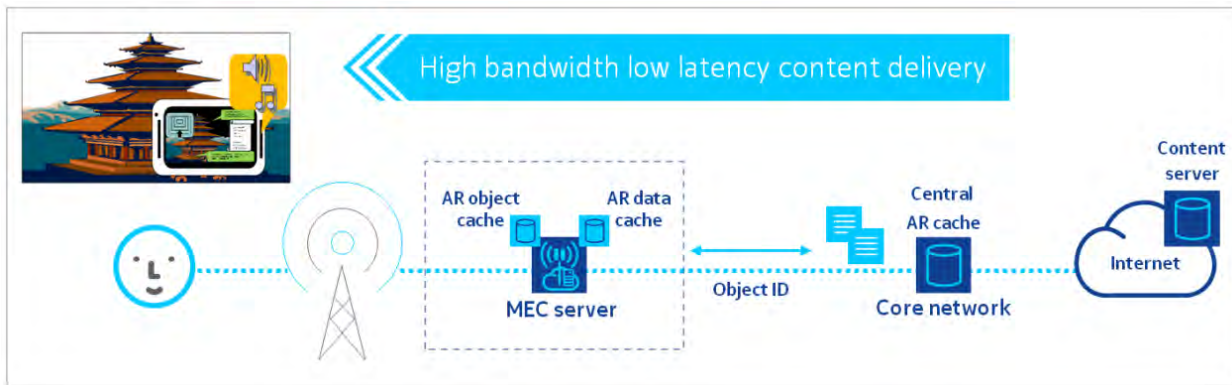


Σχήμα 3-11. Σενάριο υπηρεσίας έξυπνης επιτάχυνσης βίντεο (πηγή: ETSI White Paper No. 11, 2015)

- **Επαυξημένη Πραγματικότητα -Augmented Reality**

Οι νέες υπηρεσίες καθίστανται δυνατές όταν αναπτύσσονται δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που υποστηρίζουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης και συγχρόνως χαμηλή καθυστέρηση. Ένα παράδειγμα τέτοιων υπηρεσιών είναι η επαυξημένη πραγματικότητα ή ενισχυμένη πραγματικότητα (AR - Augmented Reality). Η AR είναι ο συνδυασμός μιας οπτικής γωνίας του πραγματικού περιβάλλοντος και των συμπληρωματικών αισθητηρίων εισροών που παράγονται από τον υπολογιστή, όπως τα δεδομένα ήχου, βίντεο, γραφικών ή GPS. Η αυξημένη πραγματικότητα μπορεί να ενισχύσει την εμπειρία ενός επισκέπτη σε ένα μουσείο ή άλλο σημείο ενδιαφέροντος. Φανταστείτε έναν επισκέπτη σε ένα μουσείο, γκαλερί τέχνης, μνημείο πόλης, μουσικό ή αθλητικό γεγονός, κρατώντας την κινητή συσκευή προς ένα συγκεκριμένο σημείο ενδιαφέροντος με την εφαρμογή που σχετίζεται με την ενεργοποίηση της επίσκεψής τους (π.χ. την εφαρμογή του μουσείου). Η κάμερα καταγράφει το σημείο ενδιαφέροντος και η εφαρμογή εμφανίζει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με το τι βλέπει ο επισκέπτης. [78]

Οι υπηρεσίες αυξημένης πραγματικότητας απαιτούν μια εφαρμογή για την ανάλυση της απόδοσης από τη φωτογραφική μηχανή μιας συσκευής ή / και μια ακριβή τοποθεσία, προκειμένου να συμπληρωθεί η εμπειρία ενός χρήστη κατά την επίσκεψη σε ένα σημείο ενδιαφέροντος παρέχοντας επιπλέον πληροφορίες στο χρήστη σχετικά με το τι βιώνει εκείνη τη στιγμή. Η εφαρμογή πρέπει να γνωρίζει τη θέση του χρήστη και την κατεύθυνση που αντιμετωπίζει, είτε μέσω τεχνικών τοποθέτησης είτε μέσω της προβολής της κάμερας ή και των δύο. Μετά την ανάλυση τέτοιων πληροφοριών, η εφαρμογή μπορεί να παρέχει επιπλέον πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο στον χρήστη. Εάν ο χρήστης μετακινηθεί, οι πληροφορίες πρέπει να ανανεωθούν. Η φιλοξενία της υπηρεσίας Augmented Reality σε μια πλατφόρμα MEC αντί για το cloud είναι επωφελής εφόσον οι συμπληρωματικές πληροφορίες που σχετίζονται με ένα σημείο ενδιαφέροντος είναι πολύ εντοπισμένες (εστιασμένες). Το Σχήμα 3-13 δείχνει πώς μια πλατφόρμα MEC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή μιας υπηρεσίας Augmented Reality.



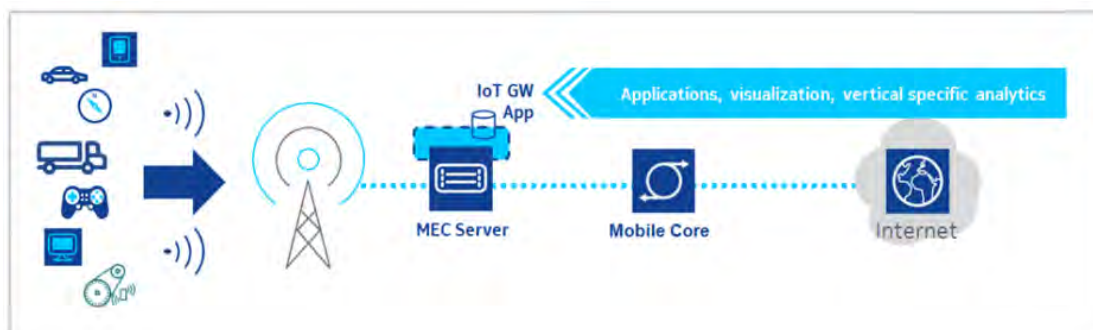
**Σχήμα 3-12. Σενάριο Υπηρεσιών Επαυξημένης Πραγματικότητας**  
(πηγή: ETSI White Paper No. 11, 2015)

Επιπλέον, η επεξεργασία της θέσης χρήστη μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια πλατφόρμα MEC και όχι σε έναν πιο κεντρικό εξυπηρετητή. Μπορεί να υπάρχει ανάγκη ενημέρωσης των πληροφοριών με γρήγορο ρυθμό, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μετακινείται ο χρήστης και το πλαίσιο στο οποίο χρησιμοποιείται η υπηρεσία επαυξημένης πραγματικότητας (π.χ. σε μια γκαλερί τέχνης, τα εκθέματα τοποθετούνται μόνο μερικά μέτρα μακριά και κάθε κομμάτι είναι συμπληρωμένο με πρόσθετο κείμενο για τον καλλιτέχνη, ερμηνεία του έργου κ.λπ.). Με άλλα λόγια, τα δεδομένα επαυξημένης πραγματικότητας απαιτούν χαμηλό latency και υψηλό ποσοστό επεξεργασίας δεδομένων, προκειμένου να παρέχουν τις σωστές πληροφορίες στη συσκευή του χρήστη ανάλογα με την τοποθεσία και τον προσανατολισμό του. Η επεξεργασία τέτοιων δεδομένων στην πλατφόρμα MEC έχει επίσης το πλεονέκτημα της συλλογής μετρήσεων, π.χ. ανώνυμων μεταδεδωμένων κ.λπ., προκειμένου να αναλύσει τη χρήση της υπηρεσίας και να βοηθήσει στη βελτίωση της υπηρεσίας προκειμένου να προσφέρει μια καλύτερη εμπειρία χρήστη (QoE).

- **Πύλη IoT - Internet of Things Gateway**

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) δημιουργεί επιπλέον μηνύματα (messages) σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών και απαιτεί πύλες για τη συγκέντρωση των μηνυμάτων και τη διασφάλιση χαμηλού latency και ασφάλειας. Λόγω της φύσης ορισμένων από τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες, απαιτείται να έχουν την ικανότητα για real time ενημέρωση και απαιτείται μια ομαδοποίηση αισθητήρων και συσκευών για αποτελεσματική εξυπηρέτηση.

Οι συσκευές IoT συχνά περιορίζονται σε πόρους από την άποψη της χωρητικότητας του επεξεργαστή και της μνήμης. Υπάρχει ανάγκη να συγκεντρωθούν διάφορα μηνύματα συσκευής IoT (IoT device messages) συνδεδεμένα μέσω του κινητού δικτύου κοντά στις συσκευές. Αυτό παρέχει επίσης μια ικανότητα επεξεργασίας αναλυτικών δεδομένων και ένα χρόνο απόκρισης χαμηλής καθυστέρησης.



**Σχήμα 3-13. Σενάριο υπηρεσίας πύλης IoT** (πηγή: ETSI White Paper No. 11, 2015)

Διάφορες συσκευές συνδέονται μέσω διαφορετικών μορφών σύνδεσης. Γενικά τα μηνύματα είναι μικρά, κρυπτογραφημένα και έρχονται σε διάφορες μορφές πρωτοκόλλων. Υπάρχει ανάγκη για ένα σημείο συγκέντρωσης χαμηλής καθυστέρησης για τη διαχείριση των διαφόρων

πρωτοκόλλων, τη διανομή μηνυμάτων και την επεξεργασία των αναλυτικών στοιχείων. Ο διακομιστής MEC παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης αυτών των προκλήσεων.

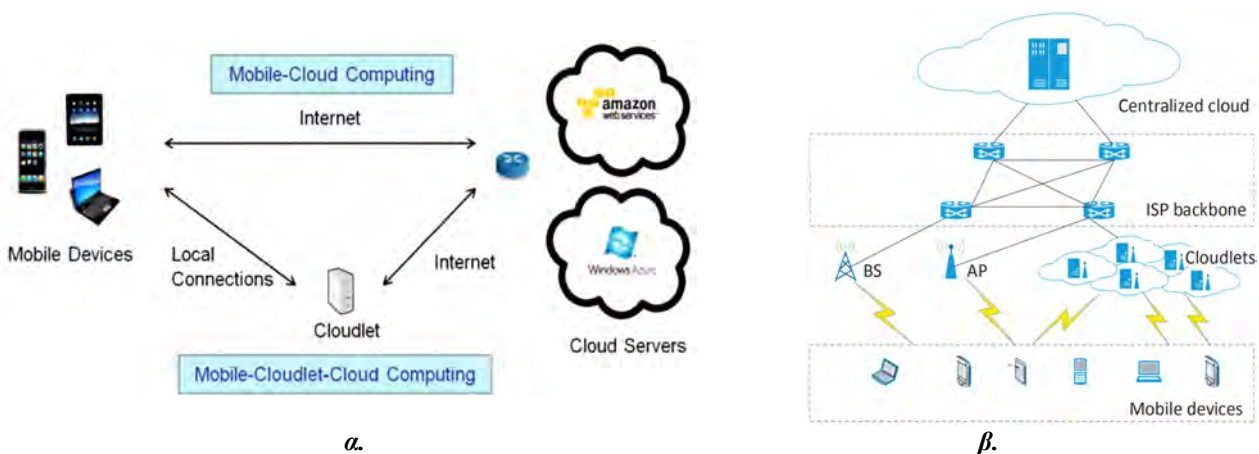
Το Mobile Edge Computing μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση και τον έλεγχο συσκευών εξ αποστάσεως, για την ανάλυση και την παροχή προβλέψεων σε πραγματικό χρόνο. Το MEC επιτρέπει τη συγκέντρωση και τη κατανομή των IoT υπηρεσιών στο πολύ καταναμημένο περιβάλλον κινητού σταθμού βάσης και επιτρέπει στις εφαρμογές να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο. [78]

Το MEC αντιπροσωπεύει μια βασική τεχνολογική και αρχιτεκτονική έννοια που επιτρέπει την εξέλιξη του 5G, καθώς βοηθά στην προώθηση και τη μετατροπή του κινητού ευρυζωνικού δικτύου σε προγραμματιζόμενο δίκτυο και συμβάλλει στην ικανοποίηση των απαιτήσεων του 5G όσον αφορά την αναμενόμενη καθυστέρηση και αυτοματοποίηση. Βασίζεται σε μια εικονική πλατφόρμα, με μια προσέγγιση συμπληρωματική προς το NFV. Στην πραγματικότητα, ενώ το NFV επικεντρώνεται στις λειτουργίες δικτύου, το πλαίσιο MEC επιτρέπει εφαρμογές που εκτελούνται στην άκρη του δικτύου. Η υποδομή του δικτύου που φιλοξενεί λειτουργίες MEC και NFV είναι αρκετά όμοια έτσι ώστε οι φορείς εκμετάλλευσης να επωφελούνται όσο το δυνατόν περισσότερο από την επένδυσή τους. Η επαναχρησιμοποίηση της υποδομής και της διαχείρισης της υποδομής του NFV στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, φιλοξενώντας τόσο τις VNFs (Virtual Network Functions) όσο και τις εφαρμογές MEC στην ίδια πλατφόρμα θα είναι επωφελής και επικερδής.

### 3.2.1.3 Cloudlets/mDc

Ένα cloudlet είναι ένα datacenter μικρής κλίμακας που αναπτύσσεται στην άκρη του Internet. Ο κύριος σκοπός του cloudlet είναι η υποστήριξη εντατικών και διαδραστικών εφαρμογών κινητής τηλεφωνίας παρέχοντας ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους σε κινητές συσκευές με χαμηλότερη καθυστέρηση. Πρόκειται για ένα νέο αρχιτεκτονικό στοιχείο που επεκτείνει τη σημερινή υποδομή του Cloud Computing.

Το Cloudlet είναι μια εικονική πλατφόρμα στη μέση των δικτύων, μεταξύ του κέντρου δεδομένων και των χρηστών (κινητή συσκευή - cloudlet - cloud) [79]. Ένα cloudlet μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κέντρο δεδομένων σε ένα κουτί (datacenter in a box) του οποίου ο στόχος είναι να φέρει το cloud πιο κοντά στο τελικό χρήστη [80]. Ο όρος cloudlet δημιουργήθηκε για πρώτη φορά από τον M. Satyanarayanan, τον Victor Bahl, τον Ramón Cáceres και τον Nigel Davies και μια πρωτότυπη εφαρμογή αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon ως ερευνητικό έργο. Πάνω στην ίδια κατεύθυνση και προσέγγιση, αντίστοιχη πρόταση έχει και η Microsoft εισάγοντας την έννοια του MicroDataCenter ως επέκταση των σημερινών μεγάλης κλίμακας CloudDataCenters [81]. Υποστήριξη αυτής της προσέγγισης γίνεται και από τους Vodafone, Intel, Huawei καθώς επίσης και από το OpenEdgeComputing.org [82].



Σχήμα 3-14. Αρχιτεκτονική των cloudlets. Οι κινητές συσκευές αλληλεπιδρούν άμεσα με το cloud ή μέσω του cloudlet για να επιτύχουν τους στόχους ποιότητας της υπηρεσίας (QoS) (π.χ. καθυστέρηση, κόστος) [83] [84] (πηγές: α. Tolga Soyata et al., 2013, β. Long Jin et al., 2016)

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-14 α και β, το παραδοσιακό κεντροποιημένο cloud φιλοξενεί κοινόχρηστους πόρους σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων και ενεργεί ως αντιπρόσωπος μεταξύ των αρχικών παρόχων περιεχομένου και των κινητών συσκευών [85]. Για να αποκτήσουν πρόσβαση σε πόρους / υπηρεσίες στα κέντρα δεδομένων, οι κινητές συσκευές συχνά πρέπει να περάσουν από το δίκτυο κορμού. Η μεγάλη καθυστέρηση και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας μπορεί να παρεμποδίσει την ικανότητα του cloud να υποστηρίξει διαδραστικές εφαρμογές που απαιτούνται από τους χρήστες. Αντίθετα, το ελαφρύ cloudlet μπορεί να εξισορροπήσει την κλίμακα των κοινόχρηστων πόρων και της γενικής πρόσβασης [86].

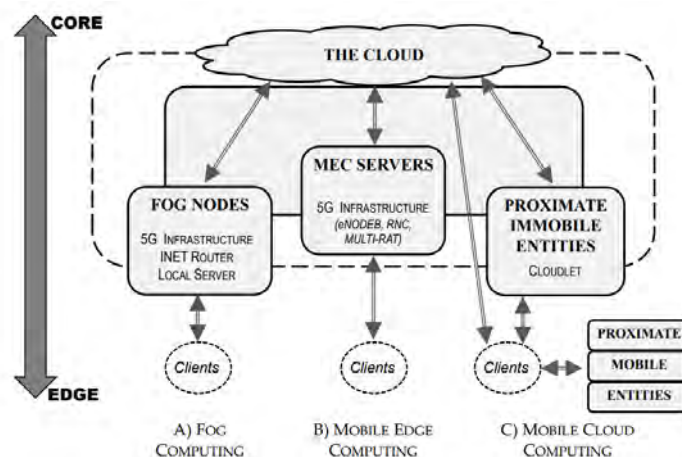
Ένα cloudlet είναι ένας αξιόπιστος, πλούσιος σε πόρους υπολογιστής συνδεδεμένος στο Internet ή ένα σύμπλεγμα υπολογιστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κινητές συσκευές μέσω ασύρματου τοπικού δικτύου υψηλής ταχύτητας (WLAN). Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, οι κινητές συσκευές λειτουργούν ως clients και τα cloudlets ως πάροχοι υπηρεσιών (service providers). Η απρόσκοπτη αλληλεπίδραση μεταξύ τους μπορεί να επιτευχθεί πιο εύκολα στη φυσική εγγύτητα του cloudlet με το χαμηλό latency εξ' αιτίας της επικοινωνίας one-hop. Λόγω των χωρικών κατανομών των cloudlets και των διακριτών τους δυνατοτήτων ή των φιλοξενούμενων πόρων, οι κινητές συσκευές έχουν διαφορετικές προτιμήσεις για καθένα από αυτά.

Ένα cloudlet αντιπροσωπεύει ένα container για εικονικές μηχανές (VMs). Οι συνδεδεμένοι χρήστες συνδέονται με VMs που υποστηρίζουν εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης κάνοντας offloading. Η έννοια του Cloudlet υποστηρίζεται από την παροχή ιεραρχικών δικτύων τριών επιπέδων. Σε αυτήν την ιεραρχία το cloudlet είναι ο πρωταρχικός πόρος για την αύξηση των δυνατοτήτων της κινητής συσκευής, ενώ ένα απομακρυσμένο cloud χρησιμοποιείται ως τελευταίος διαθέσιμος πόρος ή για εφαρμογές έντασης πόρων που αντέχουν σε καθυστέρηση.

Από την άλλη πλευρά, τα cloudlets πρέπει να ενθαρρυνθούν για να μοιραστούν τους πόρους τους, π.χ. κερδίζοντας τις χρηματικές αξίες που καταβάλλουν οι κινητές συσκευές για τη χρήση των υπηρεσιών. Όπως φαίνεται, υπάρχει ένα εμπόριο μεταξύ των κινητών συσκευών που ζητούν τις υπηρεσίες και των cloudlets που παρέχουν τέτοιες υπηρεσίες [84].

Το αυξημένο λειτουργικό κόστος όσο και το ύψος της αρχικής επένδυση αποτελούν την κύρια τροχοπέδη στην δημιουργία datacenters κοντά στους τελικούς χρήστες. Η ιδέα της κατασκευής μικρότερης κλίμακας κέντρων δεδομένων με μια κατανεμημένη μορφή κοντά στους χρήστες η οποία θα συνεργάζεται με τα κέντρα δεδομένων που θα διακρίνονται για τις υψηλές τους δυνατότητες θα καλλιεργήσει το έδαφος για την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών και εφαρμογών όπως Virtual Personal Assistants, Human Augmentation, Object Recognition κ.α. [87]

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε τις ιδιότητες και χαρακτηριστικά των τεχνολογιών – αρχιτεκτονικών, Cloud Computing (CC), Mobile Cloud Computing (MCC-cloudlets), Fog Computing, Mobile Edge Computing (MEC) με το παρακάτω Σχήμα 3-15 και τον Πίνακα 3-4.



Σχήμα 3-15. Απλή επισκόπηση των τεχνολογιών (πηγή: Rodrigo Roman et al., 2016) [88]



**Πίνακας 3-4. Σύγκριση χαρακτηριστικών**

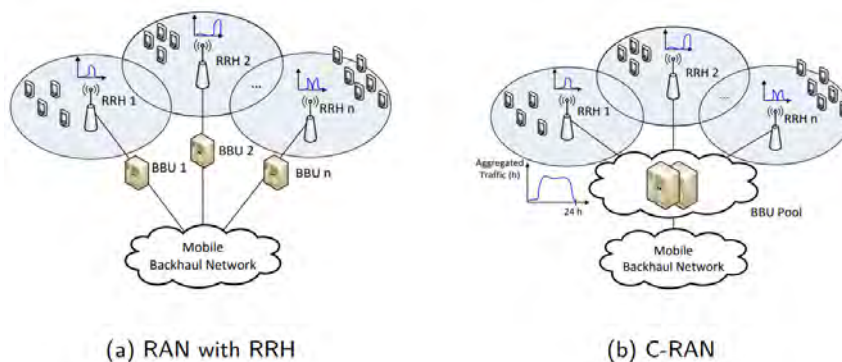
	MEC	Fog Computing	MCC - cloudlets	Cloud
<b>Ιδιοκτησία</b>	Εταιρίες τηλεπικοινωνιών	Ιδιωτικοί φορείς, άτομα		Ιδιωτικοί φορείς
<b>Ανάπτυξη</b>	Άκρη του δικτύου	Κοντά στην άκρη & στην άκρη	Άκρη του δικτύου, Συσκευές	Κορμό δικτύου
<b>Υλικό</b>	Ετερογενείς διακομιστές		Διακομιστές, συσκευές χρηστών	Διακομιστές
<b>Υπηρεσία</b>	Εικονικοποίηση		Εικονικοποίηση, άλλο	Εικονικοποίηση
<b>Αρχιτεκτονική Δικτύου</b>	N-επίπεδη, Αποκεντρωμένη, Κατανεμημένη			Κεντρικοποιημένη
<b>Κινητικότητα</b>	Ναι			N/A
<b>Καθυστέρηση</b>	Χαμηλή			Μέση
<b>Επίγνωση τοποθεσίας</b>	Ναι			N/A
<b>Διαθεσιμότητα</b>	Υψηλή			
<b>Κλιμακοσιμότητα</b>	Υψηλή			Μέση

### 3.2.2 Αρχιτεκτονική C-RAN

Το Cloud Radio Access Network (C-RAN) είναι μια πρωτοποριακή αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται στην τάση των σημερινών συνθηκών δικτύου και της τεχνολογικής προόδου. Ως ένα είδος καθαρού συστήματος, το C-RAN βασίζεται στην κεντρική επεξεργασία, στην ασύρματη συνεργασία και στην cloud υποδομή σε πραγματικό χρόνο. Η ουσία είναι να μειώσει τον αριθμό των σταθμών βάσης ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, να υιοθετήσει την τεχνολογία της εικονικοποίησης για να πραγματοποιήσει την ανταλλαγή πόρων και τον δυναμικό προγραμματισμό τους, να βελτιώσει την απόδοση του ραδιοφάσματος και να επιτύχει χαμηλό κόστος, υψηλό εύρος ζώνης και ευέλικτη λειτουργία. Ο γενικός στόχος του C-RAN είναι να αντιμετωπίσει μια σειρά προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι φορείς των mobile networks όπως η κατανάλωση ενέργειας, το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, επιδιώκοντας βιώσιμη επιχειρηματικότητα και αύξηση κέρδους στο μέλλον, προσπαθώντας να υποστηρίξει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των τελικών χρηστών προς την 5η γενιά κινητών δικτύων (5G).

#### 3.2.2.1 Περιγραφή της αρχιτεκτονικής C-RAN

Το C-RAN είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου όπου οι βασικοί πόροι είναι συγκεντρωμένοι, ώστε να μπορούν να μοιράζονται μεταξύ των σταθμών βάσης. Το σχήμα 3-16 δίνει μια γενική εικόνα της συνολικής αρχιτεκτονικής C-RAN [89]. Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια εισαγωγή στην εξέλιξη του σταθμού βάσης και τη βάση της ιδέας C-RAN.



**Σχήμα 3-16 Αρχιτεκτονική C-RAN για τα κυψελωτά δίκτυα (πηγή: Aleksandra Checko et al., 2014)**

Παραδοσιακά, στα κυψελοειδή δίκτυα, οι χρήστες επικοινωνούν με ένα σταθμό βάσης που εξυπηρετεί την κυψέλη. Οι κύριες λειτουργίες ενός σταθμού βάσης μπορούν να χωριστούν σε λειτουργίες επεξεργασίας βασικής ζώνης και ραδιοσυχνοτήτων.

### **Παραδοσιακή αρχιτεκτονική**

Στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική, η λειτουργία επεξεργασίας ραδιοσυχνότητας και βασικής ζώνης ενσωματώνεται σε ένα σταθμό βάσης. Η μονάδα της κεραίας βρίσκεται γενικά σε γειτνίαση (λίγα μέτρα) με τη μονάδα ραδιοσυχνότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17α καθώς τα ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση τους παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες. Η διεπαφή X2 ορίζεται μεταξύ των σταθμών βάσης, ενώ η διεπαφή S1 συνδέει το σταθμό βάσης με το δίκτυο κορμού. Αυτή η αρχιτεκτονική ήταν δημοφιλής για την ανάπτυξη δικτύων κινητής τηλεφωνίας 1G και 2G.

### **Σταθμός βάσης με RRH**

Στο σταθμό βάσης με αρχιτεκτονική απομακρυσμένης ραδιοφωνικής κεφαλής (Remote Radio Head - RRH), ο σταθμός βάσης χωρίζεται σε μονάδα ραδιοσυχνότητας και μονάδα επεξεργασίας σήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17β. Η μονάδα ραδιοσυχνότητας ονομάζεται RRH (ή Remote Radio Unit - RRU). Το RRH παρέχει τη διασύνδεση με τις οπτικές ίνες και εκτελεί ψηφιακή επεξεργασία, μετατροπή από ψηφιακή σε αναλογική και αντίστροφα, ενίσχυση ισχύος και φιλτράρισμα. Το τμήμα επεξεργασίας σήματος βάσης καλείται BBU (Base Band Unit) ή μονάδα δεδομένων (Data Unit - DU).

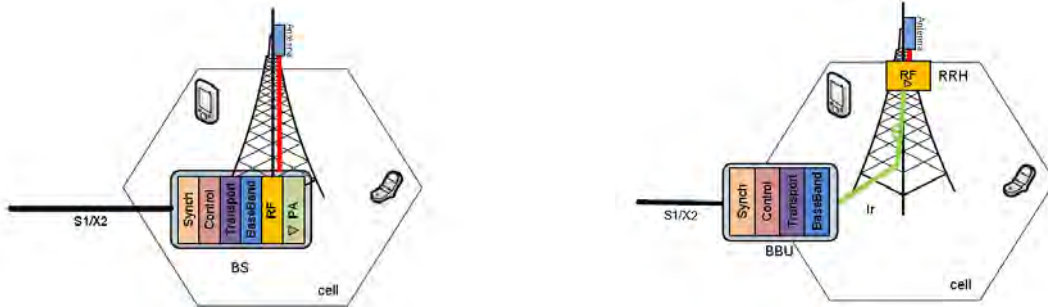
Αυτή η αρχιτεκτονική της διασύνδεσης και της διάσπασης των λειτουργιών μεταξύ BBU και RRH εισήχθη όταν αναπτύχθηκαν τα δίκτυα 3G και σήμερα το χρησιμοποιούν οι περισσότεροι σταθμοί βάσης. Η απόσταση μεταξύ RRH και BBU μπορεί να επεκταθεί μέχρι και 40 χλμ., όπου ο περιορισμός προέρχεται κυρίως από την καθυστέρηση επεξεργασίας και διάδοσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδέσεις οπτικών ινών και μικροκυμάτων. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, ο εξοπλισμός BBU μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα πιο βολικό και εύκολα προσπελάσιμο σημείο, επιτρέποντας εξοικονόμηση κόστους στην ενοικίαση και συντήρηση χώρων σε σύγκριση με την παραδοσιακή αρχιτεκτονική RAN, όπου ένα BBU πρέπει να τοποθετηθεί κοντά στην κεραία. Οι μονάδες RRH μπορούν να τοποθετηθούν σε στήλους ή στέγες, αξιοποιώντας αποτελεσματικά την φυσική ψύξη και εξοικονομώντας τον κλιματισμό στη στέγαση των BBUs.

Τα RRHs κατανέμονται στατικά στα αντίστοιχα BBUs παρόμοια με το παραδοσιακό RAN. Ένα BBU μπορεί να εξυπηρετήσει πολλά RRHs. Τα RRHs μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε μια αποκαλούμενη αρχιτεκτονική αλυσίδας daisy. Το CPRI (Common Public Radio Interface) είναι το πρωτόκολλο ραδιοφωνικής διασύνδεσης που χρησιμοποιείται ευρέως για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ RRHs και BBUs. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο με σταθερό ρυθμό μετάδοσης, αμφίδρομης επικοινωνίας που απαιτεί ακριβή συγχρονισμό και αυστηρό έλεγχο καθυστέρησης. Άλλα πρωτόκολλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το Open Base Station Architecture Initiative (OBSAI) και το Open Radio equipment Interface (ORI) [89].

### **Συγκεντρωτική Αρχιτεκτονική C-RAN**

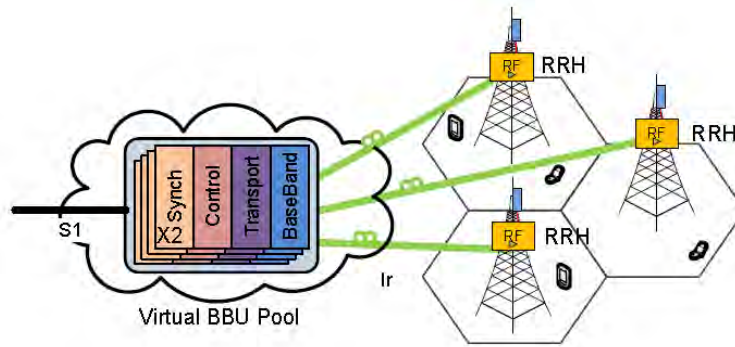
Στο C-RAN, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αξιοποίηση του BBU μεταξύ των βαρέως και ελαφρώς φορτωμένων σταθμών βάσης, τα BBUs συγκεντρώνονται σε μία οντότητα που ονομάζεται BBU Pool (ή DU Pool). Μια BBU Pool είναι κοινόχρηστη για πολλές κυψέλες τόσο φυσικές όσο και εικονικές όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-17γ. Μια BBU Pool είναι ένα virtualized cluster που μπορεί να αποτελείται από επεξεργαστές γενικού σκοπού για την εκτέλεση επεξεργασίας βασικής ζώνης (PHY / MAC). Η διασύνδεση X2 σε μια νέα μορφή, συχνά αναφέρεται ως X2+ και οργανώνει την επικοινωνία μεταξύ των ομάδων. Η ιδέα του C-RAN εισήχθη για πρώτη φορά από την IBM με το όνομα Wireless Network Cloud (WNC) και βασίζεται στην έννοια του Κατανεμημένου Συστήματος Ασύρματης Επικοινωνίας. Το C-RAN είναι ο όρος που χρησιμοποιείται σήμερα για

την περιγραφή αυτής της αρχιτεκτονικής, όπου το γράμμα C μπορεί να ερμηνευτεί ως: Cloud, Centralized processing, Cooperative radio, Collaborative ή Clean.



α) Παραδοσιακή αρχιτεκτονική σταθμού βάσης (macro BS)

β) Σταθμός βάσης με διαχωρισμένες μονάδες RRH και BBU

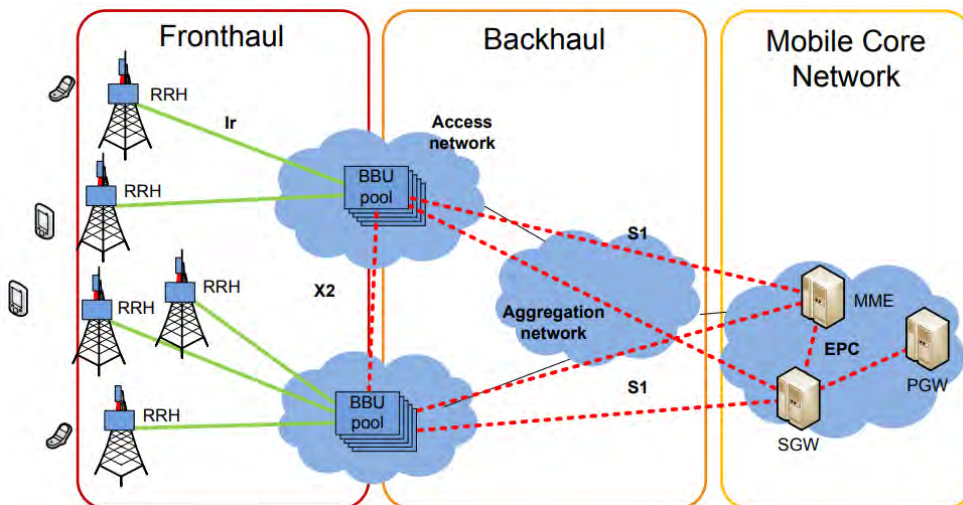


Fiber - Digital BaseBand      Coax cable - RF

γ) Αρχιτεκτονική C-RAN με RRH

Σχήμα 3-17. Εξέλιξη της αρχιτεκτονικής των σταθμών βάσης (πηγή: Aleksandra Checko et al., 2014)

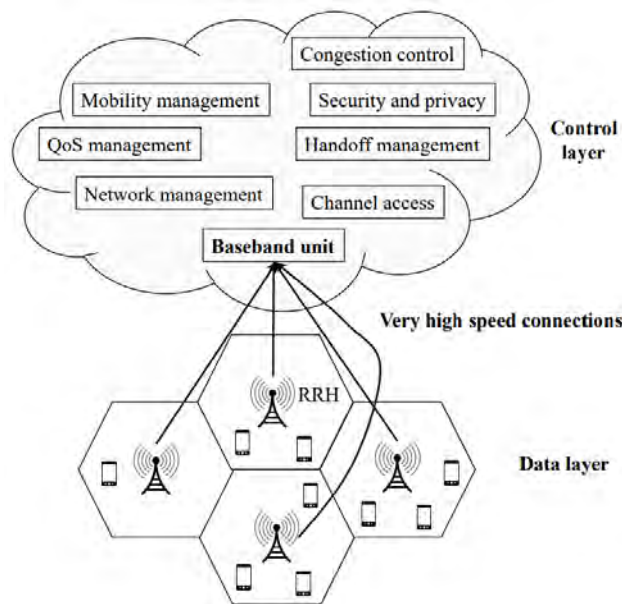
Στο Σχήμα 3-18 απεικονίζεται ένα παράδειγμα αρχιτεκτονικής C-RAN σε ένα mobile LTE network. Το fronthaul τμήμα του δικτύου εκτείνεται από τις τοποθεσίες RRHs στην BBU Pool. Το backhaul συνδέει την BBU pool με το δίκτυο κορμού (core network). Σε μια απομακρυσμένη περιοχή, τα RRHs βρίσκονται μαζί με τις κεραίες. Τα RRHs συνδέονται με τους επεξεργαστές υψηλής απόδοσης στην BBU Pool μέσω οπτικών συνδέσεων υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλής καθυστέρησης.



Σχήμα 3-18. Επισκόπηση αρχιτεκτονικής C-RAN (πηγή: Aleksandra Checko et al., 2014)

### 3.2.2.2 Ο ρόλος του Cloud στην αρχιτεκτονική C-RAN

Ο συνδυασμός του Cloud Computing και της κεντροκοιμημένης αρχιτεκτονικής του RAN, είναι ιδανικός για τον προγραμματισμό του διαμοιρασμού των κοινών δικτυακών πόρων ραδιοπρόσβασης, για τον χειρισμό των παρεμβολών μεταξύ των κοντινών cells και για την γρήγορη και εύκολη αναβάθμιση του δικτύου. Η βασική ιδέα πίσω από το C-RAN, είναι η εκτέλεση των περισσότερων λειτουργιών ενός σταθμού βάσης στο Cloud, χωρίζοντας έτσι τη λειτουργία του σε ένα Control Layer και ένα Data Layer. Οι λειτουργίες που αφορούν το Control Layer εκτελούνται στο Cloud, ενώ οι λειτουργίες που αφορούν το Data Layer εκτελούνται στους σταθμούς βάσης. Πιο συγκεκριμένα, η βασική ιδέα είναι να χωρίσουμε τις μονάδες επεξεργασίας των σημάτων (BBUs) από τους σταθμούς βάσης των σημερινών cells και να τους μεταφέρουμε στο Cloud προκειμένου να επιτύχουμε κεντρική επεξεργασία και διαχείριση των σημάτων [90]. Στο Σχήμα 3-19, φαίνεται ο διαχωρισμός του Control layer από το Data layer.

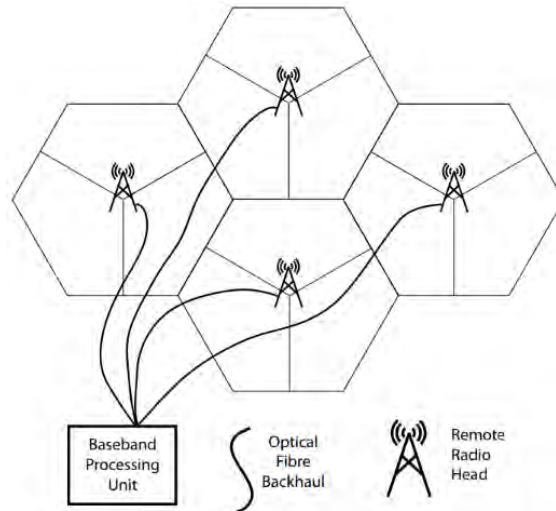


Σχήμα 3-19. Μια Cloud-Based αρχιτεκτονική για το δίκτυο 5G (πηγή: N. Panwar et al., 2015) [1]

Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με όσα διατυπώθηκαν παραπάνω, το C-RAN αντικαθιστά τους σταθμούς βάσης σε κάθε κόμβο πρόσβασης με ένα κοινόχρηστο χώρο απομακρυσμένων διαμοιραζόμενων πόρων που αφορούν τη ραδιοπρόσβαση [91]. Τα βασικά μέρη της αρχιτεκτονικής του C-RAN είναι:

- **Base Station Pool:** Παραλληλίζεται με τον εγκέφαλο του δικτύου, όπου αποτελεί τον κεντροκοιμημένο χώρο των κοινόχρηστων υπολογιστικών πόρων και εκτελεί λειτουργίες όπως ο έλεγχος σηματοδότησης και ο συντονισμός των επιμέρους λειτουργιών των cells.
- **Optical Fronthaul:** Οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των ψηφιοποιημένων αναπαραστάσεων των σημάτων βασικής ζώνης από τα BBUs στο RAN.
- **Remote Radio Heads (RRHs):** Απλές κεραιές μέσω των οποίων συνδέεται ο χρήστης στο RAN. Είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σχεδόν παντού. Εν συγκρίσει με τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης όπου χρειαζόνταν περισσότερες υποδομές και κόστος, αφού εκεί γίνονταν και η εγκατάσταση των BBUs, στο C-RAN απαιτείται μόνο ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση της κεραιάς. Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι τα RRHs μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση οποιουδήποτε cell ανεξαρτήτως του μεγέθους του (Picocell, Femtocell, Macrocell).

Στο Σχήμα 3-20, απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του C-RAN με τα βασικά της μέρη που περιγράψαμε παραπάνω.



Σχήμα 3-20. Cloud-RAN αρχιτεκτονική με κεντρική επεξεργασία των σημάτων βασικής ζώνης RRHs (πηγή: A. Dawson et al., 2014)

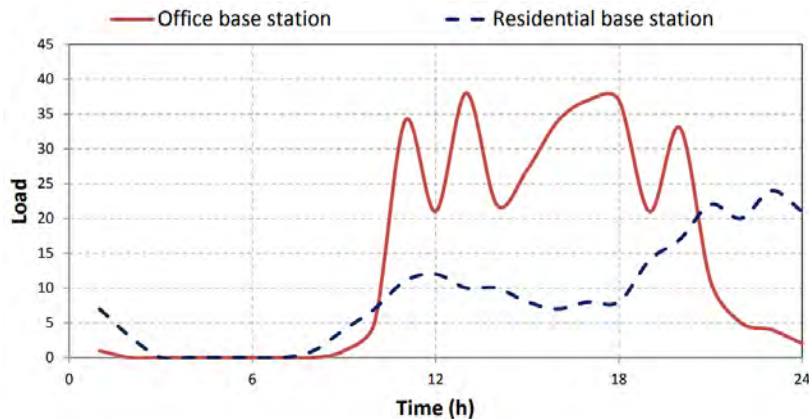
### 3.2.2.3 Πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής C-RAN

Τόσο οι macro όσο και οι μικρές κυψέλες μπορούν να επωφεληθούν από την αρχιτεκτονική του C-RAN. Για τη δημιουργία σταθμών βάσης, μια κεντρική BBU Pool επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των BBUs και μειώνει το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας των σταθμών βάσης. Μειώνει επίσης την κατανάλωση ενέργειας και παρέχει αυξημένη ευελιξία στις αναβαθμίσεις του δικτύου και στην προσαρμοστικότητα σε μη ομοιόμορφη κυκλοφορία. Επιπλέον, τα προηγμένα χαρακτηριστικά του LTE-A, όπως το CoMP και η μετριαστική παρεμβολή, μπορούν να υποστηριχθούν αποτελεσματικά από το C-RAN, το οποίο είναι απαραίτητο ειδικά για την ανάπτυξη μικρών κυψελών. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό είναι ότι οι operators κινητής τηλεφωνίας μπορούν να προσφέρουν στους χρήστες πιο ελκυστικές συμφωνίες επιπέδου εξυπηρέτησης (SLAs), δεδομένου ότι η υψηλή υπολογιστική ισχύς που χρησιμοποιούν οι πολλοί χρήστες τους, ενώ οι χρόνοι απόκρισης των εξυπηρετητών εφαρμογών είναι αισθητά μικρότεροι εάν τα δεδομένα αποθηκευτούν στην BBU Pool. Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων μπορούν να συνεργαστούν με τρίτους κατασκευαστές υπηρεσιών για να φιλοξενήσουν διακομιστές για εφαρμογές, τοποθετώντας τους στο cloud – στην BBU Pool [92].

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα πλεονεκτήματα του C-RAN:

1. Προσαρμοστικότητα σε μη ομοιόμορφη κυκλοφορία και κλιμάκωση
  2. Ενεργειακή αποδοτικότητα - Πράσινη υποδομή
  3. Εξοικονόμηση κόστους στο CAPEX & OPEX
  4. Βελτίωση χωρητικότητας
  5. Έξυπνη κυκλοφοριακή ροή στο διαδίκτυο
  6. Ευκολία στις αναβαθμίσεις και τη συντήρηση του δικτύου
- **Προσαρμοστικότητα σε μη ομοιόμορφη κυκλοφορία και κλιμάκωση**

Λόγω της δραματικής αύξησης της πυκνότητας του πληθυσμού τόσο στους οικιακούς όσο και στους εργασιακούς χώρους, το φορτίο δικτύου στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αλλάζει και σε μια χρονική γεωμετρία που ονομάζεται tidal effect. Το Σχήμα 3-21 δείχνει πώς το φορτίο του δικτύου ποικίλλει καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Δυστυχώς, στην τρέχουσα αρχιτεκτονική RAN η ικανότητα επεξεργασίας ενός BS μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τους ιδιοκτήτες κινητής τηλεφωνίας αντί να μοιράζονται σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι BSs που καλύπτουν περιοχές που υπάρχουν χώροι εργασίας είναι υποχρεωμένοι να διαχειριστούν ένα υπερβολικά βαρύ φορτίο, ενώ οι BSs σε κατοικημένες περιοχές παραμένουν σχεδόν αδρανείς ενώ εξακολουθούν να καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας και αντιστρόφως.



**Σχήμα 3-21. Κατανομή του φορτίου των σταθμών βάσης σε εργασιακούς χώρους και κατοικήσιμες περιοχές κατά τη διάρκεια του 24ώρου (πηγή: Checko, A. Etal., 2016)**

Δεδομένου ότι στο C-RAN η επεξεργασία βασικής ζώνης πολλαπλών κυψελών διεξάγεται στην κεντρική BBU Pool, ο συνολικός ρυθμός χρήσης μπορεί να βελτιωθεί. Η απαιτούμενη ικανότητα επεξεργασίας ζώνης βάσης της BBU pool αναμένεται να είναι μικρότερη από το άθροισμα των δυνατοτήτων των σταθμών βάσης. Ο λόγος του άθροισματος της χωρητικότητας των σταθμών βάσης με την απαιτούμενη χωρητικότητα στο BBU Pool ονομάζεται στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας.

Το στατιστικό κέρδος πολυπλεξίας μπορεί να μεγιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια ευέλικτη, αναδιαμορφωμένη χαρτογράφηση μεταξύ των RRHs και των BBUs, προσαρμόζοντας τα διαφορετικά προφίλ κίνησης. Επίσης εξαρτάται από την κυκλοφορία, επομένως μπορεί να μεγιστοποιηθεί με τη σύνδεση RRHs με συγκεκριμένα προφίλ κίνησης σε διαφορετικές BBU Pools.

Όσον αφορά την κλιμακωσιμότητα του δικτύου, οι αναβαθμίσεις κάλυψης απαιτούν απλώς τη σύνδεση νέων RRHs στην ήδη υπάρχουσα BBU Pool. Για να ενισχυθεί η χωρητικότητα του δικτύου, οι υπάρχουσες κυψέλες μπορούν στη συνέχεια να χωριστούν ή μπορούν να προστεθούν επιπλέον RRHs στην BBU Pool, πράγμα που αυξάνει την ευελιξία του δικτύου. Η ανάπτυξη νέων κυψελών είναι γενικά ευκολότερα αποδεκτή από τις τοπικές κοινότητες, καθώς μόνο μια μικρή συσκευή πρέπει να εγκατασταθεί στην περιοχή (RRH) και όχι ένας ογκώδης σταθμός βάσης. Εάν η συνολική δυναμικότητα του δικτύου θέλουμε να αυξηθεί, αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με την αναβάθμιση της BBU Pool, είτε προσθέτοντας περισσότερο εξοπλισμό είτε ανταλλάσσοντας υπάρχοντα BBU με πιο ισχυρά.

Καθώς τα BBUs από μια μεγάλη περιοχή θα βρίσκονται ταυτόχρονα στην ίδια BBU Pool, τα χαρακτηριστικά εξισορρόπησης φορτίου μπορούν να ενεργοποιηθούν με προηγμένους αλγόριθμους τόσο στην πλευρά BBU όσο και στην πλευρά των κυψελών. Από την πλευρά του BBU, τα BBUs αποτελούν ήδη μια οντότητα, επομένως η εξισορρόπηση φορτίου είναι θέμα εκχώρησης κατάλληλων πόρων BBU μέσα σε μια ομάδα. Από την πλευρά των κυψελών, οι χρήστες μπορούν να μετακινούνται μεταξύ κυψελών χωρίς περιορισμούς εάν η BBU Pool έχει ικανότητα να τις υποστηρίξει, καθώς η δυναμικότητα μπορεί να εκχωρηθεί δυναμικά.

- **Ενεργειακή αποδοτικότητα - Πράσινη υποδομή**

Το C-RAN είναι μια φιλική προς το περιβάλλον υποδομή. Πρώτον, με την κεντρική επεξεργασία της αρχιτεκτονικής C-RAN, ο αριθμός των σταθμών βάσης μπορεί να μειωθεί αισθητά. Κατά συνέπεια, η κατανάλωση ισχύος του κλιματισμού και του εξοπλισμού υποστήριξης μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό [93]. Δεύτερον, η απόσταση μεταξύ των RRHs και του εξοπλισμού χρήστη (UEs) μπορεί να μειωθεί, δεδομένου ότι η συνεργατική ραδιοτεχνολογία (cooperative radio technology) μπορεί να μειώσει την παρεμβολή μεταξύ των RRHs και να επιτρέψει υψηλότερη πυκνότητα αυτών. Μικρότερες κυψέλες με χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης μπορούν να αναπτυχθούν ενώ η ποιότητα κάλυψης δικτύου δεν επηρεάζεται.

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση σήματος θα μειωθεί, πράγμα που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μείωση της κατανάλωσης ρεύματος στο RAN και για την παράταση του χρόνου

stand-by της μπαταρίας του UE. Τέλος, επειδή η BBU vPool είναι ένας κοινός πόρος μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού εικονικών BSs, αυτό σημαίνει ένα πολύ υψηλότερο ποσοστό χρησιμοποίησης των πόρων επεξεργασίας και επομένως μπορεί να επιτευχθεί χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Όταν ένα εικονικό BS είναι αδρανές το βράδυ και το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος επεξεργασίας δεν είναι απαραίτητο, μπορεί να απενεργοποιηθεί επιλεκτικά (ή να μπει σε κατάσταση χαμηλότερης ισχύος) χωρίς να επηρεαστεί η δέσμευση εξυπηρέτησης 7x24.

- **Εξοικονόμηση κόστους στο CAPEX & OPEX**

Επειδή τα BBUs και ο εξοπλισμός υποστήριξης τοποθεσιών συγκεντρώνονται σε μερικές μεγάλες αίθουσες, είναι πολύ πιο εύκολη μια κεντρική διαχείριση και λειτουργία, εξοικονομώντας μεγάλο μέρος του κόστους λειτουργίας και διαχείρισης που συνδέεται με τον μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης που βρίσκονται σε ένα παραδοσιακό δίκτυο RAN. Δεύτερον, αν και ο αριθμός των RRHs δεν μπορεί να μειωθεί σε μια αρχιτεκτονική C-RAN, η λειτουργικότητά του είναι απλούστερη, το μέγεθος και η κατανάλωση ενέργειας μειώνονται και μπορούν να τοποθετηθούν σε στήλους με ελάχιστη υποστήριξη και διαχείριση χώρου. Το RRH απαιτεί μόνο την εγκατάσταση των βοηθητικών συστημάτων τροφοδοσίας κεραίας, επιτρέποντας στους operators να επιταχύνουν την κατασκευή του δικτύου για να αποκτήσουν ένα πρώτο πλεονέκτημα. Έτσι, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να καταφέρουν μεγάλη εξοικονόμηση κόστους στην ενοικίαση χώρου και στην λειτουργία και διαχείριση.

- **Βελτίωση χωρητικότητας**

Στο C-RAN, οι εικονικοί σταθμοί βάσης μπορούν να συνεργαστούν σε μια μεγάλη φυσική BBU Pool και μπορούν εύκολα να μοιράζονται στο σύστημα τα δεδομένα σηματοδότησης, κίνησης και κατάσταση καναλιών (channel state information - CSI) των ενεργών συσκευών χρηστών. Είναι πολύ πιο εύκολο να εφαρμοστεί η κοινή επεξεργασία & προγραμματισμός για να μετριαστεί η παρεμβολή μεταξύ των κυψελών (inter-cellinterference - ICI) και να βελτιωθεί η φασματική απόδοση. Για παράδειγμα, η συνεργατική τεχνολογία επεξεργασίας πολλαπλών σημείων (cooperative multi-point processing technology - CoMP σε LTE-Advanced) μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί υπό την υποδομή του C-RAN.

- **Έξυπνη κυκλοφοριακή ροή στο διαδίκτυο**

Με την ενεργοποίηση της τεχνολογίας smart breakout στο C-RAN, η αυξανόμενη κίνηση στο διαδίκτυο από έξυπνα τηλέφωνα και άλλες φορητές συσκευές μπορεί να εκφορτωθεί (offload) από το δίκτυο κορμού των φορέων εκμετάλλευσης. Τα οφέλη είναι τα εξής: μειωμένη κίνηση και κόστος στο backhaul, μειωμένη κυκλοφορία στο δίκτυο κορμού και μείωση καθυστέρησης στους χρήστες. Επίσης η μπορεί να επιτευχθεί διαφοροποίηση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών για διάφορες εφαρμογές με αποτέλεσμα η υπηρεσία που επικαλύπτει το κεντρικό δίκτυο να προσφέρει επίσης καλύτερη εμπειρία στους χρήστες.

- **Ευκολία στις αναβαθμίσεις και τη συντήρηση του δικτύου**

Η αρχιτεκτονική C-RAN με αρκετά τοποθετημένα BBUs διευκολύνει τη συντήρηση του δικτύου περιορίζοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση. Στις περιπτώσεις όμως που παρουσιάζονται αποτυχίες υλικού και αναβαθμίσεις, η ανθρώπινη παρέμβαση πρέπει να γίνει μόνο σε πολύ λίγες τοποθεσίες της BBU Pool. Αντίθετα, για το παραδοσιακό RAN, η εξυπηρέτηση μπορεί να απαιτηθεί σε τόσες κυψέλες όσες είναι και στο δίκτυο. Το C-RAN με μια εικονική BBU Pool δίνει έναν ομαλό τρόπο για την εισαγωγή νέων προτύπων, καθώς το υλικό πρέπει να τοποθετηθεί σε λίγες συγκεντρωτικές τοποθεσίες. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξή τους μπορεί να θεωρηθεί από τους φορείς εκμετάλλευσης ως μέρος της στρατηγικής τους.

Η συνύπαρξη των BBUs στο ίδιο μέρος (BBU Pool) επιτρέπει πιο συχνές ενημερώσεις της CPU από ό, τι στην περίπτωση που οι BBUs βρίσκονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Ως εκ τούτου, είναι δυνατόν να επωφεληθούν από την πρόοδο στην τεχνολογία των CPUs, είτε πρόκειται για το frequency clock (νόμος του Moore) είτε για την ενεργειακή απόδοση.

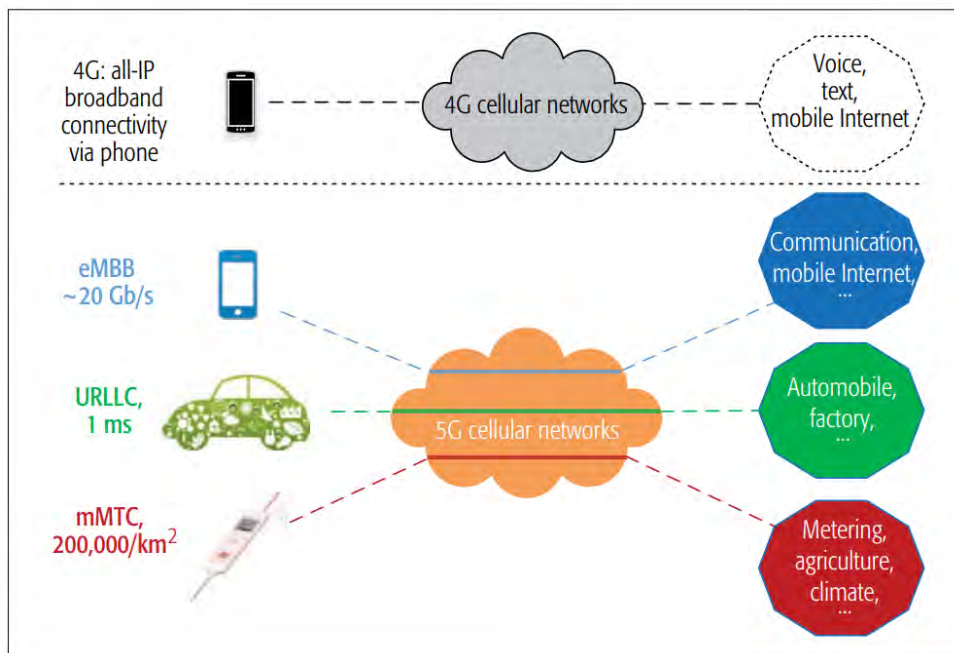
Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι το C-RAN ενσωματώνει την τεχνολογία Software Defined Radio (SDR) η οποία είναι μια πολύ γνωστή τεχνολογία που διευκολύνει την εφαρμογή σε λογισμικό τέτοιων λειτουργιών ραδιοσυχνότητας όπως η διαμόρφωση / αποδιαμόρφωση, η παραγωγή σημάτων, η κωδικοποίηση και τα πρωτόκολλα στρώματος συνδέσμων. Το ραδιοσύστημα μπορεί να σχεδιαστεί για να υποστηρίζει πολλαπλά πρότυπα. Ένα πιθανό πλαίσιο για την υλοποίηση σταθμών βάσης, στηρίζεται στο λογισμικό και οι οποίοι είναι προγραμματιζόμενοι αναβαθμίσιμοι και βελτιστοποιήσιμοι από απόσταση. Με την τεχνολογία αυτή, το C-RAN BBU Pool μπορεί να υποστηρίξει ραδιοεπικοινωνίες πολλαπλών συστημάτων και προτύπων που έχουν ρυθμιστεί με βάση το λογισμικό. Αναβαθμίσεις σε νέες συχνότητες και νέα πρότυπα μπορούν να γίνουν μέσω ενημερώσεων λογισμικού και όχι αναβαθμίσεων υλικού, όπως συμβαίνει συχνά σήμερα σε μη συμβατές κάθεται λύσεις. Επομένως, ο σταθμός βάσης πολλαπλών λειτουργιών αναμένεται να ανακουφίσει το κόστος ανάπτυξης του δικτύου και των λειτουργιών, διαχείρισης και συντήρησης (Operations, Administration and Maintenance - OAM).

### **3.3 Αρχιτεκτονική βασισμένη στην Τεχνητή Νοημοσύνη - Artificial Intelligence based architecture**

Σε αυτή την ενότητα, προσπαθούμε να επισημάνουμε ένα από τα πιο θεμελιώδη χαρακτηριστικά, μεταξύ των επαναστατικών τεχνικών στην εποχή των 5G δικτύων. Η νοημοσύνη αναδύεται σχεδόν σε κάθε σημαντική πτυχή των κυψελοειδών δικτύων, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης των ραδιοπόρων, της διαχείρισης της κινητικότητας, της διαχείρισης της παροχής υπηρεσιών, της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου κ.ο.κ. Ωστόσο, τα 5G κυψελοειδή δίκτυα αντιμετωπίζονται με ολοένα και πιο περίπλοκα ζητήματα διαμόρφωσης και άνθηση νέων απαιτήσεων υπηρεσίας, εξακολουθούν να είναι ανεπαρκή εάν δεν διαθέτουν πλήρεις λειτουργίες AI (Artificial Intelligence). Θεωρούμε ότι τα 5G δίκτυα που έχουν ενισχυθεί από την AI θα παίξουν τον πρωταγωνιστικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνιών.

Τα κυψελοειδή δίκτυα 5G, όπως αναλύσαμε και στο 1<sup>η</sup> ενότητα, προσφέρουν τρεις γενικές υπηρεσίες: extreme Mobile BroadBand - Ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB), ultrareliable MTC- εξαιρετικά αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (uRLLC) και massive MTC μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC). Αν και οι τεχνολογίες - αρχιτεκτονικές όπως τα UDN και η massive MIMO είναι απαραίτητες για την ενίσχυση της χωρητικότητας στην εποχή του 5G, είναι οικονομικά αναποτελεσματικό να αναπτυχθούν μόνο τέτοιες τεχνικές. Αντ' αυτού, τα κυψελωτά δίκτυα 5G φέρνουν την επανάσταση κυρίως με την ενσωμάτωση της ευφυΐας (νοημοσύνης) ώστε να αυξήσουν την αποδοτικότητα φάσματος (spectrum efficiency - SE) και την ενεργειακή απόδοση (energy efficiency - EE). Συγκεκριμένα, τα κυψελοειδή δίκτυα 5G παρέχουν εναλλακτικές επιλογές για τη διαχείριση των ραδιοπόρων (radio resource management - RRM), τη διαχείριση της κινητικότητας (mobility management - MM), τη διαχείριση και ενορχήστρωση (management and orchestration - MANO) και τους μηχανισμούς διαχείρισης της παροχής υπηρεσιών (service provisioning management - SPM). Συνεπώς, δεν είναι πλέον απαραίτητο να δημιουργηθούν ειδικά δίκτυα για μεμονωμένες υπηρεσίες. Αντίθετα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-22, λόγω της ανάπτυξης πιο έξυπνων δικτύων 5G, θα είναι εφικτό να παρέχονται προσαρμοσμένες φέτες δικτύου από άκρη σε άκρη (end-to-end network slices - NS) [94] για την ταυτόχρονη ικανοποίηση ξεχωριστών απαιτήσεων υπηρεσίας, όπως η χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία στην uRLLC και η εξαιρετικά υψηλή απόδοση στο eMBB [95].





**Σχήμα 3-22. 5G δίκτυα: ένας βασικός παράγοντας για όλες τις κινητές συσκευές σε όλες τις βιομηχανίες. (πηγή: Rongpeng Li et al., 2017)**

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα 5G κυψελοειδή δίκτυα θα προσαρμόσουν τους μηχανισμούς παροχής, για διαφορετικές προκαθορισμένες υπηρεσίες και θα ανοίξουν το δρόμο για την εφαρμογή της πλήρους νοημοσύνης.

Ωστόσο, εξακολουθεί να είναι δύσκολο και χρονοβόρο για τους operators των δικτύων 5G να επιλύουν συνεχώς όλο και πιο περίπλοκα ζητήματα διαμόρφωσης και να ικανοποιούν τις εξελισσόμενες απαιτήσεις υπηρεσίας, αφού τα 5G κυψελοειδή δίκτυα έχουν απλώς περισσότερες τεχνικές επιλογές και πολύπλοκες δυνατότητες ρύθμισης παραμέτρων, παρά την ικανότητα να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. (π.χ. να αναγνωρίζουν το φορτίο κυκλοφορίας- traffic load ή τα χαρακτηριστικά μιας νέας υπηρεσίας - service characteristics). Μια τέτοια αλληλεπίδραση εμπίπτει στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης (AI), το οποίο είναι αφιερωμένο στην ενδυνάμωση μηχανών και συστημάτων με νοημοσύνη παρόμοια με αυτή των ανθρώπων. Ως εκ τούτου, είναι πολλά υποσχόμενο ότι θα εφαρμόσει AI σε δίκτυα κυψελωτών δικτύων 5G για να αντιμετωπίσει τα νεοεμφανιζόμενα ζητήματα.

Σε αυτή την ενότητα, θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε σε ποια βασική τεχνική πρόοδο είναι τα 5G κυψελοειδή δίκτυα, γιατί είναι σημαντικό να αγκαλιάσουμε την AI στην εποχή 5G και πώς η AI μπορεί να συμβάλει στη διαχείριση και εντοπισμό στην εποχή 5G.

### **Artificial Intelligence for Cellular Networks - Τεχνητή Νοημοσύνη για τα Κυψελωτά Δίκτυα**

Τα κυψελοειδή δίκτυα στην εποχή 5G έχουν πολλές εναλλακτικές επιλογές για μηχανισμούς πρόσβασης και παροχής υπηρεσιών και έτσι μπορούν να αποκτήσουν τα θεμέλια για την εφαρμογή της νοημοσύνης. Εντούτοις, τα κυψελωτά δίκτυα 5G εξακολουθούν να υστερούν σε σχέση με αυτό που απαιτείται στην πράξη.

Πρώτον, ο αριθμός των ρυθμιζόμενων παραμέτρων σε έναν τυπικό κόμβο 4G έχει αυξηθεί σε 1500 από 500 που είχε ένας κόμβος 2G και 1000 που είχε ένας κόμβος 3G [96]. Εάν αυτή η τάση συνεχιστεί, ένας τυπικός κόμβος 5G αναμένεται να έχει 2000 ή ακόμη περισσότερες παραμέτρους. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ενισχυθεί η νοημοσύνη στην εποχή 5G για να πραγματοποιηθούν τα χαρακτηριστικά της αυτοοργάνωσης (self-organizing) (π.χ. αυτο-διαμόρφωση, αυτο-βελτιστοποίηση και αυτοθεραπεία - self-configuration, self-optimization, and self-healing).

Δεύτερον, οι τύποι υπηρεσιών (π.χ. eMBB, URLLC, mMTC) που ορίζονται στην εποχή 5G είναι στατικές. Ωστόσο, οι νέοι τύποι υπηρεσιών εξελίσσονται συνεχώς και το πρότυπο των υφιστάμενων

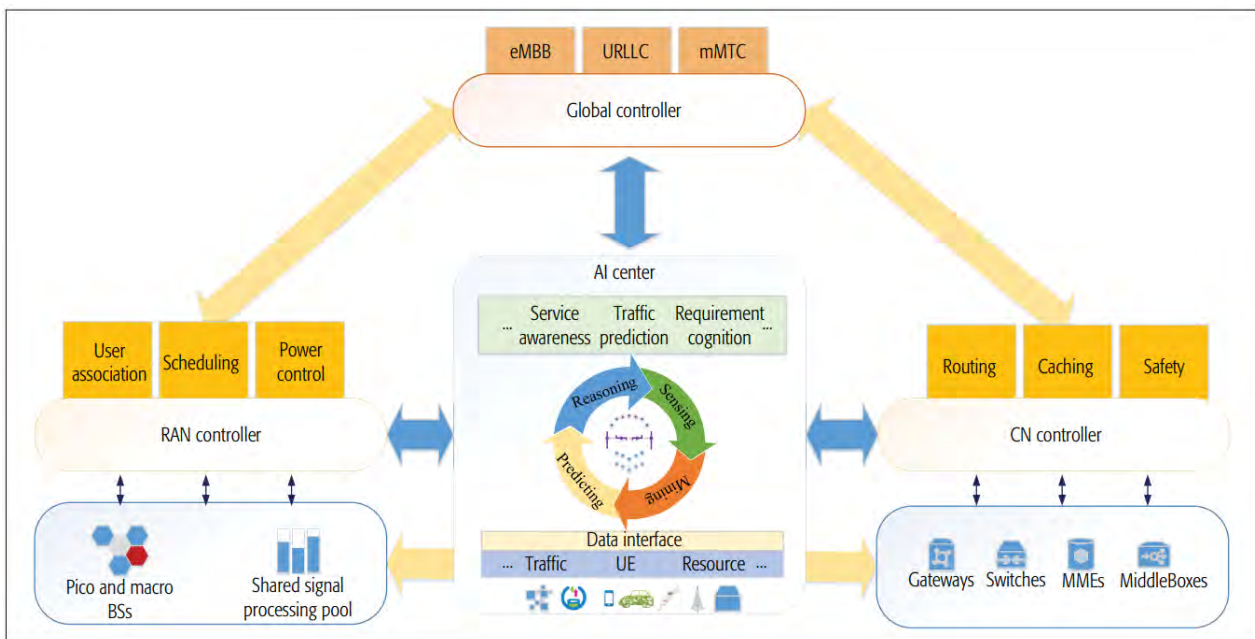
υπηρεσιών συχνά αλλάζει επίσης. Σε αυτήν την περίπτωση, τα δίκτυα 5G εξακολουθούν να στερούνται λειτουργίες για την αυτόματη αναγνώριση μιας νέου τύπου υπηρεσίας, τη συμπερίληψη του κατάλληλου μηχανισμού παροχής και τη δημιουργία του απαιτούμενου τμήματος δικτύου (network slice).

Τρίτον, τα 5G κυψελοειδή δίκτυα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από μια κεντρική αρχιτεκτονική δικτύου SDN και εξακολουθούν να στερούνται την ευελιξία και την ευρωστία κάτω από το σενάριο των συνεχώς αυξανόμενων ετερογενών και περίπλοκων κυψελοειδών δικτύων.

Για να αυτο-οργανώσει τις παραμέτρους που γίνονται σημαντικά περισσότερες, δημιουργεί αυτόματα τα τμήματα δικτύου (NS) για τις αναδυόμενες υπηρεσίες και κερδίζει επαρκή ευελιξία για τη συντήρηση του δικτύου, η οποία είναι σημαντική για τα κυψελοειδή δίκτυα. Καταφέρνουν να παρατηρούν τις αλλαγές του περιβάλλοντος, να μαθαίνουν αβεβαιότητες, να προγραμματίζουν δράσεις απόκρισης και να ρυθμίζουν σωστά τις παραμέτρους του δικτύου.

Η AI δίνει λύσεις κυρίως πώς να μάθει τις παραλλαγές, να ταξινομήσει τα ζητήματα, να προβλέψει μελλοντικές προκλήσεις και να βρει πιθανές λύσεις, αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, τα κυψελοειδή δίκτυα θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την έννοια του cognitive radio [97] και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον χρησιμοποιώντας το AI, έτσι ώστε να επιταχύνουν πλήρως την εξέλιξη και να εισέλθουν σε μία νέα έξυπνη εποχή 5G.

Το Σχήμα 3-23 απεικονίζει μια πιθανή αρχιτεκτονική κυψελωτού δικτύου 5G, στην οποία ένας ελεγκτής AI θα λειτουργεί ως εφαρμογή πάνω από ONOS (Open Network Operating System) ή μια ανεξάρτητη οντότητα δικτύου και θα επικοινωνεί με ελεγκτές RAN, CN ή καθολικούς SDN, χρησιμοποιώντας ανοικτές διεπαφές.



**Σχήμα 3-23. Αρχιτεκτονική δικτύου 5G με τη χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης - 5G cellular networks enabled by AI. (πηγή: Rongpeng Li et al., 2017)**

Συγκεκριμένα, το κέντρο AI θα διαβάσει τα εξής: τις συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών - SLA (π.χ. απαιτήσεις σχετικά με την ταχύτητα μετάδοσης, την κάλυψη, τη διάρκεια αποτυχίας), τις πληροφορίες σε επίπεδο εξοπλισμού χρήστη - UE (π.χ. κατηγορία δέκτη, περιορισμούς της μπαταρίας), πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση δικτύου (φάσμα, αριθμός εξυπηρετούμενων συνδρομητών, QoS, βασικοί δείκτες επιδόσεων λειτουργιών δικτύου, προγραμματισμένη περίοδος συντήρησης κ.λπ.) και πληροφορίες σχετικά με την υποδομή (π.χ. τύπος διακομιστή, CPU, μνήμη, αποθήκευση, πρότυπο δικτύου) από τους ελεγκτές SDN, έτσι ώστε να έρθει σε επαφή με τα δεδομένα του κυψελοειδούς δικτύου όπως πληροφορίες σχετικά με την κυκλοφορία, τον εξοπλισμό των χρηστών και τους πόρους του δικτύου [95].

Στη συνέχεια, το κέντρο ΑΙ θα χρησιμοποιεί τις ενσωματωμένες λειτουργικές μονάδες (modules) (π.χ. ανίχνευση, εξόρυξη, πρόβλεψη και συλλογιστική - sensing, mining, prediction, reasoning) για να επεξεργαστεί τις πληροφορίες που αποκτήθηκαν και τα ανατροφοδοτούμενα αποτελέσματα μάθησης, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν αναφορές ανάλυσης χαρακτηριστικών κίνησης (π.χ. πρόταση παροχής υπηρεσιών), ειδικές πληροφορίες ελέγχου συσκευής χρήστη (π.χ. προτεραιότητα εξυπηρέτησης, κατανομή εύρους ζώνης, εντολή παρακολούθησης κινητικότητας) και ειδοποίηση διαμόρφωσης δικτύου (π.χ. προσαρμογή παραμέτρων, μέθοδο πρόσβασης, ειδοποίηση σφάλματος δικτύου), προωθούνται στους ελεγκτές SDN.

Για παράδειγμα, η ΑΙ αξιοποιεί την ενότητα ανίχνευσης για να παρακολουθεί τη θέση των UE και χρησιμοποιεί την ενότητα πρόβλεψης για την πρόβλεψη της τάσης κινητικότητας βάσει του ιστορικού μοντέλου (pattern) κίνησης. Στη συνέχεια, εκμεταλλεύεται τη μονάδα συλλογισμού (reasoning) και ειδοποιεί προληπτικά τα UE για την ενημέρωση της καταχώρησης θέσης, έτσι ώστε να προετοιμαστούν οι πόροι παράδοσης και να εξοικονομηθεί το κόστος σηματοδότησης της διαχείρισης της κινητικότητας.

Από την άλλη πλευρά, τα κυψελωτά δίκτυα 5G μπορούν να διατηρούν την κανονική κατάσταση λειτουργίας υπό την προϋπόθεση πιθανών ζημιών (π.χ. hacking) στο κέντρο ΑΙ. Εν τω μεταξύ, το κέντρο ΑΙ θα μπορούσε να ανταλλάσσει περιοδικά πληροφορίες με τους ελεγκτές SDN σε κανονικές καταστάσεις, ενώ ξεκινά τις αναδυόμενες απαντήσεις για τον προγραμματισμό των ελάχιστων απαιτούμενων πόρων, μόλις οι συμβατικοί ελεγκτές SDN συναντήσουν δυσλειτουργίες. Ως εκ τούτου, σε σύγκριση με την πλήρη κεντρική αρχιτεκτονική σε συμβατικά δίκτυα, το κέντρο ΑΙ και οι ελεγκτές SDN αποτελούν ουσιαστικά ένα πολυεπίπεδο σύστημα λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας έτσι τη βελτίωση της ευρωστίας του δικτύου.

### **Δυνατότητες**

Εκτός από τα οφέλη για τα RRM (radio resource management), MM (mobility management), MANO (management and orchestration) και SPM (service provisioning management), η ΑΙ θα μπορούσε να συμβάλει περαιτέρω στην επίλυση των ακόλουθων ζητημάτων.

**Υπερφόρτωση δεδομένων κυψελοειδούς δικτύου (Overloading of Cellular Network Data):** Τα κυψελοειδή δίκτυα παράγουν τεράστιους όγκους δεδομένων παρέχοντας διαφορετικές υπηρεσίες σε διάφορους τύπους συσκευών σε διάφορα κανάλια, και διαφορετικές συνθήκες κατανάλωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, η ΑΙ θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί τα δεδομένα του κυψελοειδούς δικτύου για να προβλέψει πιθανά συμβάντα και να προβλέψει τον όγκο της κυκλοφορίας και να βοηθήσει στην εκ των προτέρων κατανομή των πόρων του δικτύου. Επιπλέον, η ΑΙ θα μπορούσε να δημιουργήσει ορισμένες λειτουργικές αναφορές για να περιγράψει και να συνοψίσει στατιστικά στοιχεία των συνδρομητών του δικτύου, τα οποία είναι σημαντικά για τον καθορισμό των πολιτικών χρέωσης.

**Ενσωμάτωση των ετερογενών κυψελοειδών δικτύων (Inter-Networking of Heterogeneous Cellular Networks):** Επί του παρόντος, οι operators έχουν αναπτύξει ετερογενή BSs στην εποχή 4G, συμπεριλαμβανομένων των picocells (παρέχοντας υψηλή χωρητικότητα), των micro-cells (παρέχοντας ευρεία κάλυψη για το eMBB) και των macro-cells (παρέχοντας ακόμη μεγαλύτερη κάλυψη για σηματοδότηση και υπηρεσίες mMTC). Η ΑΙ θα μπορούσε να αναλύσει τις απαιτήσεις μιας αναδυόμενης υπηρεσίας και να συμβάλει στην επιλογή του καταλληλότερου σημείου πρόσβασης για την εξυπηρέτηση μιας τέτοιας υπηρεσίας, από άποψη φασματικής απόδοσης (spectrum efficiency - SE) και ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency - EE) ή και άλλων πιο περίπλοκων κριτηρίων. Για παράδειγμα, η ΑΙ θα μπορούσε να δημιουργήσει συγκεκριμένες πολιτικές για τις συσκευές χρηστών για να συνδέσει ορισμένες από αυτές σε pico BSs για μεγαλύτερη απόδοση, επιτρέποντας σε ορισμένες άλλες συσκευές να συνδεθούν με macro BSs για να διατηρήσουν τη βασική ανταλλαγή πληροφοριών.

### **Δυσκολίες σε υποσύστημα υποστήριξης του χειριστή (Difficulties in an Operator Supporting Subsystem):**

Συνήθως, τα κυψελοειδή δίκτυα απλώς βασίζονται σε κάποια κατώτατα όρια-κατώφλια (thresholds) για την παρακολούθηση των ανωμαλιών του δικτύου. Ως εκ τούτου, οι μηχανικοί των operator πρέπει να είναι αρκετά προσεκτικοί ώστε να προβαίνουν σε συστηματικές ειδοποιήσεις και να διαβάζουν τους οδηγούς χρήσης για να αντιμετωπίσουν τις απροσδόκητες συνθήκες δικτύου. Σε αντίθεση η ΑΙ θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει δεδομένα κυψελοειδούς δικτύου για να αντλήσει κοινά πρότυπα κυκλοφορίας δικτύου. Επομένως, όταν τα δίκτυα αντιμετωπίζουν κυκλοφορία με άγνωστα μοτίβα (patterns), η ΑΙ μπορεί να ξεκινήσει την αντιμετώπιση προβλημάτων από την αρχή. Ομοίως, τα δίκτυα θα μπορούσαν να επωφεληθούν από την ΑΙ για να προστατευτούν από πιθανές απειλές για την ασφάλεια, έτσι ώστε μόλις η ΑΙ αντιληφθεί ύποπτη δραστηριότητα να αντιμετωπίσει τις όποιες πιθανές ανωμαλίες.

**Προκλήσεις στην ολοκλήρωση των RANs και των CN (Challenges in Integrating RANs and CNs):** Συνήθως, η διαχείριση των RANs και των CNs είναι απομονωμένη, επομένως δεν είναι αρκετά κλιμακώσιμη για την εξέλιξη του δικτύου. Καθώς το MEC (mobile edge computing) γίνεται πιο συνηθισμένο, η ΑΙ παρέχει στον ελεγκτή περισσότερη ισχύ και δυνατότητα να προγραμματίζει από κοινού τους ασύρματους και ενσύρματους πόρους, να επιλέγει τον κατάλληλο διακομιστή κατανομής περιεχομένου και προσωρινής αποθήκευσης (π.χ. κεντρικό διακομιστή) και να παρέχει πιο ενιαία προστασία έναντι πιθανών απειλών δικτύου.

### **3.4 Αρχιτεκτονική Ενεργειακής Απόδοσης – Energy Efficiency Architecture**

Οι τρέχουσες προσεγγίσεις για ενεργειακά αποδοτικά ασύρματα δίκτυα είναι σχεδόν απίθανο να ανταποκριθούν στις αναμενόμενες απαιτήσεις του 5G. Η ενεργειακή αποδοτικότητα στο 5G πρέπει να βελτιωθεί περίπου στον ίδιο βαθμό με το ρυθμό δεδομένων ώστε να διατηρηθεί η ενεργειακή κατανάλωση στα ίδια επίπεδα [98]. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να γίνουν ορισμένες αλλαγές στους ακόλουθους τομείς :

- **Εξοικονόμηση πόρων:** Η υιοθέτηση μιας ανεπαίσθητης μείωσης των ρυθμών μετάδοσης σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης θα έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση μεγάλων ποσών ενέργειας.
- **Προγραμματισμός του δικτύου:** Η προσέγγιση με σκοπό τη μείωση των σταθμών βάσης που καλύπτουν κάποιες περιοχές και ο σχεδιασμός αλγορίθμων που θα διαχειρίζονται ενεργειακά αποδοτικά το δίκτυο, καθιστώντας ανενεργό ένα BS όταν η κίνηση είναι ιδιαίτερα μειωμένη.
- **Ανανεώσιμη και εναλλακτικές μορφές ενέργειας:** Η σύνδεση των σταθμών βάσης με εναλλακτικές μορφές ενέργειας π.χ. αιολική, ηλιακή κ.α.
- **Βελτίωση του υλικού:** Οι υπεύθυνοι τεχνικοί και μηχανικοί να στραφούν σε hardware το οποίο θα είναι ιδιαίτερα βελτιωμένο και θα ρυθμίζεται ανάλογα με τις ανάγκες για ρυθμούς απόδοσης και κυκλοφορίας.

Με την εκτίμηση των 122 exabytes το 2017 και 278 exabytes το 2021 της μηνιαίας μεταφοράς δεδομένων IP, η ερευνητική κοινότητα που ασχολείται με τα ασύρματα δίκτυα, δεν πρέπει να παρέχει μόνο ποιότητα υπηρεσιών (QoS), αλλά και ενεργειακή απόδοση για αυτό το τεράστιο όγκο δεδομένων [2].

Πρέπει να αντιμετωπιστούν τρία βασικά ζητήματα σχετικά με την ενεργειακή απόδοση στα δίκτυα επικοινωνιών: (1) Περιβαλλοντικές ανησυχίες, όπου οι πεπερασμένοι πόροι αυξάνουν τις επιβλαβείς εκπομπές, (2) Λειτουργικά κόστη, τα οποία οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών επιδιώκουν να μειώσουν προκειμένου να προσφέρουν ανταγωνιστικότερες υπηρεσίες στους πελάτες τους, και (3) Υψηλή απόδοση του ίδιου του δικτύου [99].

Ιστορικά, η βελτίωση της απόδοσης του υλικού βοήθησε στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδο συσκευών και υποδομών στις κινητές επικοινωνίες. Αυτές οι σταδιακές προόδους υλικού

δεν θα μειώσουν επαρκώς την κατανάλωση ενέργειας στα 5G δίκτυα, δεδομένης της αναμενόμενης αύξησης των συσκευών, των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων και της κάλυψης. Η προσέγγιση βασισμένη στο υλικό (hardware-based approach) δεν απαντά στα παραπάνω ζητήματα (2) και (3). Μια προσέγγιση βασισμένη στο λογισμικό προσφέρει μια καλύτερη λύση για τη βελτίωση της συνολικής διαχείρισης του δικτύου. Επιπλέον, μια τέτοια προσέγγιση ταιριάζει καλύτερα με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική 5G, όπου το επίπεδο δεδομένων και το επίπεδο ελέγχου αποσυνδέονται, όπως στο SoftAir που θα παρουσιάσουμε σε επόμενη ενότητα.

Υπάρχει ανάγκη για μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε λογισμικό για την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας. Μια νέα ενεργειακά αποδοτική αρχιτεκτονική σχεδιάστηκε βάσει των απαιτήσεων 5G και βασίζεται στη λειτουργικότητα του δικτύου, όπως η αποσύνδεση μεταξύ του data plane και control plane. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται στον αλγόριθμο μηχανικής μάθησης και στην προβλεπτική ανάλυση ώστε να κατανέμει δυναμικά πόρους δικτύου για την επίλυση τόσο των απαιτήσεων κυκλοφορίας όσο και των ενεργειακών πολιτικών. Η αποδοτικότητα του ρυθμού δεδομένων, η καθυστέρηση και το QoS μπορούν να επιτευχθούν με ανοιχτό, προγραμματιζόμενο περιβάλλον και ευελιξία.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ενεργειακά αποδοτική αρχιτεκτονική για τη διαχείριση δικτύου 5G, βασισμένη σε εκτεταμένη ανάλυση των απαιτήσεων του δικτύου. Αυτή η προσέγγιση βασισμένη στο λογισμικό θα περιοριστεί στο πεδίο ελέγχου (control plane) του δικτύου 5G. Οι πόροι υποδομής θα προσαρμοστούν σύμφωνα με (α) ενεργειακές πολιτικές, (β) απαιτήσεις QoS των δεδομένων που μεταφέρονται και (γ) συνθήκες των δικτυακών πόρων, αντιμετωπίζοντας τα ζητήματα (1), (2) και (3) που περιεγράφηκαν παραπάνω.

Τα δίκτυα 5G βασίζονται στη γνώση του δικτύου για να αποκτήσουν ευελιξία. Επομένως, η αρχιτεκτονική θα βασίζεται στους ακόλουθους πυλώνες [99]:

- **Μηχανική Μάθηση (Machine Learning):** Ορισμένα στοιχεία-συστατικά μέρη της αρχιτεκτονικής θα μπορούν να μάθουν για τα πρότυπα (patterns) της κυκλοφορίας δεδομένων στα δίκτυα και να παρέχουν αποτελεσματικά μοντέλα για την ακριβή ποσοτικοποίηση των απαιτήσεων υποδομής.
- **Προγνωστική Ανάλυση (Predictive Analysis):** Η αρχιτεκτονική θα έχει την δυνατότητα να εκτελεί μια ανάλυση πρόβλεψης σχετικά με πιθανές ρυθμίσεις στην κατανομή των πόρων, αξιολογώντας μακροπρόθεσμα τις επιδόσεις της, παρέχοντας αποτελεσματικότερα και ασφαλέστερα αποτελέσματα.

Η προστιθέμενη γνώση στην αρχιτεκτονική ενεργειακής απόδοσης, θα βελτιώσει την απόδοση της διαχείρισης κατανάλωσης ρεύματος με ελάχιστη παρεμβολή στην απόδοση της μεταφοράς δεδομένων στο δίκτυο. Επομένως, επιτυγχάνεται δυναμική κατανομή πόρων, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα έναντι των υφιστάμενων ενεργειακά αποδοτικών προσεγγίσεων κατανομής πόρων [98] [100] [101].

## **Παρουσίαση Αρχιτεκτονικής Ενεργειακής Απόδοσης για 5G Δίκτυα – Energy Efficiency Architecture for 5G Networks**

Στην ενότητα αυτή γίνεται παρουσίαση μιας αρχιτεκτονικής για την αντιμετώπιση τόσο των απαιτήσεων του δικτύου 5G όσο και των απαιτήσεων για ενεργειακή απόδοση. Αυτή η προσέγγιση που βασισμένη στο λογισμικό, λαμβάνει υπόψη τα διάφορα ζητήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, ενσωματώνοντας τις τρέχουσες προσπάθειες ενεργειακής απόδοσης καθώς και τις δυνατότητες που προσφέρουν οι διάφορες τεχνολογίες που προβλέπονται για το 5G.

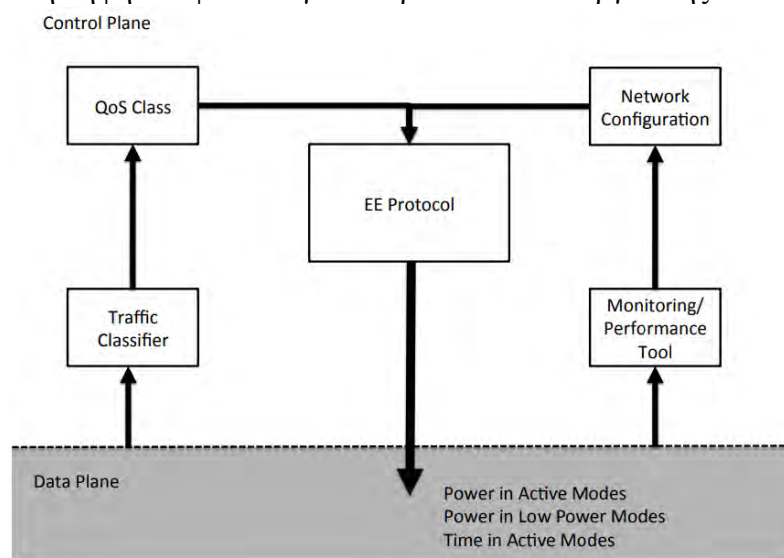
Μία από τις κύριες απαιτήσεις της τεχνολογίας 5G είναι η παροχή ενεργειακής αποτελεσματικής διαχείρισης πόρων ακόμη και με τον μεγάλο όγκο των χρηστών του δικτύου. Οι πόροι δικτύου στο data plane ρυθμίζονται δυναμικά με βάση τα δεδομένα πληροφοριών δικτύου που υποβάλλονται σε επεξεργασία στο control plane. Αυτό το σύστημα γνωστικής ανατροφοδότησης επιτρέπει βελτιώσεις στην απόδοση, δεδομένου ότι η βασισμένη στην μηχανική μάθηση ανάλυση

πρόβλεψης παράλληλα με τις πολιτικές δικτύου στο control plane, ρυθμίζει με ακρίβεια το data plane.

Προκειμένου να εφαρμοστούν ενεργειακά αποδοτικά συστήματα στο 5G, πρέπει να εξεταστεί η εισαγωγή τέτοιων μεθόδων στο control plane. Το control plane θα παρέχει τόσο δυνατότητες επεξεργασίας όσο και σημαντικές πληροφορίες εισόδου σχετικά με το data plane. Αυτό απαιτείται για να εξεταστεί η τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και το ιστορικό του για την εκτίμηση πρόβλεψης μηχανής εκμάθησης, καθώς και για οποιαδήποτε λειτουργικότητα που βασίζεται στη γνωστική λειτουργία. Συνεπώς, η υψηλή ενεργειακή απόδοση, μπορεί να επιτευχθεί λόγω της σχεδόν βέλτιστης διαχείρισης των πόρων που λαμβάνεται από το σύστημα που βασίζεται στη γνωστική λειτουργία.

Στο Σχήμα 3-24 απεικονίζεται η ενεργειακά αποδοτική αρχιτεκτονική η οποία είναι χωρισμένη σε πέντε διαφορετικά τμήματα που αναφέρονται παρακάτω:

- **Ταξινομητής κυκλοφορίας (Traffic Classifier )** - Η τρέχουσα κίνηση που διέρχεται μέσω του δικτύου πρέπει να ταξινομηθεί πριν να αποδοθεί σε αυτή μια κατηγορία (κλάση) QoS.
- **Κατηγορία (κλάση) QoS (QoS Class)** - Μια κατηγορία QoS αποδίδεται στην ταξινόμηση και μεταβιβάζεται στο πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης (energy efficient protocol). Με αυτό τον τρόπο, το ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο γνωρίζει τις απαιτήσεις ταχύτητας δεδομένων, καθυστέρησης και QoS της εφαρμογής.
- **Εργαλείο Παρακολούθησης/Απόδοσης (Monitoring/Performance Tool)** - Η απόδοση του δικτύου θα παρακολουθείται με κάποιο εργαλείο παρακολούθησης της κυκλοφορίας (packet-sniffing tool).
- **Διαμόρφωση δικτύου (Network Configuration)** - Η ρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου θα παρακολουθείται επίσης.
- **Πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης (The energy efficient (EE) protocol)** - Διευθύνει το data plane με ένα πρωτόκολλο δικτύου που ρυθμίζει τη χρήση ενέργειας στην υποδομή του δικτύου, τις διεπαφές του δικτύου και τους κόμβους του δικτύου. Η ρύθμιση της ισχύος σε ενεργούς κόμβους, αντίστοιχα η μείωση της ισχύος σε ανενεργούς (sleep mode) και ο χρόνος σε ενεργές λειτουργίες, μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των ενεργειακών πολιτικών στο δίκτυο. Αυτές οι πληροφορίες θα οριστούν ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας πληροφοριών δικτύου και της ανάλυσης πρόβλεψης. Οι πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κυκλοφορία δικτύου, το ιστορικό του δικτύου και τις συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών (service layer agreements – SLA), θα βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων για το πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης.

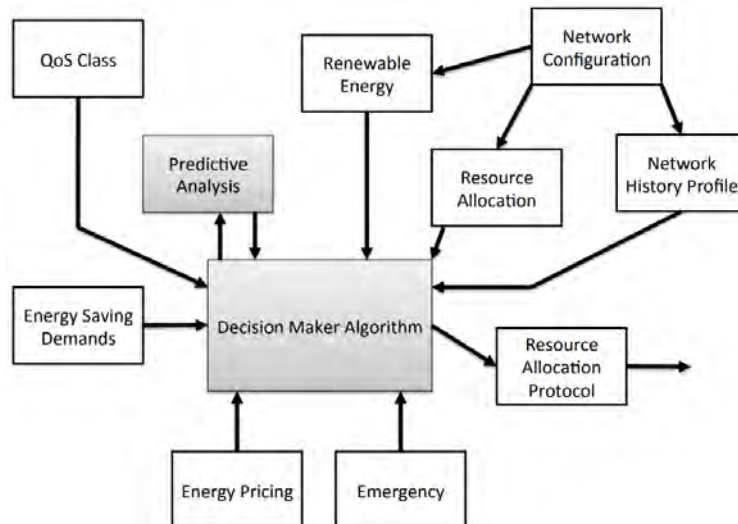


**Σχήμα 3-24. Το control plane φιλοξενεί την Αρχιτεκτονική Ενεργειακής Απόδοσης (ΑΕΑ) στην πλατφόρμα 5G. Η ΑΕΑ έχει εισόδους από το control plane που επεξεργάζεται τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από το data plane. (πηγή: Kieran Sullivan et al., 2016) [99]**

Παρακάτω διερευνάται λεπτομερώς το πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης (ΠΕΕ).

### Το πρωτόκολλο ενεργειακής απόδοσης (EE)

Για να εξασφαλιστεί η ευελιξία και η κλιμάκωση, το πρωτόκολλο EE έχει εννέα μοναδικά στοιχεία. Ο πιο σημαντικός είναι ο αλγόριθμος λήψης αποφάσεων ο οποίος θα ομαδοποιεί πληροφορίες σχετικά με τα άλλα στοιχεία και θα δίνει μια ακριβή απάντηση στο πρωτόκολλο κατανομής πόρων. Αυτό θα ενεργοποιηθεί μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Μια προσεκτική ματιά στα πρωτόκολλα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-25, με συστατικά που είναι βασισμένα στη μηχανική μάθηση και επισημαίνονται με γκρι χρώμα. Τα στοιχεία του πρωτοκόλλου EE παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 3-25. Εννέα στοιχεία δίνουν τις σχετικές πληροφορίες εισόδου για έναν αλγόριθμο λήψης αποφάσεων, ορίζοντας μια επιθυμητή διαμόρφωση κατανομής πόρων. Τα εξαρτήματα μηχανικής μάθησης είναι γκρι χρώμα. (πηγή: Kieran Sullivan et al., 2016)

1. **Αλγόριθμος λήψης αποφάσεων (Decision Maker Algorithm)** - Υπεύθυνος για τη συγκέντρωση όλων των δεδομένων σχετικά με το δίκτυο και την ευθυγράμμιση τόσο με τις απαιτήσεις ενέργειας όσο και απόδοσης. Η έξοδος θα προωθηθεί στον καταναμητή πόρων (resource allocator).
2. **Πρωτόκολλο κατανομής πόρων (Resource Allocation Protocol)** - Με βάση τη ρύθμιση των πόρων που δίνεται από τον Αλγόριθμο λήψης αποφάσεων, το πρωτόκολλο κατανομής πόρων θα μεταδίδει πληροφορίες ελέγχου στο data plane για να προσαρμόσει τις ρυθμίσεις του δικτύου (διαμόρφωση δικτύου).
3. **Κατηγορία-κλάση QoS (QoS Class)** - Οι διαφορετικές εφαρμογές θα δημιουργούν διαφορετικές απαιτήσεις κυκλοφορίας που μεταφράζονται σε κλάσεις-κατηγορίες QoS. Ο αλγόριθμος λήψης αποφάσεων πρέπει να γνωρίζει την κίνηση (traffic) του δικτύου, για τη ρύθμιση των απαιτούμενων απαιτήσεων ενέργειας και απόδοσης της εφαρμογής.
4. **Διαμόρφωση δικτύου (Network Configuration)** - Η διαμόρφωση του δικτύου στο data plane.
5. **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Renewable Energy)** - Ο Αλγόριθμος λήψης αποφάσεων χρειάζεται πληροφορίες σχετικά με τους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους που είναι διαθέσιμοι στο δίκτυο data plane. Αυτός ο τύπος ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την κατηγορία QoS και τις απαιτήσεις εξοικονόμησης ενέργειας (**Energy Saving Demands**).
6. **Κατανομή πόρων (Resource Allocation)** - Ο αλγόριθμος λήψης αποφάσεων για την επισκόπηση των διαφορετικών δυνατοτήτων εγκατάστασης χρειάζεται πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατανομή πόρων του δικτύου στο data plane.

7. **Προφίλ ιστορικού δικτύου (Network History Profile)** - Τα περιοδικά ίχνη επισκεψιμότητας που συλλέγονται για την τακτική ανάλυση κυκλοφορίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία προφίλ ιστορικού δικτύου. Αυτό θα επιτρέψει στον Αλγόριθμο λήψης αποφάσεων να συμβαδίσει την τρέχουσα κυκλοφορία δικτύου με το κανονικό προφίλ κυκλοφορίας στο δίκτυο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.
8. **Προγνωστική ανάλυση (Predictive Analysis)** - Επειδή το control plane βρίσκεται σε κέντρα δεδομένων υψηλής απόδοσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι πρόβλεψης για την γρήγορη ανάλυση διαφορετικών επιλογών κατανομής πόρων στο δίκτυο. Αυτό θα βοηθήσει τον Αλγόριθμο λήψης αποφάσεων να επιλέξει τους καλύτερους πόρους για το δίκτυο και τις εφαρμογές που εκτελούνται μέσω αυτού.
9. **Τιμολόγηση ενέργειας (Energy Pricing)** - Οι πολιτικές τιμολόγησης της ενέργειας μπορούν να δημιουργηθούν και να ενημερωθούν ανεξάρτητα από τον Αλγόριθμο λήψης αποφάσεων. Αυτό θα επιτρέψει τη δυναμική διαπραγμάτευση των τιμών μεταξύ των πελατών, παρέχοντας ταχύτερη διαμόρφωση τιμών.
10. **Επείγουσα κατάσταση (Emergency)** - Οι πολιτικές έκτακτης ανάγκης επηρεάζουν την κατανομή πόρων στο data plane του δικτύου για μεγαλύτερη παροχή υπηρεσιών διαχείρισης δικτύου.

Οι απαιτήσεις του 5G για ταχύτητα δεδομένων, καθυστέρηση και QoS αντιμετωπίζονται από τον μηχανισμό ανάδρασης (feedback mechanism) της κλάσης QoS. Αυτό θα τροφοδοτεί με αρκετές πληροφορίες τον Αλγόριθμο λήψης αποφάσεων για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων απόδοσης του δικτύου 5G. Η τιμολόγηση της ενέργειας και η ανανεώσιμη ενέργεια πρόκειται να παράσχουν ενεργειακές πολιτικές στον Αλγόριθμο λήψης αποφάσεων για να εξετάσουν τις καλύτερες απαιτήσεις εξοικονόμησης ενέργειας. Τέλος, τα άλλα συστατικά στοιχεία, ειδικά τα έκτακτα, παρέχουν επαρκή ευελιξία στην αρχιτεκτονική που θα χρειαστεί για ένα προγραμματιζόμενο και κλιμακώσιμο δίκτυο όπως το 5G. Με τη χρήση της παραπάνω αρχιτεκτονικής που σκοπό έχει την ενεργειακή απόδοση, το δίκτυο 5G είναι συνέχεια σε θέση να παρέχει υψηλή μετάδοση δεδομένων, ενώ παράλληλα διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου για εξοικονόμηση ενέργειας σε σχεδόν βέλτιστη απόδοση.

### 3.5 UDN Αρχιτεκτονική με επίκεντρο το χρήστη - User Centric Ultra Dense Network (UUDN)

Η Ultra Dense Networking αρχιτεκτονική με επίκεντρο τον χρήστη (User-centric UDN - UUDN) έχει ως αρχή το διαχωρισμό του User plane και του Control plane (U/C). Η υλοποίηση των UUDN μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των τεχνολογιών SDN και NFV που θα παρουσιάσουμε σε επόμενες ενότητες. Σε αυτή την αρχιτεκτονική όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-26, δεν υπάρχουν πλέον cells λογικά και φυσικά από την οπτική γωνία του χρήστη. Τα πυκνά APs (Access Points) σε μια περιοχή θα οργανώνονται έξυπνα (Access Point Group - APG) για να παρακολουθούν την κίνηση του χρήστη και να παρέχουν μετάδοση δεδομένων κατ'απαίτηση. Το UUDN επιτρέπει σε έναν χρήστη να νιώθει σαν να τον ακολουθεί πάντα ένα δίκτυο [102].

Υπάρχουν τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά του UUDN:

**Ένα ευφρές δίκτυο γνωρίζει τον χρήστη:** Το δίκτυο θα είναι πιο έξυπνο και μπορεί να ανιχνεύσει αυτόματα την ικανότητα του τερματικού, τις απαιτήσεις του χρήστη και το περιβάλλον του, καθώς και να κατασκευάσει πληροφορίες γνώσης για κάθε χρήστη.

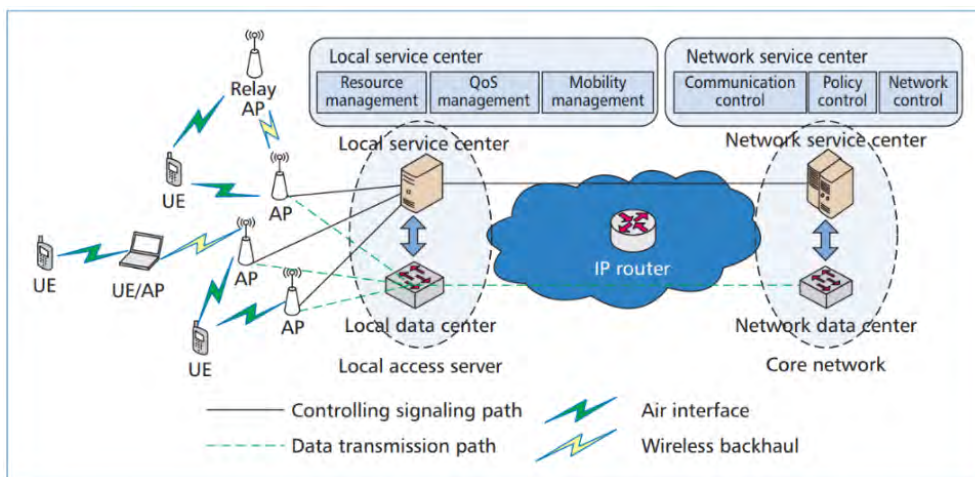
**Ένα μετακινούμενο δίκτυο ακολουθεί τον χρήστη:** Ενώ ένας χρήστης κινείται, το APG του θα προσαρμοστεί δυναμικά για να υποστηρίξει την κίνηση του, η οποία είναι αρκετά διαφορετική από την παραδοσιακή διαδικασία διαχείρισης και προώθησης της κινητικότητας.

**Ένα Δυναμικό Δίκτυο εξυπηρετεί τον Χρήστη:** Τα μέλη του APG θα προσαρμόζονται ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις του χρήστη. Μπορούν να μεταδώσουν μια ροή δεδομένων από κοινού και συνεργατικά για να βελτιώσουν την αποδοτικότητα φάσματος και την εμπειρία του χρήστη (QoE).



**Ένα ασφαλές δίκτυο παρέχει στο χρήστη εγγύηση:** Το δίκτυο θα παρέχει εγγυήσεις ασφαλείας μέσω του ελέγχου ταυτότητας όταν ένα AP συνδέεται με το APG και μέσω του ελέγχου ταυτότητας της συσκευής του χρήστη με το δίκτυο.

Τέσσερις λειτουργικές οντότητες εισάγονται για να παρέχουν υπηρεσίες που εστιάζουν στους χρήστες (Πίνακας 3-5). Το τοπικό κέντρο εξυπηρέτησης (Local Service Center - LSC) και το τοπικό κέντρο δεδομένων (Local Data Center - LDC) εισάγονται για να παρέχουν τη λογική αποσύνδεση του control plane και του user plane. Όλοι οι τύποι AP συνδέονται με το LSC και το LDC με διάφορα backhaul (ενσύρματα ή ασύρματα). Στην πλευρά του κεντρικού δικτύου, το κέντρο υπηρεσιών δικτύου (Network Service Center - NSC) και το κέντρο δεδομένων δικτύου (Network Data Center - NDC) εισάγονται για να παρέχουν τις λειτουργίες ελέγχου και μετάδοσης. Το LSC και το LDC μπορούν να ενσωματωθούν σε μια τοπική πύλη (Local Gateway) ως μια φυσική οντότητα και το NSC και το NDC μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε μία οντότητα δικτύου κορμού (CN).



Σχήμα 3-26. Αρχιτεκτονική δικτύου UUDN. (πηγή: Shanzhi Chen et al., 2016)

Πίνακας 3-5. Λειτουργικές οντότητες του UUDN

	User plane	Control plane
Access network	LDC	LSC
Core network	NDC	NSC

Οι λειτουργίες και οι διεπαφές κάθε οντότητας στο UUDN είναι οι εξής [103]:

- Το AP είναι το κανάλι ραδιοεπικοινωνίας για τις συσκευές χρήστη (UE) που περιλαμβάνει το data plane και το control plane. Τα APs μπορούν να κατασκευαστούν με λειτουργίες στρώματος RF, PHY, MAC και IP ή με συνδυασμούς αυτών βάσει της χωρητικότητας του backhaul. Αν το AP έχει μόνο RF, τα επίπεδα PHY to IP θα συγκεντρωθούν στο LDC. Με αυτήν την αρχιτεκτονική, το LDC μπορεί να παρέχει κοινή επεξεργασία σε επίπεδο PHY. Επομένως η προηγμένη διαδικασία σήματος μπορεί με αυτό τον τρόπο να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των APs.
- Το LSC είναι το κέντρο υπηρεσιών ελέγχου για την οργάνωση μιας δυναμικής ομάδας APs (Access Points Group - APG) για την εξυπηρέτηση ενός χρήστη. Θα έχει τις νέες λειτουργίες διαχείρισης των ραδιοπόρων (radio resource management – RRM), συντονισμό πολλαπλών RAT, αποτελεσματικό έλεγχο QoS, διαχείριση κινητικότητας με επίκεντρο τον χρήστη και τοπικό έλεγχο των ραδιοζεύξεων.
- Το LDC είναι το τοπικό κέντρο δεδομένων για την αντιμετώπιση της μετάδοσης δεδομένων των χρηστών. Θα παρέχει λειτουργίες στο user plane και έχει επίσης τις λειτουργίες του συντονισμού των πολλαπλών APs.

- Το NSC είναι το κέντρο δεδομένων δικτύου για την παροχή των λειτουργιών ελέγχου πολιτικής χρήστη, AAA (authentication, authorization, and accounting) και κινητικότητας υψηλού επιπέδου (περιαγωγή, μεταφορά μέσω NSC) κλπ.
- Το NDC λειτουργεί ως πύλη δεδομένων πακέτων στην πλευρά του δικτύου.

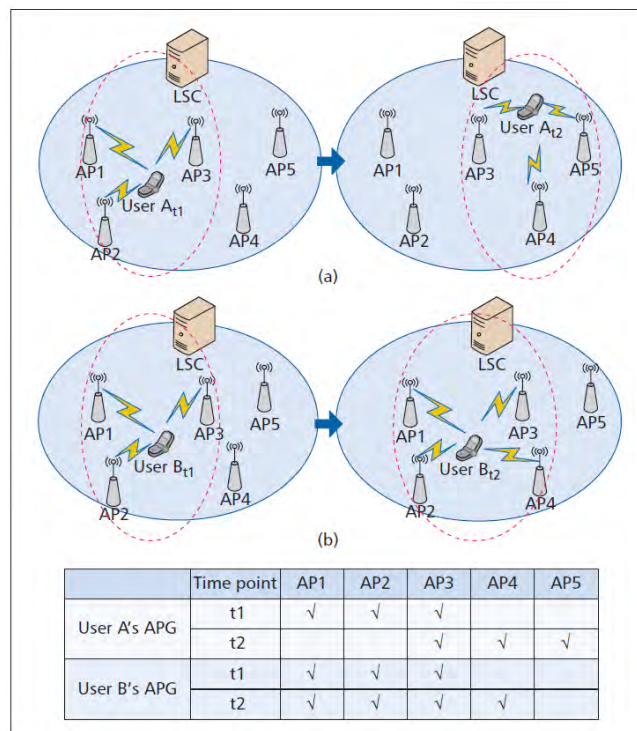
Με αυτήν την αρχιτεκτονική, τα LSC και LDC βρίσκονται πολύ κοντά στη θέση των APs, έτσι ώστε να είναι εύκολο να παρέχουν λειτουργίες εξυπηρέτησης βασισμένες στον χρήστη, προηγμένη διαχείριση πόρων και διαχείριση παρεμβολών. Είναι πιο ευέλικτη για το UUDN η ανάπτυξη μέσω της αποσύνδεσης του user plane και του control plane και την αποκέντρωση των λειτουργιών του βασικού δικτύου (CN) στα LSC και LDC.

### Διαχείριση κινητικότητας με επίκεντρο το χρήστη (User-Centric Mobility Management)

Το UDN θεωρείται ως η βασική ανάπτυξη για την αντιμετώπιση προβλημάτων κάλυψης και χωρητικότητας στα αναδυόμενα ασύρματα συστήματα. Στην περίπτωση αυτή, ο αριθμός των APs είναι πιθανόν συγκρίσιμος με τον αριθμό των χρηστών.

Ένας νέος όρος έχει εισαχθεί για να περιγράψει μια δυναμική μέθοδο ομαδοποίησης από APs. Η έννοια του DAPGing (**D**ynamic **A**ccess **P**oints **G**rouping), θεωρείται μια προσέγγιση διαχείρισης της κινητικότητας με επίκεντρο τον χρήστη. Με αυτή τη μέθοδο, κάθε εγγεγραμμένος χρήστης διαθέτει ένα μοναδικό APG με μοναδικό αναγνωριστικό APG-ID. Το περιβάλλον APG θα αποθηκευτεί σε ένα τοπικό κέντρο εξυπηρέτησης (LSC) και οι περισσότερες από τις διαδικασίες DAPGing θα εκτελούνται από το LSC. Ορισμένες διαδικασίες υψηλού επιπέδου, όπως η πιστοποίηση ταυτότητας, η μεταπομπή (handover) κ.α. διαχειρίζονται από το κέντρο εξυπηρέτησης δικτύου (NSC). Ενώ ένας χρήστης κινείται, το APG του θα προσαρμόζεται δυναμικά για να υποστηρίξει την κίνηση του, η οποία είναι αρκετά διαφορετική από την παραδοσιακή διαδικασία διαχείρισης και προώθησης της κινητικότητας. Στο παραδοσιακό κυψελοειδές δίκτυο, οι χρήστες μεταφέρονται από το ένα cell στο άλλο, ενώ στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική (de-cellular ultra-dense network), το δίκτυο θα ακολουθήσει την κίνηση του χρήστη. Το DAPGing κάνει τη διαχείριση κινητικότητας να έχει διαφορετική λειτουργικότητα.

Επιπλέον, η διαχείριση της κινητικότητας στο UDN πρέπει να εξεταστεί με βάση το συντονισμό παρεμβολών και τη διαχείριση πόρων.

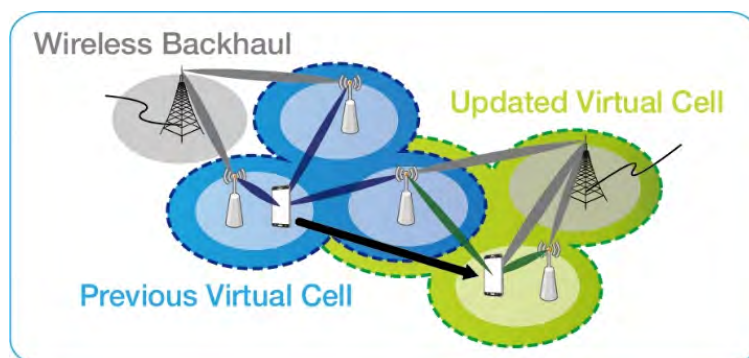


**Σχήμα 3-27. Τοπικά σενάρια DAPGing: a) Ανανέωση APG με κινητικότητα τερματικού. b) Ανανέωση APG με διαχείριση πόρων και άλλους παράγοντες. (πηγή: Shanzhi Chen et al., 2016)**

Στα Σχήματα 3-27a και b απεικονίζονται δύο τυπικά σενάρια DAPGing. Στο DAPGing, κάθε APG-ID αντιπροσωπεύει ένα APG. Κάθε τερματικό αποκτά ένα μοναδικό APG-ID όταν ένα τερματικό συνδέεται με ένα δίκτυο UUDN.

Για παράδειγμα, ο χρήστης A έχει ένα APG με όνομα GA και ακολουθεί πάντα την κίνηση του χρήστη A για διαφορετικά χρονικά σημεία  $t_1$  και  $t_2$ , που υποστηρίζονται από διαφορετικό συνδυασμό APs σε κάθε χρονικό σημείο. Τα σχετικά APs εμφανίζονται επίσης για κάθε χρονικό σημείο. Ωστόσο, η ανανέωση του GA είναι διαφανής στον τερματικό A. Για τον χρήστη B, ο οποίος είναι ακίνητος σε αυτό το παράδειγμα, το APG του (GB) ανανεώνεται επίσης σε διαφορετικά χρονικά σημεία  $t_1$  και  $t_2$ , για άλλο λόγο π.χ. λόγω της προσαρμογής της κατανομής των πόρων.

Σε πλήρη συμφωνία με τα παραπάνω, άλλος ένας όρος έχει κάνει την εμφάνισή του τελευταία, αυτός του virtual cell με επίκεντρο το χρήστη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-28. Ένα user-centric virtual cell αποτελείται από μια ομάδα συνεργαζόμενων BSs (APs) το οποίο συνεχώς αναμορφώνεται έτσι ώστε ο χρήστης να βρίσκεται πάντα στο "κέντρο" του cell [104].



Σχήμα 3-28. Εικονικό κυψελοειδές δίκτυο με επίκεντρο τον χρήστη - User Centric Virtual Cellular Network (πηγή: Samsung Electronics, 5G Vision, 2015)

Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ του UUDN και της παραδοσιακής κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής.

Πίνακας 3-5. Σύγκριση παραδοσιακής αρχιτεκτονικής και UUDN

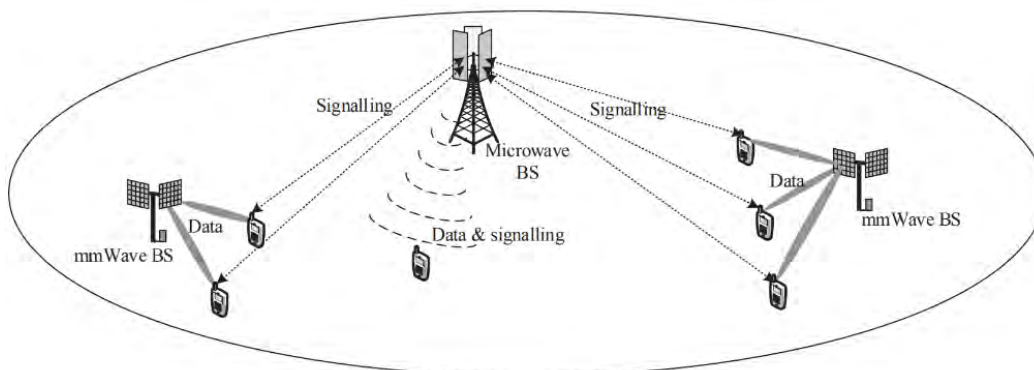
	Παραδοσιακή αρχιτεκτονική	Αρχιτεκτονική UUDN
Αρχιτεκτονική	Δίκτυο-κεντρική Κυψελοειδής δομή	Με επίκεντρο το χρήστη Δομή χωρίς cells
Μονάδα εξυπηρέτησης	Ένας Σταθμός Βάσης	Δυναμική ομάδα σημείων πρόσβασης
Διαχείριση κινητικότητας	Μεταπομπή	Δυναμική ομαδοποίηση
Ανίχνευση δικτύου	Ανίκανη	Ικανή
Διαχείριση ραδιοπόρων	Ανεξάρτητη από την κυψέλη	Συνεργασία, με επίκεντρο τον χρήστη
Διαχείριση παρεμβολών	Ανεξάρτητη από την κυψέλη	Συνεργασία, με επίκεντρο τον χρήστη
Ασφάλεια	Επαναλαμβανόμενη επαλήθευση ταυτότητας	Επαλήθευση ταυτότητας με αναμετάδοση

### 3.6 Αρχιτεκτονική με επίκεντρο τη συσκευή - Device-centric architecture

Τα κυψελοειδή δίκτυα ιστορικά σχεδιάστηκαν με βάση το ρόλο των "cells" ως θεμελιώδεις μονάδες μέσα στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Σύμφωνα με έναν τέτοιο σχεδιασμό, μια συσκευή αποκτά υπηρεσία δημιουργώντας μια σύνδεση κατερχόμενη ζεύξης (downlink) και μια σύνδεση ανερχόμενη ζεύξης (uplink), που μεταφέρει τόσο τον έλεγχο όσο και κίνηση δεδομένων, με τον σταθμό βάσης (BS) να διοικεί το κελί όπου βρίσκεται η συσκευή [105].

Τα τελευταία χρόνια, διαφορετικές τάσεις έχουν δείξει τη διατάραξη αυτής της δομής με επίκεντρο το cell (cell-centric structure):

1. Η πυκνότητα των σταθμών βάσης αυξάνεται ραγδαία, οδηγούμενη από την άνοδο των ετερογενών δικτύων. Ενώ τα ετερογενή δίκτυα ήταν ήδη τυποποιημένα σε 4G, η αρχιτεκτονική δεν σχεδιάστηκε για να τα υποστηρίξει. Η πυκνωση δικτύου μπορεί να απαιτήσει μερικές σημαντικές αλλαγές στο 5G. Η ανάπτυξη σταθμών βάσης με πολύ διαφορετικές δυνατότητες μετάδοσης και περιοχές κάλυψης, για παράδειγμα, απαιτεί την αποσύνδεση του downlink και του uplink κατά τρόπο που επιτρέπει την ροή των αντίστοιχων πληροφοριών μέσω διαφορετικών συνόλων κόμβων [106].
2. Η ανάγκη για πρόσθετο φάσμα θα οδηγήσει αναπόφευκτα στη συνύπαρξη ζωνών συχνοτήτων με ριζικά διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης μέσα στο ίδιο σύστημα. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνεται η έννοια του phantom cell όπου το data plane και το control plane διαχωρίζονται: οι πληροφορίες ελέγχου στέλνονται από κόμβους υψηλής ισχύος σε συχνότητες μικροκυμάτων (microwaves), ενώ τα δεδομένα ωφέλιμου φορτίου μεταφέρονται από κόμβους χαμηλής ισχύος σε mmWave συχνότητες. Στο Σχήμα 3-29 βλέπουμε αυτή τη διάταξη. [107] [23]



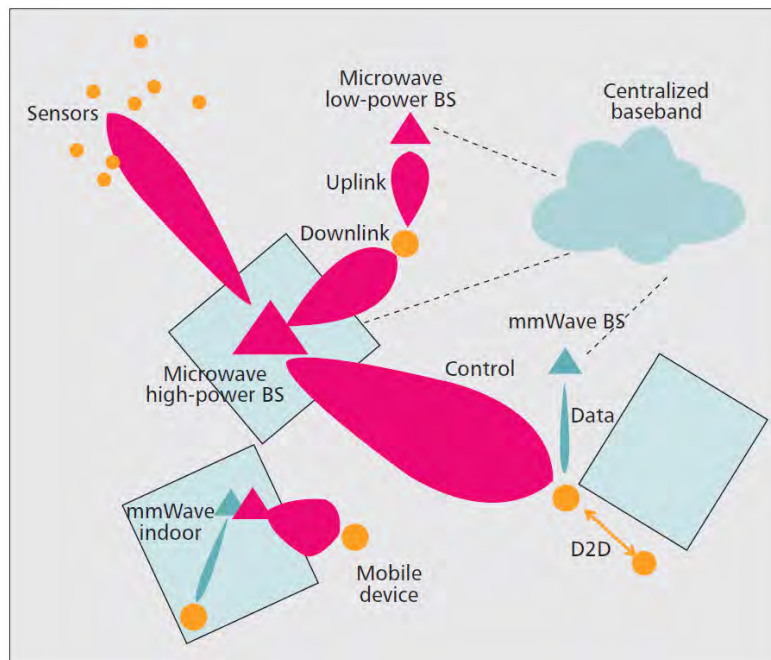
**Σχήμα 3-29. Δίκτυο με χρήση τεχνολογίας mmWave και phantom cells**  
(πηγή: Jeffrey G. Andrews et al., 2014)

3. Η έννοια centralized baseband που σχετίζεται με το C-RAN βασίζεται στην εικονικοποίηση και οδηγεί σε αποσύνδεση μεταξύ ενός κόμβου και του υλικού που έχει διατεθεί για να χειριστεί την επεξεργασία που σχετίζεται με αυτόν τον κόμβο. Το σύνολο των συγκεντρωμένων πόρων του υλικού, για παράδειγμα, θα μπορούσαν να κατανεμηθούν δυναμικά σε διαφορετικούς κόμβους ανάλογα με τις μετρήσεις που ορίζονται από τον διαχειριστή του δικτύου [108].
4. Οι νέες υπηρεσίες στα δίκτυα 5G, θα μπορούσαν να απαιτήσουν έναν πλήρη επαναπροσδιορισμό της αρχιτεκτονικής. Τα τρέχοντα έργα εξετάζουν αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς που κυμαίνονται από τη συγκέντρωση (κεντρικό έλεγχο) ή τη μερική συγκέντρωση έως την πλήρως κατανεμημένη προσέγγιση.
5. Οι συνεργατικές επικοινωνίες, όπως το συνεργατικό πολλαπλό σημείο (cooperative multipoint - CoMP) ή η αναμετάδοση, θα μπορούσαν να απαιτήσουν έναν επαναπροσδιορισμό των λειτουργιών των διαφόρων κόμβων. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν την αξιοπιστία των πλήρων αμφίδρομων κόμβων (full-duplex nodes) για επικοινωνία μικρής εμβέλειας στο άμεσο μέλλον [109] [110]

6. Η χρήση πιο έξυπνων συσκευών θα μπορούσε να επηρεάσει το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Συγκεκριμένα, τόσο η επικοινωνία D2D όσο και το έξυπνο caching απαιτούν έναν αρχιτεκτονικό επαναπροσδιορισμό όπου το κέντρο βάρους μετακινείται από τον πυρήνα του δικτύου στην περιφέρεια (συσκευές, αναμεταδότες, local wireless proxies κ.α).

Με βάση αυτές τις τάσεις, η αρχιτεκτονική με επίκεντρο το cell (cell-centric architecture) κατά περιπτώσεις εξελίσσεται σε μια αρχιτεκτονική με επίκεντρο τη συσκευή (device-centric): μια δεδομένη συσκευή (ανθρώπινη συσκευή ή μηχανή) θα πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνεί ανταλλάσσοντας πολλαπλές ροές πληροφοριών μέσω διαφόρων πιθανών συνόλων ετερογενών κόμβων. Με άλλα λόγια, το σύνολο των κόμβων του δικτύου που παρέχουν συνδεσιμότητα σε μια συγκεκριμένη συσκευή και οι λειτουργίες αυτών των κόμβων σε μια συγκεκριμένη περίοδο επικοινωνίας θα πρέπει να προσαρμόζονται στη συγκεκριμένη συσκευή για αυτή τη συγκεκριμένη περίοδο. Υπό αυτό το πρίσμα, οι έννοιες του uplink / downlink και του καναλιού ελέγχου / δεδομένων πρέπει να επαναξιολογηθούν (Σχήμα 3-30).

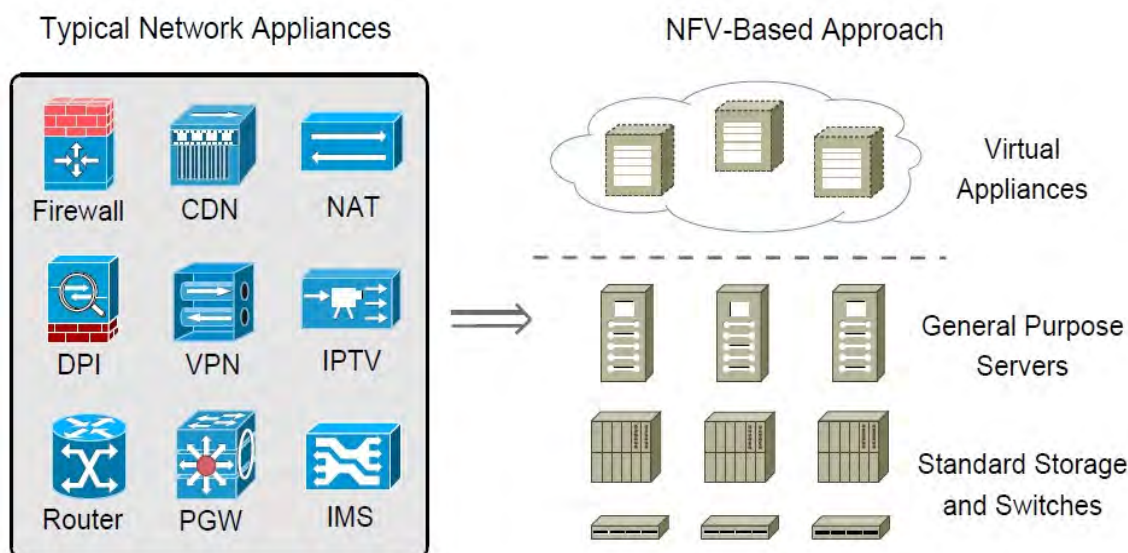
Ενώ η ανάγκη για μια εκ βάθρων αλλαγή στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό είναι φανερή, απαιτούνται σημαντικές ερευνητικές για να προκύψει μια συνεκτική και ρεαλιστική πρόταση. Οι παραπάνω τάσεις με την κατεύθυνση του device-centric θα μπορούσαν να επηρεάσουν σημαντικά την ανάπτυξη του 5G στο μέλλον.



**Σχήμα 3-30. Παράδειγμα αρχιτεκτονικής με επίκεντρο τη συσκευή (device-centric architecture). (πηγή: Boccardi Federico et al., 2014)**

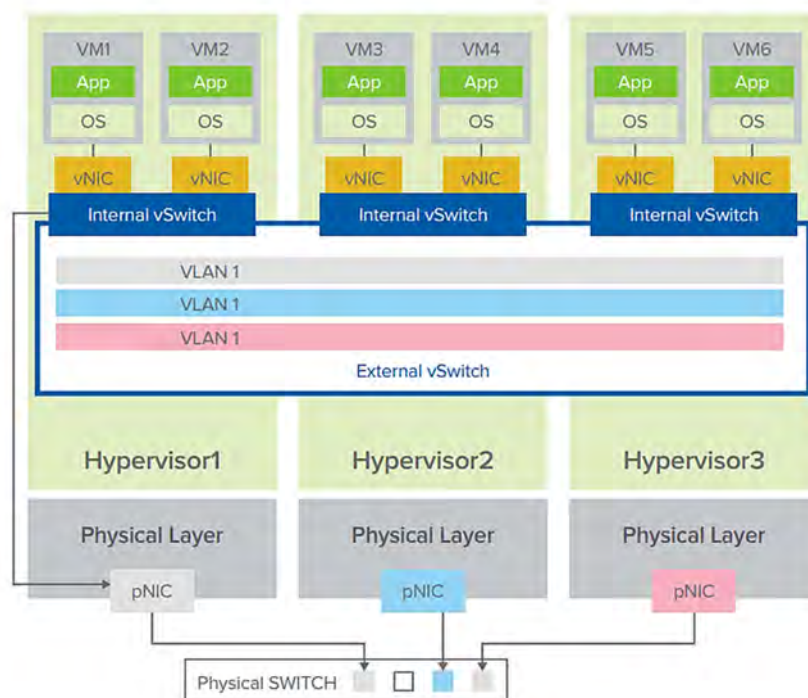
## 4. NETWORK FUNCTION VIRTUALIZATION (NFV)

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνολογίες που έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν δραματικά την μελλοντική δικτύωση 5G, αλλά και στο πως θα παίζει ρόλο στα κληρονομούμενα δίκτυα, είναι η εικονικοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων λειτουργιών δικτύου, το λεγόμενο Network Function Virtualization (NFV). Το NFV αποτελεί μια προσπάθεια να εικονικοποιηθούν (virtualise) οι επιμέρους λειτουργίες των δικτύων (network functions) οι οποίες μέχρι σήμερα διεξάγονται από εξειδικευμένες-αποκλειστικές συσκευές υλικού (dedicated hardware appliances). Βασικός στόχος της νέας τεχνολογίας είναι ο μετασχηματισμός των δικτύων από ένα σύνολο διαφορετικών στοιχείων με ξεχωριστή λειτουργία το καθένα, σε ένα σύνολο από εξυπηρετητές (servers) μεγάλης κλίμακας οι οποίοι θα είναι ικανοί να εκτελέσουν τις λειτουργίες των συμβατικών συσκευών. Ειδικότερα, θα δίνεται η δυνατότητα αντικατάστασης των σημερινών στοιχείων ενός δικτύου, όπως είναι οι δρομολογητές (routers), μεταγωγείς (switches), τείχη προστασίας (firewalls), πύλες εικονικών ιδιωτικών δικτύων (Virtual Private Networks gateways) καθώς και τμημάτων των υποδομών κινητής τηλεφωνίας με servers οι οποίοι θα πραγματοποιούν τις λειτουργίες των ανωτέρω αλλά και άλλων συσκευών, είτε κεντροποιημένα είτε κατακευματισμένα (Σχήμα 4-1). Το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό γνώρισμα του NFV είναι η διαθεσιμότητα του τόσο στα ενσύρματα όσο και στα ασύρματων δίκτυα χωρίς να χρειάζεται να λάβει χώρα κάποια εγκατάσταση νέου εξοπλισμού. [111] [112].



Σχήμα 4-1. Η εικονικοποίηση διαφόρων λειτουργιών δικτύου από το NFV (πηγή: Bo Han et al., 2015)

Φυσικά η πραγματοποίηση του στόχου αυτού δύναται να επιτευχθεί με την εκκίνηση πολλαπλών Εικονικών Μηχανών (Virtual Machines, VMs), κάτι που λογίζεται ρεαλιστικό με τις υπάρχουσες υπολογιστικές δυνατότητες. Στο Σχήμα 4-2 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας NFV. Στην πράξη, τα VNFs αναπτύσσονται κυρίως ως ένα ή περισσότερα VMs. Υπάρχουν οι hypervisors οι οποίοι έχουν την ευθύνη για τον πλήρη έλεγχο των VMs. Στις τελευταίες, φιλοξενούνται Λειτουργικά Συστήματα (Operating Systems, OSs) που αναλαμβάνουν την εκτέλεση των δικτυακών λειτουργιών (VNFs) ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Στο Σχήμα 4-2 κάθε App της VM αποτελεί και μία ξεχωριστή VNF, π.χ. router, switch, firewall, load balancer, media server κ.α.



**Σχήμα 4-2. Απεικόνιση της τεχνολογίας NFV σε υψηλό επίπεδο**  
(πηγή: Spirent Communications, *VNF Benchmarking, 2017*) [113]

Όσον αφορά τη μέθοδο υλοποίησης του NFV διαφαίνονται δύο βασικές αρχιτεκτονικές:

- **Κεντριοποιημένα**, με τις εικονικά υλοποιήσιμες δικτυακές λειτουργίες να εκτελούνται σε κέντρα δεδομένων (data centers) και τον τελικό χρήστη να έχει απομακρυσμένη πρόσβαση σε αυτά και
- **Κατανεμημένα**, με τις εικονικά υλοποιήσιμες δικτυακές λειτουργίες να εκτελούνται είτε στις εγκαταστάσεις του τελικού χρήστη είτε σε κάποιο δομικό στοιχείο κοντά σε αυτόν.

Μέχρι σήμερα οι ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται κυρίως στην κεντριοποιημένη (centralized) αρχιτεκτονική για την υλοποίηση του NFV. Ωστόσο, η κατανεμημένη αρχιτεκτονική αναμένεται να αξιοποιηθεί κυρίως από επιχειρήσεις που επιθυμούν την παροχή ποιοτικότερων υπηρεσιών στους πελάτες τους. Σε αυτή την κατεύθυνση κινούνται μικρές και μεγάλες εταιρίες προσδοκώντας αύξηση των εσόδων τους από την εμπορική εκμετάλλευση του Distributed NFV.

Η πρόταση για το NFV προήλθε κυρίως από τους μεγαλύτερους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς (telecom operators - service providers). Οι operators επιθυμούν να περιορίσουν τις μεγάλες δαπάνες σε δικτυακό υλικό και στην αντίστοιχη συντήρησή του, μειώνοντας τις εκροές που καταβάλλουν στους προμηθευτές δικτυακού υλικού. Αναζητώντας, λοιπόν, τρόπους μείωσης των δαπανών για την υποδομή των δικτύων τους, οι operators στοχεύουν στην υιοθέτηση του NFV το οποίο προβλέπεται να είναι τεχνολογικά ουδέτερο οξύνοντας ακόμη περισσότερο τον ανταγωνισμό ανάμεσα στους παρόχους δικτυακού υλικού.

### ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ NFV

Η τεχνολογία NFV, υπόσχεται στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών περισσότερη ευελιξία στο να διευρύνουν τις δυνατότητες του δικτύου τους και τις υπηρεσίες που προσφέρουν στους πελάτες τους. Επίσης, τους προσφέρει τη δυνατότητα να εγκαθιστούν νέες υπηρεσίες δικτύου ή να αναβαθμίζουν παλαιότερες πιο γρήγορα και φθηνότερα. Πιο συγκεκριμένα, οι κατευθύνσεις για το NFV που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τη σχεδίαση του δικτύου είναι οι εξής [114]:

- **Αποσύζευξη του Software από το Hardware:** Με την ανάπτυξη του NFV, ένα στοιχείο δικτύου δεν συνίσταται πλέον από ένα συνδυασμό software και hardware, με αποτέλεσμα η

υλοποίηση και η εξέλιξη του καθενός θα είναι ανεξάρτητη του ενός από το άλλο. Αυτή η αποσύζευξη επιτρέπει στο software να εξελίσσεται ανεξάρτητα από το hardware, και το αντίστροφο.

- **Ευέλικτη υλοποίηση και σχεδιασμό λειτουργιών δικτύου (NF):** Η αποσύνδεση του λογισμικού από το υλικό οδηγεί στον επανασχεδιασμό πόρων και στοιχείων υλικού και στη χρήση τους για πολλαπλές ταυτόχρονες λειτουργίες δικτύου. Λόγω αυτού, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να αναπτύξουν τις υπηρεσίες δικτύου ταχύτερα για τους πελάτες τους που εκτελούνται με τις ίδιες οντότητες υλικού.
- **Αποτελεσματική κλιμάκωση δικτύου:** Η δυνατότητα υλοποίησης των λειτουργιών του δικτύου με μορφή λογισμικού προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον δυναμικό εφοδιασμό με πόρους μιας VNF, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου κάθε στιγμή.

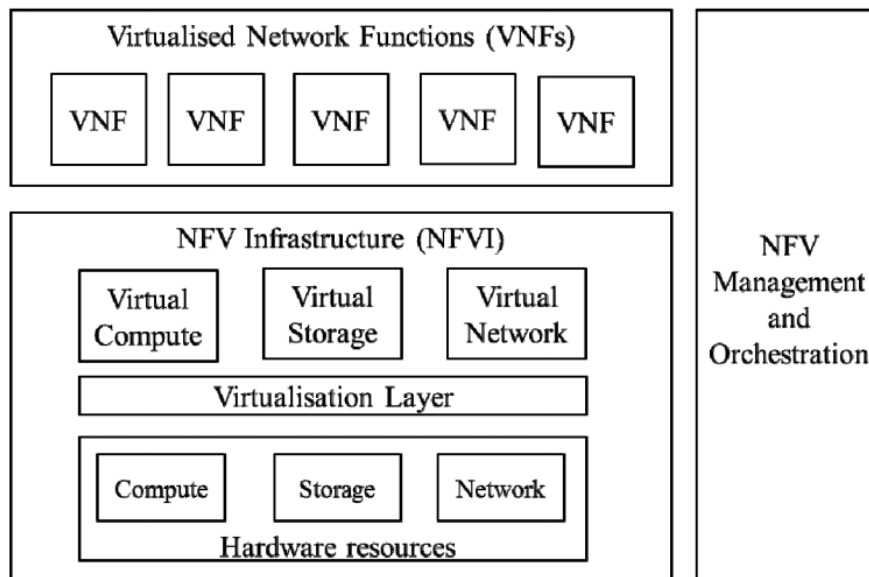
#### 4.1 Γενικό Πλαίσιο Αρχιτεκτονικής

Αρχικά θα παρουσιασθεί το γενικό πλαίσιο αρχιτεκτονικής σύμφωνα με το ETSI ISG NFV (European Telecommunications Standardization Institute, Industry Specification Group for NFV) [115] και στη συνέχεια θα αναλυθεί εκτενέστερα. Το πλαίσιο λειτουργίας του NFV σε υψηλό επίπεδο (με απόκρυψη των λεπτομερειών) σκιαγραφείται στο Σχήμα 4-3.

Στην εικόνα αυτή απεικονίζονται ουσιαστικά 3 βασικά τμήματα:

- Υποδομή NFV (NFV Infrastructure, NFVI)
- Εικονικοποιημένες Δικτυακές Λειτουργίες (Virtualised Network Functions, VNFs)
- Ενορχήστρωση και Διαχείριση του NFV (NFV Management and Orchestration, NFV-MANO)

**NFVI.** Στο κατώτερο επίπεδο τοποθετούνται οι φυσικοί πόροι που απαρτίζονται από υπολογιστικές, αποθηκευτικές και δικτυακές μονάδες (Compute, Storage, Network). Στην κορυφή αυτών βρίσκεται το επίπεδο εικονικοποίησης (Virtualisation Layer), το οποίο απαρτίζεται συνήθιστα από κάποιον υπερ-ελεγκτή (hypervisor). Τέλος, στο ανώτερο επίπεδο της NFVI τοποθετούνται οι εικονικοί πόροι οι οποίοι δημιουργούνται με τη βοήθεια του υπερ-ελεγκτή (Virtual Compute, Virtual Storage, Virtual Network).



*Σχήμα 4-3. Πλαίσιο λειτουργίας της τεχνολογίας NFV σε υψηλό επίπεδο (πηγή: ETSI GS NFV 002 V1.2.1)*

**VNFs.** Οι εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες αποτελούν τις σύγχρονες δικτυακές λειτουργίες με τη διαφορά ότι υλοποιούνται από εικονικούς πόρους που παρέχει η NFVI. Συνεπώς, οι λειτουργίες της δρομολόγησης, της μεταγωγής, της εγκαθίδρυσης μιας σύνδεσης, της

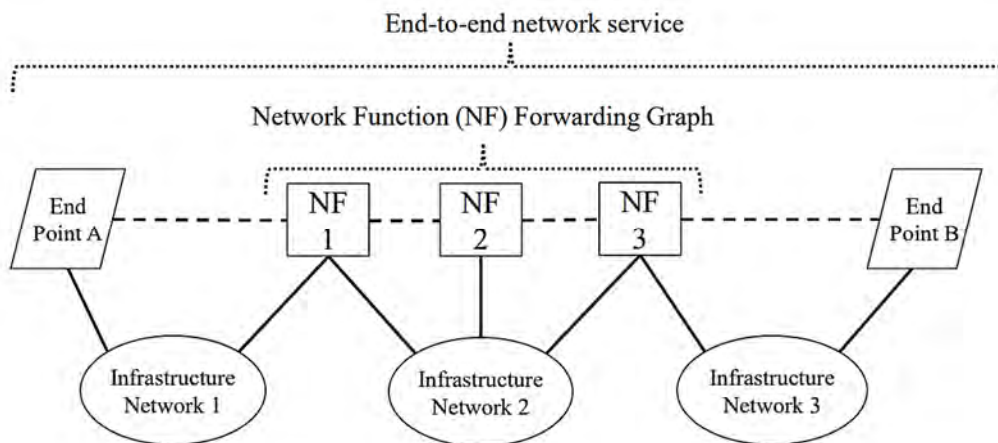


ισοστάθμισης του φορτίου κίνησης (load-balancing), κ.ά. δεν υλοποιούνται πλέον από αποκλειστικές φυσικές συσκευές αλλά από εικονικές μηχανές που παρέχουν την ίδια ακριβώς λειτουργικότητα με τις προηγούμενες συμβατικές. Παράλληλα, η χρησιμοποίηση φυσικών και εικονικών πόρων στην ίδια υποδομή είναι εφικτή όπως θα φανεί αργότερα. Ουσιαστικά, λοιπόν, οι εικονικές δικτυακές λειτουργίες αποτελούν το προϊόν-στόχο της αρχιτεκτονικής του NFV ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα των σημερινών δικτύων.

**NFV Management and Orchestration.** Αυτή η δομική μονάδα καλύπτει την ενορχήστρωση και τη διαχείριση του κύκλου ζωής των φυσικών πόρων και/ή των πόρων λογισμικού που υποστηρίζουν την εικονικοποίηση της υποδομής. Επιπρόσθετα, είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs. Γενικά, εστιάζει σε όλες τις λειτουργίες του πλαισίου οι οποίες σχετίζονται με τη διαχείριση των διαδικασιών εικονικοποίησης.

Προτού παρουσιασθεί το πλαίσιο αρχιτεκτονικής του NFV αναλυτικότερα, θα γίνει αναφορά σε δύο στοιχεία τα οποία υλοποιούνται ως επί το πλείστον στα σημερινά δίκτυα και προσαρμόζονται κατάλληλα για την υλοποίηση του NFV.

Το πρώτο στοιχείο αφορά τον επονομαζόμενο γράφο προώθησης των δικτυακών λειτουργιών (Network Function Forwarding Graph, NF-FG) ο οποίος στην περίπτωση του NFV μετασχηματίζεται σε αντίστοιχο εικονικό (Virtual NF-FG, VNF-FG). Ο αρχικός γράφος περιγράφει τη λογική σύνδεση μεταξύ των δικτυακών λειτουργιών ώστε να υποστηριχθεί η παροχή μιας δικτυακής λειτουργίας από άκρο σε άκρο (end-to-end network service). Τα τερματικά σημεία του δικτύου, καθώς και οι δικτυακές λειτουργίες, συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενσύρματης ή ασύρματης υποδομής που δύναται να αφαιρεθεί λογικά ώστε να προκύψει η συνολική από άκρο σε άκρο σύνδεση. Στο Σχήμα 4-4 [115] ο γράφος σχηματίζεται από τις διακεκομμένες γραμμές, ενώ οι πραγματικές φυσικές συνδέσεις με συνεχείς γραμμές.

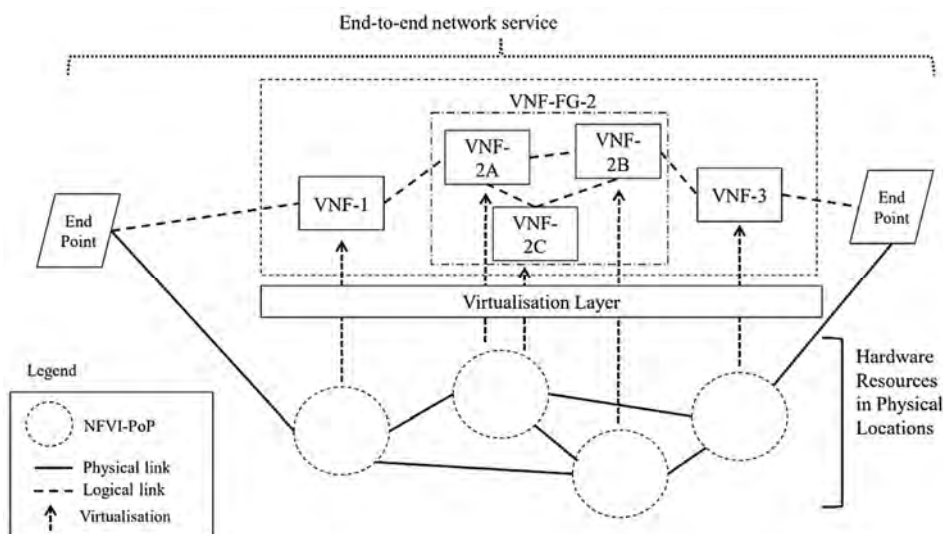


**Σχήμα 4-4. Αναπαράσταση Network Function Forwarding Graph (πηγή: ETSI GS NFV 002 V1.2.1)**

Στο παραπάνω σχήμα ο γράφος προώθησης αφορά τις δικτυακές λειτουργίες NF1, NF2 και NF3, ενώ η δικτυακή υποδομή 2 (Infrastructure Network 2) χρησιμοποιείται για την υποστήριξη των δικτυακών λειτουργιών του γράφου.

Ο VNF-FG υλοποιείται κατά όμοιο τρόπο με τον NF-FG με τη διαφορά ότι πλέον ο γράφος συνίσταται από εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει αναφορά στο δεύτερο στοιχείο που αφορά τα σημεία παρουσίας της NFVI, δηλαδή τα NFVI Points of Presence (NFVI-PoPs). Τα τελευταία περιλαμβάνουν φυσικούς πόρους για υπολογισμούς, αποθήκευση και δικτύωση τους οποίους έχει υπό τον έλεγχό του ο διαχειριστής του δικτύου (network operator). Στο Σχήμα 4-5 [115] παρουσιάζεται εκτενέστερα η δικτυακή αρχιτεκτονική του Σχήματος 4-4 αφού έχουν αντικατασταθεί οι συμβατικές δικτυακές λειτουργίες με τις αντίστοιχες εικονικές. Επιπρόσθετα, αναδεικνύονται και τα NFVI-PoPs τα οποία υλοποιούν, με τη βοήθεια του επιπέδου εικονικοποίησης (virtualisation layer), τις VNFs είτε με αναλογία ένα προς ένα είτε

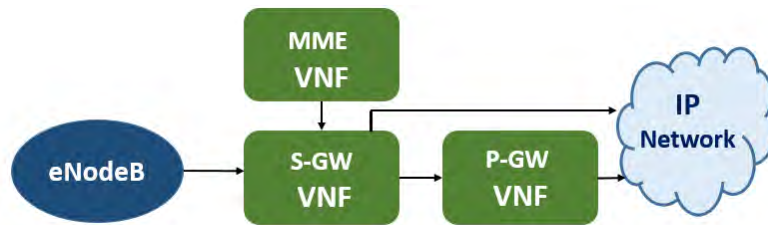
μαζικά. Παράλληλα είναι εφικτή η υλοποίηση ενός VNF-FG με τη συμμετοχή πολλαπλών VNF-PoPs με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εμφωλευμένοι γράφοι προώθησης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-5.



**Σχήμα 4-5. Αναπαράσταση VNF-FG με τα αντίστοιχα NFVI-PoPs υλοποίησης (πηγή: ETSI GS NFV 002 V1.2.1)**

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται πως μια δικτυακή λειτουργία (συγκεκριμένα η VNF2) δύναται να υλοποιηθεί από διαφορετικά NFVI-PoPs κάτι που σημαίνει ότι δεν υφίστανται τοπολογικοί περιορισμοί για την υλοποίηση των VNFs. Συνεπώς, είναι εφικτή η αξιοποίηση τοπολογικά διεσπαρμένων υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων για την υλοποίηση μιας VNF, όπως ακριβώς υλοποιείται και η VNF2 στο Σχήμα 4-5. Οι συνδυασμοί πολλαπλών NFVI-PoPs για την υλοποίηση μιας VNF είναι δυνατοί σε περίπτωση που ικανοποιούνται οι περιορισμοί απόδοσης αλλά και ασφάλειας που έχουν τεθεί.

Η υπηρεσία δικτύου που είναι εικονική μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενός μόνο VNF, ή μπορεί να απαιτεί πολλαπλές VNFs. Όταν μια ομάδα VNF εφαρμόζει συλλογικά την υπηρεσία δικτύου, είναι πιθανό ορισμένες λειτουργίες να έχουν εξαρτήσεις από άλλες, οπότε η VNF χρειάζεται να επεξεργαστεί τα δεδομένα σε μια συγκεκριμένη ακολουθία. Όταν μια ομάδα VNFs δεν έχει καμία αλληλεξάρτηση, τότε αυτή η ομάδα αναφέρεται απλά ως ένα σύνολο VNFs. Ένα παράδειγμα είναι η εικονικοποίηση του Evolved Packet Core (vEPC), όπου το Mobile Management Entity - MME (Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας) είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο ταυτότητας του χρήστη και την επιλογή του Service Gateway (SGW). Το SGW λειτουργεί ανεξάρτητα από τη λειτουργία του MME και προωθεί τα πακέτα δεδομένων του χρήστη. Αυτές οι VNFs λειτουργούν συλλογικά για να προσφέρουν μέρος της λειτουργικότητας του vEPC, αλλά υλοποιούν ανεξάρτητα τις λειτουργίες τους. Εάν, ωστόσο, η υπηρεσία δικτύου απαιτεί VNFs για να επεξεργαστούν τα δεδομένα σε μια συγκεκριμένη ακολουθία, τότε η διασύνδεση μεταξύ των VNFs πρέπει να καθοριστεί και να αναπτυχθεί. Αυτό αναφέρεται ως VNF-Forwarding-Graph (VNF-FG) ή αλυσιδωτή υπηρεσία (service chaining) όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Στο παράδειγμα του vEPC, εάν προστεθεί άλλη μία VNF που παρέχει λειτουργικότητα Packet Data Network Gateway (PGW), η PGW VNF θα πρέπει να επεξεργάζεται μόνο τα δεδομένα μετά το SGW. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6, αυτή η διασύνδεση μεταξύ SGW, MME και PGW σε αυτή τη συγκεκριμένη σειρά για τη ροή πακέτων καθιστά ένα VNF-FG. Αυτή η ιδέα της αλυσιδωτής εξυπηρέτησης είναι σημαντική στην τεχνολογία του NFV [116].



Σχήμα 4-6. Εικονικός EPC (vEPC) με χρήση VNF-FG

Σημαντική παρατήρηση όσον αφορά τους VNF-FGs είναι η ανάγκη δημιουργίας διεπαφών ανάμεσα στην υποδομή και στις VNFs ή/και στις NFs οι οποίες θα ακολουθούν κάποια κοινώς αποδεκτά πρότυπα. Τα πρότυπα αυτά δύναται να αναπτυχθούν είτε από κάποιον οργανισμό προτυποποίησης είτε να είναι εξαρχής ανοικτά (open de-facto standards). Η ανάγκη αυτή προέρχεται από την επιδίωξη επίτευξης του στόχου ύπαρξης πολλών κατασκευαστών (vendors) μιας συγκεκριμένης δικτυακής υποδομής ώστε κάθε ενδιαφερόμενος κατασκευαστής να βρίσκεται σε θέση να προσφέρει τη δική του VNF. Μόνον όταν διασφαλισθεί η επικοινωνία των προερχόμενων από διαφορετικούς κατασκευαστές VNFs θα είναι εφικτή η υιοθέτηση ενός τέτοιου μοντέλου. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό θα ενταθούν οι προσπάθειες ανάπτυξης καινοτόμων προϊόντων/υπηρεσιών στους κλάδους που θα αξιοποιηθεί το NFV, καθώς αναμένεται να αυξηθούν τα επίπεδα ανταγωνισμού με την είσοδο νέων εταιριών.

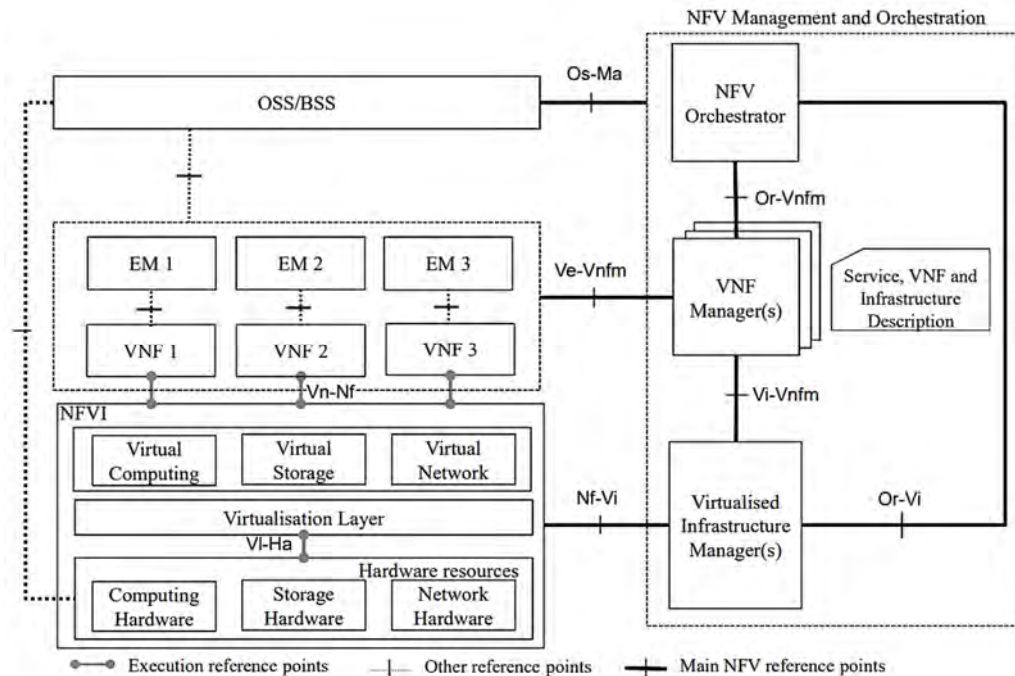
#### 4.2 Αναλυτικό Πλαίσιο Αρχιτεκτονικής

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του Σχήματος 4-3 με περισσότερες λεπτομέρειες. Γίνεται αναφορά τόσο στις επιμέρους δομικές μονάδες όσο και στα σημεία διεπαφής (interfaces) μεταξύ αυτών. Η αναλυτική αρχιτεκτονική προβάλλεται στο Σχήμα 4-7 [115], όπου με συνεχή γραμμή περιγράφονται τα δομικά στοιχεία και οι διεπαφές που ενδιαφέρουν την ETSI NFV ISG και αποτελούν υποψήφια αντικείμενα προτυποποίησης. Οι διακεκομμένες γραμμές περιγράφουν συμπληρωματικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής και δεν απασχολούν άμεσα την ομάδα εργασίας.

Όπως διαπιστώνεται από την ανωτέρω εικόνα δίνεται έμφαση κυρίως στις διεπαφές μεταξύ των δομικών μονάδων αλλά και στην εσωτερική δομή της μονάδας διαχείρισης του NFV. Συγκεκριμένα, η περιγραφόμενη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει:

- την **NFVI**, όπως παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 4-3, η οποία ενδέχεται να εκτείνεται σε πολλαπλές τοποθεσίες όπου λειτουργούν τα NFVI-PoPs. Οι υπολογιστικοί πόροι θεωρούνται ως Commercial off-the-shelf (COTS), δηλαδή δεν αποτελούν ιδιόκτητα (proprietary) προϊόντα που δεν υφίστανται μετατροπές. Συνεπώς, η προμήθεια του εξοπλισμού δύναται να διεξαχθεί σε μαζικούς όγκους (high volumes) αξιοποιώντας και τις εμφανιζόμενες οικονομίες κλίμακας. Οι ίδιες παρατηρήσεις ισχύουν τόσο για τα αποθηκευτικά μέσα όσο και για τα μέσα δικτύωσης. Τα πρώτα ενδέχεται να ανήκουν στο δίκτυο όντας κοινής χρήσεως (Network Attached Storage, NAS) ή σε κάποιον εξυπηρετητή αποκλειστικά, ενώ τα μέσα δικτύωσης συνδέουν τα NFVI-PoPs είτε μεταξύ τους είτε με εξωτερικά δίκτυα ή δικτυακά στοιχεία.
- τις **VNFs**, όπως ορίστηκαν παραπάνω αλλά και η Διαχείριση Στοιχείου (Element Management, **EM**), που είναι υπεύθυνη για τις διαχειριστικές λειτουργίες μιας ή περισσότερων VNFs. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια VNF δύναται να υλοποιηθεί σε μία ή περισσότερες εικονικές μηχανές (VMs), όπου στην τελευταία περίπτωση κάθε VM αναλαμβάνει να υλοποιήσει μια υπο-λειτουργία της VNF. Οι VNFs χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα ανθεκτικές (resilient) και δύναται να αναδημιουργηθούν είτε αυτόματα είτε κατά απαίτηση [117]. Συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση αυτόματης αναδημιουργίας (automatic re-creation) μιας VNF, ενεργοποιείται μηχανισμός πυροδότησης (triggering) της εκκίνησης της VNF εφόσον ικανοποιούνται κάποια προκαθορισμένα κριτήρια.
- Στην περίπτωση της κατά απαίτηση αναδημιουργίας (on-demand recreation) μιας VNF η εντολή δημιουργίας δίνεται είτε από κάποια εξουσιοδοτημένη οντότητα, όπως κάποιο OSS, είτε από κάποιον εξουσιοδοτημένο χρήστη, όπως τον διαχειριστή του δικτύου.



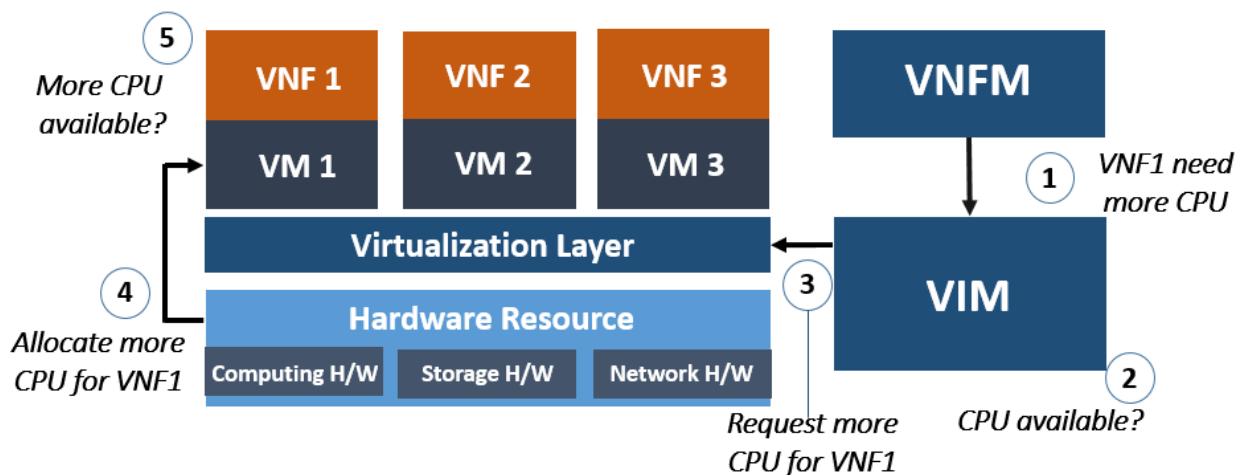
Σχήμα 4-7. Αναλυτικό πλαίσιο αρχιτεκτονικής NFV (πηγή: ETSI GS NFV 002 V1.2.1) [115]

- το **NFV Management and Orchestration**, για το οποίο παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες υλοποίησής του. Ειδικότερα περιλαμβάνει:
  - τον Διαχειριστή Εικονικοποιημένης Υποδομής (Virtualised Infrastructure Manager, **VIM**), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την NFVI. Ενδέχεται να υπάρχουν περισσότεροι του ενός VIMs ανάλογα με την αρχιτεκτονική της υποδομής.
  - τον Διαχειριστή VNF (**VNF Manager**), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs (αρχειοποίηση, ενημέρωση, υποβολή αιτήσεων, κλιμάκωση, τερματισμός) ενώ ταυτόχρονα μπορεί να επικοινωνήσει και με τον ή τους VIMs. Και σε αυτή την περίπτωση ενδέχεται να υπάρχουν είτε ένας VNF Manager για κάθε VNF είτε ένας VNF Manager για πολλές VNFs (Σχήμα 4-10).
  - τον Ενορχηστρωτή (**NFV Orchestrator**), ο οποίος έχει τη γενική εποπτεία της μονάδας διαχείρισης αλλά και της αρχιτεκτονικής του NFV.
- Τέλος, η παραπάνω αρχιτεκτονική περιλαμβάνει την Περιγραφή για τις Υπηρεσίες, τις VNFs και την Υποδομή (Service, VNF and Infrastructure Description) και τα Συστήματα Υποστήριξης των Λειτουργιών και της Επιχείρησης (Operations Support Systems and Business Support Systems, **OSS/BSS**). Το πρώτο παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πρότυπο ανάπτυξης των VNFs, τον VNF-FG, πληροφοριακά μοντέλα για την υποδομή του NFV καθώς και πληροφορίες για τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται. Τα OSS/BSS αποτελούν συστήματα υποστήριξης των λειτουργιών ενός παρόχου τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, όπως συστήματα χρέωσης, εξυπηρέτησης πελατών κ.ά. και δεν υλοποιούνται απαραίτητα από τον πάροχο της αρχιτεκτονικής NFV.

Στο Σχήμα 4-7 τοποθετούνται ακόμη οι διεπαφές μεταξύ των επιμέρους δομικών μονάδων της αρχιτεκτονικής NFV. Αυτές είναι:

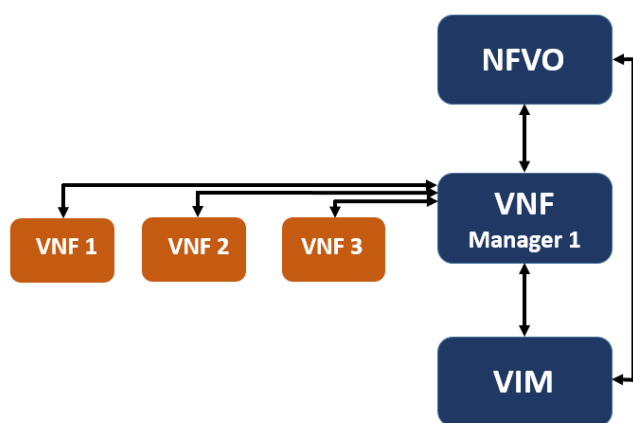
- **Vi-Ha:** Virtualisation Layer - Hardware Resources. Η διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται για να συνδέσει τους πόρους υλικού με το επίπεδο εικονικοποίησης ώστε να δημιουργηθεί το κατάλληλο περιβάλλον εκτέλεσης (execution environment) για τις VNFs. Ουσιαστικά συλλέγει πληροφορίες για την παρούσα κατάσταση των πόρων υλικού ώστε να συμβάλλει στη σωστή διαχείριση των VNFs. Σημαντικό στοιχείο είναι η εξασφάλιση της ουδετερότητας όσον αφορά τους φυσικούς πόρους, δηλαδή η διεπαφή οφείλει να είναι ανεξάρτητη της υλικής υποδομής.
- **Vn-Nf:** VNF - NFV Infrastructure. Η διεπαφή αυτή αναπαριστά το περιβάλλον εκτέλεσης που παρέχει η NFVI στις VNFs. Δεν περιλαμβάνονται στοιχεία ελέγχου, ενώ πρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις απόδοσης και φορητότητας για τις VNFs.
- **Nf-Vi:** NFVI - Virtualised Infrastructure Manager (VIM). Η διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται για την κατανομή των εικονικοποιημένων πόρων ανάλογα με τις αιτήσεις από τον Διαχειριστή VNF και τον Ενορχηστρωτή. Επιπρόσθετα, προωθεί σε αυτούς την κατάσταση των εικονικοποιημένων πόρων, ενώ ταυτόχρονα διαχειρίζεται και τους φυσικούς πόρους (παραμετροποίηση, καταγραφή και προώθηση κατάστασης).
- **Ve-Vnfm:** VNF/EM - VNF Manager. Η συγκεκριμένη διεπαφή αναλαμβάνει τόσο τις αιτήσεις για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs όσο και την ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση των VNFs και τις παραμέτρους ρύθμισής τους.
- **Os-Ma:** OSS/BSS - NFV Management and Orchestration. Η διεπαφή αυτή αξιοποιείται για την παροχή αρκετών ειδών πληροφοριών. Ενδεικτικά αναφέρονται οι αιτήσεις των OSS/BSS για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των δικτυακών υπηρεσιών και των VNFs, η προώθηση πληροφοριών κατάστασης της αρχιτεκτονικής NFV, η ανταλλαγή πληροφοριών που αφορούν την πολιτική που ακολουθείται, καθώς και την κατάσταση της υποδομής (χωρητικότητα, ιστορικό χρήσης, κ.α.).
- **Vi-Vnfm:** Virtualised Infrastructure Manager - VNF Manager. Η διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται για αιτήσεις κατανομής πόρων από τον VNF Manager και για ανταλλαγή πληροφοριών ρύθμισης και κατάστασης των εικονικοποιημένων πόρων.
- **Or-Vnfm:** Orchestrator - VNF Manager. Η διεπαφή αυτή αξιοποιείται για αιτήματα από τον VNF Manager σχετικά με την εγκυρότητα, την εξουσιοδότηση, την κατανομή και τη δέσμευση των πόρων. Επιπρόσθετα, ο VNF Manager αποστέλλει πληροφορίες ρύθμισης των VNFs στον Ενορχηστρωτή ώστε να επιτευχθεί η άρτια διαχείριση των δικτυακών υπηρεσιών.
- **Or-Vi:** Orchestrator - Virtualised Infrastructure Manager. Η διεπαφή αυτή χρησιμοποιείται τόσο για τη δέσμευση και την κατανομή των πόρων με εντολή του Ενορχηστρωτή όσο και για την άμεση ανταλλαγή πληροφοριών κατάστασης και ρύθμισης των πόρων, δίχως δηλαδή να παρεμβάλλεται ο VNF Manager.

Σύμφωνα με το πλαίσιο του ETSI, είναι ευθύνη του VNFM να αναβαθμίσει μια VNF και να διαχειριστεί την κλιμάκωση των πόρων της. Όταν ο VNFM πρέπει να δημιουργήσει μια νέα VNF ή να προσθέσει ή να τροποποιήσει τους πόρους που είναι διαθέσιμοι σε μια VNF (π.χ. περισσότερη CPU ή μνήμη), επικοινωνεί αυτή την απαίτηση με το VIM. Με τη σειρά του, ζητά από το στρώμα εικονικοποίησης (virtualization layer) να τροποποιήσει τους πόρους που διατίθενται στο VM που φιλοξενεί τη VNF. Δεδομένου ότι ο VIM έχει ορατότητα στο απόθεμα, μπορεί επίσης να καθορίσει εάν είναι δυνατό για το τρέχον υλικό να καλύψει αυτές τις πρόσθετες ανάγκες. Το Σχήμα 4-8 δείχνει αυτή τη ροή των συμβάντων.

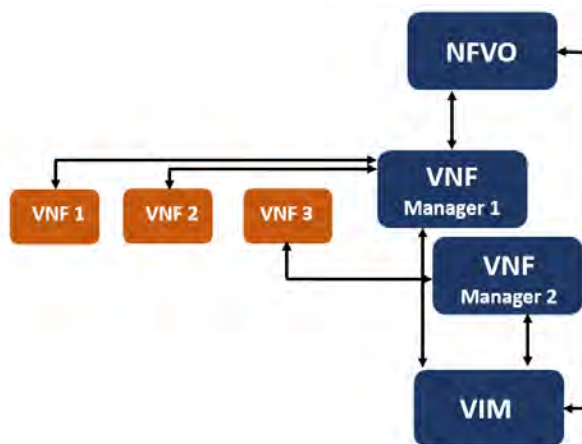


Σχήμα 4-8. Κλιμάκωση πόρων VNF από τον VNFM

Για τη διαχείριση όλων των VNFs δεν υπάρχει ο περιορισμός της διαχείρισης από έναν μόνο VNFM. Είναι πιθανό ο κατασκευαστής (vendor) που κατέχει μια VNF να έχει το δικό του VNFM για να διαχειριστεί αυτή τη VNF. Επομένως, μπορεί να υπάρξουν υλοποιήσεις NFV όπου πολλαπλοί VNFMs διαχειρίζονται πολλαπλές VNFs ή ένα μόνο VNFM διαχειρίζεται μία μόνο VNF, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-9 και 4-10.



Σχήμα 4-9. Ένας VNFM διαχειρίζεται πολλαπλές VNFs - Single VNFM Managing Multiple VNFs



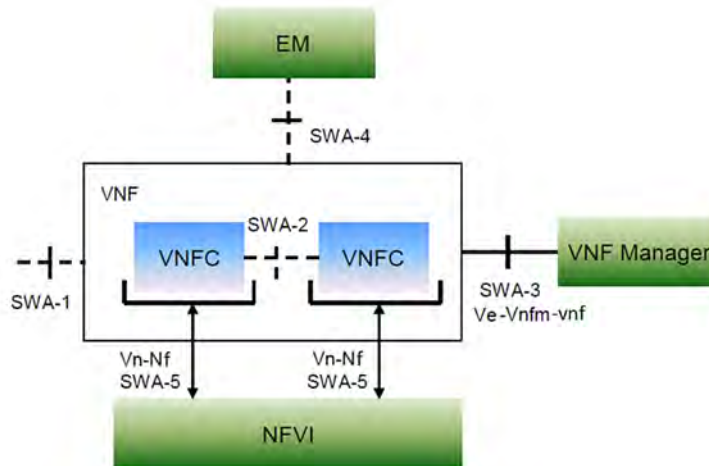
Σχήμα 4-10. Πολλαπλοί VNFMs διαχειρίζονται ξεχωριστές VNFs - Multiple VNFMs Managing Separate VNFs

Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στον τομέα της ασφάλειας της αρχιτεκτονικής NFV. Στην περίπτωση που υφίστανται οι συμβατικές δικτυακές υπηρεσίες, η επίτευξη της ασφάλειας αποτελούσε πιο εφικτό στόχο σε σύγκριση με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι φυσικές δικτυακές υπηρεσίες (Physical Network Functions, PNFs) παρέχονται ως αποτέλεσμα στενής συνεργασίας υλικού και λογισμικού, ενώ ο μοναδικός κατασκευαστής της υποδομής βρίσκεται σε θέση να ελέγξει ενδεχόμενα κενά ασφάλειας περισσότερο αποτελεσματικά. Αντίθετα, στην αρχιτεκτονική του NFV αναμένεται να συμμετέχουν πολλαπλοί κατασκευαστές των επιμέρους δομικών στοιχείων, όπως των υλικών πόρων, του επιπέδου εικονικοποίησης, των VNFs, του Διαχειριστή Εικονικοποιημένης Υποδομής (VIM), κ.ά. Σημαντικό δομικό στοιχείο για την επίτευξη ασφάλειας στην αρχιτεκτονική αποτελεί το επίπεδο εικονικοποίησης ή ο υπερ-ελεγκτής που ενδεχομένως να εισάγει επιπρόσθετες αδυναμίες ασφάλειας, καθώς διαχειρίζεται τη διαθέσιμη υποδομή. Η πιστοποίηση του υπερ-ελεγκτή από τρίτη οντότητα κρίνεται απαραίτητη για την ενίσχυση των επιπέδων ασφάλειας, ενώ απαιτείται ο συνεχής έλεγχος και η παρακολούθηση ιδιαίτερα του υπερελεγκτή ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενα κενά στην ασφάλεια του συστήματος. Παράλληλα, θα πρέπει να δοθεί προσοχή τόσο στις πολλαπλές διεπαφές που περιλαμβάνει πλέον η

νέα αρχιτεκτονική αλλά και στην εξασφάλιση της απομόνωσης των VNFs, ώστε τα εμφανιζόμενα κενά ασφάλειας να μην επηρεάζουν τις υπηρεσίες συνολικά.

### 4.3 Ανάλυση των VNFs

Σε αυτή την ενότητα προσεγγίζεται αναλυτικότερα η λειτουργία και η εσωτερική δομή των VNFs. Παρουσιάζονται τόσο το εσωτερικό τους όσο και οι διεπαφές που τους επιτρέπουν να επικοινωνούν με τις γειτνιάζουσες δομικές μονάδες. Η αναπαράσταση της περιγραφόμενης δομής φαίνεται στο Σχήμα 4-11 [118].



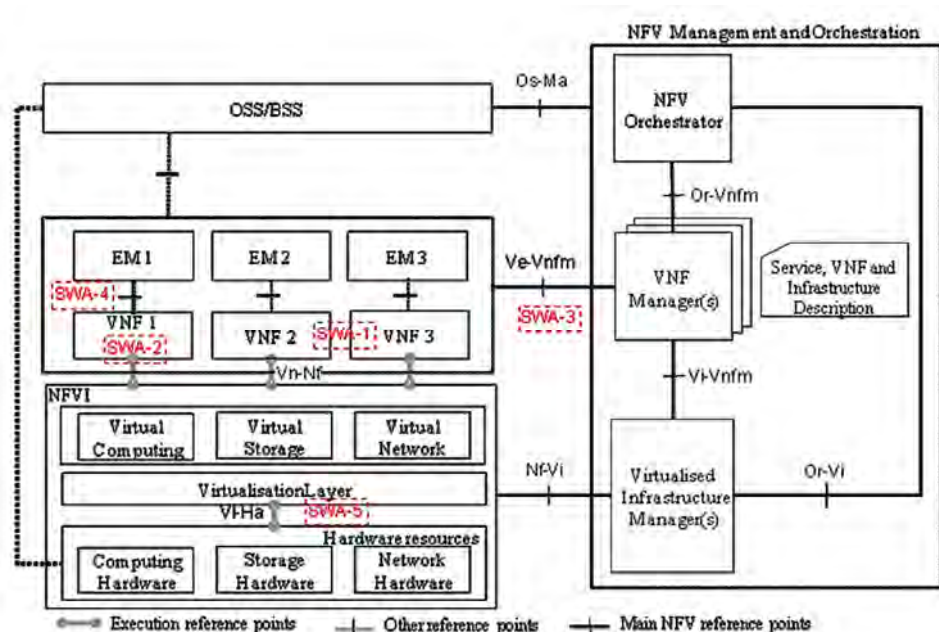
**Σχήμα 4-11: Αναπαράσταση της δομής μιας VNF και των διεπαφών της (πηγή: ETSI GS NFV-SWA 001 V1.1.1)**

Στο παραπάνω σχήμα οι διεπαφές της περιγραφόμενης VNF λαμβάνουν τα ονόματα SWA-1 έως SWA-5. Σύμφωνα με την ορολογία του 3GPP (TS 29.273), η SWA περιγράφει τη διεπαφή ανάμεσα σε έναν 3GPP AAA (Authentication, Authorization, Accounting) εξυπηρετητή και σε μια μη-αξιόπιστη, μη-3GPP, βασιζόμενη σε IP οντότητα. Γενικότερα, οι διεπαφές αυτές συνδέουν οντότητες που έχουν ορισθεί και αναγνωρίζονται από το 3GPP (VNF Manager, NFVI, κ.ά.) και οντότητες που οι λεπτομέρειες κατασκευής τους δεν είναι γνωστές με συνέπεια να χαρακτηρίζονται ως μη αξιόπιστες (VNFs). Συγκεκριμένα, οι διεπαφές είναι κατά σειρά:

- **SWA-1:** συνδέει τις VNFs είτε μεταξύ τους είτε με PNFs, αν υπάρχουν, είτε με τερματικά σημεία
- **SWA-2:** εσωτερική διεπαφή μιας VNF
- **SWA-3:** συνδέει τη VNF με τον Διαχειριστή VNF (αναφέρεται και ως Ve-Vnfm ή εδώ ως VeNf-Vnfm)
- **SWA-4:** συνδέει τη VNF με το αντίστοιχο EM
- **SWA-5:** συνδέει τα συστατικά της VNF με την NFVI (αναφέρεται και ως Vn-Nf) Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ανάλυση της εσωτερικής δομής της VNF, η οποία αποτελείται από ένα ή περισσότερα συστατικά VNF (VNF Components, VNFCs). Τα VNFCs εξαρτώνται άμεσα από τις VNFs στις οποίες ανήκουν, ενώ ο κύκλος ζωής τους είναι ίσος ή μικρότερος αυτών. Αποτελούν τα επιμέρους τμήματα στα οποία δύναται να διασπαστεί μια VNF, όπου κάθε τμήμα VNFC αναλαμβάνει μια συγκεκριμένη λειτουργία ώστε να υποστηριχθεί η παρεχόμενη υπηρεσία. Για παράδειγμα, στην υποδομή κινητής τηλεφωνίας 4<sup>ης</sup> γενιάς οι λειτουργίες των S-GW και P-GW θα μπορούσαν να υποστηριχθούν από δύο VNFCs αντίστοιχα, όντας μέρος μιας VNF. Ο τρόπος με τον οποίο κάποιος κατασκευαστής VNF αξιοποιεί τα VNFCs εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η επιδιωκόμενη απόδοση, επεκτασιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια του συστήματος, καθώς και η ολοκλήρωση με τις VNFs άλλων κατασκευαστών. Γενικά κάθε πάροχος VNF αναμένεται να χρησιμοποιήσει τα δικά του

VNFCs, τα οποία θα πρέπει να συμβάλλουν στη διατήρηση των ιδιοτήτων της λειτουργικότητας και της ατομικότητας που χαρακτηρίζει μια VNF.

Στο Σχήμα 4-12 [118] παρουσιάζεται η συνολική αρχιτεκτονική με την προσθήκη των διεπαφών SWAs.

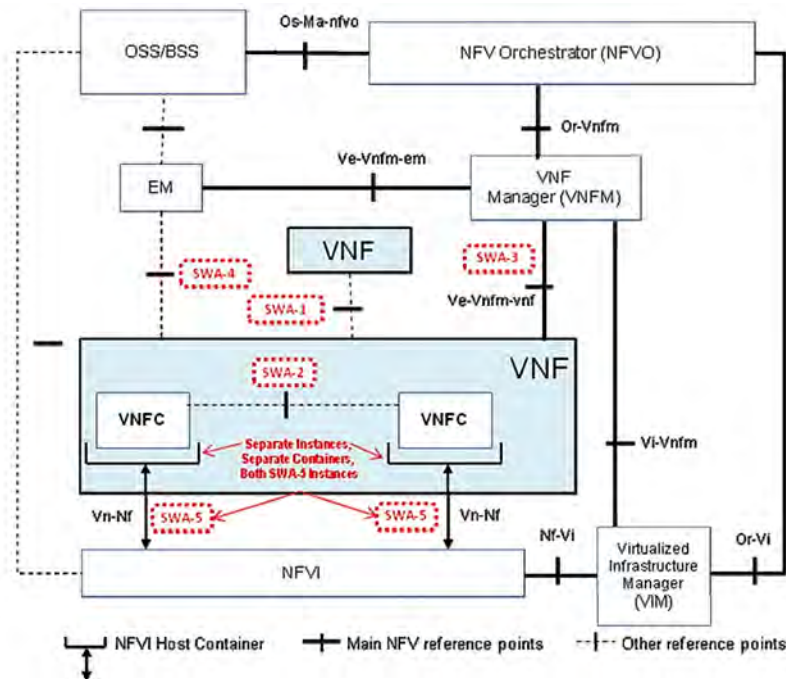


Σχήμα 4-12: Αρχιτεκτονική NFV παρουσία των διεπαφών SWAs (πηγή: ETSI GS NFV-SWA 001 V1.1.1)

Αξίζει να σημειωθεί πως η διεπαφή SWA-2 δεν υπόκειται σε απαιτήσεις για γνωστοποίηση των προδιαγραφών της, καθώς αποτελεί εσωτερική διεπαφή της VNF, καθώς συνδέει τα VNFCs μεταξύ τους. Επομένως, ο κατασκευαστής ενός VNFC δεν έχει την υποχρέωση να εξασφαλίσει τη συμβατότητα του δικού του VNFC με τα VNFCs τρίτου κατασκευαστή. Αυτή η παρατήρηση ενδεχομένως να ωθήσει τους μεγάλους κατασκευαστές δικτυακού εξοπλισμού να συμπεριλάβουν το μεγαλύτερο μέρος της αρχιτεκτονικής τους σε μια VNF που θα αποτελείται από πολλαπλά VNFCs ώστε να έχουν τη δυνατότητα απόκρυψης των εσωτερικών λεπτομερειών κατασκευής. Ωστόσο, η αξιοπιστία μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής θα υποβαθμισθεί καθώς η συγκεκριμένη VNF θα αποτελέσει μοναδικό σημείο αποτυχίας (single point of failure) του συνολικού συστήματος.

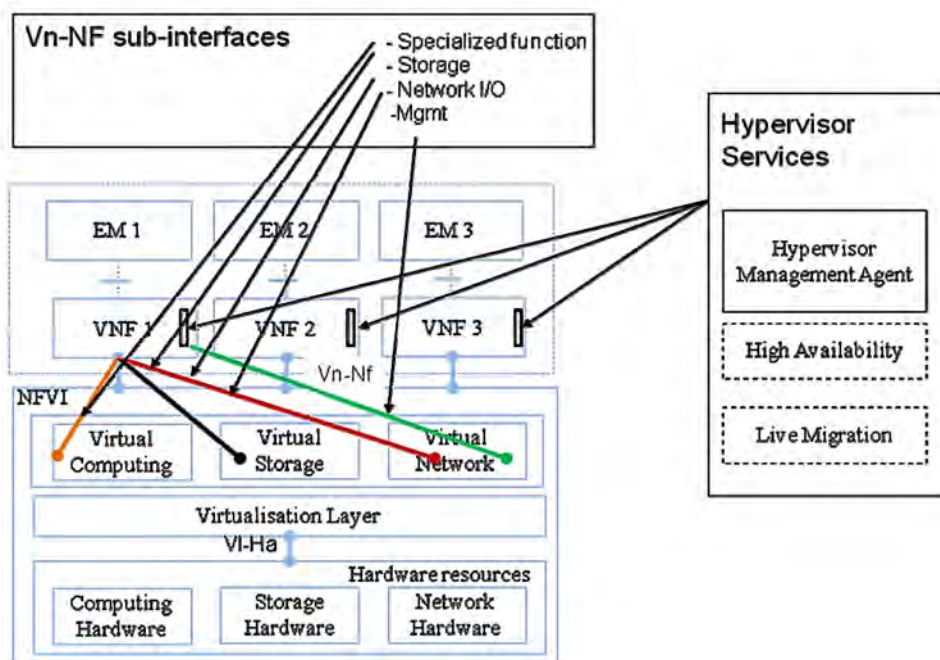
Όσον αφορά την επικοινωνία με την υποδομή, η διεπαφή SWA-5 ή Vn-Nf παρατηρείται ότι αναλαμβάνει τη διασύνδεση κάθε VNFC της VNF με την υποκείμενη NFVI. Συνεπώς, τα επιμέρους συστατικά NFV έχουν τη δυνατότητα να δεσμεύσουν πόρους με αποκλειστικότητα δίχως αυτοί να αποδοθούν στην VNF συνολικά. Η δυνατότητα αυτή δίνεται με την ύπαρξη των διεπαφών «δοχείου» (container interfaces), οι οποίες αναπαρίστανται στο Σχήμα 4-11 με τη μορφή δοχείου κάτω από τα VNFCs. Τα container interfaces παρέχουν στα αντίστοιχα VNFCs το εικονικοποιημένο περιβάλλον που δημιουργείται από την NFVI, κάτι που στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί ευθύνη των διεπαφών SWA-5. Ουσιαστικά τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν την παραμετροποίηση του εκάστοτε περιβάλλοντος που αιτούνται τα VNFCs, καθώς και τα προγραμματιστικά εργαλεία για την ανάπτυξή τους. Γενικά είναι αποδεκτό πως η αντιστοιχία των VNFCs και των container interfaces είναι 1:1. Το Σχήμα 4-13 δείχνει μια εξελισσόμενη άποψη του πλαισίου αρχιτεκτονικής NFV, παρέχοντας περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις πτυχές που σχετίζονται με την αρχιτεκτονική λογισμικού VNF. Αποσαφηνίζει επίσης το ρόλο της διεπαφής SWA-5 όπως αναφέρθηκε παραπάνω.





Σχήμα 4-13. Διεπαφές VNF και σημεία αναφοράς του αρχιτεκτονικού πλαισίου NFV (πηγή: ETSI GS NFV-SWA 001 V1.1.1)

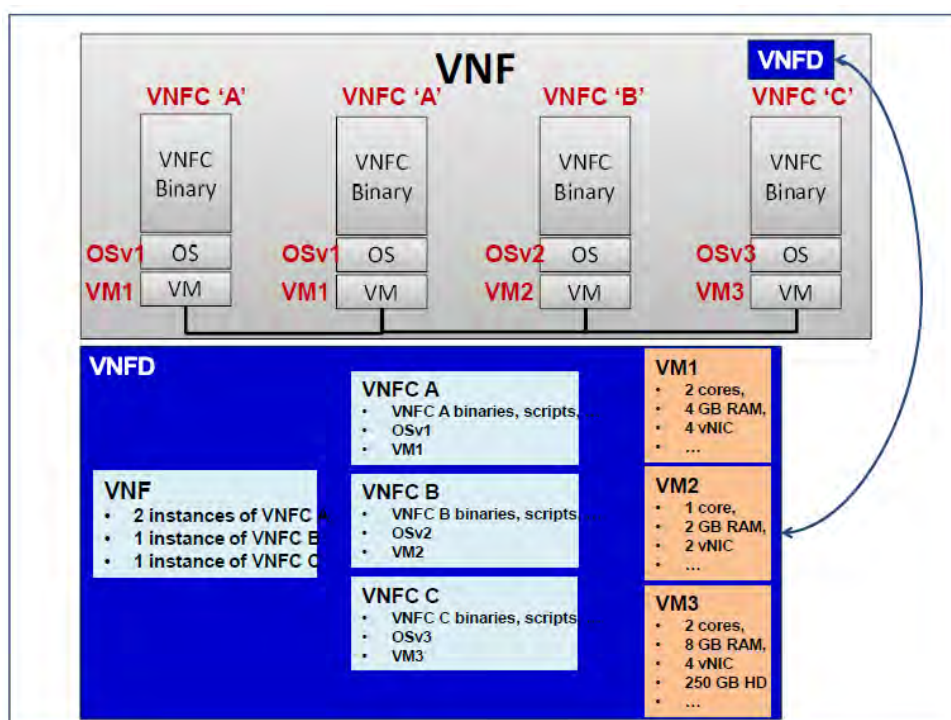
Η διεκπεραίωση κάποιας λειτουργίας προϋποθέτει τη δέσμευση πόρων από τα κατάλληλα VNFCs. Οι πόροι όπως έχουν παρουσιασθεί, ανήκουν σε τρεις κατηγορίες: εικονικοί υπολογιστικοί, εικονικοί αποθηκευτικοί και εικονικοί δικτυακοί. Για να στεφθεί με επιτυχία η δέσμευσή τους, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη τριών υπο-διεπαφών οι οποίες εξασφαλίζουν την επικοινωνία κάθε VNF (ή ενδεχομένως κάθε VNFC) με τις τρεις κατηγορίες εικονικών πόρων αντίστοιχα. Οι τρεις υπο-διεπαφές (sub-interfaces) ουσιαστικά υποκαθιστούν τη λειτουργία της SWA-5 και για το λόγο αυτό αποκαλούνται SWA-5 υπο-διεπαφές. Η διάταξη αυτή αναπαρίσταται διαγραμματικά στο Σχήμα 4-14 [118]. Αξίζει να σημειωθεί πως στο σχήμα αυτό απεικονίζεται και μια μονάδα διαχείρισης δίπλα από κάθε VNF, η λειτουργικότητα της οποίας θα μπορούσε να υποστηριχθεί και από τον VNF Manager.



Σχήμα 4-14: Αναπαράσταση των υπο-διεπαφών SWA-5 (Vn-Nf) (πηγή: ETSI GS NFV-SWA 001 V1.1.1)

Κάθε VNF λειτουργεί σε συσχέτιση με ένα δομικό στοιχείο το οποίο συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες που αφορούν τη συγκεκριμένη VNF. Το στοιχείο αυτό αποκαλείται Περιγραφέας VNF (VNF Descriptor, VNFD) και αποτελεί ουσιαστικά ένα πρότυπο που περιλαμβάνει πληροφορίες για τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της VNF. Ο ρόλος του εξαρτάται άμεσα από τον κύκλο ζωής της αντίστοιχης VNF, ενώ αποτελεί το δομικό στοιχείο που επικοινωνεί με τη μονάδα διαχείρισης της αρχιτεκτονικής NFV (NFV-MANO) ώστε να αντληθούν οι πληροφορίες κατάστασης της εκάστοτε VNF. Σε αυτές τις πληροφορίες περιλαμβάνονται και οι ανάγκες που έχει η εκάστοτε VNF σε πόρους, όπως εύρος ζώνης, καθυστέρηση, μνήμη κ.ά.

Στο Σχήμα 4-15 [118] δίνεται ένα πρότυπο παράδειγμα για το περιεχόμενο ενός Περιγραφέα. Όπως φαίνεται, το στοιχείο αυτό περιλαμβάνει για κάθε VNFC πληροφορίες για τα αρχεία, το λειτουργικό σύστημα και την έκδοσή του, καθώς και την αντιστοίχιση με την VM που το υποστηρίζει. Επιπρόσθετα, διαθέτει τις προδιαγραφές ανάπτυξης της κάθε εικονικής μηχανής σε όρους επεξεργαστικής ισχύος, μνήμης, διεπαφών, κλπ.

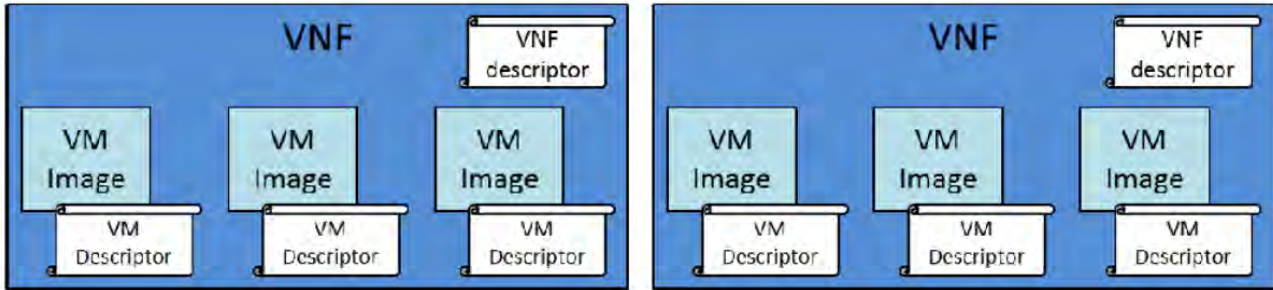


**Σχήμα 4-15: Πρότυπο παράδειγμα των πληροφοριών ενός VNF Descriptor (πηγή: ETSI GS NFV-SWA 001 V1.1.1)**

Μείζονος σημασίας είναι η επικοινωνία μεταξύ ενός VNFC με την αντίστοιχη VM που το υποστηρίζει. Ουσιαστικά η VM παρέχει στο VNFC τους απαραίτητους εικονικούς πόρους για να επιτευχθεί η άρτια λειτουργία του. Σε αυτή την κατεύθυνση, λοιπόν, κινείται και η επιλογή των τεχνολογιών μνήμης, δικτύωσης, αποθήκευσης και άλλων που θα εξασφαλίσουν την εκτέλεση των εντολών με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση. Συγκεκριμένα, για την επικοινωνία της VM με την Κάρτα Διεπαφής Δικτύου (Network Interface Card, NIC) χρησιμοποιείται ένα από τα πρωτόκολλα SR-IOV (Single Route I/O Virtualization) ή DPDK (Data Plane Development Kit). Αντίστοιχα, για την παροχή δικτυακής υποστήριξης χρησιμοποιείται είτε το Ethernet είτε το Infiniband. Η τελευταία τεχνολογία θεωρείται περισσότερο αποδοτική λόγω της απλότητας αλλά και του μικρότερου κόστους της.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε VNF αποτελείται από ένα ή περισσότερα VNFCs, τα οποία υποστηρίζονται από τα εικονικά περιβάλλοντα των VMs. Οι τελευταίες διαθέτουν κι αυτές Περιγραφέα (VM Descriptor) που περιλαμβάνει τις πληροφορίες που αφορούν κάθε Εικόνα

Εικονικής Μηχανής (VM Image), δηλαδή κάθε τρέχουσα VM. Ένα πρότυπο σχεδιάγραμμα όλων αυτών φαίνεται στο Σχήμα 4-16 [119].



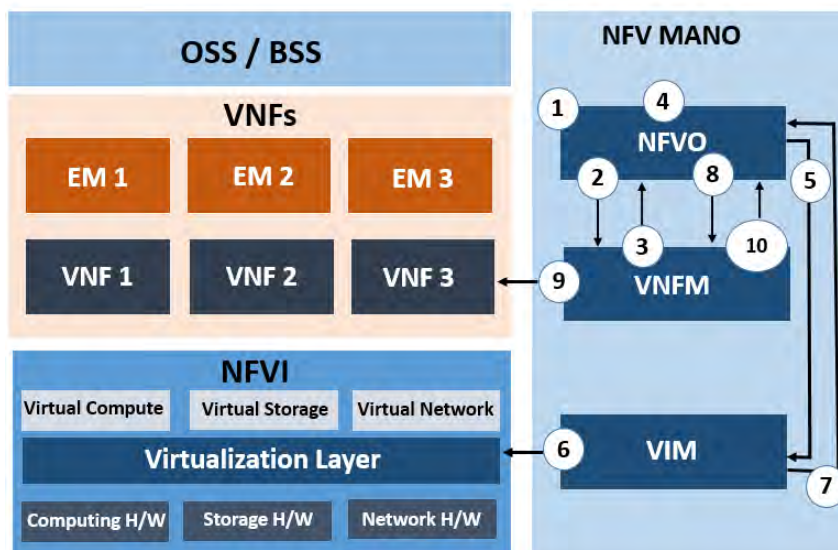
Σχήμα 4-16: Παρουσίαση της εσωτερικής δομής των VNFs με τις VM Images (πηγή: ETSI GS NFV-PER 001 v1.1.1)

Αξίζει να σημειωθεί πως σε περίπτωση που κριθεί απαραίτητη η δημιουργία μιας νέας VNF (από τις πληροφορίες κατάστασης που έχει λάβει η μονάδα διαχείρισης ή από απαίτηση των OSS/BSS), τότε συνήθως ακολουθούνται τα κατωτέρω βήματα:

- Ο NFV-MANO και ειδικότερα ένας εκ των Orchestrator ή VNF Manager αποστέλλει την κατάλληλη αίτηση στον VIM.
- Ο VIM δημιουργεί ένα κενό δοχείο εικονικοποίησης (virtualization container) με την κατάλληλη διεπαφή SWA-5 (Vn-Nf) έτοιμο να «φορτωθεί».
- Στη συνέχεια η «φόρτωση» της VNF με τα απαιτούμενα VNFCs είναι ευθύνη του παρόχου της και του τρόπου παραμετροποίησης της διαδικασίας, ενώ ο αντίστοιχος Περιγραφέας VNF ενημερώνεται με τα αρχικά δεδομένα κατάστασης από τον VNF Manager.

Με τη βοήθεια του Σχήματος 4-17 μπορούμε να δούμε πώς λειτουργεί αυτό το μοντέλο από άκρη σε άκρη (end to end - E2E), λαμβάνοντας το παράδειγμα μιας απλής υπηρεσίας δικτύου και εξετάζοντας πώς οι λειτουργικές μονάδες που ορίζονται στο πλαίσιο ETSI, αλληλεπιδρούν συλλογικά για την υλοποίηση της υπηρεσίας [116].

Το Σχήμα 4-17 παρουσιάζει μια απλοποιημένη έκδοση των σχετικών βημάτων.



Σχήμα 4-17. Ροή από άκρη σε άκρη στο πλαίσιο ETSI NFV - End-to-End Flow in the ETSI NFV Framework

Τα παρακάτω βήματα απεικονίζουν αυτήν τη διαδικασία:

- **Βήμα 1:** Ο NFVO έχει καθολική άποψη και εικόνα της τοπολογίας του δικτύου από άκρη σε άκρη

- **Βήμα 2:** Ο NFVO παράγει τα απαιτούμενα VNFs και τα γνωστοποιεί στο VNFM.
- **Βήμα 3:** Ο VNFM καθορίζει τον αριθμό των VMs που απαιτούνται καθώς και τους πόρους που θα χρειαστεί κάθε ένα από αυτά και θα επιστρέψει στο NFVO με αυτή την απαίτηση να είναι σε θέση να εκπληρώσει τη δημιουργία των VNFs.
- **Βήμα 4:** Επειδή ο NFVO έχει πληροφορίες σχετικά με τους πόρους υλικού, επικυρώνει εάν υπάρχουν αρκετοί πόροι διαθέσιμοι για τη δημιουργία των VMs. Ο NFVO πρέπει τώρα να ξεκινήσει ένα αίτημα για τη δημιουργία αυτών των VMs.
- **Βήμα 5:** Ο NFVO αποστέλλει αίτημα στο VIM να δημιουργήσει τα VMs και να διαθέσει τους απαραίτητους πόρους σε αυτά.
- **Βήμα 6:** Ο VIM ζητά από το στρώμα εικονικοποίησης (virtualization layer) να δημιουργήσει αυτά τα VMs.
- **Βήμα 7:** Μόλις δημιουργηθούν με επιτυχία τα VMs, ο VIM το γνωστοποιεί αυτό πίσω στο NFVO.
- **Βήμα 8:** Ο NFVO ειδοποιεί το VNFM ότι οι VMs που χρειάζονται είναι διαθέσιμα για να αναπτύξουν τα VNFs.
- **Βήμα 9:** Ο VNFM διαμορφώνει τα VNFs με συγκεκριμένες παραμέτρους.
- **Βήμα 10:** Μετά την επιτυχή διαμόρφωση των VNFs, ο VNFM επικοινωνεί με το NFVO ότι τα VNFs είναι έτοιμα, διαμορφωμένα και διαθέσιμα για χρήση.

Τέλος, για την καλύτερη διαχείριση της συνολικής αρχιτεκτονικής, η λειτουργικότητα του NFV-MANO ή μέρος αυτής δύναται να υποκατασταθεί από κάποια ολοκληρωμένη πλατφόρμα νέφους (cloud platform), όπως είναι το Openstack ή το Nokia Cloud Network Director. Με τον τρόπο αυτό θα επιτευχθεί πιο αποτελεσματικά η διαχείριση της υποδομής η οποία, ως μέρος του νέφους, κατατάσσεται σε μια εκ των Ιδιωτική, Κοινοτική, Δημόσια και Υβριδική Υποδομή Νέφους [120].

#### 4.4 Πεδία αξιοποίησης της τεχνολογίας NFV

Η ομάδα εργασίας του ETSI για το NFV έχει προτείνει κάποια τεχνολογικά πεδία όπου είναι εφικτή η αποτελεσματική αξιοποίηση της νέας αρχιτεκτονικής. Τα πεδία αυτά δεν αποτελούν τα μόνα προς εκμετάλλευση αλλά μπορούν να δώσουν την κατεύθυνση προς την οποία το NFV θα καταστεί πραγματικότητα και σε άλλους κλάδους. Η ETSI NFV ISG, λοιπόν, έχει εκδώσει το έγγραφο με τίτλο “NFV Use Cases” στο οποίο αναφέρει 9 περιπτώσεις αξιοποίησης του NFV [121].

**Network Functions Virtualisation Infrastructure as a Service - NFVIaaS.** Η αρχιτεκτονική του NFV προτείνεται να αξιοποιηθεί για την υποστήριξη του IaaS που αποτελεί μοντέλο εξυπηρέτησης του cloud computing. Συγκεκριμένα, η NFVI δύναται να παρέχει τις αντίστοιχες υπηρεσίες του IaaS αλλά και του NaaS στην περίπτωση που θεωρηθεί ξεχωριστό μοντέλο εξυπηρέτησης, καθώς η NFVI συνδυάζει πόρους υπολογιστικής ισχύος, αποθήκευσης και δικτύωσης. Συνεπώς, η υποδομή θα πρέπει να υποστηρίζει τόσο τις VNFs, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, αλλά και τις εφαρμογές cloud που συνήθως παρέχει η cloud infrastructure.

**Virtual Network Function as a Service - VNFaaS.** Σε αυτή την περίπτωση η αρχιτεκτονική του NFV ουσιαστικά υποκαθιστά τη λειτουργικότητα του μοντέλου εξυπηρέτησης SaaS. Για να το επιτύχει αυτό προσφέρει κατάλληλα διαμορφωμένες VNFs στον πελάτη (ενδεχομένως μια επιχείρηση), οι οποίες διεκπεραιώνουν λειτουργίες απαραίτητες στο δίκτυο πρόσβασης και στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Τέτοιες είναι η δρομολόγηση πρόσβασης (access routing), το τείχος προστασίας (firewall), η επιθεώρηση πακέτων (deep packet inspection), λειτουργίες που ενισχύουν την ασφάλεια (intrusion prevention system) και διαχειριστικές λειτουργίες. Σημειώνεται ότι η νέα υποδομή προβλέπει τη δυνατότητα ύπαρξης μονάδων οι οποίες δεν είναι εικονικοποιημένες (non-virtualized) και οι οποίες θα πρέπει να συνεργάζονται άρτια με τις ήδη εικονικοποιημένες.

**Virtual Network Platform as a Service - VNPaaS.** Όπως γίνεται αντιληπτό από την ονομασία, η αρχιτεκτονική NFV προσφέρει μια ομάδα VNFs κατάλληλα διαμορφωμένες ώστε να παρέχουν τη λειτουργικότητα του μοντέλου εξυπηρέτησης PaaS. Χαρακτηριστικό παράδειγμα

προσφερόμενης υπηρεσίας αποτελεί ένα εικονικό δίκτυο (virtual network) το οποίο παρέχεται στον πελάτη μέσα από τη συνεργασία των VNFs. Στο μέλλον, ενδεχομένως, θα είναι εφικτή και η υποστήριξη ενός IMS (IP Multimedia Subsystem) κάποιου τηλεπικοινωνιακού παρόχου. Εμφανίζεται και σε αυτή την περίπτωση η ανάγκη για σωστή διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε εικονικοποιημένες και μη-εικονικοποιημένες δομές.

**VNF Forwarding Graph - VNF FG.** Ο γράφος προώθησης για τις VNFs περιγράφηκε παραπάνω. Ωστόσο, η λειτουργικότητά του είναι ιδιαίτερος σημαντική καθώς δύναται να αξιοποιηθεί ως μια υπηρεσία. Συγκεκριμένα, υπερέχει έναντι των συμβατικών δομών και συνδέσεων σε όρους αποδοτικότητας, ανθεκτικότητας, ευελιξίας, πολυπλοκότητας και δυνατότητας ανάπτυξης με αποτέλεσμα να αποτελεί μια συνολική δομή προς εκμετάλλευση από τον πελάτη-επιχείρηση. Έχει την ευθύνη προώθησης των πακέτων, ενώ υποστηρίζει τη συνύπαρξη των PNFs και VNFs.

**Virtualisation of CDNs - vCDN.** Τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (Content Delivery Networks, CDNs) έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό την τελευταία δεκαετία εξαιτίας της εκρηκτικής αύξησης του όγκου των δεδομένων που οφείλεται κυρίως στα δεδομένα βίντεο (video data). Η αρχιτεκτονική NFV επιχειρεί την εικονικοποίηση των συστατικών στοιχείων των CDNs και κυρίως των κόμβων προσωρινής αποθήκευσης των δεδομένων (cache nodes) και των ελεγκτών CDNs (CDN controllers). Η προσαρμογή των ελεγκτών στην υποδομή του NFV θα βελτιώσει τη ροή αιτήσεων των χρηστών σε όρους καθυστέρησης, καθώς θα είναι δυνατή η εύκολη μεταφορά των controllers κοντά στους πελάτες. Επιπλέον, η εικονικοποίηση της συνολικής υποδομής θα προσφέρει βελτίωση στην κατανομή του φορτίου στα σημερινά δίκτυα και αύξηση της αντιλαμβανόμενης χωρητικότητάς τους.

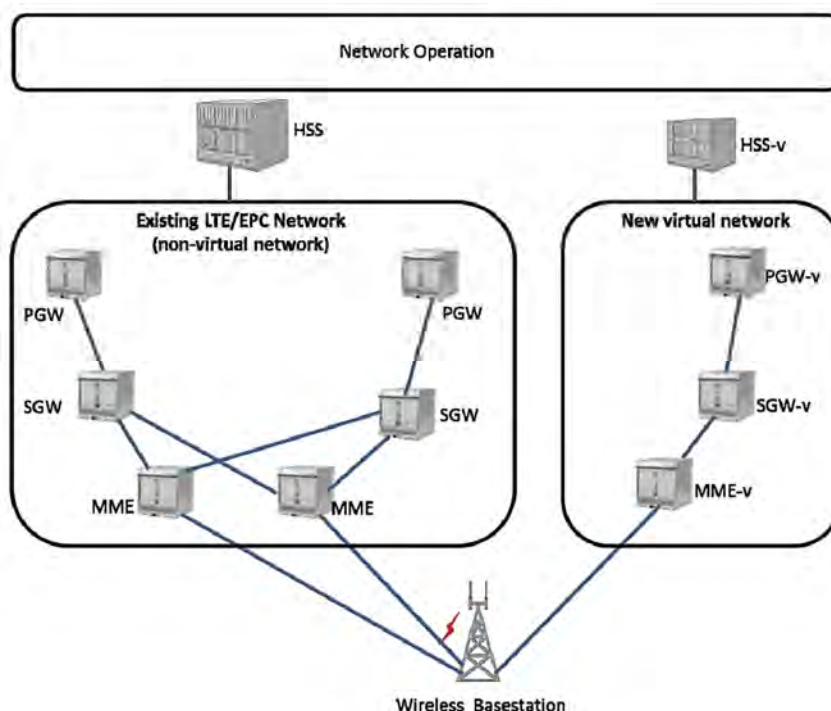
**Fixed Access Network Functions Virtualisation.** Στον κλάδο της σταθερής ευρυζωνικής πρόσβασης τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει η τεχνολογία DSL (Digital Subscriber Line) και ιδίως η ADSL2+ (Asymmetric DSL version 2+). Τα επόμενα έτη, ωστόσο, αναμένεται να εξαπλωθούν τόσο τα VDSL/VDSL2 (Very high bit rate DSL) με ταχύτητες έως περίπου 100 Mbps όσο και το G.fast με υποστηριζόμενες ταχύτητες έως 1 Gbps για μικρές αποστάσεις. Οι τεχνολογίες αυτές βασίζονται στην επέκταση της οπτικής ίνας μέχρι την καμπίνα (cabinet) και κάποιο χώρο πλησίον του συνδρομητή, αντίστοιχα. Για την ανάπτυξη των προτύπων αυτών απαιτούνται οπτικές και ηλεκτρονικές μονάδες οι οποίες θα καταστούν πολύ πιο αποδοτικές σε ενδεχόμενη εικονικοποίησή τους. Ειδικότερα, η ένταξη της λειτουργικότητας των στοιχείων αυτών στην NFVI θα εξασφαλίσει στον πάροχο της νέας υποδομής χαμηλότερο κόστος, μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στο τελευταίο τμήμα του δικτύου και πολύ καλύτερη διαχείρισή του καθώς αυτή θα μπορεί να διεξαχθεί πλήρως απομακρυσμένα. Σύγχρονες συσκευές που είναι εφικτή η υποκατάστασή τους από την αρχιτεκτονική NFV είναι η ONU (Optical Network Unit), το OLT (Optical Line Terminal), το DSLAM (Digital Subscriber Line Access Terminal) κ.ά.

**Virtualisation of the Home Environment.** Τα τελευταία χρόνια οι πλατφόρμες που παρέχονται στις οικίες για δικτυακές υπηρεσίες πολλαπλασιάζονται, καθώς έχουν αυξηθεί κατακόρυφα οι παρεχόμενες υπηρεσίες πολυμέσων. Μάλιστα οι τελευταίες χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια και συχνά απαιτούν διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης (λόγου χάρη δορυφορική, καλωδιακή τηλεόραση, IP-TV κλπ). Η τεχνολογία NFV αναμένεται να αξιοποιηθεί στη διαχείριση του συνόλου των ετερογενών αυτών πλατφορμών, εικονικοποιώντας τις λειτουργίες εκείνες που λαμβάνουν χώρα στην οικία του πελάτη. Παραδείγματα αυτών αποτελούν η οικιακή πύλη (residential GW) με λειτουργίες όπως η δρομολόγηση IP, το DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) κ.ά. και το κουτί ρύθμισης (setup box) που περιέχει λειτουργίες σχετικές με τις προτιμήσεις του συνδρομητή καθώς και δυνατότητες εγγραφή βίντεο κλπ.

**Virtualisation of Mobile Base Station.** Με τον όρο εικονικοποίηση του σταθμού βάσης που υποστηρίζει κινητές συσκευές γίνεται αναφορά σε όλες τις γενιές κινητής τηλεφωνίας (2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> γενιά). Η αύξηση του όγκου κίνησης στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τα τελευταία χρόνια έχει

δημιουργήσει την ανάγκη περισσότερο εύρωστων δομών που θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν τα δίκτυα νέας γενιάς. Για το λόγο αυτό προτείνεται είτε η πλήρης εικονικοποίηση της υποδομής πρόσβασης αναπτύσσοντας το C-RAN (Cloud ή Centralized Radio Access Network) είτε η μερική εικονικοποίηση κάποιων δομικών στοιχείων. Στην πρώτη περίπτωση δύναται να ενταχθούν στην NFVI οι λειτουργίες μεταγωγής, εξισορρόπησης φορτίου και η μονάδα βασικής ζώνης (BaseBand Unit, BBU), ενώ στη δεύτερη μπορούν να εικονικοποιηθούν οι κωδικοποιητές/αποκωδικοποιητές, ο ελεγκτής πρόσβασης μέσου (Medium Access Control, MAC), ο ελεγκτής ραδιοπόρων (Radio Resource Control, RRC) κ.ά.

**Virtualisation of Mobile Core Network and IMS.** Σαν τελευταία περίπτωση εξετάζεται η εικονικοποίηση του δικτύου κορμού κινητής τηλεφωνίας, καθώς και το υποσύστημα πολυμέσων βασισμένο στο πρωτόκολλο IP (IMS) που έχει αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία. Γενικά δύναται να υποστηριχθεί η ταυτόχρονη ύπαρξη εικονικοποιημένων και μη-εικονικοποιημένων δομικών στοιχείων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-18.



**Σχήμα 4-18.** Συνύπαρξη εικονικοποιημένης και μη-εικονικοποιημένης υποδομής δικτύου κορμού κινητής τηλεφωνίας νέας γενιάς (EPC) (πηγή: ETSI GS NFV 001 v1.1.1)

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το δίκτυο κορμού κινητής τηλεφωνίας νέας γενιάς (Evolved Packet Core, EPC) στη συμβατική μη-εικονικοποιημένη εκδοχή του και στην αντίστοιχη εικονικοποιημένη. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι εικονικοποιημένες δομικές μονάδες του να παρέχουν την ίδια ακριβώς λειτουργικότητα με τις συμβατικές, δηλαδή με την Οντότητα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity, MME), την Πύλη Εξυπηρέτησης (Serving Gateway, S-GW) και την Πύλη Δικτύου Πακέτων Δεδομένων (Packet data network Gateway, P-GW). Στο δίκτυο κορμού ανήκει ακόμη και η Λειτουργία για τους Κανόνες Πολιτικής και Χρεώσεων (Policy and Charging Rules Function, PCRF). Στο Σχήμα 4-18 συμπεριλαμβάνεται επίσης και ο Εξυπηρετητής των Οικείων Συνδρομητών του δικτύου (Home Subscriber Server, HSS).

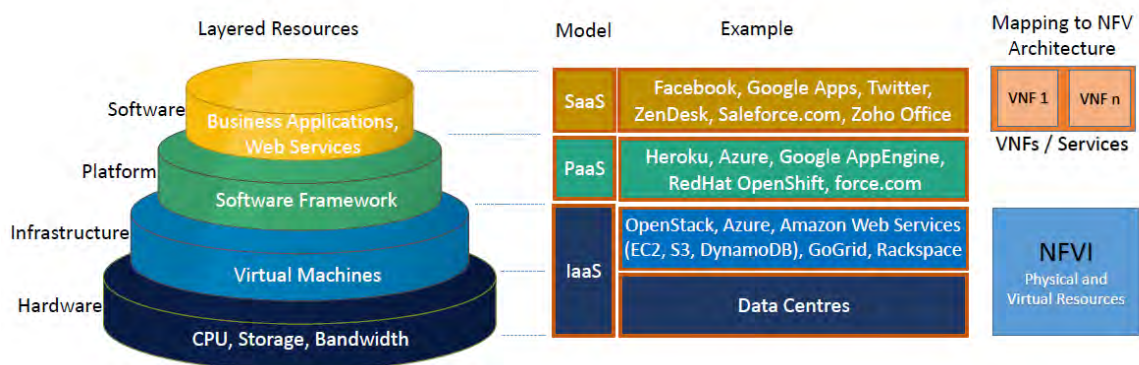
#### 4.5 NFV & Business Model

Η τεχνολογία Virtualization εξαλείφει την εξάρτηση μεταξύ μιας NF (Network Function) με το απαραίτητο εξειδικευμένο hardware για την υλοποίηση της - όπως συμβαίνει στα παραδοσιακά φυσικά δίκτυα - δημιουργώντας ένα περιβάλλον εκτέλεσης και διαχείρισης των interfaces για τις VNFs (Virtual Network Functions). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διαμοιρασμό της φυσικής

υποδομής (hardware) από διαφορετικές VNFs με την μορφή των Virtual Machines (VMs). Επιπλέον, η συγκέντρωση της συνολικής φυσικής υποδομής (hardware) ευνοεί τον μαζικό και εύκολο διαμοιρασμό της NFV υποδομής, σχηματίζοντας τους πόρους NFVI (Network Function Virtual Infrastructure), φαινόμενο που παρατηρείται και στο Cloud Computing.

Στο Σχήμα 4-19, έχουμε χαρτογραφήσει τα μοντέλα υπηρεσίας στο cloud σε μέρος της αρχιτεκτονικής NFV. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το IaaS αντιστοιχεί τόσο στους φυσικούς όσο και στους εικονικούς πόρους του NFVI, ενώ οι υπηρεσίες και οι VNFs στο NFV είναι παρόμοιες με το μοντέλο υπηρεσιών SaaS στο υπολογιστικό νέφος.

Όπως και με τις υπηρεσίες του Cloud Computing, η τεχνολογία NFV δημιουργεί επιχειρηματικά μοντέλα και ευκαιρίες αντίστοιχα των IaaS, PaaS και SaaS του Cloud. Για παράδειγμα, ο πάροχος μιας VNF δεν είναι απαραίτητο να είναι ιδιοκτήτης της VNF υποδομής που απαιτείται για την υλοποίηση και τη λειτουργία της VNF [122].



**Σχήμα 4-19. Μοντέλο Υπηρεσιών Cloud Computing και αντιστοίχισή τους στην αρχιτεκτονική του NFV (πηγή: R. Mijumbi et al., 2015) [114]**

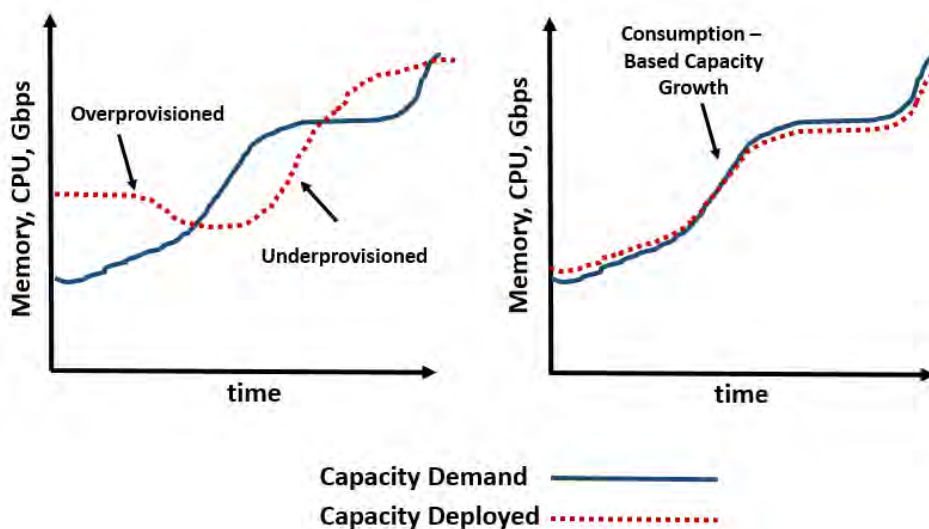
Η τεχνολογία Network Virtualization, έρχεται να διαχωρίσει το ρόλο των παραδοσιακών ISPs (Internet Service Providers) και να δημιουργήσει δύο νέα επιχειρηματικά πεδία ανεξάρτητα μεταξύ τους: α) τους Infrastructure Providers (**InPs**), οι οποίοι διαχειρίζονται τη φυσική υποδομή του δικτύου (servers, storage, computing) και τους β) Service Provides (**SPs**) ή Mobile Virtual Network Operators (**MVNO**), οι οποίοι δημιουργούν εικονικά δίκτυα (Virtual Networks) συναθροίζοντας πόρους από διαφορετικούς InPs και προσφέρουν end-to-end υπηρεσίες. Πιο συγκεκριμένα [114] [123]:

- **InPs:** Οι InPs εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους φυσικούς πόρους του δικτύου, με τη μορφή data centers και φυσικών δικτύων. Πάνω σε αυτούς τους πόρους, υλοποιούνται οι εικονικοί πόροι οι οποίοι προσφέρονται σε διαφορετικούς SPs μέσω ενός προγραμματιζόμενου interface. Επίσης οι InPs, μπορούν να αποφασίσουν με ποιο τρόπο θα διατεθούν οι διαθέσιμοι διαμοιραζόμενοι πόροι στους SPs. Ένας InP μπορεί να χρησιμοποιεί δημόσια data centers όπως αυτά που χρησιμοποιεί η Amazon ή ιδιωτικούς servers όπως διάφοροι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι. Αν ένας InP δεν είναι ικανός να προσφέρει τους απαραίτητους πόρους σε έναν SP για να υλοποιήσει την υπηρεσία του, μπορούν να γίνουν συμφωνίες έτσι ο SP να λαμβάνει πόρους από 2 διαφορετικούς InPs προκειμένου να συμπληρώσει τον απαιτούμενο αριθμό πόρων, δημιουργώντας έτσι multi-domain VNFs.
- **SPs - MVNO:** Οι πάροχοι υπηρεσιών νοικιάζουν πόρους από πολλαπλούς InPs προκειμένου να δημιουργήσουν και να εγκαταστήσουν εικονικά δίκτυα, χρησιμοποιώντας τους διαμοιραζόμενους πόρους που τους δόθηκαν για να προσφέρουν στους πελάτες τους end-to-end υπηρεσίες. Κάθε εικονικό δίκτυο αποτελείται από εικονικούς κόμβους οι οποίοι συνδέονται με virtual links. Ένας εικονικός κόμβος είναι ένα στοιχείο λογισμικού που εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης. Ένα virtual link είναι μια λογική σύνδεση μεταξύ 2 εικονικών κόμβων, η οποία διαθέτει δυνατότητα να αλλάζει με δυναμικό τρόπο τις ιδιότητες της. Κάθε εικονικός κόμβος

φιλοξενείται σε ένα φυσικό κόμβο ενώ κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα εικονικά δίκτυα, διαμοιράζοντας τους πόρους τους σε άλλους SPs δίνοντας τους την εικόνα ότι πρόκειται για έναν εικονικό InP. Ένας SP μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε άλλους SPs. Ακόμη οι πάροχοι υπηρεσιών προσφέρουν υλοποιήσεις software για NFs. Σε επόμενη ενότητα θα περιγράψουμε τη λειτουργία του Network Slicing δίνοντας περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας των virtual networks και το ρόλο των MVNO.

#### 4.6 Τα οφέλη του NFV

Η ανάπτυξη με βάση την κατανάλωση εξασφαλίζει ότι οι πόροι του δικτύου αυξάνονται σε στενή συσχέτιση με τη ζήτηση. Με τη χρήση του παραδοσιακού εξοπλισμού δικτύου, η ανάπτυξη του δικτύου σημειώθηκε με άλματα, με αποτέλεσμα την κατά περιόδους άνω των προβλέψεων (overprovisioned) και αργότερα κάτω των προβλέψεων (underprovisioned) ικανότητα (χωρητικότητα) των δικτύων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-20. Η χρήση του NFV αποτρέπει την σπατάλη χρόνου και πόρων δημιουργώντας δίκτυα όπου οι πόροι που θα απαιτούνται θα καθορίζονται από τις ανάγκες των υπηρεσιών κάθε στιγμή [116].



Σχήμα 4-20. Ανάπτυξη χωρητικότητας δικτύων με βάση την κατανάλωση

Η εκμετάλλευση του NFV δε θα επιφέρει μόνο μείωση στα λειτουργικά κόστη των operators αλλά και επιπρόσθετα έσοδα από τις νέες υπηρεσίες που θα αναπτυχθούν. Επιπλέον, πολύ σημαντική θα είναι η συνεισφορά του NFV στην υποδομή των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας καθώς ο τομέας του Mobile Computing θα προσελκύσει περισσότερα έσοδα την επόμενη δεκαετία σε σχέση με τους desktop computers. Μερικά από τα πλεονεκτήματα του NFV συνοψίζονται παρακάτω [124]:

- Επιτυγχάνεται η μείωση των λειτουργικών εξόδων (Operating Expenses, OPEX) μέσω της αυτοματοποίησης, της εύκολης αναβάθμισης και της επεκτασιμότητας (scalability) που παρέχονται, υλοποιώντας τις δικτυακές λειτουργίες από VMs. Χαρακτηριστικό είναι πως σήμερα απαιτούνται από 2 εβδομάδες έως 2 μήνες για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και περίπου 6 μήνες για την αξιοποίηση των νέων υποδομών [125]. Οι χρόνοι αυτοί (time to market) αναμένεται να μειωθούν εντυπωσιακά με την υλοποίηση της νέας τεχνολογίας.
- Μειώνεται η πολυπλοκότητα των συστημάτων και αξιοποιούνται αποδοτικότερα οι πόροι των δικτύων (συσκευές, εύρος ζώνης, ενέργεια κ.ά.).
- Η τεχνολογία NFV, επιτρέπει τον διαμοιρασμό των δικτυακών πόρων μεταξύ διαφορετικών VNFs με πολύ πιο εύκολο και προσαρμοστικό τρόπο, ενώ οι πόροι που ανατίθενται σε κάθε VNF μπορεί να αναδιανέμονται με δυναμικό τρόπο. Αυτή η δυνατότητα, ανοίγει το δρόμο για τη δημιουργία εξειδικευμένων υπηρεσιών με βάση τις απαιτήσεις των πελατών.



- Υλοποιείται άμεσα η μετατροπή μιας συσκευής σε άλλη, καθώς όλες οι λειτουργίες πλέον διεξάγονται σε servers και συγκεκριμένα σε virtual machines που είναι εύκολα διαχειρίσιμες από απόσταση (remote management).
- Δίνεται η δυνατότητα να αντικατασταθούν διάφορες συμβατικές συσκευές (routers, switches, NATs, firewalls, load-balancers, RANs, MMEs κ.ά.) από συμβατικούς servers (x86) γενικού σκοπού.
- Η επιτακτική ανάγκη για διαρκώς αυξανόμενους υπολογιστικούς πόρους δύναται να ικανοποιηθεί με την εκκίνηση νέων VMs προσφέροντας με απλό τρόπο την επιδιωκόμενη επεκτασιμότητα.
- Το NFV θα επιτρέψει στους χρήστες να βιώσουν την εμπειρία του back-end (ποιότητα υπηρεσιών που είναι εφάμιλλη με εκείνη των data centers) με την ταυτόχρονη ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων.
- Οι operators θα έχουν τη δυνατότητα να μετασχηματίσουν τις λειτουργίες των OSS/BSS, οι οποίες σήμερα είναι πολύπλοκες, προσφέροντας νέες προσωποποιημένες υπηρεσίες στους χρήστες, βελτιώνοντας τους τρόπους χρέωσης και τιμολόγησης, ενώ ο χρόνος απόκτησης των υπηρεσιών θα μειωθεί στο ελάχιστο. Όλα αυτά θα οδηγήσουν στη δημιουργία νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας (value added services) από τους παρόχους.
- Πλέον η συντήρηση του δικτυακού εξοπλισμού θα γίνεται άμεσα και απομακρυσμένα, ενώ θα αυξηθούν τα επίπεδα ασφάλειας των δικτύων θωρακίζοντάς τα απέναντι στις επιθέσεις DDoS (Distributed-Denial-of-Service).
- Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του NFV είναι το γεγονός πως υποστηρίζει την ετερογένεια των παρατάξεων που θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων της 5<sup>ης</sup> γενιάς. Η τεχνολογία αυτή εξαλείφει τους περιορισμούς που προκύπτουν από την ανάγκη ιδιοκτησίας εξειδικευμένου hardware για την υποστήριξη υπηρεσιών.
- Τέλος, η τεχνολογία NFV είναι συμβατή με παλιότερες συσκευές και τεχνολογίες και συνεπώς, η υιοθέτησή της δύναται να διεξαχθεί σταδιακά.

Σε διεθνές επίπεδο έχει γίνει κατανοητό πως το NFV είναι ικανό να αλλάξει τη δομή και τη λειτουργία των σημερινών δικτύων, ενώ αναμένεται από κοινού με το Software Defined Networking (SDN) να αποτελέσουν ένα από τα επόμενα Megatrends του κλάδου των ICT παίζοντας πολύ σημαντικό ρόλο στα δίκτυα 5G. Η ανάγκη για real time υπηρεσίες, για online και on-demand υπηρεσίες και γενικότερα η ικανοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του 5G πιέζει προς την κατεύθυνση της αλλαγής του τρόπου με τον οποίο σχεδιάζουμε τα δίκτυα. Το NFV θα παίζει καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς τόσο όσο αφορά το Δίκτυο Κορμού (EPC) όσο και το RAN. Επιπρόσθετα, η αξιοποίηση του NFV ενδεχομένως μεταβάλλει τις ισορροπίες στον ευρύτερο κλάδο των Τηλεπικοινωνιών. Κι αυτό διότι το NFV δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για τη δυναμική επέκταση μικρών εταιρειών καθώς η ευελιξία τους στην εκμετάλλευση νέων τεχνολογιών σε επίπεδο λογισμικού τους δίνει συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις εταιρίες κολοσσούς του κλάδου.

## 5. SOFTWARE DEFINED NETWORKS

### Εισαγωγή

Τα σημερινά δίκτυα εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων και των απαιτήσεων από την πλευρά των χρηστών και των υπηρεσιών, είναι αρκετά πολύπλοκα και δύσκολα στη διαχείρισή τους. Αυτά τα δίκτυα διαθέτουν πολλά είδη εξοπλισμού, όπως δρομολογητές (routers), μεταγωγείς (switches), τείχη προστασίας (firewalls), μεταφραστές διεύθυνσης δικτύου (NAT), εξισορροπιστές φορτίου διακομιστή (server load balancers) συστήματα ανίχνευσης εισβολών (intrusion detection systems) κ.α. Οι διαχειριστές των δικτύων έχουν πλέον αυξημένες απαιτήσεις που αφορούν την εγκαθίδρυση και παραμετροποίηση του δικτυακού περιβάλλοντος. Παράλληλα, οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές αποδεικνύεται ότι καθιστούν δύσκολη οποιαδήποτε καινοτομία, καθώς επίσης και τις διαδικασίες διαχείρισης και παραμετροποίησης των δικτυακών συσκευών. Επιπλέον, οι κατασκευαστές - προμηθευτές (vendors) των δικτυακών συσκευών προσφέρουν κλειστά πρωτόκολλα και λογισμικές διεπαφές (software interfaces) για την επικοινωνία μεταξύ του Επιπέδου Ελέγχου (Control Plane) και του Επιπέδου Δεδομένων (Data Plane) των συσκευών. Παρόλο που ορισμένα εργαλεία διαχείρισης δικτύων προσφέρουν ένα κεντρικό πλεονέκτημα για τη διαμόρφωση του δικτύου, τα συστήματα αυτά εξακολουθούν να λειτουργούν στο επίπεδο μεμονωμένων πρωτοκόλλων, μηχανισμών και διεπαφών διαμόρφωσης περιορίζοντας τους διαχειριστές τους, οι οποίοι εγκλωβίζονται στη χρήση αυτών των πρωτοκόλλων τα οποία δεν υποστηρίζονται από όλους τους κατασκευαστές, αφού δεν είναι προτυποποιημένα. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας επιβραδύνει την καινοτομία, αυξάνει την πολυπλοκότητα και διογκώνει τόσο το κόστος αγοράς (CAPEX) όσο και το κόστος λειτουργίας ενός δικτύου (OPEX).

### 5.1 Οι περιορισμοί των παραδοσιακών δικτύων.

Είναι πλέον φανερό ότι ικανοποίηση των σημερινών απαιτήσεων της αγοράς είναι σχεδόν αδύνατη με τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων. Οι απαιτήσεις για κινητικότητα και εύρος ζώνης ολοένα αυξάνονται. Οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές δικτύων δεν έχουν σχεδιαστεί για να ικανοποιούν τις σημερινές απαιτήσεις των χρηστών, των επιχειρήσεων και των φορέων. Έτσι, οι σχεδιαστές δικτύων αντιμετωπίζουν ποικίλους περιορισμούς, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται οι παρακάτω:

#### Η πολυπλοκότητα οδηγεί στη στάση

Η τεχνολογία δικτύωσης μέχρι και σήμερα, έχει σχεδιαστεί κυρίως από πρωτόκολλα, τα οποία είναι προορισμένα για τη σύνδεση μεταξύ υπολογιστών, ανεξαρτήτως αποστάσεων, ταχύτητας σύνδεσης και τοπολογίας. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πρωτόκολλα δικτύωσης τα οποία παρέχουν ευρύτερη συνδεσιμότητα και αυστηρότερη ασφάλεια, υψηλότερη απόδοση και αξιοπιστία, αλλά κάθε ένα από αυτά έχει σχεδιαστεί για να επιλύει ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Αυτά τα δεδομένα έχουν οδηγήσει σε έναν από τους βασικότερους περιορισμούς των σημερινών δικτύων: την πολυπλοκότητα. Η εισαγωγή ή μετακίνηση οποιασδήποτε συσκευής, προϋποθέτει την ενασχόληση εξειδικευμένου προσωπικού, με όλο τον εξοπλισμό, ανανέωση των λιστών ελέγχου πρόσβασης (ACL), VLANs, ποιότητας των υπηρεσιών (QoS) και άλλων μηχανισμών. Έτσι, τα σημερινά δίκτυα παραμένουν σχετικά στατικά, για την αποφυγή του κινδύνου διατάραξης των υπηρεσιών.

Αυτή η στατική κατάσταση των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών δικτύων έρχεται σε αντιδιαστολή με τη δυναμική φύση των σημερινών περιβάλλοντων εξυπηρετητών. Η τεχνολογία της εικονικοποίησης έχει διαφοροποιήσει ριζικά την οπτική των νέων αρχιτεκτονικών. Πριν την εικονικοποίηση, οι εφαρμογές βρίσκονταν σε έναν μοναδικό εξυπηρετητή και αντάλλασσαν κίνηση με επιλεγμένους πελάτες. Σήμερα, οι εφαρμογές κατανέμονται σε πολλαπλές εικονικές μηχανές (VMs), οι οποίες ανταλλάσσουν ροές κίνησης, μεταξύ τους.

Σήμερα, πολλές επιχειρήσεις λειτουργούν δίκτυα για φωνή, δεδομένα, βίντεο και άλλες υπηρεσίες. Οι διαχειριστές όμως αυτών των δικτύων θα πρέπει να διαμορφώσουν κάθε εξοπλισμό

ξεχωριστά, ανάλογα με τον κατασκευαστή, καθώς η παροχή των πόρων και η διαμόρφωση των συσκευών γίνονται κατά βάση χειροκίνητα.

### **Ασυνεπείς πολιτικές**

Η πολυπλοκότητα των υπάρχοντων δικτύων καθιστά πολύ δύσκολη την εφαρμογή ενός συνόλου πρόσβασης, ασφάλειας, QoS και άλλων πολιτικών και αυτό καθιστά τις επιχειρήσεις ευάλωτες σε κινδύνους ασφάλειας. Για την εφαρμογή μίας ευρείας πολιτικής στο δίκτυο απαιτείται η διαμόρφωση χιλιάδων συσκευών και μηχανισμών, διαδικασία που είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα.

### **Αδυναμία κλιμακωσιμότητας**

Οι διαχειριστές των δικτύων αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην βελτιστοποίηση μεγάλων εγκαταστάσεων όπως μεγάλα κέντρα δεδομένων, ευρείας γεωγραφικής έκτασης δίκτυα και μεγάλα δίκτυα επιχειρήσεων. Ωστόσο, το δίκτυο γίνεται ολοένα και πιο σύνθετο με την προσθήκη χιλιάδων συσκευών δικτύωσης, οι οποίες πρέπει να διαμορφωθούν και να τεθούν υπό διαχείριση. Το IT για την κλιμάκωση του δικτύου βασίζεται σε αναμενόμενα πρότυπα κίνησης. Ωστόσο, στα σύγχρονα εικονικοποιημένα κέντρα δεδομένων, τα πρότυπα κίνησης είναι εξαιρετικά δυναμικά και συνεπώς απρόβλεπτα. Η ύπαρξη πολλαπλών πελατών σε ένα μοναδικό στιγμιότυπο εφαρμογής (multi – tenancy) σημαίνει ότι το δίκτυο θα πρέπει να εξυπηρετεί ομάδες χρηστών με διαφορετικές εφαρμογές και διαφορετικές ανάγκες για απόδοση. Κάποιες λειτουργίες όπως η καθοδήγηση των ροών κίνησης ενός πελάτη, για την παροχή παραμετροποιημένου ελέγχου απόδοσης, ή η παράδοση κατά απαίτηση, είναι εξαιρετικά σύνθετες, χρονοβόρες, κοστοβόρες και εξειδικευμένες ως προς την υλοποίηση τους στα υπάρχοντα δίκτυα.

### **Εξάρτηση από κατασκευαστές**

Η σωστή και αποδοτική παραμετροποίηση των δικτυακών συσκευών δεν είναι απλή υπόθεση καθώς αυτές προέρχονται από διάφορους κατασκευαστές. Η εκάστοτε συσκευή έχει εκ φύσεως συγκεκριμένο τρόπο ρύθμισης. Επίσης, αναλόγως τον κατασκευαστή επιτρέπεται έλεγχος με διαφορετικό τρόπο σε κάθε στοιχείο που την απαρτίζει αφού συνήθως δεν υπάρχει κάποια ανοιχτή διεπαφή (vendor lock in). Συνεπώς ένας διαχειριστής πρέπει να ξέρει τον τρόπο παραμετροποίησης για κάθε συσκευή από κάθε κατασκευαστή.

Στις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές δικτύων, κάθε δικτυακή συσκευή αποτελεί ένα αυτόνομο στοιχείο. Εσωτερικά της, για λόγους οργάνωσης και απόδοσης, οι απαιτούμενοι μηχανισμοί ήταν σχεδιασμένοι και υλοποιημένοι σε διακριτές ομάδες με βασικότερες αυτές που αφορούσαν τις λειτουργίες προώθησης των δεδομένων (**forwarding/data plane**), τις λειτουργίες διαχείρισης (**management**) καθώς και τις λειτουργίες ελέγχου (**control**) [126].

#### **Data Plane**

Κάθε δικτυακή συσκευή υλοποιεί τοπικά το Επίπεδο Προώθησης Δεδομένων, το οποίο πραγματοποιεί λειτουργίες όπως (i) προώθηση πακέτων, (ii) αντιστοίχιση διευθύνσεων IP προορισμού με βάση το μέγιστο κοινό πρόθεμα (Longest Common Prefix - LCP), και (iii) εφαρμογή Λίστας Ελέγχου Πρόσβασης (Access - Control Lists - ACLs).

#### **Control Plane**

Το control plane αποτελεί το κομμάτι του δικτύου που μεταφέρει την σηματοδότηση και είναι υπεύθυνο για την διαμόρφωση και διαχείριση του τρόπου λειτουργίας του Data Plane. Το Επίπεδο Ελέγχου καθορίζει τη μέθοδο προώθησης των πακέτων, κάνοντας χρήση κατάλληλων αλγορίθμων. Με τον τρόπο αυτό το Επίπεδο Ελέγχου κάθε συσκευής είναι ικανό να λάβει αποφάσεις σχετικά με τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το κάθε πακέτο.

#### **Management Plane**

Μέρος του management plane, είναι οι ενέργειες που αφορούν την διαχείριση ενός δικτύου δεδομένων και επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας των άλλων διαστάσεων. Το κύριο μοντέλο αναφοράς για την διαχείριση είναι το **FCAPS** (Fault, Configuration, Accounting, Performance,

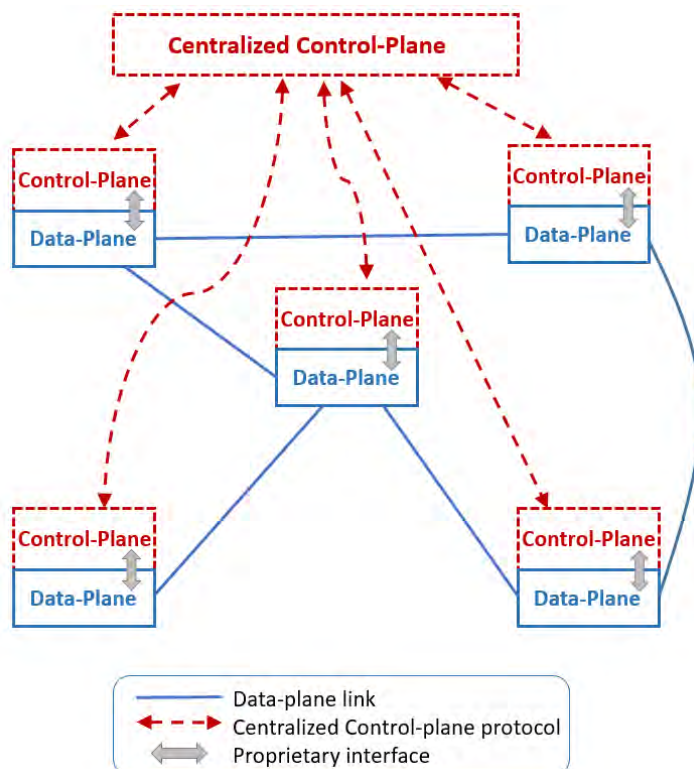
Security - Διαχείριση Βλαβών/Λαθών, Διαχείριση Διάρθρωσης, Λογιστική Διαχείριση, Διαχείριση επιδόσεων, Διαχείριση ασφαλείας).

Όλοι οι παραπάνω περιορισμοί έχουν οδηγήσει τους μηχανικούς δικτύων στην προσπάθεια εύρεσης νέων τεχνολογιών και την ανάπτυξη λύσεων για τη βελτίωση της παρούσας αρχιτεκτονικής των δικτύων.

Μελετώντας λοιπόν τα προαναφερθέντα προβλήματα των υαρχόντων δικτύων καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως μια ποιοτική και ουσιαστική αναβάθμιση είναι επιτακτική για την καλύτερη λειτουργία των δικτύων και την καλύτερη παροχή υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Μια τέτοια αναβάθμιση και προοπτική ανάπτυξης στον τομέα των δικτύων προσφέρουν τα Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό (SDN - Software Defined Networks) καθώς έχουν αλλάξει τελείως τον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε και ελέγχουμε τα δίκτυα και τις ροές πληροφοριών που διακινούνται με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών και πιο ασφαλή επικοινωνία μεταξύ των μελών ενός δικτύου. Το βασικό, χαρακτηριστικό που κάνει το SDN ιδιαίτερα δημοφιλές είναι η ικανότητα του να καθιστά το δίκτυο προγραμματίσιμο.

## 5.2 Δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό (SDN)

Την τελευταία δεκαετία, άρχισαν να κερδίζουν έδαφος προσεγγίσεις που προωθούσαν την αποσύζευξη (decoupling) του επιπέδου ελέγχου με αυτό της προώθησης δεδομένων. Στην κυριαρχούσα κεντροποιημένη αρχιτεκτονική επιπέδου ελέγχου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5-1, υπάρχει μια κεντρική οντότητα που υπαγορεύει τον τρόπο προώθησης των πακέτων στο δίκτυο. Το δίκτυο προγραμματίζεται με την χρήση μιας ομάδας εντολών που έχει ως σκοπό την εισαγωγή ροών που χρησιμοποιούνται από το επίπεδο προώθησης πακέτων των συσκευών. Με αυτό τον τρόπο η διαχείριση και η λειτουργία των δικτυακών συσκευών γίνεται απλούστερη, σε αντιδιαστολή με αυτές των κεντρικών οντοτήτων ελέγχου που συγκεντρώνουν την πολυπλοκότητα.



Σχήμα 5-1. Κεντροποιημένο επίπεδο ελέγχου

Παράλληλα με το διαχωρισμό λειτουργιών ελέγχου και προώθησης δεδομένων άρχισε να προωθείται και ο ορισμός ανοιχτών/προτυποποιημένων (open/standardized) διεπαφών, κατά αντιστοιχία με αυτές που είχαν ήδη δημιουργηθεί στα λειτουργικά συστήματα υπολογιστών. Συμπερασματικά, η μεταφορά του ελέγχου σε προσβάσιμες υπολογιστικές συσκευές, διαδικασία

που στο παρελθόν πραγματοποιούνταν αυτόνομα σε κάθε δικτυακή συσκευή, δίνει την δυνατότητα σε εφαρμογές και υπηρεσίες δικτύου να έχουν μια αφαιρετική εποπτεία για την υποκείμενη δικτυακή υποδομή, αντιμετωπίζοντας την σαν μια λογική οντότητα.

Η ιδέα των δικτύων καθοριζόμενων από λογισμικό (SDN - Software Defined Networks) αποτελεί μία δικτυακή αρχιτεκτονική κατά την οποία η διαχείριση των αποφάσεων για την δρομολόγηση λαμβάνεται από ένα κεντρικό σημείο διαχείρισης, τον controller. Το SDN μπορεί να ερμηνευτεί ως μία αρχιτεκτονική αρχή, όπου ο έλεγχος (control) και η διαχείριση των δικτύων κεντροκοπούνται και αποσυνδέονται από το επίπεδο των δεδομένων (data), καθιστώντας το δίκτυο προγραμματίσιμο.

Ας δώσουμε εδώ τον ορισμό για το τι είναι SDN με βάση τον οργανισμό IETF (Internet Engineering Task Force). Με βάση λοιπόν το RFC 7426, SDN ορίζεται: *Μια νέα προσέγγιση στον δικτυακό προγραμματισμό όπου δίνεται η δυνατότητα αρχικοποίησης, ελέγχου και δυναμικής διαχείρισης των δικτυακών συσκευών μέσω ανοιχτών διεπαφών, σε ένα πλαίσιο δημιουργίας δικτύων (framework) όπου υφίσταται φυσικός διαχωρισμός του επιπέδου ελέγχου - **Control Plane** από το επίπεδο προώθησης - **Forwarding Plane**.* [127]

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, η SDN αρχιτεκτονική αποσυνδέει τον έλεγχο από το πεδίο των δεδομένων και παρέχει ένα νέο μοντέλο διαστρωμάτωσης. Το ONF (Open Networking Foundation) έχει αναλάβει τη διαδικασία της προτυποποίησης των βασικών συστατικών της SDN αρχιτεκτονικής. Ένα από αυτά τα πρότυπα είναι το OpenFlow, το οποίο θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Οι “πυλώνες” στους οποίους δομείται αυτή η νέα ιδέα είναι: (α) ο χωρισμός των επιπέδων δεδομένων και ελέγχου, (β) η χρήση ροών δεδομένων αντί για διευθύνσεις προορισμού για τη λήψη αποφάσεων προώθησης, (γ) η λογική του ελέγχου μεταφέρεται σε μία εξωτερική οντότητα, τον ελεγκτή (SDN controller) που τρέχει ένα δικτυακό λειτουργικό σύστημα και (δ) το δίκτυο είναι προγραμματιζόμενο μέσα από εφαρμογές λογισμικού που τρέχουν στο λειτουργικό σύστημα του δικτύου και αλληλοεπιδρούν με τις συσκευές του δικτύου, που πλέον χωρίς καμία “ευφυΐα” αποτελούν απλές συσκευές προώθησης.

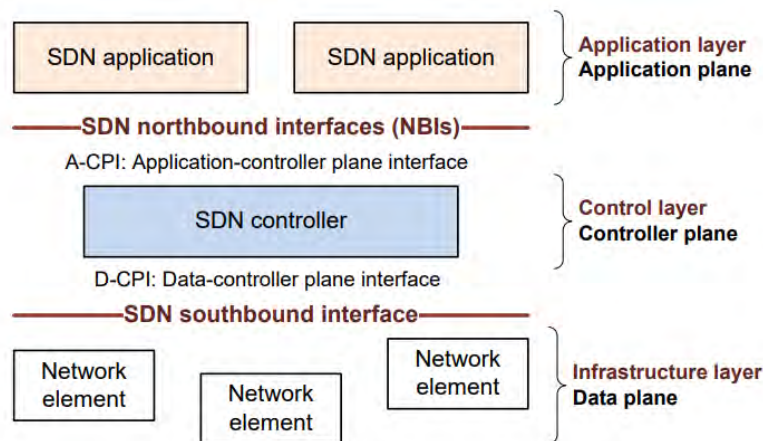
Οι ιδέες πίσω από τα Δίκτυα Καθοριζόμενα από Λογισμικό δεν είναι νέες, αλλά αποτέλεσμα προηγούμενων ερευνητικών θεμάτων, όπως τα ενεργά δίκτυα ή η ανάπτυξη του πρωτοκόλλου OpenFlow που προηγήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Stanford.

Η αρχιτεκτονική SDN απαρτίζεται από τρία επίπεδα [128] :

**1. επίπεδο εφαρμογών (application layer)**

**2. επίπεδο ελέγχου (control layer)**

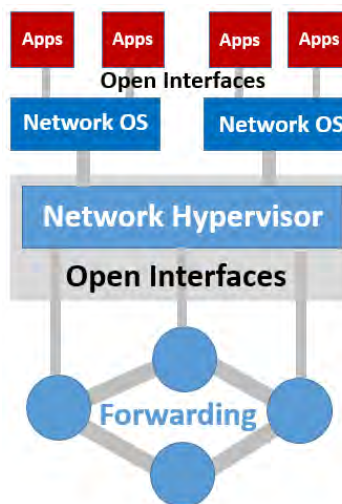
**3. επίπεδο υποδομής (infrastructure layer),** καθώς και από τις Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών (APIs), οι οποίες παρέχουν τα απαραίτητα εργαλεία επικοινωνίας, μεταξύ των επιπέδων (Σχήμα 5-2).



Σχήμα 5-2. Τα βασικά στοιχεία του SDN (πηγή: ONF TR-502) [128]

Αυτή η αρχιτεκτονική και η διευθέτηση του ελέγχου και της διαχείρισης του δικτύου παρέχουν τη δυνατότητα κεντρικοποίησης της κατάστασης και της ευφυίας του, σε ένα μόνο τμήμα του. Έτσι, βελτιώνεται η ιδιότητα της προγραμματιστικότητας του δικτύου. Επιπλέον, επιταχύνεται η δημιουργικότητα και η εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών και υπηρεσιών. Με την κεντρικοποίηση, το SDN απλοποιεί την τροφοδοσία των πολιτικών διαχείρισης, ενώ ταυτοχρόνως βελτιστοποιεί την απόδοση και τη διακριτότητά τους. Έτσι, το SDN μπορεί να καταστήσει τα δίκτυα περισσότερο κλιμακώσιμα και ευέλικτα. Η SDN αρχιτεκτονική διαχωρίζει το υλικό από το λογισμικό, το πεδίο ελέγχου από το πεδίο δεδομένων και τη φυσική από τη λογική διαμόρφωση [129].

Το SDN μοντέλο επιπέδων μπορεί ακόμη να προσαρμοστεί, με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο διαφοροποιημένο σχήμα. Σε αυτή την περίπτωση, προστίθεται ένα επιπλέον επίπεδο στο μοντέλο και ο ελεγκτής των ελεγκτών (Network Hypervisor) αναλαμβάνει το λογικό τεμαχισμό του δικτύου (slicing). Πιο συγκεκριμένα, ο Hypervisor επιτρέπει σε κάθε ανεξάρτητο ελεγκτή να ελέγχει μόνο ένα υποσύνολο υπολογιστών (φυσικούς ή εικονικούς) στο δίκτυο, χωρίς να έχει τη δυνατότητα να επηρεάζει άλλα τμήματα του δικτύου (Σχήμα 5-3). Σε επόμενη ενότητα θα περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας του τεμαχισμού δικτύου.



Σχήμα 5-3: SDN Αρχιτεκτονική με Hypervisor

### 5.3 Δομή του SDN

Η αρχιτεκτονική των δικτύων SDN περιγράφεται από μία δομή τριών επιπέδων όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 5-2: επιπέδου υποδομής, επιπέδου ελέγχου και επιπέδου εφαρμογών [129]. Παρουσιάζονται και αναλύονται με λεπτομέρεια, τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας του κάθε επιπέδου [128]:

#### 1. Επίπεδο υποδομής (Infrastructure Layer)

Σε αυτό το επίπεδο βρίσκεται όλο το υλικό (δικτυακές συσκευές όπως δρομολογητές, μεταγωγείς κ.α.) και υλοποιείται η φυσική διασύνδεσή του. Στις συσκευές υλικού εκτελείται λογισμικό, το οποίο παρέχει μία διεπαφή ελέγχου του επιπέδου δεδομένων (Data-controller plane interface, Southbound API). Αυτή η διεπαφή χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με το ανώτερο επίπεδο, δηλαδή το επίπεδο ελέγχου. Οι δικτυακές συσκευές εκτελούν τον ρόλο της προώθησης των πακέτων στο δίκτυο ανάλογα τις πληροφορίες και τις εντολές που λαμβάνουν από τον SDN controller.

#### 2. Επίπεδο ελέγχου (Control Layer)

Αποτελεί το πιο σημαντικό επίπεδο της αρχιτεκτονικής. Σε αυτό το επίπεδο, υπάρχει ένας ελεγκτής (controller), ο οποίος επικοινωνεί με όλες τις δικτυακές συσκευές της υποδομής παρακολουθώντας παράλληλα και την τοπολογία. Το επίπεδο ελέγχου SDN (Control Layer) είναι μια λογική κεντροποιημένη πλατφόρμα η οποία είναι υπεύθυνη για την εξυπηρέτηση των

απαιτήσεων του επιπέδου εφαρμογών SDN και επιπλέον είναι επιφορτισμένη με την παροχή πληροφοριών προς το επίπεδο εφαρμογών SDN σχετικά με την κατάσταση του δικτύου. Τέτοιες πληροφορίες είναι π.χ. στατιστικά στοιχεία και γεγονότα που συμβαίνουν.

### 3. Επίπεδο εφαρμογών (Application Layer)

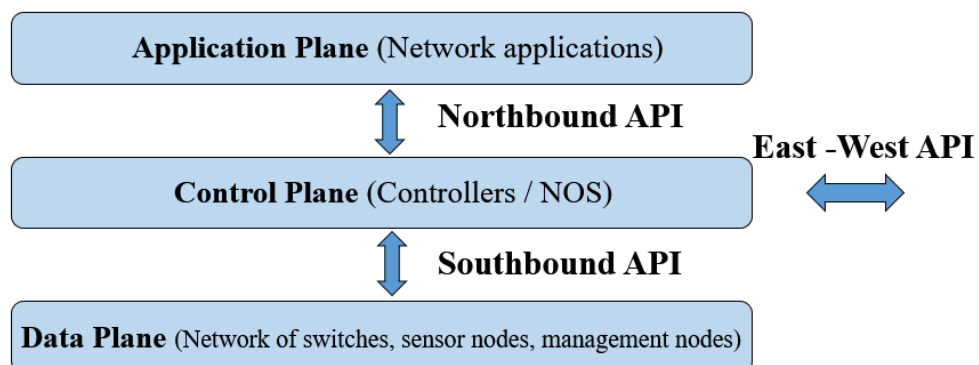
Στο επάνω μέρος του Σχήματος 5-4 παρατηρούμε το επίπεδο των εφαρμογών SDN. Οι εφαρμογές SDN (Apps στο Σχήμα 5-3) είναι προγράμματα που άμεσα και προγραμματιστικά επικοινωνούν με την πλατφόρμα ελέγχου SDN (SDN controller) μέσω των βόρειων διεπαφών (Northbound Interfaces - NBIs) για να ικανοποιήσουν τις όποιες δικτυακές ανάγκες έχουν. Επιπροσθέτως οι εφαρμογές αυτές καταναλώνουν πολλές φορές πόρους του υπάρχοντος δικτύου για να ικανοποιήσουν εσωτερικές λειτουργίες στην κατεύθυνση της λήψης αποφάσεων.

Αποτελεί επίσης το επίπεδο, όπου ορίζονται όλα τα χαρακτηριστικά, οι υπηρεσίες και οι πολιτικές. Επιπλέον, μπορούν να εισάγουν χαρακτηριστικά από άκρο-σε-άκρο και να παίρνουν αποφάσεις, με βάση τις αλλαγές στο δίκτυο. Κάθε φορά που αλλάζει η τοπολογία του δικτύου, κάποιο χαρακτηριστικό ή κάποια πολιτική, οι εφαρμογές μπορούν να αλλάξουν δυναμικά τη συμπεριφορά του δικτύου, από ένα μοναδικό σημείο. [130]

Μεταξύ αυτών των τριών επιπέδων υπάρχουν οι Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών (APIs), οι οποίες παρέχουν τα απαραίτητα εργαλεία επικοινωνίας:

- Το **Northbound API (Application-controller plane interface, A-CPI)** παρέχεται από τον ελεγκτή και οι εφαρμογές πρέπει να διαχειριστούν την επικοινωνία τους μαζί του, μέσω αυτής της διεπαφής.
- Το **Southbound API (Data-controller plane interface, D-CPI)** είναι ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ του ελεγκτή και των δικτυακών συσκευών.
- Το **Eastbound** και το **Westbound API** εμφανίζονται στην κατακεκολλημένη SDN αρχιτεκτονική και στις λειτουργίες τους περιλαμβάνονται η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των ελεγκτών, ορισμένες δυνατότητες παρακολούθησης και ενημέρωσης και η υλοποίηση αλγόριθμων συνοχής δεδομένων.

Αν θέλουμε να κοιτάξουμε τώρα στο πως επικοινωνούν τα επίπεδα του SDN μεταξύ τους, θα πρέπει πρώτα να έχουμε ορίσει τα layers των Southbound και Northbound API's. Το Northbound Interface είναι μια διεπαφή που επιτρέπει σε ένα στοιχείο του δικτύου, να επικοινωνεί με ένα στοιχείο υψηλότερου επιπέδου. Αντίστοιχα το Southbound Interface είναι μια διεπαφή που επιτρέπει σε ένα στοιχείο του δικτύου, να επικοινωνεί με ένα στοιχείο χαμηλότερου επιπέδου. Ως παραδείγματα τέτοιων στοιχείων μπορούμε να θεωρήσουμε ένα router και τον ελεγκτή του δικτύου. Πιο αναλυτικά, το Southbound Interface είναι ένα πρότυπο που καθορίζει τον τρόπο όπου ο ελεγκτής του SDN επικοινωνεί με το επίπεδο όπου τα δεδομένα κινούνται, για να κάνει αλλαγές στο δίκτυο ώστε να εξυπηρετεί καλύτερα τις ανάγκες του δικτύου. Ενώ από την άλλη το Northbound Interface είναι ο τρόπος που ο ελεγκτής επικοινωνεί με εφαρμογές και υπηρεσίες που τρέχουν πάνω στο δίκτυο. Όλες οι διεπαφές απεικονίζονται στο Σχήμα 5-4.



Σχήμα 5-4. Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών (APIs)

## Νότιο τμήμα - Southbound API - D-CPI

Το πρωτόκολλο OpenFlow που θα μελετήσουμε παρακάτω, είναι μία Southbound διεπαφή, η οποία πραγματοποιεί τη σύνδεση μεταξύ του ελεγκτή και των συσκευών προώθησης, όπως των μεταγωγέων. Οι πρόσφατες βελτιώσεις στην SDN αρχιτεκτονική προτείνουν την ύπαρξη ενός Επιπέδου Αφαίρεσης Υπηρεσιών (SAL) ή ενός hypervisor, σε αυτό το νότιο τμήμα, ώστε ο ελεγκτής και τα πρωτόκολλα να αναπτύσσονται, χωρίς να επηρεάζουν το ένα το άλλο.

## Βόρειο τμήμα - Northbound API - A-CPI

Όλα τα είδη των εφαρμογών (middleboxes) που θέλουν να αλληλεπιδράσουν με τον ελεγκτή και το υποκείμενο δίκτυο ή την κίνηση του δικτύου, μπορούν τυπικά να σχεδιαστούν σε αυτό το τμήμα. Οι σχετιζόμενες με το SDN προγραμματιστικές γλώσσες, όπως η Pyretic και η Frenetic επικοινωνούν με τον ελεγκτή, μέσω του βόρειου τμήματος.

## Ανατολικό και δυτικό τμήμα - Eastbound & Westbound API

Τόσο το δυτικό όσο και το ανατολικό τμήμα χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η διαχείριση της κατανεμημένης SDN αρχιτεκτονικής. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές, πιθανές κατανεμημένες SDN αρχιτεκτονικές που μπορούν να υλοποιηθούν. Οι ελεγκτές έχοντας την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους, μπορούν να διαμοιράζονται κοινές εργασίες με αποτέλεσμα ο φόρτος να είναι δυνατόν να κατανέμεται σε νέα στιγμιότυπα των ελεγκτών, σε πραγματικό χρόνο, με βάση τις ανάγκες σε πόρους, την κατανάλωση ενέργειας κτλ.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μέσω της Southbound διεπαφής πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ των Επιπέδων Ελέγχου και Προώθησης, με τη χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων. Κάποια από τα πιο αντιπροσωπευτικά πρωτόκολλα, εκτός του openflow που θα περιγράψουμε στην επόμενη ενότητα, είναι:

- **ForCES:** Το πρωτόκολλο Forwarding and Control Element Separation (ForCES [131]) προτάθηκε ως μία προσέγγιση για τον πλήρη διαχωρισμό των Επιπέδων Ελέγχου και Προώθησης. Ακόμη, περιλαμβάνει ένα μοντέλο για την προδιαγραφή της πληροφορίας που ανταλλάσσεται μεταξύ των Στοιχείων Ελέγχου (Control Elements – CE) και των Στοιχείων Προώθησης (Forwarding Element – FE). Συνεπώς, είναι δυνατός ο καθορισμός Λογικών Λειτουργικών Δομών (Logical Function Blocks – LFBs), στοχεύοντας στην περιγραφή των συσκευών, των δυνατοτήτων τους, και των δικτυακών ‘γεγονότων’ που παράγουν.
- **NETCONF/YANG:** Το Network Configuration Protocol (NETCONF [132]) παρέχει μηχανισμούς για την εγκαθίδρυση, μεταχείριση και διαγραφή παραμέτρων των δικτυακών συσκευών. Οι εν λόγω διαδικασίες πραγματοποιούνται μέσω κλήσεων σε απομακρυσμένες διαδικασίες (Remote Procedure Calls - RPC), κωδικοποιώντας την πληροφορία με βάση το πρότυπο XML. Ταυτόχρονα, έχει αναπτυχθεί η γλώσσα YANG [133] για τη μοντελοποίηση των πληροφοριών, των παραμέτρων και των εντολών που ανταλλάσσονται μέσω του πρωτοκόλλου NETCONF.
- **PCEP:** Στην αρχιτεκτονική του Path Computation Element (PCE) [134], ορίζεται μία οντότητα, ικανή να υπολογίσει διαδρομές-μονοπάτια τα οποία μπορεί να ακολουθήσει μία υπηρεσία (ή ένα σύνολο υπηρεσιών). Η αρχιτεκτονική αυτή αναπαριστά μία οπτική των δικτύων, όπου ο υπολογισμός διαδρομών, η από-άκρο-σε-άκρο σηματοδότηση, και η προώθηση των πακέτων, είναι τρεις τελείως διαχωρισμένες διαδικασίες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Path Communication Protocol (PCEP) [135], το οποίο χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ ενός Path Computation Client (PCC) και ενός PCE, ή πολλαπλών PCEs.
- **OpFlex:** Το πρωτόκολλο OpFlex [136], παρουσιάστηκε από τη Cisco και υλοποιεί μία δηλωτική μέθοδο ελέγχου, για τη μεταφορά και επιβολή πολιτικών από έναν Ελεγκτή Πολιτικών, σε ένα σύνολο έξυπνων συσκευών, ικανών να κατανοήσουν και να υλοποιήσουν τις πολιτικές αυτές. Στην πραγματικότητα μοιάζει αρκετά με εργαλεία όπως το Puppet [137] ή το



CFEngine [138], μέσω των οποίων είναι δυνατή η χρήση δηλωτικών γλωσσών για την παραμετροποίηση πόρων εξυπηρετητών.

## 5.4 Το πρωτόκολλο Openflow

Το πρωτόκολλο OpenFlow (OF) έχει λανθασμένα συνδεθεί με το SDN θεωρώντας ότι αποτελεί κύριο συστατικό του. Για να αποσαφηνιστεί αυτό, θα λέγαμε ότι είναι η νότια διεπαφή (Southbound API) που επιτρέπει να επικοινωνεί ο ελεγκτής με το επίπεδο της υποδομής [139] [140].

Το πρωτόκολλο OpenFlow αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Stanford στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2008. Είναι ένα έργο ανοικτού κώδικα (open source), το οποίο αποσκοπεί στο να προσφέρει ένα εύκολα προγραμματιζόμενο και ανοικτό περιβάλλον δικτύωσης για τη δοκιμή και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών, μεθόδων και αλγορίθμων δρομολόγησης και ασφάλειας δικτύου [141]. Η ιδέα βασίζεται στο ότι τα περισσότερα switches έχουν πίνακες από εγγραφές ροής δεδομένων (π.χ. NAT, QoS). Το SDN συνδέθηκε με το OpenFlow πρωτόκολλο, για απομακρισμένη επικοινωνία με τα στοιχεία του network plane με σκοπό τον καθορισμό της δρομολόγησης των πακέτων του δικτύου μέσω των network switches.

Παρακάτω θα περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας και τις απαιτήσεις που προκύπτουν σε ένα openflow switch δηλαδή σε μια συσκευή δικτύου η οποία συνεργάζεται με το πρωτόκολλο openflow [142].

Τα κύρια συστατικά του πρωτοκόλλου Openflow είναι:

- Ο OF ελεγκτής (OF controller)
- Οι OF μεταγωγείς με τα εξής στοιχεία:
  - Θύρες
  - Το κανάλι OF
  - Πίνακες από ροές

### 5.4.1 Openflow ελεγκτής (controller)

Ο διαχωρισμός του Control από το Data plane επιτρέπει τον έλεγχο των συσκευών μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow, παρέχοντας ένα αδιάσπαστο, κεντρικοποιημένο περιβάλλον προγραμματισμού και ελέγχου των δικτυακών συσκευών. Ο Controller είναι κατά ένα τρόπο, ένα Λειτουργικό Σύστημα για το δίκτυο όπου η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και των εφαρμογών διέρχονται από εκείνον, χρησιμοποιώντας το υπερκείμενο (Northbound) Interface. Διευθύνει και επιβλέπει όλες τις μεταφορές δεδομένων (μέσω των Southbound APIs) που γίνονται στις συσκευές δικτύου (switches) και φροντίζει για την εξυπηρέτηση των απαιτήσεων των εφαρμογών (μέσω των Northbound APIs) που βρίσκονται σε υψηλότερο επίπεδο. Κάποιες από τις βασικές διεργασίες που είναι υπεύθυνοι οι ελεγκτές να υλοποιούν είναι για παράδειγμα η καταγραφή και αποθήκευση πληροφοριών για το ποιες δικτυακές συσκευές είναι συνδεδεμένες και ποιους σκοπούς εξυπηρετούν, η συλλογή στατιστικών δεδομένων κ.α. Επίσης είναι αυτοί που προσθέτουν και αφαιρούν εγγραφές ροής απ' τον πίνακα ροής.

Γενικά ο Controller χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που συλλέγει ή παράγει ο ίδιος για νέες ροές και γεγονότα που συμβαίνουν στο δίκτυο το οποίο ελέγχει, ώστε να ανανεώνει την οπτική που έχει για το δίκτυο, κάθε στιγμή. Για τον λόγο αυτό, όλοι οι Controllers βασίζουν τη λειτουργία και τις αποφάσεις τους σε δικτυακά γεγονότα (events). Σαν γεγονός, χαρακτηρίζεται κάθε τι που θα συμβεί στο δίκτυο που ελέγχει ο OF Controller και το οποίο μπορεί να έχει ενδιαφέρον για κάποια από τις εφαρμογές του.

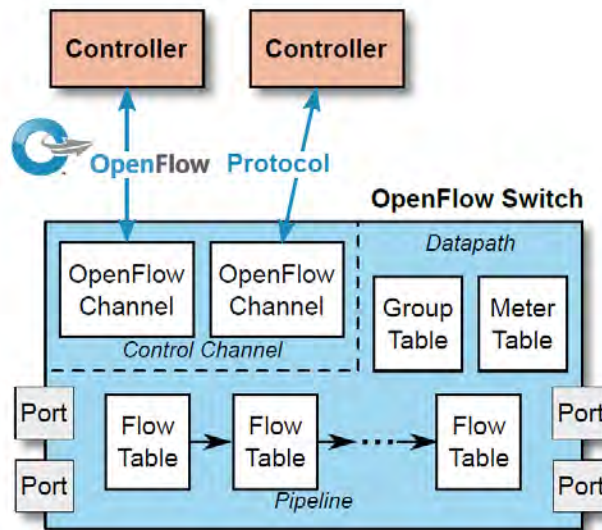
Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί αρκετές πλατφόρμες ελεγκτών όπως είναι η NOX, POX, Floodlight, Beacon, Maestro, Ryu, Trema, Opendaylight, αλλά και αρκετές ακόμα. Από τους προαναφερθέντες ελεγκτές:

- ο NOX είναι γραμμένος σε γλώσσα C,
- ο Trema σε Ruby,

- οι POX και Ryu σε Python και
- οι Floodlight, Maestro, Beacon και OpenDaylight σε Java.

#### 5.4.2 Openflow μεταγωγέας (OF switch)

Ο μεταγωγέας OpenFlow, περιέχει έναν ή περισσότερους πίνακες ροών (flow tables), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση και προώθηση των πακέτων, μέσω ενός ασφαλούς διαύλου επικοινωνίας (secure channel) προς έναν OpenFlow Controller [143]. Στο Σχήμα 5-5 βλέπουμε ένα OpenFlow logical Switch.



Σχήμα 5-5. Βασικά στοιχεία ενός Openflow μεταγωγέα. (πηγή: ONF TS-025)

Ένας μεταγωγέας openflow (openflow logical switch) αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

- **Flow and Group Tables**

Ένα openflow switch αποτελείται από ένα ή περισσότερους flow tables και έναν Group Table οι οποίοι αναλύουν τα πακέτα (δεδομένα) που καταφτάνουν και στην συνέχεια τα προωθούν υπακούοντας σε μία ομάδα κανόνων που περιέχονται σε αυτούς τους πίνακες και οι οποίοι ονομάζονται flow entries. Όταν ένα πακέτο δεδομένων καταφτάνει στην συσκευή δικτύου τότε επεξεργάζεται και ταυτοποιείται στον πρώτο πίνακα από τους κανόνες που περιέχονται σε αυτόν και στην συνέχεια ίσως προχωρήσει σε κάποιον επόμενο πίνακα σύμφωνα με την σωληνοειδή (pipeline) μορφή ή θα εκτελέσει κάποια άλλη λειτουργία.

- **Openflow Channels**

Τα Openflow κανάλια (Openflow channels) είναι ουσιαστικά η δίοδος επικοινωνίας της openflow πλατφόρμας ελέγχου (openflow controller) με την openflow συσκευή δικτύου (openflow switch). Μέσω αυτών των καναλιών η πλατφόρμα ελέγχου μπορεί να ελέγξει τα δεδομένα που εισέρχονται μέσα στην συσκευή δικτύου προσθέτοντας, αναβαθμίζοντας, διαγράφοντας και γενικά παραμετροποιώντας τους κανόνες (flow entries) που υπάρχουν στους πίνακες (flow tables) και μέσω των οποίων παίρνονται η αποφάσεις για την μεταφορά των δεδομένων.

- **Flow Entries (Κανόνες)**

Οι κανόνες είναι οντότητες που περιέχονται με την μορφή ομάδας στον εκάστοτε πίνακα και ουσιαστικά ταυτοποιούν ένα πακέτο όταν καταφτάνει και στην συνέχεια εφαρμόζουν ενέργειες η οποίες καθορίζουν την υπόλοιπη πορεία του πακέτου στην συσκευή δικτύου. Βέβαια όταν ένα πακέτο δεδομένων καταφτάνει στην συσκευή δικτύου δεν εκτελεί όλες τις ενέργειες που περιγράφονται στην ομάδα κανόνων του πρώτου πίνακα αλλά εφαρμόζει ενέργειες ενός και μόνο κανόνα που είναι επιφορτισμένος με την επεξεργασία και μεταφορά του συγκεκριμένου πακέτου

δεδομένων και μόνο. Θα αναφερθούμε στον τρόπο που τα πακέτα δεδομένων ταυτοποιούνται και μεταφέρονται σε επόμενη ενότητα.

#### 5.4.2.1 Θύρες Openflow (Openflow Ports)

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 5-5, υπάρχουν θύρες (ports) οι οποίες είναι προσκολλημένες στην συσκευή δικτύου. Αυτές οι θύρες ονομάζονται openflow θύρες και είναι βασικό κομμάτι μια συσκευής δικτύου. Οι openflow θύρες είναι διεπαφές οι οποίες μεταφέρουν τα πακέτα των δεδομένων μεταξύ της openflow επεξεργασίας και του υπόλοιπου δικτύου. Οι συσκευές δικτύου openflow συνδέονται μεταξύ τους μέσω αυτών των θυρών και ένα πακέτο δεδομένων μπορεί να μεταφερθεί από την μία openflow συσκευή δικτύου (openflow switch) στην άλλη από την θύρα εξόδου της πρώτης και από την θύρα εισόδου της δεύτερης.

Στο πρωτόκολλο OF ορίζονται 3 είδη από θύρες, οι οποίες είναι [143]:

1. **Φυσική Θύρα:** Οι φυσικές θύρες OpenFlow είναι θύρες που ορίζονται από το switch και αντιστοιχούν σε διασύνδεση υλικού του ίδιου του μεταγωγέα. Για παράδειγμα, σε ένα Ethernet switch, οι φυσικές θύρες αντιστοιχούν ένα προς ένα στις διεπαφές Ethernet. Σε ορισμένες αναπτύξεις, ο μεταγωγέας OpenFlow μπορεί να εικονικοποιηθεί μέσω του υλικού του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μια φυσική θύρα OpenFlow μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα εικονικό slice της αντίστοιχης διασύνδεσης υλικού του μεταγωγέα.
2. **Λογική Θύρα:** Οι λογικές θύρες OpenFlow είναι θύρες που ορίζονται από το switch και δεν αντιστοιχούν άμεσα σε μια διασύνδεση υλικού του. Οι λογικές θύρες είναι αφαιρέσεις υψηλότερου επιπέδου που μπορούν να οριστούν στον μεταγωγέα χρησιμοποιώντας μεθόδους που δεν είναι βασισμένες στο OpenFlow (π.χ. link aggregation groups, tunnels, loopback interfaces κ.α.). Οι λογικές θύρες μπορεί να περιλαμβάνουν ενθυλάκωση πακέτων και μπορεί να αντιστοιχούν σε διάφορες φυσικές θύρες. Η επεξεργασία που γίνεται από τη λογική θύρα πρέπει να είναι διαφανής για την επεξεργασία OpenFlow και αυτές οι θύρες πρέπει να αλληλεπιδρούν με την επεξεργασία OpenFlow όπως οι φυσικές θύρες.
3. **Δεσμευμένες Openflow Θύρες (Reserved Ports):** Οι δεσμευμένες openflow θύρες είναι οι θύρες αυτές οι οποίες περιγράφουν γενικές λειτουργίες (actions) που πρέπει να γίνουν όταν ένα πακέτο καταφθάνει στην δικτυακή συσκευή. Τέτοιες λειτουργίες είναι αποστολή ενός πακέτου στην μονάδα ελέγχου, εκτέλεση πλημμύρας, ομαλή λειτουργία της δικτυακής συσκευής όσον αφορά την μεταγωγή του πακέτου (normal non-openflow L2 Forwarding) και άλλες λειτουργίες τις οποίες εξηγούμε παρακάτω:
  - **ALL:** Με την συγκεκριμένη λειτουργία η openflow συσκευή δικτύου είναι υπεύθυνη να δημιουργήσει αντίγραφα του πακέτου δεδομένων που κατέφθασε και να τα στείλει σε όλες τις διαθέσιμες θύρες για έξοδο από την συσκευή δικτύου εκτός από την θύρα που εισήλθε το αρχικό πακέτο δεδομένων.
  - **CONTROLLER:** Η λειτουργία αυτή δίνει εντολή να χρησιμοποιηθεί το openflow κανάλι που συνδέει την πλατφόρμα ελέγχου openflow με την συσκευή δικτύου. Αυτή η δεσμευμένη θύρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν θύρα εξόδου αλλά και σαν θύρα εισόδου. Όταν χρησιμοποιείται σαν θύρα εξόδου τότε το πακέτο δεδομένων μετατρέπεται σε ένα ειδικό πακέτο-μήνυμα (packet-in message) και στέλνεται στην πλατφόρμα ελέγχου για περαιτέρω επεξεργασία. Όταν χρησιμοποιείται σαν θύρα εισόδου τότε σηματοδοτεί ένα πακέτο που στάλθηκε στην δικτυακή συσκευή από την πλατφόρμα ελέγχου.
  - **TABLE:** Αντιπροσωπεύει την αρχή της σωληνοειδούς διαδικασίας του openflow και ουσιαστικά επιβεβαιώνει την ταυτοποίηση του πακέτου στον πρώτο πίνακα κανόνων και την επεξεργασία του πακέτου από τους υπόλοιπους πίνακες σ αυτήν την σωληνοειδούς τύπου επεξεργασία.

- **IN-PORT:** Αντιπροσωπεύει την πόρτα από την οποία εισήλθε το πακέτο και χρησιμοποιείται ως θύρα εξόδου δηλαδή δίνει εντολή να εξαχθεί το πακέτο από την θύρα από την οποία εισήλθε αρχικά.
- **ANY:** Συγκεκριμένες τιμές χρησιμοποιούνται σε κάποια openflow αιτήματα όταν δεν έχει χρησιμοποιηθεί καμία συγκεκριμένη πόρτα (π.χ. port is wildcarded). Κάποια openflow αιτήματα περιέχουν μια αναφορά σε μία συγκεκριμένη θύρα όπου το συγκεκριμένο αίτημα έχει μοναδική εφαρμογή. Χρησιμοποιώντας το ANY σαν αριθμό θύρας σ'αυτά τα συγκεκριμένα αιτήματα επιτρέπουμε σ'αυτά τα αιτήματα να εφαρμοστούν σε οποιοσδήποτε θύρες.
- **LOCAL:** Αναφέρεται στην τοπική δικτυακή στοίβα της συσκευής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πόρτα εισόδου και σαν πόρτα εξόδου. Η local port μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργοποίηση απομακρυσμένων οντοτήτων οι οποίες μπορούν να επικοινωνήσουν με την openflow συσκευή και τις λειτουργίες που αυτή κατέχει διαμέσου του openflow δικτύου και όχι μέσω από ένα ξεχωριστό δίκτυο που θα είχε ελεγκτικά χαρακτηριστικά πάνω σε αυτήν την συσκευή δικτύου.
- **NORMAL:** Αντιπροσωπεύει την παραδοσιακή non-openflow διαδικασία/πόρτα που χρησιμοποιείται από μια non-openflow δικτυακή συσκευή για την μεταφορά και επεξεργασία ενός πακέτου δεδομένων (forwarding). Αυτή η θύρα που αντιπροσωπεύει αυτήν την λειτουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σαν θύρα εξόδου και επίσης υπάρχει περίπτωση η λειτουργία αυτή να μην είναι διαθέσιμη σε όλες τις συσκευές δικτύου.
- **FLOOD:** Αυτή η λειτουργία/πόρτα αντιπροσωπεύει μια πλημμυρίδα πακέτων η οποία είναι παραδοσιακή λειτουργία non-openflow δικτυακών συσκευών. Συγκεκριμένα με αυτήν την λειτουργία το πακέτο θα σταλεί σε όλες τις θύρες εξόδου εκτός από την θύρα που εισήλθε αρχικά.

Επιπλέον πρέπει να διευκρινισθεί ότι οι openflow-only δικτυακές συσκευές δεν υποστηρίζουν τις πόρτες **NORMAL** και **FLOOD** ενώ οι υβριδικές δικτυακές συσκευές τις υποστηρίζουν. Με τον όρο υβριδικές δικτυακές συσκευές εννοούμε αυτές τις συσκευές που υποστηρίζουν και το openflow πρωτόκολλο αλλά και την παραδοσιακή διαδικασία μεταγωγής πακέτων από ένα ethernet switch.

Οι μεταγωγείς αποτελούνται από δύο κατηγορίες:

1. **Openflow-only μεταγωγείς:** οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να διαχειριστούν πακέτα μόνο με βάση το πρωτόκολλο openflow.
2. **Υβριδικοί μεταγωγείς:** οι οποίοι αποτελούν υβριδικό εξοπλισμό με δυνατότητα να υποστηρίζουν τόσο openflow μεταγωγή όσο και παραδοσιακή μεταγωγή με την χρήση Ethernet πρωτοκόλλου. Αυτοί οι μεταγωγείς περιλαμβάνουν ένα μηχανισμό κατηγοριοποίησης που ανακατευθύνει τα ληφθέντα πακέτα είτε στην διασωλήνωση OF είτε στη κανονική διασωλήνωση.

#### 5.4.2.2 Ασφαλές Κανάλι

Το OpenFlow secure channel (ασφαλές κανάλι) είναι ουσιαστικά η δίοδος επικοινωνίας της openflow πλατφόρμας ελέγχου (openflow controller) με την openflow συσκευή δικτύου (openflow switch). Μέσω αυτού του καναλιού η πλατφόρμα ελέγχου μπορεί να ελέγξει τα δεδομένα που εισέρχονται μέσα στην συσκευή δικτύου προσθέτοντας, αναβαθμίζοντας, διαγράφοντας και γενικά παραμετροποιώντας τους κανόνες (flow entries) που υπάρχουν στους πίνακες (flow tables) και μέσω των οποίων παίρνονται η αποφάσεις για την μεταφορά των δεδομένων. Η επικοινωνία που εγκαθίσταται (σύνδεση TCP) μεταξύ του ελεγκτή και των συσκευών δεν είναι απαραίτητο να κρυπτογραφείται αλλά συνήθως αυτό γίνεται για μεγαλύτερη ασφάλεια με τη χρήση πρωτοκόλλου TLS (Transport Layer Security).

## Openflow μηνύματα

Ο μεταγωγέας ανταλλάσσει μηνύματα με τον ελεγκτή ώστε να δημιουργηθούν κανόνες για τα πακέτα και για να συμπληρωθούν οι πίνακες ροών.

Τα είδη των μηνυμάτων διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- **Ελεγκτή προς μεταγωγέα (Controller-to-Switch messages):** Τα μηνύματα τύπου Controller-to-switch (διαφόρων τύπων όπως Feature, Configuration, Modify state, Read state, Packet out, Barrier, Role-request, Asynchronous configuration) αποστέλλονται από τον ελεγκτή και δεν απαιτούν πάντα απάντηση από τον μεταγωγέα. Μέσα από αυτά τα μηνύματα ο ελεγκτής ρυθμίζει τις δικτυακές συσκευές, διαχειρίζεται τον πίνακα ροής (flow table) και αποκτά πληροφορίες για την κατάσταση του πίνακα ροής και τις δυνατότητες που υποστηρίζονται από τον δρομολογητή κάθε δεδομένη στιγμή.
- **Ασύγχρονα (Asynchronous messages):** αυτά δημιουργούνται από τον μεταγωγέα για να ενημερώσει τον ελεγκτή για γεγονότα που συμβαίνουν στο δίκτυο καθώς τις αλλαγές στην κατάσταση του (Packet in, Flow removed, Port status). Τα μηνύματα αυτά αποστέλλονται χωρίς αίτηση από τον μεταγωγέα στον ελεγκτή και δηλώνουν μια αλλαγή στο μεταγωγέα ή στην κατάσταση του δικτύου. Ένα από τα πιο σημαντικά γεγονότα είναι το packet-in, το οποίο συμβαίνει όταν ένα πακέτο που δεν έχει αντιστοίχιση με κάποια ροή, φτάνει στο OF switch. Όταν συμβαίνει αυτό, ένα μήνυμα packet-in στέλνεται στον ελεγκτή, που περιέχει το πακέτο ή ένα μέρος του πακέτου, προκειμένου ο ελεγκτής να το εξετάσει και να προσδιορίσει ποιο είδος ροής θα πρέπει να συσταθεί για αυτό. Άλλα γεγονότα περιλαμβάνουν λήξη καταχωρήσεων ροής, αλλαγή κατάστασης της θύρας ή άλλα συμβάντα σφάλματος.
- **Συμμετρικά (Symmetric messages):** μπορούν να δημιουργηθούν και από τις δύο πλευρές χωρίς να προηγηθεί αίτημα επικοινωνίας (Hello, Echo, Error, Experimental). Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν ή να διαγνώσουν προβλήματα στην σύνδεση του controller με το μεταγωγέα.

### 5.4.2.3 Πίνακες και Κανόνες Openflow (Openflow tables and flow entries)

Οι μεταγωγείς για να είναι σε θέση να διαχειρίζονται τα πακέτα δημιουργούν πίνακες με εγγραφές. Ένας openflow πίνακας αποτελείται από μία ομάδα από κανόνες (flow entries). Κάθε κανόνας αποτελείται από πεδία που καθορίζουν την ύπαρξη αλλά και την λειτουργία του. Ένα δείγμα ενός κανόνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-6 [143].

Match Fields	Priority	Counters	Instructions	Timeouts	Cookies	Flags
--------------	----------	----------	--------------	----------	---------	-------

Σχήμα 5-6. Τα πεδία ενός openflow κανόνα (flow entry) σε ένα πίνακα ροής (flow table)

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τα κύρια πεδία από τα οποία αποτελείται ένα κανόνας σε ένα openflow πίνακα. Τέτοιου τύπου κανόνες καθορίζουν τις λειτουργίες και τις μεταγενέστερες ενέργειες μιας openflow δικτυακής συσκευής κατά την εισαγωγή ενός πακέτου δεδομένων. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε διεξοδικότερα τα πεδία αυτά.

Κάθε κανόνας ενός openflow πίνακα (flow table entry) περιέχει:

- **Match fields:** Τα πεδία ταυτοποίησης (match fields) ταυτοποιούν τα πακέτα δεδομένων που καταφτάνουν στην δικτυακή συσκευή. Η ταυτοποίηση αυτή γίνεται με βάση την θύρα εισόδου που εισήλθε το πακέτο δεδομένων, τις επικεφαλίδες που φέρει το πακέτο και προαιρετικά με κάποια σωληνοειδούς τύπου πεδία όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-7 που ακολουθεί.

Ingress Port	Ether source	Ether dst	Ether type	VLAN id	VLAN Priority	IP src	IP dst	IP proto	IP ToS	TCP src	TCP dst
--------------	--------------	-----------	------------	---------	---------------	--------	--------	----------	--------	---------	---------

Σχήμα 5-7. Πεδία του πακέτου που χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση (match fields)

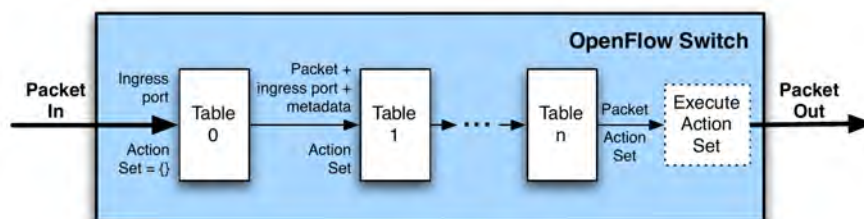
- **Priority:** Αυτό το πεδίο καθορίζει την προτεραιότητα που έχει ένας κανόνας σε σχέση με τους υπόλοιπους κανόνες μιας ομάδας όσον αφορά την χρησιμοποίηση αυτού για την ταυτοποίηση των πακέτων δεδομένων που εισέρχονται.
- **Counters:** Οι Μετρητές (Counters) είναι τα πεδία αυτά τα οποία ενημερώνονται κάθε φορά που ταυτοποιείται ένα πακέτο δεδομένων από τον συγκεκριμένο κανόνα. Επίσης μέσω των Μετρητών μπορούμε να γνωρίζουμε συνολικά πόσα πακέτα του δικτύου έχουν ταυτοποιηθεί από έναν κανόνα ενός πίνακα το οποίο μπορεί να θεωρηθεί και ένα στατιστικό στοιχείο.
- **Instructions:** Είναι τα πεδία αυτά τα οποία χρησιμοποιούνται για την μεταβολή των δράσεων που θα εφαρμοστούν σε ένα πακέτο δεδομένων ή για την μεταβολή της σωληνοειδούς επεξεργασίας.
- **Timeouts:** Τα πεδία λήξεως χρόνου καθορίζουν την διάρκεια στην οποία είναι ενεργός ένας κανόνας και μπορεί να ταυτοποιεί πακέτα. Μετα το πέρας του χρονικού διαστήματος ο κανόνας αφαιρείται από τον openflow πίνακα.
- **Cookies:** Αδιαφανή δεδομένα που χρησιμοποιούνται κυρίως από την μονάδα ελέγχου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την μονάδα ελέγχου για να φιλτραριστούν κανόνες (flow entries) λόγω αιτήσεων για στατιστικά δεδομένα, για μετατροπή κανόνων και για διαγραφή κανόνων. Τα cookies δεν χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των εισερχόμενων πακέτων.
- **Flags:** Τα Flags αλλάζουν τον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται οι κανόνες. Για παράδειγμα το Flag OFPFF\_SEND\_FLOW\_REM ενεργοποιεί μηνύματα απομάκρυνσης κανόνα για έναν συγκεκριμένο κανόνα (flow entry).

Κάθε κανόνας αναγνωρίζεται από τα πεδία ταυτοποίησης (match fields) και το πεδίο προτεραιότητας του κανόνα (priority). Επίσης το πεδίο του κανόνα που ονομάζεται Instructions περιέχει δράσεις (actions) που θα εφαρμοστούν σε ένα εισερχόμενο πακέτο.

#### 5.4.2.4 Matching (Πεδίο ταυτοποίησης πακέτων)

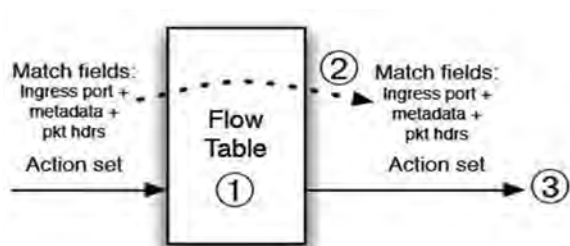
Το matching είναι η διαδικασία ταυτοποίησης εισερχόμενων δεδομένων (πακέτων). Καθώς καταφτάνει ένα πακέτο σε μια openflow συσκευή δικτύου τότε η συσκευή αυτή ξεκινάει να εξετάζει τους κανόνες (flow entries) που υπάρχουν στον πρώτο πίνακα κανόνων (flow table με αριθμό 0) και βασιζόμενη στην διαδικασία διασωλήνωσης (pipeline) που ακολουθείται μπορεί να εξετάσει κανόνες και σε επόμενους πίνακες όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5-8 [144].

Τα πεδία ταυτοποίησης που ανήκουν στο εισερχόμενο πακέτο αφαιρούνται από αυτό και χρησιμοποιούνται για την εξέταση των κανόνων στον πίνακα κανόνων. Τα πεδία αυτά εξαρτώνται από το τύπο του πακέτου και πολλές φορές περιέχουν διάφορες επικεφαλίδες όπως για παράδειγμα Ethernet ή IPv4 διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού. Επιπροσθέτως ταυτοποίηση μπορεί να γίνει και με βάση την πόρτα που εισήλθε το πακέτο.



Σχήμα 5-8. Τα πακέτα αντιστοιχίζονται σε πολλούς πίνακες στη διασωλήνωση (pipeline) (πηγή: ONF TS-012)

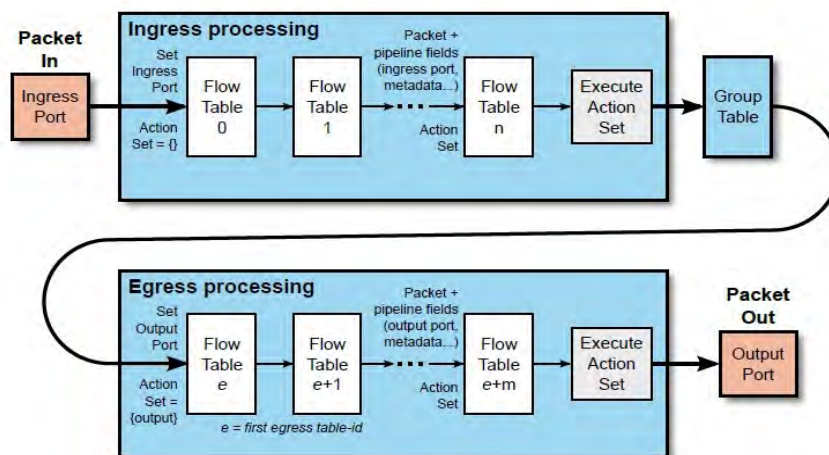
Ένα εισερχόμενο πακέτο ταιριάζει με έναν κανόνα σε έναν πίνακα κανόνων εάν τα πεδία ταυτοποίησης του πακέτου που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των κανόνων σε έναν πίνακα κανόνων ταιριάζουν με τα πεδία ταυτοποίησης ενός από τους κανόνες στον πίνακα. Το πακέτο ταιριάζει μόνο με τον κανόνα που έχει τα ίδια πεδία ταυτοποίησης με αυτό και σε περίπτωση που δύο ή περισσότεροι κανόνες έχουν τα ίδια πεδία ταυτοποίησης με του πακέτου τότε επιλέγεται ο κανόνας με την μεγαλύτερη προτεραιότητα. Στην συνέχεια οι μετρητές που υπάρχουν στον συγκεκριμένο επιλεγμένο κανόνα ενημερώνονται και εφαρμόζονται τα instructions που περιλαμβάνονται στον κανόνα. Στο Σχήμα 5-9 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση των παραπάνω.



- ① Αντιστοίχιση κατά σειρά προτεραιότητας
- ② εκτέλεση οποιασδήποτε εντολής:
  - I. Με την τροποποίηση του πακέτου ανάλογα με την εντολή που εκτελείται και ενημέρωση των πεδίων αντιστοίχισης
  - II. Ενημέρωση του πεδίου εντολών του πακέτου
  - III. Ενημέρωση μεταδεδομένων πακέτου
- ③ Αποστολή του αντίστοιχου πακέτου και των σετ εντολών στο επόμενο Flow Table

**Σχήμα 5-9 Επεξεργασία πακέτου σε flow table (πηγή: ONF TS-012) [144]**

Η έκδοση 1.5 του OpenFlow εισάγει τους egress πίνακες, δίνοντας την δυνατότητα η επεξεργασία να γίνει στα πλαίσια της εξερχόμενης θύρας. Η διαδικασία σωλήνωσης (pipeline) γίνεται πλέον σε δύο στάδια, την επεξεργασία εισόδου και εξόδου (ingress processing-egress processing). Ο διαχωρισμός των δύο σταδίων υποδεικνύεται από τον πρώτο πίνακα egress. Όλοι οι πίνακες με αριθμό μικρότερο από τον πρώτο πίνακα egress χρησιμοποιούνται ως πίνακες ingress και κανένας πίνακας με αριθμό μεγαλύτερο ή ίσο από τον πρώτο πίνακα egress δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ingress table. Η διαδικασία της σωλήνωσης ξεκινά με την εισερχόμενη επεξεργασία του πρώτου flow table. Το πακέτο θα πρέπει να αντιστοιχηθεί σε κάποιο από τα flow entries του πίνακα 0. Άλλοι πίνακες ingress μπορεί να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης του πρώτου πίνακα. Εάν το αποτέλεσμα της επεξεργασίας εισόδου είναι να προωθηθεί το πακέτο σε κάποια από τις θύρες εξόδου, το OpenFlow switch μπορεί να πραγματοποιήσει επεξεργασία εξόδου στα πλαίσια της θύρας εξόδου. Η επεξεργασία εξόδου είναι προαιρετική, ένα switch μπορεί να μην υποστηρίζει καθόλου egress tables. Εάν δεν υπάρχει egress table τότε το πακέτο προωθείται έξω από το switch. Εάν υπάρχει egress table, το πακέτο πρέπει να αντιστοιχηθεί με τις εγγραφές αυτού του πίνακα και μπορεί να χρειαστούν και άλλα egress tables, ανάλογα με το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης.



**Σχήμα 5-10. Η ροή του πακέτου μέσα από τη διαδικασία σωλήνωσης. (πηγή: ONF TS-025) [143]**

#### 5.4.2.5 Table-Miss (Μη ταυτοποίηση πακέτων)

Κάθε πίνακας κανόνων (flow table) πρέπει να υποστηρίζει έναν table-miss κανόνα (flow entry) σε περίπτωση που ένα εισερχόμενο πακέτο δεν αντιστοιχηθεί με κανέναν κανόνα του πίνακα κανόνων. Ο table miss κανόνας εξηγεί πως θα επεξεργαστούν τα μη αντιστοιχιζόμενα πακέτα για παράδειγμα μπορεί τα πακέτα αυτά να σταλούν στην μονάδα ελέγχου (controller), να απορριφθούν ή να σταλούν σε επόμενο πίνακα για περαιτέρω επεξεργασία.

Ο table-miss κανόνας αναγνωρίζεται από τα πεδία ταυτοποίησης και προτεραιότητας. Συγκεκριμένα όλα τα πεδία ταυτοποίησης έχουν παραλειφθεί και η προτεραιότητα αυτού του κανόνα είναι η χαμηλότερη δυνατή δηλαδή μηδέν. Ο table-miss κανόνας πρέπει τουλάχιστον να υποστηρίζει την δράση αποστολής του μη αντιστοιχιζόμενου πακέτου στην μονάδα ελέγχου μέσω της πόρτας με το αναγνωριστικό CONTROLLER ή να υποστηρίζει την δράση απόρριψης του πακέτου.

Ο table-miss κανόνας συμπεριφέρεται σε γενικές γραμμές όπως οποιοσδήποτε άλλος κανόνας. Δεν θεωρείται δεδομένη η ύπαρξή του σε ένα πίνακα κανόνων και η μονάδα ελέγχου είναι υπεύθυνη για την τοποθέτηση και την αφαίρεση αυτού του κανόνα. Επίσης ο κανόνας αυτός μπορεί να εκλείψει από τον πίνακα κανόνων καθώς μπορεί να περατωθεί η χρονική διάρκεια ύπαρξής του. Ο table-miss κανόνας επεξεργάζεται τα μη αντιστοιχιζόμενα εισερχόμενα πακέτα και εφαρμόζονται οι οδηγίες (instructions) που υπάρχουν στον συγκεκριμένο κανόνα. Εάν ο συγκεκριμένος κανόνας στείλει το πακέτο στην μονάδα ελέγχου τότε το packet-in μήνυμα θα αναγράφει ως αιτία αδυναμία ταυτοποίησης (table miss). Σε περίπτωση που ένας table-miss κανόνας δεν υπάρχει στον πίνακα τότε τα μη αντιστοιχιζόμενα πακέτα απορρίπτονται.

#### 5.4.2.6 Group & Meter Tables

Ένας ακόμη είδος πινάκων που ορίζεται από την αρχιτεκτονική του OpenFlow είναι τα group tables, τα οποία εμπεριέχουν καταχωρίσεις που ονομάζονται group entries. Με την χρήση αυτών των tables είναι δυνατή η προώθηση ομάδων ή και όλων των πακέτων που βρίσκονται σε αντιστοιχία με ένα group entry. Η δομή ενός group entry φαίνεται στο Σχήμα 5-11:

Group Identifier	Group Type	Counters	Action Buckets
------------------	------------	----------	----------------

Σχήμα 5-11. Group Entry

Αναλυτικά τα πεδία του group entry είναι:

- Το **group identifier**, αναγνωριστικό ομάδας, που είναι ένας μη προσημασμένος ακέραιος αριθμός των 32bit και χρησιμεύει για την ταυτοποίηση της ομάδας πακέτων που αφορούν το συγκεκριμένο entry.
- Το **group type**, ο τύπος της ομάδας, που δείχνει ποιες εντολές από την ομάδα εντολών (action bucket) θα εκτελεστούν για τα πακέτα που ανήκουν στο entry.
- Οι διάφοροι **μετρητές - counters**, που χρησιμοποιούνται για διάφορες
- πληροφορίες, όπως αριθμός πακέτων που ανήκουν στο group entry.
- Οι ομάδες εντολών, **action buckets**, μια διατεταγμένη λίστα εντολών στην οποία κάθε εντολή περιέχει ένα σύνολο ενεργειών και τις σχετικές παραμέτρους για να εφαρμοστούν στο προς επεξεργασία πακέτο.

Όσο αφορά τα group types, υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες:

- **Κατηγορία all:** Εκτελούνται όλες οι εντολές στις ομάδες εντολών, με το πακέτο να κλωνοποιείται σε αντίγραφα και να επεξεργάζεται από κάθε εντολή στο action bucket. Αυτή η κατηγορία χρησιμοποιείται συνήθως για ευρυεκπομπή (broadcasting) και πολυεκπομπή (multicasting).

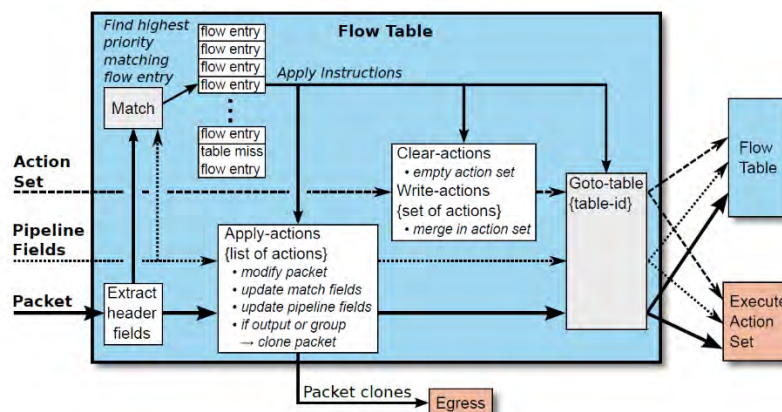


- **Κατηγορία select:** Εκτελείται μόνο μια εντολή από το σύνολο της ομάδας εντολών, βάση των παραμέτρων του πακέτου και των αλγορίθμων επιλογής της εκάστοτε συσκευής.
- **Κατηγορία indirect:** Εκτελείται μια μόνο προκαθορισμένη εντολή στο group table, πράγμα που επιτρέπει πολλαπλές ροές πακέτων να δείχνουν σε ένα αναγνωριστικό ομάδας (group identifier) και να υποστηρίζεται γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη προώθηση ομάδων πακέτων σε συγκεκριμένο προορισμό.
- **Κατηγορία fast failover:** Εκτελείται η πρώτη εν ενεργεία ομάδα εντολών, δηλαδή το σύνολο εντολών που είναι συσχετισμένο με μια ενεργή θύρα εξόδου. Με αυτή την μέθοδο κάθε δέσμη ενεργειών στο action bucket συσχετίζεται με μια θύρα εξόδου για να μπορεί η συσκευή δρομολόγησης σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης από μια θύρα εξόδου να επαναδρομολογήσει πακέτα σε εφεδρικές θύρες χωρίς να χρειαστεί ξανά επικοινωνία με τον controller.

**Πίνακας με μετρητές ροής (Meter Table):** Ένα τέτοιος πίνακας, απαρτίζεται από αντίστοιχες εγγραφές (meter entries) οι οποίες ορίζουν μετρητές για κάθε ροή, δίνοντας την δυνατότητα υλοποίησης απλών ή συνθετότερων ενεργειών διασφάλισης ποιότητας (Quality of Service), όπως για παράδειγμα ο περιορισμός της ροής κίνησης (rate limiting). Κάθε τέτοιος δείκτης μετρά το ρυθμό μετάδοσης πακέτων που έχει ανατεθεί σε αυτόν, επιτρέποντας τον έλεγχο της ταχύτητας. Επισημαίνεται πως οι μετρητές ροής, είναι συνδεδεμένοι απευθείας με εγγραφές, σε αντίθεση με τις ουρές (Queues) που είναι συνδεδεμένες με θύρες. Οποιαδήποτε εγγραφή μπορεί να ορίσει σύνδεση με κάποιο meter, μέσω του instruction set της. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως ένας μετρητής ροής ελέγχει την συνολική ροή, από όλες τις εγγραφές που είναι συνδεδεμένες με αυτόν. Όσον αφορά την χρήση πολλαπλών μετρητών στον ίδιο πίνακα ροής, κάτι τέτοιο είναι εφικτό αλλά όχι για διαφορετικούς μετρητές στις ίδιες εγγραφές. Ωστόσο μπορούν να εφαρμοσθούν πολλαπλοί μετρητές στις ίδιες ροές πακέτων σε διαφορετικούς διαδοχικούς πίνακες ροής.

#### 5.4.2.7 Instructions (Οδηγίες)

Κάθε κανόνας σε έναν πίνακα κανόνων περιέχει ένα σετ από οδηγίες (instructions) οι οποίες εφαρμόζονται όταν ένα εισερχόμενο πακέτο αντιστοιχηθεί σε έναν συγκεκριμένο κανόνα. Αυτές οι οδηγίες έχουν ως αποτέλεσμα μετατροπές στο πακέτο, στο σετ των δράσεων (action set) που θα αναληφθούν και στην σωληνοειδή διαδικασία (Σχήμα 5-12).



Σχήμα 5-12. Σωληνοειδής διαδικασία Openflow (πηγή: ONF TS-025) [143]

Μία συσκευή δικτύου δεν είναι απαραίτητο να υποστηρίζει όλα τα είδη των οδηγιών αλλά πρέπει να υποστηρίζει τις οδηγίες που αναφέρονται ως "Required Instruction" δηλαδή απαραίτητες οδηγίες. Επίσης η μονάδα ελέγχου (controller) μπορεί να "ρωτήσει" την συσκευή δικτύου ποιες από τις "Optional Instruction" δηλαδή ποιες μη-απαραίτητες οδηγίες υποστηρίζει.

- **Optional Instruction: Apply-Actions:** Εφαρμόζει συγκεκριμένες δράσεις χωρίς αλλαγές στο σετ των δράσεων (action set). Αυτή η οδηγία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει

μετατροπές στο πακέτο μεταξύ δύο πινάκων ή να εκτελέσει πολλές δράσεις του ίδιου τύπου. Οι δράσεις είναι καθορισμένες σαν λίστα δράσεων (list of actions).

- *Optional Instruction: Clear-Actions:* Εκκαθαρίζει όλες τις δράσεις από ένα σετ δράσεων.
- *Required Instruction: Write-Actions:* Συνδέει ένα σετ δράσεων με το ήδη υπάρχων σετ δράσεων.
- *Optional Instruction: Stat-Trigger stat thresholds:* Δημιουργεί ένα γεγονός (event) στην μονάδα ελέγχου όταν κάποιο από τα στατιστικά ενός κανόνα ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο ορισμένο κατώφλι τιμών.
- *Required Instruction: Goto-Table next-table-id:* Αναφέρει τον επόμενο πίνακα στην σωληνοειδή διαδικασία που ακολουθείται. Οι κανόνες στον τελευταίο πίνακα κανόνων αυτής της διαδρομής δεν πρέπει να περιλαμβάνουν την συγκεκριμένη οδηγία (instruction).
- *Optional Instruction: Write-Metadata metadata:* Γράφει τιμές μεταδεδομένων στο πεδίο των μεταδεδομένων (metadata field).

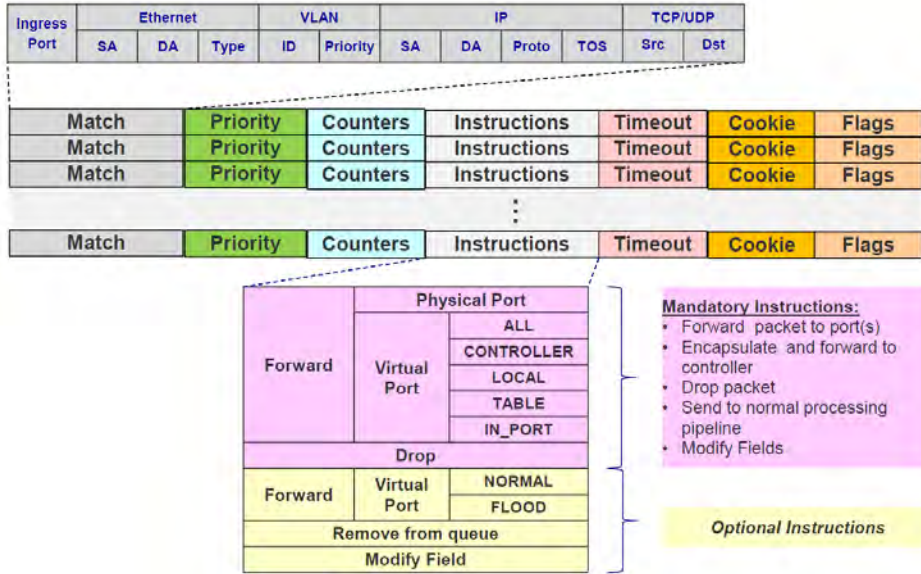
Το σετ των οδηγιών (instruction set) που περιλαμβάνεται σε έναν κανόνα αποτελείται το πολύ από μία οδηγία κάθε τύπου. Η συσκευή δικτύου πρέπει να απορρίπτει κανόνες που δεν εκτελούν τις οδηγίες που περιέχουν. Στην περίπτωση αυτή η συσκευή δικτύου επιστρέφει ένα μήνυμα λάθους (error message).

#### 5.4.2.8 Actions (Δράσεις)

Μία συσκευή δικτύου δε είναι απαραίτητο να υποστηρίζει όλες τις δράσεις (actions) πρέπει όμως να υποστηρίζει τις λεγόμενες "απαραίτητες δράσεις" δηλαδή τις "Required Actions". Επίσης η μονάδα ελέγχου (Controller) μπορεί να "ρωτήσει" την συσκευή δικτύου ποιες από τις μη-απαραίτητες δράσεις υποστηρίζει δηλαδή ποιες από τις "Optional Actions". Άρα οι απαραίτητες δράσεις που έχουμε είναι:

- *Required Action: Output port no:* Η Δράση αυτή προωθεί (**forward**) ένα εισερχόμενο πακέτο σε μια καθορισμένη openflow θύρα. Οι openflow συσκευές δικτύου πρέπει να υποστηρίζουν προωθήσεις σε φυσικές θύρες (physical ports), σε λογικές θύρες που είναι καθορισμένες από την συσκευή δικτύου (switch-defined logical ports), και σε κατειλημμένες θύρες (reserved ports) όπως η θύρα της μονάδας ελέγχου (CONTROLLER port).
- *Required Action: Group group id:* Επεξεργάζεται το εισερχόμενο πακέτο διαμέσου ενός συγκεκριμένου group από δράσεις.
- *Required Action: Drop:* Τα εισερχόμενα πακέτα που δεν τους έχει επιβληθεί συγκεκριμένη δράση ή κάποιο συγκεκριμένο group δράσεων απορρίπτονται. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να προέλθει αν υπάρχει κάποιο άδαιο σετ οδηγιών (Instructions) ή αν έχει εφαρμοστεί η Clear-Action οδηγία.

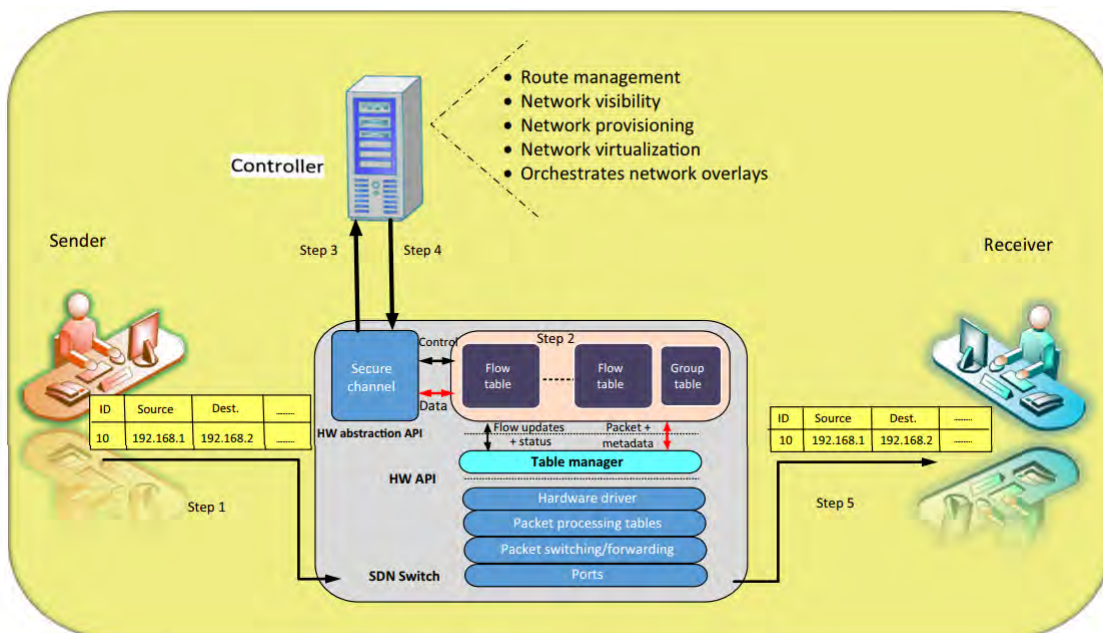
Στο Σχήμα 5-13 απεικονίζεται ενδεικτικά η αντιστοίχιση μεταξύ πεδίων από κανόνες σε πίνακες ροής (match fields, instruction) και πεδία που περιέχουν τα πακέτα προς αντιστοίχιση.



Σχήμα 5-13. Αντιστοίχιση μεταξύ πεδίων από κανόνες σε πίνακες ροής

### 5.5 Λειτουργία SDN με τη χρήση Openflow

Μόλις ο μεταγωγέας λάβει το πρώτο πακέτο μίας ροής ενός αποστολέα (βήμα 1), ελέγχει στην κρυφή μνήμη (cache) του SDN για να βρει έναν κανόνα ροής για το πακέτο (βήμα 2). Αν βρεθεί εγγραφή που να αντιστοιχεί, τότε εκτελούνται οι οδηγίες που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη εγγραφή ροής (πχ. ανανέωση του μετρητή, σύνολο ενεργειών, μεταδεδομένα κτλ.). Στη συνέχεια, τα πακέτα προωθούνται στον παραλήπτη (βήμα 5). Αν δε βρεθεί αντιστοίχιση στον πίνακα ροών, τότε το πακέτο μπορεί να προωθηθεί στον ελεγκτή, μέσω ενός ασφαλούς καναλιού (βήμα 3). Με τη χρήση ενός Southbound API, ο ελεγκτής δύναται να προσθέσει, να ανανεώσει και να διαγράψει εγγραφές ροών, τόσο αντιδραστικά (ως απόκριση στη ροή των πακέτων) όσο και προληπτικά. Ο ελεγκτής εκτελεί τον αλγόριθμο δρομολόγησης και προσθέτει μία νέα εγγραφή προώθησης στον πίνακα ροών του μεταγωγέα και όλων των σχετικών μεταγωγέων, που ανήκουν στο μονοπάτι της ροής (βήμα 4). Έπειτα, ο μεταγωγέας προωθεί το πακέτο στην κατάλληλη θύρα για να αποσταλεί στον τελικό παραλήπτη (βήμα 5). Όλα τα παραπάνω βήματα απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 5-14.



Σχήμα 5-14. Απεικόνιση της λειτουργίας του SDN (πηγή: Sakir Sezer et al., 2013) [145]

## 5.6 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις του SDN

Το SDN έχει ως στόχο την παροχή ανοικτών, κεντρικοποιημένων, διαχωρισμένων, προγραμματίσιμων, βασισμένων σε ροές και δυναμικών μηχανισμών δικτυακών μεταγωγών.

Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας αρχιτεκτονικής SDN είναι τα εξής [146]:

- **Άμεση προγραμματισιμότητα (Direct programmability):** Το επίπεδο ελέγχου είναι άμεσα προγραμματιζόμενο επειδή αποσυνδέεται από το επίπεδο δεδομένων.
- **Ευελιξία (Agility):** Η αποσύζευξη του επιπέδου ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων επιτρέπει στους διαχειριστές να προσαρμόζουν δυναμικά τη ροή της κυκλοφορίας σε όλο το δίκτυο για να ανταποκρίνονται στις μεταβαλλόμενες ανάγκες.
- **Κεντρική διαχείριση (Central management):** Η νοημοσύνη δικτύου είναι (λογικά) συγκεντρωμένη σε ελεγκτές SDN που βασίζονται σε λογισμικό. Αυτοί οι ελεγκτές διατηρούν μια συνολική εικόνα του δικτύου υποδομής. Κάθε ελεγκτής (controller) εμφανίζεται σε εφαρμογές και μηχανισμούς πολιτικής ως ένας και μόνος λογικός μεταγωγέας.
- **Προγραμματιζόμενη διαμόρφωση (Programmable configuration):** Το SDN επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύου να ρυθμίζουν, να διαχειρίζονται, να ασφαλίζουν και να βελτιστοποιούν πολύ γρήγορα τους πόρους του δικτύου μέσω δυναμικών αυτοματοποιημένων προγραμμάτων SDN, τα οποία μπορούν να γράψουν, διότι τα προγράμματα δεν εξαρτώνται από ιδιόκτητο λογισμικό.

Για τις επιχειρήσεις και τους φορείς εκμετάλλευσης, μια ποιοτική και ουσιαστική αναβάθμιση των δικτύων είναι επιτακτική για την καλύτερη λειτουργία τους και την καλύτερη παροχή υπηρεσιών προς τους τελικούς χρήστες. Μια τέτοια αναβάθμιση προσφέρει το SDN, καθώς όπως αναφέραμε προηγουμένως έχει αλλάξει τελείως τον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε και ελέγχουμε τα δίκτυα και τις ροές πληροφοριών που διακινούνται με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών και πιο ασφαλή επικοινωνία μεταξύ των μελών ενός δικτύου. Οι τεχνολογίες SDN δίνουν στο IT τη δυνατότητα να αναδειξεί την υψηλού εύρους ζώνης, δυναμική φύση των σύγχρονων εφαρμογών, να προσαρμόσει το δίκτυο στις εκάστοτε επιχειρησιακές ανάγκες και να μειώσει σημαντικά την πολυπλοκότητα των λειτουργιών και της διαχείρισης.

Τα οφέλη που μπορούν να αποκομίσουν οι επιχειρήσεις, οι φορείς, και συνεπώς οι χρήστες, μέσω της SDN αρχιτεκτονικής, συνοψίζονται ως εξής:

- **Κεντρικοποιημένη δικτυακή επίβλεψη**

Το SDN παρέχει μια κεντρικοποιημένη επίβλεψη του δικτύου η οποία καθιστά εφικτό τον έλεγχο και την διαχείριση των λειτουργιών που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Με την αποδέσμευση της πλατφόρμας ελέγχου από αυτή των δεδομένων τα δίκτυα μπορούν να επιταχύνουν την αποστολή των διαφόρων υπηρεσιών και να επιτύχουν μια πιο αποδοτική επίβλεψη των εικονικών και πραγματικών δικτυακών συσκευών από μια κεντρική τοποθεσία.

- **Ευελιξία**

Πολλές φορές οι επιχειρήσεις έρχονται αντιμέτωπες με αιτήματα πελατών τους που τις υποχρεώνουν να εγκαθιδρύσουν νέες υπηρεσίες στο σύστημά τους για την διεκπεραίωση αυτών των αιτημάτων. Έτσι με την βοήθεια της SDN τεχνολογίας οι διαχειριστές των δικτύων της εκάστοτε επιχείρησης μπορούν να αναπτύξουν, να παραμετροποιήσουν και να πειραματιστούν με νέες εφαρμογές και υπηρεσίες χωρίς να επηρεάσουν την λειτουργία του ήδη υπάρχοντος δικτύου της επιχείρησης. Επίσης παρέχεται ένα σύνολο προγραμματιζόμενων διεπαφών (APIs) οι οποίες βοηθούν στον έλεγχο των πραγματικών αλλά και των εικονικών συσκευών του δικτύου.

- **Υψηλότερος ρυθμός καινοτομίας**

Η υιοθέτηση του SDN επιταχύνει την καινοτομία στις επιχειρήσεις, επιτρέποντας στους IT φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου να προγραμματίζουν το δίκτυο, σε πραγματικό χρόνο, σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες και απαιτήσεις. Με την εικονικοποίηση της δικτυακής δομής και της αφαίρεσής της, από μεμονωμένες υπηρεσίες δικτύου, το SDN και το OpenFlow δίνουν στο IT και

ενδεχομένως στους χρήστες, τη δυνατότητα να προσαρμόσουν τη συμπεριφορά του δικτύου και να εισάγουν νέες υπηρεσίες μέσα σε λίγες ώρες.

- **Αποδοτικότερη ασφάλεια δικτύων**

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των δικτύων στα οποία εφαρμόζεται η αρχιτεκτονική SDN αποτελεί η κεντροποιημένη ασφάλεια. Η τεχνολογία της εικονοποίησης έχει μετατρέψει τον έλεγχο των δικτύων σε μια απαιτητική διαδικασία καθώς εικονικές μηχανές ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται συνεχώς στα πλαίσια μιας πραγματικής υποδομής δικτύου. Έτσι οι διαχειριστές πρέπει συνεχώς να παραμετροποιούν τα τείχη προστασίας και να εφαρμόζουν διαφορετικές πολιτικές φιλτραρίσματος ώστε να καταστήσουν ασφαλές το δίκτυο. Με την βοήθεια του SDN, οι διαχειριστές μπορούν να παρέχουν μια κεντροποιημένη και πιο αποδοτική ασφάλεια στο δίκτυο διανέμοντας εύκολα πολιτικές ασφαλείας σε όλο το δίκτυο. Επίσης μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε κακόβουλη χρήση του δικτύου και να δράσουν αμέσως λόγω της ευκολίας που τους παρέχει ο κεντρικός έλεγχος του δικτύου. Έτσι ο έλεγχος του δικτύου εναποτίθεται σε μια και μόνο κεντρική πλατφόρμα.

- **Μείωση λειτουργικών εξόδων**

Τα δίκτυα πλέον παρουσιάζουν διαχειριστική αποδοτικότητα, βελτίωση στην λειτουργία πολλών δικτυακών συσκευών και καλύτερο έλεγχο στις εικονοποιημένες υπηρεσίες που παρέχονται. Έτσι οδηγούν σε μείωση των λειτουργικών εξόδων μια εταιρίας και βοηθούν στην αυτόματη και κεντροποιημένη επίλυση προβλημάτων των υπάρχοντων δικτύων που επιβάρυναν οικονομικά την εκάστοτε επιχείρηση.

- **Αποδοτική χρησιμοποίηση υπάρχοντος εξοπλισμού και αποφυγή επιπρόσθετων εξόδων**

Η υιοθέτηση του SDN δίνει νέα πνοή στην ήδη υπάρχουσα υποδομή και στις ήδη υπάρχουσες συσκευές δικτύου. Οι ήδη υπάρχουσες συσκευές δικτύου μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και να παραμετροποιηθούν ώστε να εκτελούν εντολές τις οποίες λαμβάνουν από την κεντρική μονάδα ελέγχου. Έτσι αφαιρώντας ευφυΐα από τις συσκευές αυτές και αντιμετωπίζοντας αυτές σαν μαύρα κουτιά (black boxes) που θα λαμβάνουν εντολές από την κεντρική πλατφόρμα οδηγούμαστε σε φθηνότερες λύσεις δικτυακού υλικού καθώς έχουμε αφαιρέσει το κόστος δημιουργίας έξυπνων δικτυακών συσκευών.

- **Έλεγχος πόρων Cloud computing**

Λόγω της συνεχόμενης ανάπτυξης των υπηρεσιών cloud είναι απαραίτητο να αποσπάσουμε τον έλεγχο των πόρων αυτών των υπηρεσιών και να το αποδώσουμε στη πλατφόρμα ελέγχου των SDNs για να έχουμε μια αποδοτική κατανομή των πόρων που καταναλώνουν αυτές οι υπηρεσίες. Έτσι είναι δυνατή η ενοποίηση των πόρων των υπηρεσιών cloud. Για παράδειγμα, μπορούμε να εναποθέσουμε στην κεντρική μονάδα ελέγχου των SDN δικτύων τον έλεγχο των δικτυακών οντοτήτων ενός μεγάλου κέντρου δεδομένων. Επιπλέον, οι εφαρμογές, βασισμένες σε νέφος (cloud applications), μπορούν να υπόκεινται σε διαχείριση μέσω ευφών συστημάτων σύνθεσης και τροφοδοσίας, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τη λειτουργική επιβάρυνση και αυξάνοντας την ευελιξία της επιχείρησης.

- **Ποιοτική παροχή υπηρεσιών**

Η ικανότητα της παραμετροποίησης και του ελέγχου ροών δεδομένων είναι ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα. Με την κεντροποίηση του δικτυακού ελέγχου και της διάθεσης των πληροφοριών κατάστασης στις εφαρμογές υψηλότερων επιπέδων, η SDN υποδομή μπορεί να προσαρμόζεται καλύτερα στις δυναμικές ανάγκες των χρηστών. Τα χαρακτηριστικά του SDN επιτρέπουν την αποδοτική μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, με αποτέλεσμα να μπορούν να παρέχουν ποιοτικές υπηρεσίες (QoS) φωνής μέσω του διαύλου του IP πρωτοκόλλου. Επίσης βελτιώνεται η παροχή υπηρεσιών Streaming καθώς εγγυώνται την αδιάκοπη μεταφορά πληροφορίας και την αποφυγή προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν. Για παράδειγμα, ένας φορέας θα μπορούσε να εισάγει μία υπηρεσία βίντεο, η οποία να προσφέρει στους premium

συνδρομητές τη μέγιστη δυνατή ανάλυση με αυτοματοποιημένο τρόπο. Σήμερα οι χρήστες πρέπει να επιλέξουν μία ρύθμιση ανάλυσης, την οποία το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει ή να μην υποστηρίξει. Ως αποτέλεσμα δημιουργούνται καθυστερήσεις και διακοπές, οι οποίες υποβαθμίζουν την εμπειρία του χρήστη. Με το SDN βασισμένο στο OpenFlow, η εν λόγω εφαρμογή βίντεο θα μπορούσε αυτόματα – και σε πραγματικό χρόνο – να εντοπίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης και να προσαρμόζει την ανάλυση του βίντεο.

Από την άλλη πλευρά, αρκετές **προκλήσεις και περιορισμοί** προκύπτουν από την κεντροποίηση του πεδίου δεδομένων, ακριβώς λόγω της ύπαρξης ενός μοναδικού σημείου διαχείρισης και ελέγχου της κατάστασης του δικτύου [147]. Μερικές από αυτές τις προκλήσεις είναι:

- **Συχνή ανανέωση των OpenFlow μεταγωγέων**

Ο ελεγκτής πρέπει να ανανεώνει τους OpenFlow μεταγωγείς συχνότερα από όσο απαιτούν οι παραδοσιακοί μεταγωγείς, κάτι το οποίο επιφέρει υψηλότερη επιβάρυνση στο δίκτυο. Οι ροές ταξινομούνται σε κατηγορίες, με διαφορετική προτεραιότητα και διαφορετική απαίτηση σε QoS, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται θέματα ευελιξίας, κυρίως σε δίκτυα ευρείας κλίμακας.

- **Κλιμακωσιμότητα του πεδίου ελέγχου**

Η συγκέντρωση όλων των λειτουργιών, σε έναν μοναδικό κόμβο, απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, αποθηκευτικότητα και δυνατότητα διακίνησης δεδομένων, απαιτήσεις οι οποίες αυξάνουν το χρόνο απόκρισης. Επιπλέον, λόγω των περιορισμών του υλικού στους οποίους υπόκεινται οι μεταγωγείς, αυξάνεται η πιθανότητα δημιουργίας σημείων συμφόρησης στο δίκτυο, ενώ σε μεγάλου μεγέθους datacenters και δίκτυα cloud computing, οι λύσεις για τα προβλήματα κλιμακωσιμότητας (πχ. μηχανισμοί υπερτροφοδοσίας πόρων ή εξισορρόπησης φορτίου) δεν είναι ικανές να επιφέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

- **Διαχείριση νέων ροών**

Το πρώτο πακέτο κάθε νέας ροής, η οποία εισέρχεται στο σύστημα, προωθείται στον SDN ελεγκτή για επιθεώρηση και αυτός καθορίζει το μονοπάτι που θα ακολουθήσει η ροή και προγραμματίζει τις εγγραφές ροών, σε κάθε μεταγωγέα αυτού του μονοπατιού. Έτσι, με την είσοδο μίας νέας ροής, ο ελεγκτής θα πρέπει να επικοινωνήσει με όλους τους μεταγωγείς του μονοπατιού, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη καθυστέρηση αλλά και σε πιθανή αστοχία του δικτύου.

- **Μοναδικό σημείο αποτυχίας**

Ο ελεγκτής αντιπροσωπεύει ένα μοναδικό σημείο αποτυχίας και μπορεί να καταστήσει το δίκτυο ιδιαίτερα ευάλωτο σε επιθέσεις ή διατάραξη της λειτουργίας του. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται από τον ελεγκτή, για την εγκαθίδρυση των ιδιοτήτων κάθε ροής, οδηγεί σε καθυστέρηση ενώ οποιοδήποτε σφάλμα, σε οποιοδήποτε στάδιο, μπορεί να καταλήξει σε αστάθεια του δικτύου.

## 5.7 Περιπτώσεις χρήσης του SDN στα mobile δίκτυα

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται μερικές συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης για να επεξηγηθούν τα βασικά πλεονεκτήματα που παρέχει η εφαρμογή του SDN στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τρεις περιπτώσεις χρήσης αναδεικνύουν τα οφέλη των SDN βασισμένα σε Openflow: α) η διαχείριση παρεμβολής μεταξύ των κυψελών β) διαχείριση mobile κίνησης και γ) η αποδοτική εικονικοποίηση του δικτύου [148].

### α) Inter-cell Interference Management

Μία από τις βασικές στρατηγικές που χρησιμοποιούν σήμερα οι φορείς κινητής τηλεφωνίας για την αντιμετώπιση προβλημάτων χωρητικότητας στα δίκτυά τους είναι η μείωση του μεγέθους των κυψελών. Η υλοποίηση μικρών κυψελών επιτρέπει την καλύτερη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και επομένως καλύτερη φασματική απόδοση. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση έρχεται σαφώς σε βάρος της υψηλότερης παρεμβολής μεταξύ των κυψελών. Η βιομηχανία κυψελοειδών δικτύων έχει

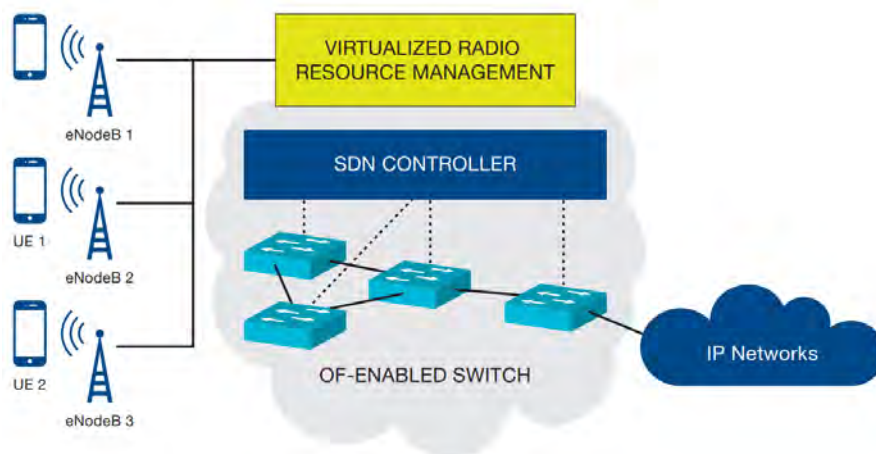
αναγνωρίζει τη δυσκολία στη διαχείριση παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα και έχει αναπτύξει πολλές τεχνικές για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος.

Υπάρχει ένας αριθμός τεχνικών οι οποίες χρησιμοποιούνται στα LTE δίκτυα για να αντιμετωπίσουν την παρεμβολή μεταξύ των κυψελών, συμπεριλαμβανομένων:

- inter-cell interference coordination (ICIC), η οποία επιλεκτικά μειώνει την ισχύ για subchannels στην περιοχή συχνοτήτων,
- enhanced inter-cell interference coordination (e-ICIC), όπου οι μακροκυψέλες συμπληρώνονται με Pico-cells μέσα στην περιοχή κάλυψής τους,
- coordinated multi point transmission/reception (comp), όπου η παρεμβολή μειώνεται στους χρήστες στα άκρα των κυψελών με προγραμματισμό από κοινού αρκετών κυψελών με μάλλον ισχυρή παρεμβολή στην άκρη, ή με μετάδοση από κοινού, έτσι ώστε η ισχύς λήψης και η εμπειρία της υπηρεσίας των χρηστών στα άκρα της κυψέλης να μπορούν να βελτιωθούν.

Αυτές οι τεχνικές βασίζονται σε πολύπλοκους, κατανεμημένους αλγορίθμους με αρνητική επίδραση στην απόδοση του συστήματος από πολλές απόψεις. Για παράδειγμα, η COMP μειώνει τις παρεμβολές στην άκρη της κυψέλης με συντονισμένο προγραμματισμό αρκετών γειτονικών κυψελών ή με κοινή μετάδοση έτσι ώστε να βελτιώνεται η ποιότητα της υπηρεσίας για τους χρήστες των ακραίων κυψελών. Αυτή η προσέγγιση εισάγει σημαντικά γενικά έξοδα επεξεργασίας και επιβάλλει υψηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια και πόρους δικτύου στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (RAN).

Το SDN μπορεί να χειριστεί το πρόβλημα παρεμβολών με έναν καλύτερο τρόπο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-15, το στρώμα λογικά κεντροποιημένου ελέγχου δίνει τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων κατανομής των ραδιοπόρων με συνολική ορατότητα κατά μήκος διαφορετικών σταθμών βάσης, πράγμα το οποίο είναι μακράν βέλτιστο από τη διαχείριση κατανεμημένων ραδιοπόρων (RRM), διαχείριση κινητικότητας, και πρωτοκόλλων/εφαρμογών δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα. Μεταφέροντας την ευφυΐα του δικτύου κεντρικά, οι αποφάσεις διαχείρισης κατανεμημένων ραδιοπόρων (RRM) μπορούν να προσαρμοστούν βασισμένες σε δυναμική κατανομή ισχύος και subcarrier κάθε σταθμού βάσης. Επιπροσθέτως, η κλιμακωσιμότητα βελτιώνεται, επειδή καθώς προστίθενται νέοι χρήστες, η απαιτούμενη χωρητικότητα σε κάθε σταθμό βάσης παραμένει χαμηλή, επειδή η επεξεργασία του RRM κεντροποιείται στον ελεγκτή (SDN controller).



**Σχήμα 5-15. Κεντροποιημένος έλεγχος με χρήση Openflow σταθμού βάσης για διαχείριση παρεμβολών. (πηγή: ONF Solution Brief, September 30, 2013) [141]**

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ελεγκτής (SDN controller) επικοινωνεί με τους σταθμούς βάσης μέσω της πρότυπης southbound διεπαφής (openflow), οποιεσδήποτε αναβαθμίσεις όσον αφορά τη διαχείριση κατανεμημένων ραδιοπόρων δύνανται να επιτευχθούν ανεξαρτήτως του υλικού των σταθμών βάσης.

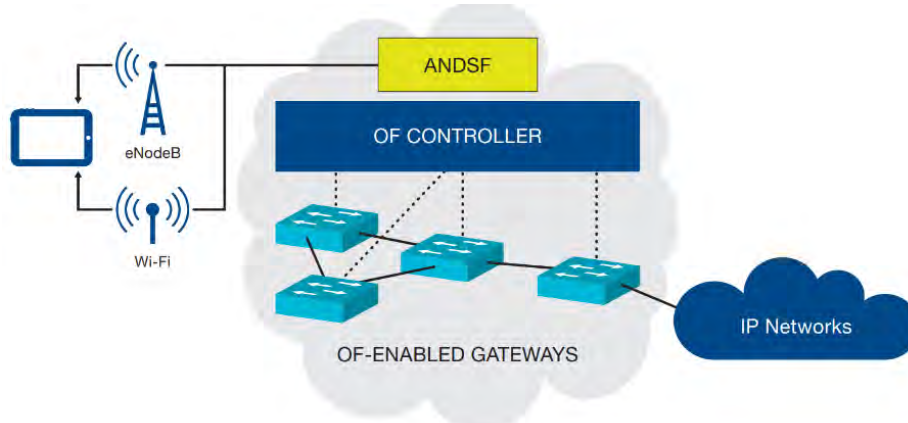
## β) Mobile Traffic Management

Το traffic steering και η διαχείριση μονοπατιού έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον εντός της κοινότητας του SDN. Το traffic steering είναι εφαρμόσιμο σε έναν αριθμό περιοχών και ενδεχόμενων περιπτώσεων χρήσης που περιλαμβάνουν εξισορρόπηση φόρτου (load balancing), εφαρμογή φίλτρου σε περιεχόμενο (content filtering), έλεγχο πολιτικών και εφαρμογή, αποφυγή και ανάκαμψη από καταστροφή (όπως η χρήση των μονοπατιών για backup), ιδιαίτερος σε οτιδήποτε είναι σχετικό με ανακατεύθυνση και διαχείριση ροών.

Στο πλαίσιο των κινητών και ασύρματων δικτύων υπάρχουν περιπτώσεις χρήσης όπως το offloading και η περιαγωγή της Mobile κίνησης, προσαρμογή στο περιεχόμενο (όπως adaptive streaming), και βελτιστοποίηση της mobile κίνησης που θα μπορούσαν να ωφεληθούν σημαντικά με υλοποίηση του Openflow ως πλατφόρμα SDN.

Το offloading είναι επίσης γνωστό ως περιαγωγή Wi-Fi, καθώς συνεπάγεται την κίνηση της κυκλοφορίας από ένα κινητό δίκτυο σε δίκτυο Wi-Fi. Οι κανόνες που ενεργοποιούν το offloading μπορούν να οριστούν είτε από τον τελικό χρήστη είτε από τον operator. Οι τελικοί χρήστες συνήθως το κάνουν για να ελέγξουν το κόστος της υπηρεσίας δεδομένων ή λόγω της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας εύρους ζώνης, ενώ οι φορείς εκμετάλλευσης προσπαθούν να μειώσουν τη συμφόρηση των σταθμών βάσης. Ωστόσο, στα παραδοσιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, δεν υπάρχει πρωτόκολλο που να ελέγχει την προώθηση μέσω διαφορετικών κυψελοειδών τεχνολογιών. Κατά συνέπεια, οι μεταβιβάσεις μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών απαιτούν σύνθετες διαδικασίες που εισάγουν μεγάλες καθυστερήσεις και υψηλά ποσοστά απώλειας πακέτων. Η κυκλοφορία δεν μπορεί να επανατοποθετηθεί δυναμικά, οπότε το offloading στα σημερινά δίκτυα δεν συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση των πόρων όσο θα έπρεπε. Στα δίκτυα SDN η κατάσταση είναι διαφορετική. Το SDN παρέχει το πρωτόκολλο ελέγχου (π.χ. OpenFlow) που λειτουργεί σε διαφορετικές τεχνολογίες, έτσι επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη προϋπόθεση μετάδοσης. Το offloading μπορεί να γίνει δυναμικά και με διάφορα κριτήρια ενεργοποίησης, όπως: αριθμός χρηστών ανά σταθμό βάσης, διαθέσιμο εύρος ζώνης, προφίλ συνδρομητή, τύπο εφαρμογής και διάρκεια ροής. Επίσης, κάθε καταχώριση πίνακα ροής σε μεταγωγείς SDN περιέχει μετρητές πακέτων που επιτρέπουν στον operator να χρησιμοποιεί ως κριτήριο ενεργοποίησης τον ατομικό ρυθμό ροής ή το συνολικό ρυθμό ροής ανά εφαρμογή, κυψέλη, εξοπλισμού χρήστη κ.λπ.

Το Offloading μπορεί επίσης να εφαρμοστεί αντίστροφα (reverse offload), όταν η συμφόρηση (congestion) σε ένα δίκτυο Wi-Fi πυροδοτεί τη μετακίνηση mobile χρηστών σε ένα άλλο Wi-fi ή σε μια mobile σύνδεση δεδομένων (3G ή 4G/LTE). Ο ελεγκτής Openflow (OF Controller) θα πρέπει να αλληλεπιδράσει με οντότητες όπως το ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function, λειτουργία ανακάλυψης πρόσβασης δικτύου και επιλογή) για ανακάλυψη ασύρματων δικτύων κοντά στον mobile χρήστη και πραγματοποίηση του wi-fi offload (Σχήμα 5-16). Η επιλογή του προορισμού περιαγωγής μπορεί να βασιστεί σε μια μετρική QoS, όπως η απόδοση, η ισχύς του σήματος ή η απόσταση για να διατηρηθεί η εμπειρία χρήστη.



Σχήμα 5-16. Openflow-based mobile offload (πηγή: ONF Solution Brief, September 30, 2013 [141])



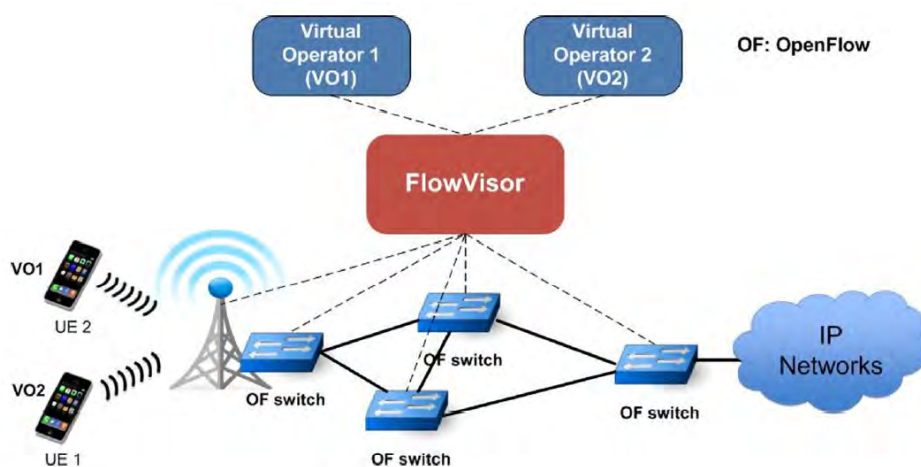
Το offloading της mobile κίνησης με αξιοποίηση των SDN βασισμένων σε Openflow απαιτεί τον ελεγκτή του mobile δικτύου (πιθανόν να κατοικεί στη μονάδα διαχείρισης κινητικότητας MME), να διαλειτουργεί με την ανακάλυψη πρόσβασης δικτύου και τη συνάρτηση επιλογής (ANDSF), το πλαίσιο 3GPP το οποίο παρέχει πληροφορίες συνδεσιμότητας του εξοπλισμού χρήστη και συνδυάζει τα mobile δίκτυα με τα δίκτυα Wi-Fi.

Το Mobile offloading έχει καταστεί εξαιρετικά σημαντικό με το κύμα της mobile κίνησης και συσκευών επειδή δίνει τη δυνατότητα σε Mobile παρόχους να βελτιστοποιούν τους πόρους RAN και να βελτιώνουν την ποιότητα της εμπειρίας (QoE) για εφαρμογές κινητών που είναι απαιτητικές σε δεδομένα.

### γ) Αποδοτική εικονικοποίηση δικτύου

Γενικά, το SDN βασισμένο στο πρωτόκολλο OpenFlow, μετατρέπει τις συσκευές δικτύου σε πλήρως προγραμματιζόμενα στοιχεία προώθησης. Ο σύγχρονος σχεδιασμός συστημάτων χρησιμοποιεί συχνά εικονικοποίηση για να αποσυνδέσει το μοντέλο υπηρεσίας συστήματος από τη φυσική του υλοποίηση και υποδομή. Έτσι, το πρωτόκολλο OpenFlow αποτελεί ένα συγκεκριμένο υπόστρωμα για την ανάπτυξη εικονικοποιημένων περιβαλλόντων. Με τη χρήση ενός hypervisor δικτύου [149], μπορεί κανείς να εικονικοποιήσει πλήρως ένα φυσικό υπόστρωμα δικτύου, εισάγοντας ξεχωριστά επίπεδα αφαίρεσης για να επιτύχει τους επιχειρησιακούς στόχους που διαχωρίζονται από την υποκείμενη φυσική υποδομή. Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη ενός διαφανούς διαχειριστή Proxy OpenFlow (π.χ. FlowVisor [150]) μπορεί να οδηγήσει σε ανάθεση διαφόρων χρηστών δικτύου, με τη μορφή φετών δικτύου (network slices), σε πολλούς ενοικιαστές - μισθωτές (tenants).

Με λύσεις εικονικοποίησης που βασίζονται στο SDN, όπως ο FlowVisor, πολλαπλοί μισθωτές μπορούν να μοιράζονται ένα ενιαίο επίπεδο δεδομένων μεταγωγής με ελεγχόμενο και απομονωμένο τρόπο (Σχήμα 5-17). Ο FlowVisor είναι ένας εξειδικευμένος ελεγκτής SDN που εικονικοποιεί πλήρως το δίκτυο χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο OpenFlow ως εργαλείο αφαίρεσης υλικού. Η εικονικοποίηση δικτύων γίνεται με διαχωρισμό εύρους ζώνης ζεύξης, τοπολογίας, κυκλοφορίας, CPU συσκευής και πινάκων ροών. Πάνω από το στρώμα αφαίρεσης υλικού, κάθε μία από τις απομονωμένες φέτες δικτύου, μπορεί να τρέξει τα δικά της πρωτόκολλα π.χ. μπορούν να βελτιστοποιηθούν για τις εφαρμογές που εκτελούνται σε κάθε μια από αυτές και προσαρμόζονται για τον operator στον οποίο ανήκουν. Όλες οι αποφάσεις διαχείρισης της κυκλοφορίας εκτελούνται από μια προγραμματιζόμενη οντότητα - τον ελεγκτή OpenFlow, όπου ο FlowVisor εξυπηρετεί πολλούς ελεγκτές - ένα για κάθε slice. Κάθε ελεγκτής βλέπει και ελέγχει μόνο το δικό του slice.



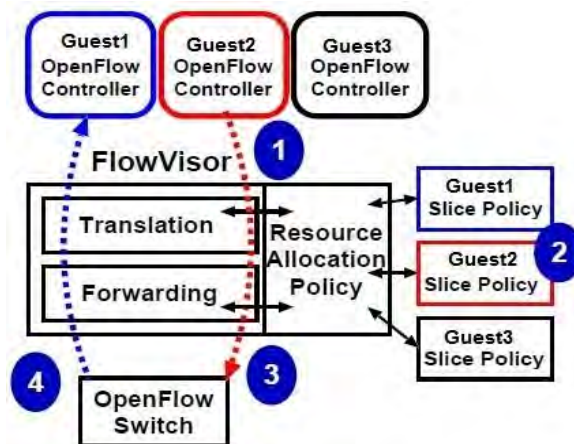
Σχήμα 5-17. Εικονικοποίηση δικτύου με FlowVisor (πηγή: Slavica Tomovic et al., 2014) [148]

Ο FlowVisor τοποθετείται μεταξύ του υποκείμενου υλικού της συσκευής δικτύου στην οποία εγκαθίσταται και του λογισμικού το οποίο ελέγχει, ακριβώς όπως η εικονική μηχανή σε ένα υπολογιστή. Παρεμβάλλεται μεταξύ των ελεγκτών και των δικτυακών συσκευών (OF switches)

δημιουργώντας slices όπου το καθένα από αυτά ελέγχεται από έναν ελεγκτή. Με την χρήση του πρωτοκόλλου OpenFlow ο FlowVisor ελέγχει αυτό το υλικό για την δημιουργία του εικονικού δικτύου. Ο FlowVisor υποστηρίζει πολλαπλά δίκτυα OpenFlow, δεχόμενο ξεχωριστό ελεγκτή για το κάθε δίκτυο. Αυτά ορίζονται ως τεμάχια δικτύου (network slices) και είναι πλήρως απομονωμένα.

Ο FlowVisor θεωρεί κάθε slice ως σύνολο από flow entries οι οποίες συνολικά δημιουργούν ένα ενιαίο πεδίο κίνησης (traffic) που ονομάζεται flowspace. Δοθέντος μιας επικεφαλίδας ενός πακέτου ο FlowVisor μπορεί να αποφασίσει σε ποια slices (δίκτυα) ανήκει και δημιουργεί τα ανάλογα flowspaces για κάθε δίκτυο. Είναι δυνατό ένα πακέτο να ανήκει σε περισσότερα του ενός slices, με μόνο περιορισμό τα flowspaces για κάθε slice να μην επικαλύπτονται σε κανένα σημείο της τοπολογίας.

Πιο παραστατικά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο FlowVisor λειτουργεί σαν ενδιάμεσος (proxy) μεταξύ OpenFlow συσκευών δικτύου και πολλαπλών φιλοξενούμενων (guest) ελεγκτών. Όλα τα μηνύματα OpenFlow περνούν από το FlowVisor, από και προς τους guest ελεγκτές και μέσω μηνυμάτων OpenFlow, ο FlowVisor επικοινωνεί και με τους guests και με τις υπόλοιπες συσκευές του δικτύου. Οι guest ελεγκτές θεωρούν ότι επικοινωνούν κατευθείαν με τις συσκευές δικτύου χωρίς να “βλέπουν” το FlowVisor, επειδή ο FlowVisor είναι "διαφανής" (transparent proxy) και επομένως δεν χρειάζεται να γίνει καμία παραμετροποίηση στους Controllers όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 5-18.



**Σχήμα 5-18. Flow Visor controller με guest controllers. (πηγή: R. Sherwood et al., 2010) [150]**

Εδώ βλέπουμε ένα FlowVisor με τρεις guest ελεγκτές (σημείο 1) οι οποίοι επικοινωνούν με το OpenFlow switch μέσω του FlowVisor. Ο κάθε guest έχει το δικό του slice δίκτυο όπως του ανατίθεται και στο FlowVisor διατηρούνται αρχεία πολιτικών (policies) για κάθε guest (σημείο 2) και βάση αυτών δημιουργούνται τα flowspaces. Αν ένας από τους guests επιχειρήσει να αναθέσει ένα flow entry στο switch, ο FlowVisor ελέγχει σύμφωνα με την πολιτική του guest αν τέτοια ανάθεση είναι επιτρεπτή και έγκυρη, οπότε προωθεί το flow entry στο flow table του μεταγωγέα (σημείο 3). Επίσης οποιαδήποτε κίνηση από τον μεταγωγέα προς τους guest ελεγκτές ελέγχεται από το FlowVisor (σημείο 4) και ανατίθεται στο ανάλογο flowspace.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του FlowVisor συνοψίζονται ως εξής:

- Ορίζει ένα τμήμα του δικτύου (slice) ως ένα σύνολο ροών που τρέχει σε μια τοπολογία με μεταγωγείς (topology of switches).
- Βρίσκεται ανάμεσα σε κάθε ελεγκτή OpenFlow και στους μεταγωγείς, για να βεβαιωθεί ότι ένας guest ελεγκτής μπορεί να παρακολουθεί και να ελέγχει μόνο τους μεταγωγείς που θεωρείται ότι έχει.
- Χωρίζει το εύρος ζώνης σύνδεσης, αναθέτοντας έναν ελάχιστο ρυθμό δεδομένων στο σύνολο ροών που συνθέτουν ένα slice.

Πρέπει να επισημανθεί ότι, ο FlowVisor δεν υποστηρίζει μόνο μια πολύ ευέλικτη μέθοδο καθορισμού δικτύων στο χώρο ροής (flow space) αλλά παρέχει ένα μοντέλο εικονικοποίησης, οποιασδήποτε λογικής προώθησης που συμμορφώνεται με το βασικό μοντέλο ροής.

Η επέκταση του FlowVisor για την υποστήριξη της εικονικοποίησης των σταθμών βάσης θα οδηγήσει σε μια πιο αποδοτική χρήση των περιορισμένων ασύρματων πόρων. Επιπλέον, δεδομένου ότι πολλοί φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, απαιτείται μικρότερος αριθμός εξοπλισμού που συνεπάγεται και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από τα ασύρματα δίκτυα. Η εικονικοποίηση του σταθμού βάσης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, ο τεμαχισμός μπορεί να γίνει στο πεδίο του χρόνου και κάθε ένας από τους εικονικούς σταθμούς βάσης μπορεί να χρησιμοποιήσει όλους τους υποφορείς (subcarriers) και τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής κατά τη διάρκεια χρονικών θυρίδων που τους έχουν εκχωρηθεί ή μπορούν να αποκτήσουν διαφορετικά υποσύνολα υποφορέων και να εκτελέσουν μετάδοση σε όλες τις χρονοθυρίδες με ένα κλάσμα της μέγιστης ισχύος μετάδοσης.

Σύμφωνα με τις περιπτώσεις χρήσης που περιγράφηκαν παραπάνω - τη διαχείριση παρεμβολής μεταξύ κυψελών, τη διαχείριση της mobile κίνησης και την αποδοτική εικονικοποίηση του δικτύου (network slicing με τη χρήση του flowvisor) - τα SDNs που βασίζονται σε Openflow παρέχουν έναν αριθμό από οφέλη για κινητά ασύρματα δίκτυα και επομένως μπορούμε να συμπληρώσουμε ως **πλεονεκτήματα** χρήσης του και τα ακόλουθα:

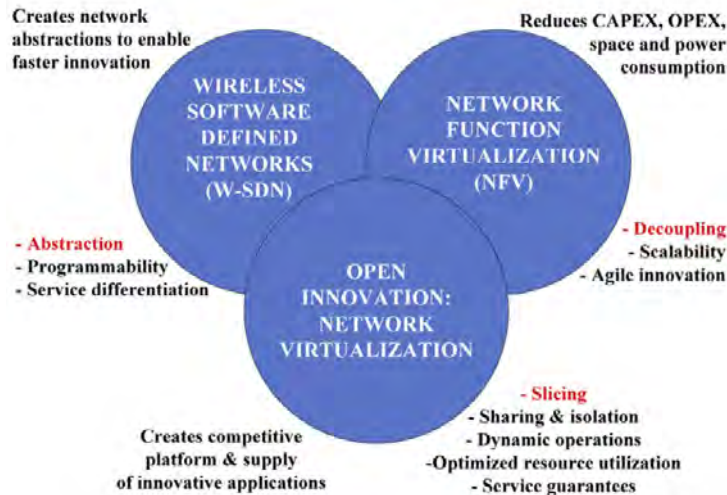
Για τις περιπτώσεις χρήσης της διαχείρισης της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών και τη διαχείριση της Mobile κίνησης, ο λογικά κεντροποιημένος έλεγχος δίνει τη δυνατότητα για πιο αποτελεσματικές και βέλτιστες αποφάσεις διαχείρισης πόρων, βελτιώνοντας την αξιοποίηση του φάσματος ραδιοσυχνότητας. Επιπροσθέτως, απαλλάσσονται οι σταθμοί βάσης από έντονη υπολογιστική επεξεργασία (offloading), μειώνοντας το κόστος του RAN και αυξάνοντας την κλιμακωσιμότητα.

Η κεντροποίηση και η απομόνωση του επιπέδου ελέγχου (control plane) από τα συστατικά του εξοπλισμού, επιτρέπει στους αλγόριθμους διαχείρισης της δικτυακής συμφόρησης να ενημερώνονται από ένα κεντρικό σημείο χωρίς το φόρτο και το κόστος της ρύθμισης ατομικά κάθε συστατικού εξοπλισμού. Οι πάροχοι mobile μπορούν προσαρμοστικά να εφαρμόσουν πολιτικές offloading, βασισμένοι σε πραγματικά πρότυπα κίνησης, αντίθετα με τις σημερινές στατικές πολιτικές που δεν μπορούν να προσαρμοστούν σε μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου.

Το μοντέλο ελέγχου βασισμένο σε Openflow ροές επιτρέπει στους παρόχους κινητής να εφαρμόζουν πολιτικές αποτελεσματικά σε πολύ διαβαθμισμένο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένων session του χρήστη, της συσκευής και των επιπέδων εφαρμογής με ένα πολύ αυτοματοποιημένο τρόπο. Αυτός ο έλεγχος δίνει τη δυνατότητα σε mobile παρόχους να υποστηρίξουν multi-tenancy, ενώ διατηρείται η απομόνωση κίνησης, η ασφάλεια και η ελαστική διαχείριση πόρων, όταν οι πελάτες μοιράζονται την ίδια υποδομή.

## 6. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ SDN & NFV ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 5<sup>ης</sup> ΓΕΝΙΑΣ

Δεδομένου ότι τα δίκτυα 5G θα κατευθύνονται από το λογισμικό, οι νέες λύσεις αρχιτεκτονικής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από δύο αναδυόμενες τεχνολογίες, το SDN και το NFV όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6-1. Ειδικότερα, το όφελος του SDN έγκειται στην ικανότητά του να παρέχει μια αφαίρεση της υποδομής του φυσικού δικτύου. Μέσω της δυνατότητας προγραμματισμού του δικτύου, η δυνατότητα αλλαγής της συμπεριφοράς του δικτύου στο σύνολό του, το SDN απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τη διαχείριση των δικτύων [151].



Σχήμα 6-1. W-SDN με το NFV και ένα παράδειγμα ανοιχτής καινοτομίας, π.χ., virtualization δικτύου. (πηγή: Ian F. Akyildiz et al., 2015)

Το επίπεδο προγραμματισμού του δικτύου που παρέχεται από το SDN επιτρέπει την προσαρμογή και βελτιστοποίηση διαφόρων φετών δικτύου για διαφορετικές υλοποιήσεις υπηρεσιών, χρησιμοποιώντας την ίδια φυσική και λογική υποδομή δικτύου. Επιπλέον, διαχωρίζοντας τις λειτουργίες του δικτύου από τις υποκείμενες συσκευές υλικού, το NFV επιτρέπει μια λειτουργία δικτύου να εφαρμοστεί σε λογισμικό είτε τοπικά είτε σε απομακρυσμένους διακομιστές και data centers. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να βελτιώσει την δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου, πράγμα που επιτρέπει τη βέλτιστη οργάνωση και την εύκολη διαχείριση και ελέγχου ολόκληρου του δικτύου. Το σημαντικότερο όφελος που επιφέρει το NFV είναι η ευελιξία να εκτελούνται και να βελτιώνονται οι λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου έγκαιρα και ανεξάρτητα από την υποκείμενη φυσική υποδομή του δικτύου.

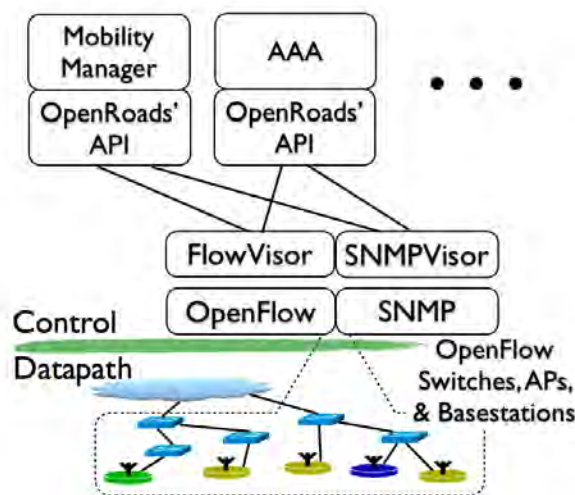
Πρόσφατα, οι έννοιες αυτές υλοποιούνται σε ασύρματα κυψελοειδή δίκτυα μέσω διαφόρων πτυχών, εφοδιάζοντας τα κυψελοειδή δίκτυα με την απαραίτητη ευελιξία για να εξελιχθούν και να προσαρμοστούν σύμφωνα με το συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον δικτύου για τα δίκτυα 5G. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια επισκόπηση μερικών αρχιτεκτονικών που έχουν υιοθετήσει τις παραπάνω τεχνολογίες [151] [152]. Ιδιαίτερο βάρος δίνεται στην αρχιτεκτονική του SoftAir ως ένα νέο παράδειγμα για τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς [153]. Το SoftAir παρέχει υψηλής ευελιξίας αρχιτεκτονική, η οποία μπορεί να επιταχύνει τις καινοτομίες τόσο για την υποδομή προώθησης υλικού όσο και για τους αλγόριθμους δικτύωσης λογισμικού μέσω του διαχωρισμού του επιπέδου ελέγχου και του επιπέδου δεδομένων, επιτρέποντας την αποδοτική και προσαρμοστική κοινή χρήση πόρων δικτύου μέσω εικονικοποίησης δικτύου. Τέλος, ενθαρρύνει τη σύγκλιση των ετερογενών δικτύων μέσω ανοικτών και τεχνολογικά ανεξάρτητων διεπαφών και ενισχύει την ενεργειακή απόδοση μέσω της δυναμικής κλιμάκωσης της υπολογιστικής ικανότητας των SD-BSSs, αποτελώντας μια ολοκληρωμένη λύση τόσο σε επίπεδο RAN όσο και σε επίπεδο CN.

Στο τέλος της ενότητας θα περιγράψουμε την τεχνολογία του Network Slicing, που υποστηρίζει ένα σύνολο υπηρεσιών με ξεχωριστές απαιτήσεις σε μια κοινή υποδομή και υπόσχεται να παίξει καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα 5G.

## 6.1 OpenRoads

Το OpenRoads [154] είναι μια πρόωμη προσπάθεια να αναπτυχθεί μια ασύρματη πλατφόρμα SDN με το OpenFlow και το NOX από το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ. Χρησιμοποιεί το SDN ως γέφυρα μεταξύ τεχνολογιών όπως το LTE, το WiFi ή το WiMAX για να υποστηρίξει την ομαλή κινητικότητα των χρηστών. Η υποστήριξη του συνδυασμού πολλαπλών τεχνολογιών μπορεί να αυξήσει την ικανότητα και την κάλυψη του δικτύου εκμεταλλευόμενη τις διαθέσιμες τεχνολογίες. Διαχωρίζει το επίπεδο ελέγχου από το datapath (επίπεδο δεδομένων) και παράγει φέτες δικτύου (network slices) χρησιμοποιώντας το FlowVisor [150] για να απομονώσει διαφορετικές ροές. Η υποκείμενη υποδομή ρυθμίζεται με τη χρήση του SNMPVisor, μια διεπαφή γραμμής εντολών (command line interface) για τη ρύθμιση των στοιχείων του επιπέδου δεδομένων με τη χρήση του πρωτόκολλο SNMP. Με άλλα λόγια, το OpenRoads επιτρέπει την εκτέλεση πολλών διαφορετικών πειραμάτων και υπηρεσιών ταυτόχρονα σε ένα φυσικό δίκτυο.

Στην αρχιτεκτονική αυτή προστίθεται το OpenFlow σε σημεία πρόσβασης WiFi και σταθμούς βάσης WiMAX για τον έλεγχο της κυκλοφορίας και χρησιμοποιείται ο NOX controller ως ελεγκτής δικτύου που μπορεί να επικοινωνεί με συσκευές OpenFlow και να παρέχει καθολικές προβολές του δικτύου. Ο FlowVisor μπορεί να θεωρηθεί ως ένας διαφανής proxy για το OpenFlow. Τεμαχίζει το δίκτυο σε φέτες (slices) με σκοπό να μεταβιβάσει τον έλεγχο των διαφορετικών ροών σε διαφορετικούς ελεγκτές. Αυτή η ιδέα του τεμαχισμού του δικτύου θα επεκταθεί και στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, όπου προτείνεται με την εικονικοποίηση του υποστρώματος του δικτύου και με το διαχωρισμό σε μικρότερες κυψέλες να εικονικοποιηθούν οι ασύρματοι πόροι και να επιτραπεί στους εικονικούς διαχειριστές του δικτύου (Mobile Virtual Network Operator - MVNO) να συνυπάρξουν σε ένα ενιαίο φυσικό επίπεδο του δικτύου. Η βασική δομή του OpenRoads φαίνεται στο Σχήμα 6-2. Το OpenRoads θα μπορούσε επίσης να διαχωρίσει επιτυχώς την κίνηση των διαφορετικών χρηστών με διαφορετικές πολιτικές προώθησης. Το OpenRoads είναι το πρώτο έργο για τη μετακίνηση του ασύρματου δικτύου προς μια λειτουργία πιο ανοικτή (openness). Ωστόσο, στοχεύει κυρίως σε δίκτυα WiMAX / WiFi με μικρή υποστήριξη για κυψελοειδή δίκτυα.



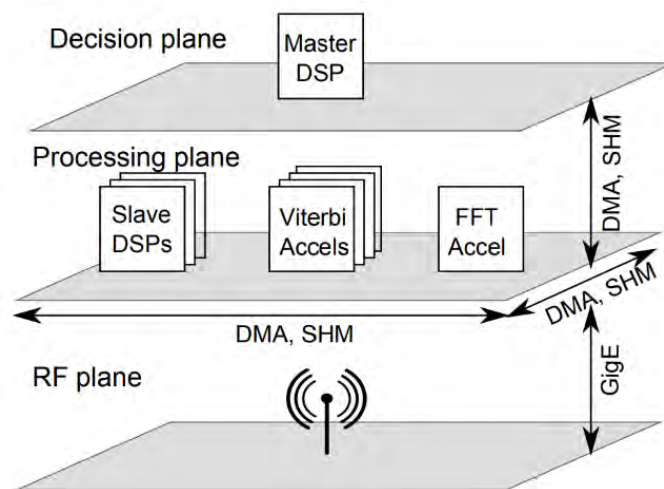
Σχήμα 6-2. OpenRoads: Ασύρματη αρχιτεκτονική OpenFlow (πηγή: K.-K. Yap et al., 2010)

## 6.2 OpenRadio

Ένα νέο προγραμματιζόμενο ασύρματο επίπεδο δεδομένων προτείνεται από το OpenRadio [155] που παρέχει δυνατότητες αρθρωτού προγραμματισμού για ολόκληρη την ασύρματη στοίβα. Το OpenRadio, είχε ως κίνητρο τη δυσκολία του συνεχούς ανασχεδιασμού των δικτύων ώστε αυτά να μπορούν να συμβαδίζουν με την εξέλιξη των πρωτοκόλλων και έτσι προτείνει τη χρήση του SDN για την κατασκευή κυψελοειδών δικτύων κορμού (cellular core networks) που υποστηρίζουν πιο αποτελεσματικά την εξέλιξη αυτή. Η κύρια ιδέα πίσω από το OpenRadio είναι να υποστηρίζει

συστηματικά διαφορετικά πρωτόκολλα (3G, 4G, ή WiFi), ενώ βελτιστοποιεί τη λειτουργία σε όλα αυτά. Χρησιμοποιώντας αρθρωτές αφαιρέσεις, το OpenRadio μπορεί να εξελίξει στοιχεία πρωτοκόλλου αναβαθμίζοντας τη λειτουργία του επιπέδου ελέγχου, συχνά αναβαθμίζοντας το λογισμικό χωρίς να αντικαταστήσει το υλικό του ελεγκτή ή τα στοιχεία (συσκευές) του επιπέδου δεδομένων.

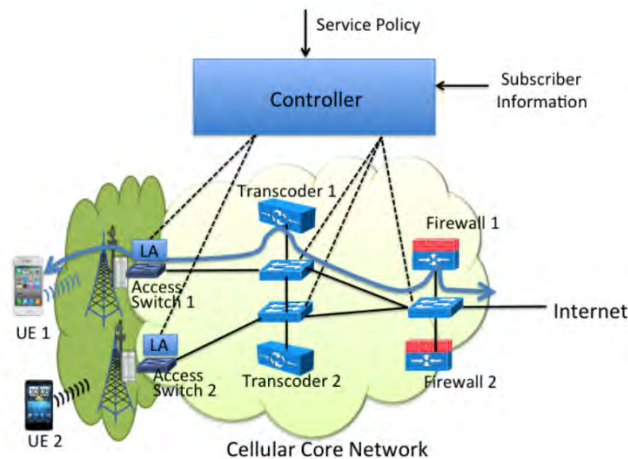
Το Σχήμα 6-3 δείχνει την αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης (BS) OpenRadio, η οποία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση αρχιτεκτονικής ψηφιακών επεξεργαστών σημάτων πολλαπλών πυρήνων (multi-core DSP - Digital Signal Processors). Αυτές οι αρχιτεκτονικές τυπικά περιέχουν πυρήνες DSP βελτιστοποιημένους για υπολογισμούς επεξεργασίας σήματος και επιταχυντές υλικού που παρέχουν επιτάχυνση συγκεκριμένων, συνήθως χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων. Τέτοιες πλατφόρμες παρέχουν την επιθυμητή ισορροπία μεταξύ της απόδοσης και της ευελιξίας. Η πρόκληση του λογισμικού είναι να αξιοποιήσει την ακατέργαστη τεράστια υπολογιστική ισχύ διατηρώντας ταυτόχρονα τις αρθρωτές αφαιρέσεις (abstractions). Από την άλλη πλευρά, ο βασικός στόχος του συστήματος είναι ο χρόνος εκτέλεσης, δηλαδή οι πυρήνες DSP και οι επιταχυντές υλικού, να εκτελούν γρήγορα τις προκαθορισμένες ενέργειες. Προς αυτή την κατεύθυνση, ενώ η αποδοτική εκτέλεση επιτυγχάνεται μέσω του επιταχυνόμενου υλικού, ο προσδιορισμός στο χρόνο εκτέλεσης επιτυγχάνεται μέσω του διαχωρισμού του επιπέδου απόφασης (Decision plane) από το επίπεδο της επεξεργασίας (Processing plane). Ο ίδιος διαχωρισμός εφαρμόζεται και στους πόρους υλικού, ορίζοντας τον πυρήνα του επιπέδου απόφασης ως κύριο πυρήνα (Master DSP) που ελέγχει τους πυρήνες επεξεργασίας και επιταχυντές (Slave DSPs, accelerators) του επιπέδου επεξεργασίας. Δύο σημαντικές συμβολές του σχεδιασμού του OpenRadio είναι οι εξής. Πρώτον, αποσυνδέει το ασύρματο πρωτόκολλο από το υλικό, ακόμα και αν διασφαλίζει ότι οι πλατφόρμες πολλαπλών πυρήνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή των πρωτοκόλλων. Δεύτερον, παρέχει μια προγραμματιζόμενη διεπαφή μεταξύ των στοιχείων επεξεργασίας και απόφασης των ασύρματων πρωτοκόλλων. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στην διαχείριση των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών καθώς επίσης παρέχει υποστήριξη για το QoS και την εξέλιξη και την τυποποίηση του πρωτοκόλλου.



**Σχήμα 6-3. Στα εσωτερικά του OpenRadio BS με διαφορετικά είδη υπολογιστικών πυρήνων (πηγή: M. Bansal et al., 2012)**

### 6.3 SoftCell

Η κατανομή πόρων είναι απαραίτητη στο κυψελοειδές δίκτυο όπου το RAN συνδέεται με τα όρια του Internet για να μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας. Το παραδοσιακό κυψελοειδές δίκτυο συγκεντρώνει τον έλεγχο αυτής της όψης του δικτύου στις πύλες PG-W που οδηγεί σε καθυστέρηση και συμφόρηση. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική οδηγεί σε σημαντικούς περιορισμούς αποτυχίας και κλιμάκωσης, που απαιτούν πολύπλοκες και δαπανηρές μονάδες P-GW, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι ανοχής σφάλματος και κλιμάκωσης.



Σχήμα 6-4. Αρχιτεκτονική δικτύου SoftCell (πηγή: X. Jin et al., 2013)

Το Softcell [156] είναι η πρώτη προσπάθεια για να επεκταθεί το SDN στον πυρήνα του κινητού δικτύου. Ουσιαστικά υλοποιεί τις βασικές αρχές του SDN στο επίπεδο ελέγχου του πυρήνα του δικτύου. Το SoftCell καταργεί τις πολύπλοκες λειτουργίες από το P-GW στους μεταγωγείς πρόσβασης στους σταθμούς βάσης. Ο ελεγκτής έχει μια συνολική προβολή του δικτύου και μπορεί να δρομολογήσει την κυκλοφορία μέσω middle-boxes που είναι εγκατεστημένα στους μεταγωγείς όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-4. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση σχεδιασμού απαιτεί υψηλή κατάσταση (για υποστήριξη ευρείας ποικιλίας πακέτων) και εύρος ζώνης (προς υποστήριξη της κίνησης στο Internet), οι οποίες ενδέχεται να περιορίσουν την επεκτασιμότητα του δικτύου. Για να αντιμετωπίσει αυτή την ανησυχία, το SoftCell εισάγει έναν πολυδιάστατο αλγόριθμο συσσωρευμένης δέσμης πακέτων για να μειώσει το μέγεθος του πίνακα προώθησης στις οντότητες του επιπέδου δεδομένων. Δεδομένου ότι η πλειονότητα της κυκλοφορίας προέρχεται από κινητές συσκευές, για να μειωθεί η απαίτηση εύρους ζώνης, το SoftCell εκτελεί ταξινόμηση πακέτων η οποία πραγματοποιείται στους μεταγωγείς πρόσβασης, δίπλα στους σταθμούς βάσης, χρησιμοποιώντας έναν τοπικό ελεγκτή και μεταγωγείς υλοποιημένους σε λογισμικό όπως vSwitch [157]. Το SoftCell εγγυάται ότι τα πακέτα που ανήκουν στην ίδια σύνδεση διασχίζουν την ίδια σειρά middleboxes προς τις δύο κατευθύνσεις, ακόμη και με την ύπαρξη κινητικότητας, βελτιώνοντας την επεκτασιμότητα και την ευελιξία του δικτύου.

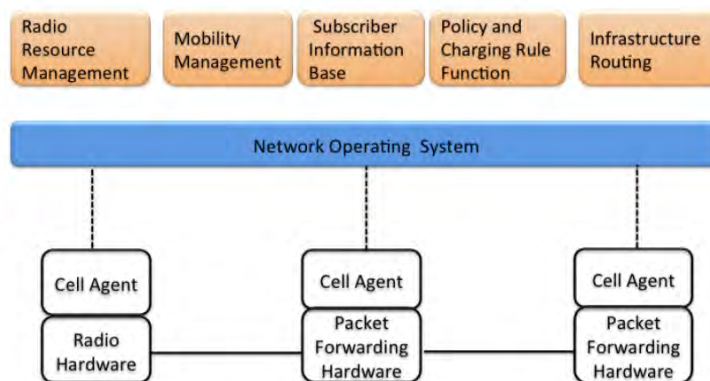
## 6.4 CellSDN

Σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα κυψελοειδή δίκτυα έχουν ορισμένα μοναδικά χαρακτηριστικά και αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις κλιμάκωσης. Για παράδειγμα, επειδή στα κυψελοειδή δίκτυα οι χρήστες κινούνται πάντα, θα δημιουργηθεί ένας μεγάλος αριθμός ενημερώσεων κατάστασης από το επίπεδο δεδομένων, το οποίο θα δημιουργήσει μεγάλη πίεση σε έναν κεντρικό ελεγκτή. Επιπλέον, η μέση καθυστέρηση απόκρισης θα αυξηθεί επίσης έντονα όταν ένα σύνολο σταθμών βάσης επικοινωνεί ταυτόχρονα με ένα απομακρυσμένο controller. Στις προκλήσεις αυτές προσπαθεί να δώσει λύση η αρχιτεκτονική CellSDN [158].

Στο Σχήμα 6-5 συνοψίζεται η αρχιτεκτονική δικτύου CellSDN, η οποία στοχεύει στην επίτευξη ενός κεντρικού επιπέδου ελέγχου για τα δίκτυα κορμού των κυψελοειδών δικτύων. Η αρχιτεκτονική SDN προσφέρει έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να θυσιάζεται η δυνατότητα κλιμάκωσης. Ενεργοποιεί το SDN σε κυψελοειδή δίκτυα με 4 επιπλέον επεκτάσεις: (1) οι εφαρμογές του ελεγκτή εκφράζουν την πολιτική όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των συνδρομητών, (2) οι μεταγωγείς εκτελούν έναν τοπικό πράκτορα ελέγχου για απλές ενέργειες, (3) οι μεταγωγείς υποστηρίζουν πιο ευέλικτη λειτουργικότητα του επιπέδου δεδομένων και (4) οι σταθμοί βάσης (BSs) υποστηρίζουν τον απομακρυσμένο έλεγχο των εικονικών ασύρματων πόρων. Ο ελεγκτής SDN αποτελείται από λειτουργικό σύστημα δικτύου (NOS) που εκτελεί πολλές ενότητες εφαρμογών π.χ. διαχείριση ραδιοπόρων, διαχείριση κινητικότητας και δρομολόγηση. Επίσης, η SIB (Subscriber Information Base) αποθηκεύει και διατηρεί πληροφορίες για τους χρήστες, όπως δυναμικά δεδομένα π.χ. η

τρέχουσα διεύθυνση IP των χρηστών, η τοποθεσία και η συνολική κατανάλωση κυκλοφορίας. Το NOS μπορεί να μετατρέπει τις πολιτικές σε κανόνες αλλαγής, όπως την αντιστοίχιση αποφάσεων σε σχέση με τις κεφαλίδες πακέτων ή τη μέτρηση δικτύου στους συνδρομητές, επιτρέποντας στις ενότητες εφαρμογών να εστιάζουν στους συνδρομητές και τα χαρακτηριστικά τους. Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται αποτελεσματική κατανομή πόρων μέσω virtualization δικτύου χρησιμοποιώντας το FlowVisor (ένα proxy μεταξύ του ελεγκτή και του επιπέδου δεδομένων). Ο ελεγκτής μπορεί με αυτό το τρόπο να διαιρέσει δυναμικά το δίκτυο σε φέτες (slices) που κάθε μια να χειρίζεται όλη την κίνηση που ταιριάζει με κάποιο χαρακτηριστικό στο προφίλ του συνδρομητή. Επιτρέπει στον πάροχο να απομονώνει την κυκλοφορία χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα παλαιού τύπου.

Επιπλέον, ο ελεγκτής ενδέχεται να μην είναι σε θέση να ανταποκριθεί τόσο γρήγορα σε τοπικά συμβάντα, όπως μπορούν οι ίδιοι οι μεταγωγείς. Οι μεταγωγείς έχουν κάποιο απλό λογισμικό ελέγχου (που ονομάζεται τοπικός πράκτορας ελέγχου – local control agent) που εκτελεί απλές τοπικές ενέργειες υπό την εντολή του ελεγκτή π.χ. αλλάζοντας αυτόματα την προτεραιότητα μιας ουράς όταν η κυκλοφορία υπερβαίνει ένα όριο ή αλλάζοντας μια ετικέτα σε ένα πακέτο δρομολογώντας την κίνηση μέσω ενός ενδιάμεσου middlebox. Αυτές οι λειτουργίες δεν επωφελούνται σημαντικά από το συντονισμό του ελεγκτή με βάση την καθολική εικόνα όλου του δικτύου, αλλά απαιτούν γρήγορο χρόνο απόκρισης. Ως εκ τούτου, η ερευνητική πρόκληση για το CellSDN είναι ο σχεδιασμός των τοπικών πρακτόρων και οι τεχνικές διαχωρισμού των λειτουργιών.



Σχήμα 6-5. Cellular SDN (CellSDN) (πηγή: L. Li et al., 2010)

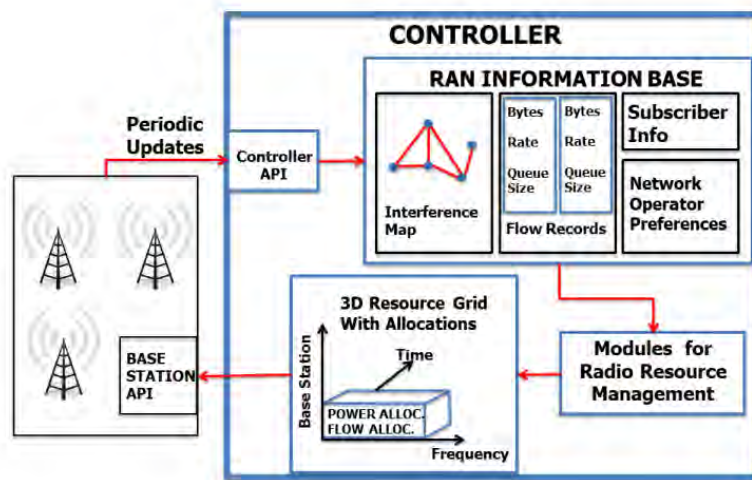
Υπάρχουν όμως και κάποιοι περιορισμοί του CellSDN. Δεδομένου ότι το CellSDN είναι το πρώτο έργο για την ενσωμάτωση του SDN σε κυψελοειδή δίκτυα, αφορά μόνο για το δίκτυο κορμού και δεν έχει καμία σχέση με το RAN. Παρέχει μια αφηρημένη έννοια χωρίς πρακτικές μεθόδους υλοποίησης. Συγκεκριμένα, εισάγεται η έννοια της αποσύνδεσης, η οποία περιλαμβάνει (i) ελεγκτή και μεταγωγείς με τοπικούς πράκτορες ελέγχου, (ii) μεταγωγείς με ευέλικτες λειτουργίες επιπέδου δεδομένων, όπως βαθιά επιθεώρηση πακέτων και συμπίεση κεφαλίδας. Το CellSDN αναφέρει επίσης τις βασικές λειτουργίες εικονικοποίησης, όπου οι σταθμοί βάσης πρέπει να υποστηρίζουν την εικονικοποίηση των ασύρματων πόρων για την ευέλικτη και αποδοτική διαχείριση τους.

## 6.5 SoftRAN

Τα σημερινά δίκτυα ραδιοπρόσβασης χρησιμοποιούν κατανομημένους αλγόριθμους για τη διαχείριση περιορισμένου φάσματος και την εκτέλεση μεταπομπών. Για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης ασύρματης κίνησης (mobile traffic) και της πυκνής ανάπτυξης σταθμών βάσης, ορισμένοι ερευνητές πρότειναν το SoftRAN [159], ένα κεντροποιημένο Software Defined δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας, για αποδοτική και αποτελεσματική διαχείριση μεταπομπών, κατανομή ραδιοπόρων καθώς και ρύθμιση τιμών ισχύος μετάδοσης. Το SoftRAN χρησιμοποιεί ένα λογικά κεντροποιημένο επίπεδο ελέγχου, ασύρματης πρόσβασης για την αφαίρεση ενός συνόλου σταθμών βάσης ως ένα ενιαίο εικονικό σταθμό βάσης. Οι ραδιοπόροι αφαιρούνται στις διαστάσεις του χώρου, του χρόνου και της συχνότητας, οδηγώντας σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα πόρων που



μπορεί να διατεθεί κεντρικά για την επίτευξη σχεδόν της βέλτιστης κατανομής τους. Στόχος είναι η εικονικοποίηση του RAN σε ένα εικονικοποιημένο σταθμό βάσης, ο οποίος θα πραγματοποιεί κατανομή των κινητών πόρων, επιτελώντας εξισορρόπηση φορτίου κίνησης καθώς και άλλες λειτουργίες ελέγχου σε ένα μόνο σημείο. Το Σχήμα 6-6 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του SoftRAN.



Σχήμα 6-6. Αρχιτεκτονική SofRAN (πηγή: A. Gudipati et al., 2013)

Στο SoftRAN, τα δίκτυα ελέγχονται με κεντρικό τρόπο: όλοι οι σταθμοί βάσης αφαιρούνται ως εικονικά στοιχεία και διοικούνται από τον λογικό κεντρικό ελεγκτή. Ο ελεγκτής διατηρεί την εποπτεία της κατάστασης ολόκληρου του δικτύου και λαμβάνει αποφάσεις. Υπάρχουν καθορισμένα APIs για την επικοινωνία του επιπέδου ελέγχου με τους σταθμούς βάσης ώστε να γίνεται ενημέρωση της καθολικής κατάστασης του δικτύου και για τη διαμόρφωση του καθενός σταθμού βάσης. Διαφορετικές ενότητες του ελεγκτή έχουν πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων πληροφοριών (RAN information base - RIB) που αποτελείται από χάρτες παρεμβολών (interference map), αρχεία ροής (flow records) και προτιμήσεις των operators (network operator preferences) και χρησιμοποιούν αυτές τις πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων διαχείρισης των ραδιοπόρων.

Ωστόσο, αυτός ο σχεδιασμός πρέπει να αντιμετωπίσει την καθυστέρηση επικοινωνίας (latency) μεταξύ του επιπέδου δεδομένων και του επιπέδου ελέγχου ειδικά όταν πρέπει να ληφθούν γρήγορα αποφάσεις. Η καθυστέρηση αντιμετωπίζεται μέσω κατανομής καθηκόντων, όπου μεμονωμένα στοιχεία στο επίπεδο δεδομένων έχουν τον τοπικό έλεγχο, ενώ το λογικά κεντρικοποιημένο επίπεδο ελέγχου (ο controller), έχει τον έλεγχο για ολόκληρο το δίκτυο. Το SoftRAN έχει δύο βασικές αρχές για τον διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου. Πρώτον, οι αποφάσεις ελέγχου που επηρεάζονται από γειτονικούς σταθμούς βάσης και κυψέλες πρέπει να γίνονται στον κεντρικό ελεγκτή. Δεύτερον, οι αποφάσεις που εξαρτώνται από τις ταχέως μεταβαλλόμενες παραμέτρους πρέπει να γίνονται τοπικά από σταθμούς βάσης κατά προτίμηση, π.χ. κατανομή των πόρων. Λειτουργίες όπως η διαχείριση της μεταπομπής (handover) και η κατανομή της ισχύος μετάδοσης γίνονται στον controller καθώς οι αποφάσεις αυτές δεν μπορούν να γίνουν στο σταθμό βάσης αφού απαιτείται γενικότερος συντονισμός και με τους γειτονικούς σταθμούς. Από την άλλη πλευρά, η ευθύνη για την κατανομή συχνότητας κατερχόμενη ζεύξης (downlink) μεταβιβάζεται στον σταθμό βάσης καθώς αυτή η εκχώρηση δεν απαιτεί συντονισμό μεταξύ των γειτονικών κυψελών. Πράγματι, τέτοιες παράμετροι κατανομής συχνοτήτων μεταξύ των κυψελών ενημερώνονται συχνά, καθιστώντας δύσκολη την ανεκτικότητα των καθυστερήσεων στη λήψη αυτών των αποφάσεων σε κεντρικό επίπεδο. Ωστόσο, η κατανομή συχνοτήτων ανερχόμενη ζεύξης (uplink) γίνεται στον ελεγκτή για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ γειτονικών κυψελών.

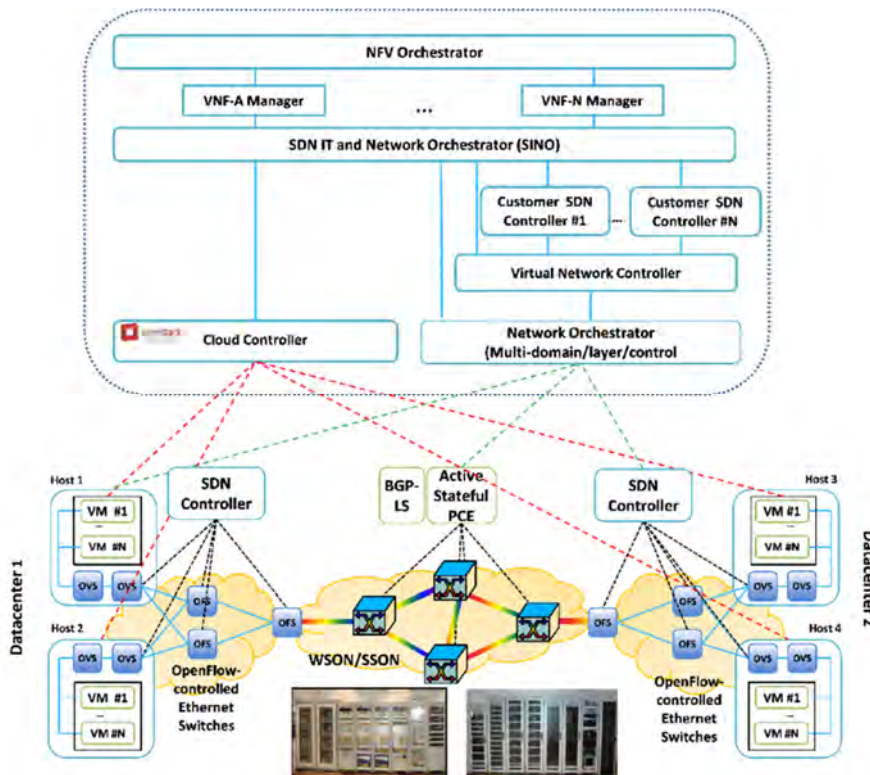
Το SoftRAN βελτιώνει την αντιστοίχιση πόρων (διαχείριση χρόνου και συχνότητας σε κάθε σταθμό βάσης) και την αποτελεσματική κατανομή ισχύος εκπομπής για ένα σύνολο πόρων σε κάθε σταθμό βάσης ενός πυκνού WCN (Wireless Core Network).

## 6.6 ADRENALINE

Το ADRENALINE [160] αποτελεί ένα ρεαλιστικό περιβάλλον δοκιμών (testbed) το οποίο περιλαμβάνει πολλά αλληλένδετα αν και ανεξάρτητα συστατικά και πρωτότυπα, προσφέροντας υπηρεσίες end-to-end, διασυνδέοντας χρήστες και εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών ετερογενών δικτύων για την ανάπτυξη και δοκιμή υπηρεσιών 5G. Επιτρέπει σε ερευνητές, κατασκευαστές συστημάτων και φορείς εκμετάλλευσης να αξιολογούν πειραματικά, σε συνθήκες κοντά στα συστήματα παραγωγής, όλες τις πτυχές που σχετίζονται με τον cloud computing, σε καταναμημένα περιβάλλοντα με πολλαπλά γεωγραφικά διασκορπισμένα κέντρα δεδομένων, ενώ παράλληλα διαχειρίζονται πόρους αποθήκευσης, υπολογισμού και δικτύωσης.

Το ADRENALINE περιλαμβάνει ένα επίπεδο ελέγχου πολλαπλών τεχνολογιών για δίκτυα πολλαπλών στρώσεων, τα οποία διαχειρίζονται τους πόρους δικτύωσης. Εν συντομία, ένα επίπεδο ελέγχου είναι ένα λογισμικό που αυτοματοποιεί τις διαδικασίες που εμπλέκονται στην παροχή υπηρεσιών δικτύωσης, όπως οπτικές διαδρομές φωτός ή υπηρεσίες συνδεσιμότητας Ethernet / MPLS-TP / IP. Ο σχεδιασμός του επιπέδου ελέγχου στο ADRENALINE ακολουθεί τις γενικές αρχές του SDN.

Οι υπηρεσίες συνδεσιμότητας δικτύου παρέχονται από μια ενορχήστρωση ελέγχου. Σε ένα συγκεκριμένο τομέα και επίπεδο, το επίπεδο ελέγχου μπορεί να βασίζεται στην τεχνολογία και τα πρωτόκολλα GMPLS - ένα καταναμημένο σύστημα στο οποίο ένας αποκλειστικός ελεγκτής είναι υπεύθυνος για κάθε κόμβο αυτόνομα - ή ακολουθεί τις αρχές SDN / OpenFlow, με κεντρικό ελεγκτή που διαχειρίζεται όλες τις πτυχές ενός δικτύου, ρυθμίζοντας δυναμικά τα δίκτυα σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών και των εφαρμογών. Τα επίπεδα ελέγχου GMPLS μπορούν να επεκταθούν με ένα στοιχείο υπολογιστικής διαδρομής (PCE - Path Computation Element), το οποίο είναι μια εφαρμογή ή υπηρεσία που αναλαμβάνει συγκεκριμένα καθήκοντα και ευθύνες του επιπέδου ελέγχου, όπως υπολογισμός βέλτιστων διαδρομών ή ενεργώντας ως κεντρικό σημείο για τη διαχείριση των συνδέσεων (Active Stateful PCE).



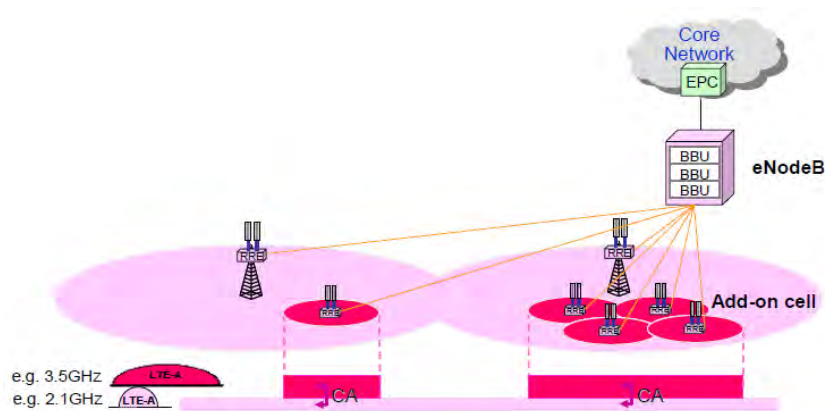
Σχήμα 6-7. Αρχιτεκτονική ADRENALINE (πηγή: Centre Tecnologic Telecomunicacions Catalunya)

Η ενορχήστρωση δικτύου από άκρο σε άκρο (για την παροχή ενός γενικού ελέγχου ανεξάρτητα από τον αριθμό των τομέων) ενεργοποιείται με την εκτεταμένη χρήση της αρχιτεκτονικής και του πλαισίου λειτουργίας δικτύου με βάση τις εφαρμογές, χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του επιπέδου ελέγχου ADRENALINE. Οι υπηρεσίες εικονικοποίησης δικτύου από άκρο σε άκρο εκτελούνται από έναν Εικονικό Ελεγκτή Δικτύου (Virtual Network Controller), ο οποίος είναι σε θέση να παρέχει αφηρημένες προβολές δικτύου πολλαπλών επιπέδων σε διάφορους πελάτες, διασφαλίζοντας την ασφάλεια, την απομόνωση και τον ανεξάρτητο έλεγχο του SDN (δηλ. τους ελεγκτές SDN του πελάτη).

Όπως αναφέρθηκε, στο αλληλένδετο περιβάλλον στο οποίο οι υπηρεσίες 5G από άκρο σε άκρο μπορούν να καλύπτουν ετερογενείς τεχνολογίες cloud-computing και δικτύωσης, το ADRENALINE περιλαμβάνει ένας ολοκληρωμένο ενοποιημένο πληροφοριακό και δικτυακό ενορχηστρωτή SDN (SINO - SDN Integrated IT and Network Orchestrator). Ένα SINO είναι ένα συγκεντρωτικό σύστημα ικανό να συντονίζει, από άποψη υψηλού επιπέδου, πτυχές διαχείρισης του cloud και δικτύων σε σύγχρονα περιβάλλοντα πολλαπλών μισθωτών (multi-tenant environments), παρέχοντας στην πλατφόρμα την εκτέλεση εφαρμογών χρηστών και εικονικοποιημένων λειτουργιών δικτύου (VNF Manager). Ένας ενορχηστρωτής NFV (NFV orchestrator) παρέχεται επίσης για να αναπτύξει την από άκρο σε άκρο εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών VNF Forwarding Graphs. Ο διαχειριστής υπηρεσίας Cloud Computing υλοποιείται με βάση ένα τροποποιημένο λογισμικό OpenStack, ένα από τα κορυφαία καταναμημένα συστήματα cloud computing ανοιχτού κώδικα.

## 6.7 DOCOMO

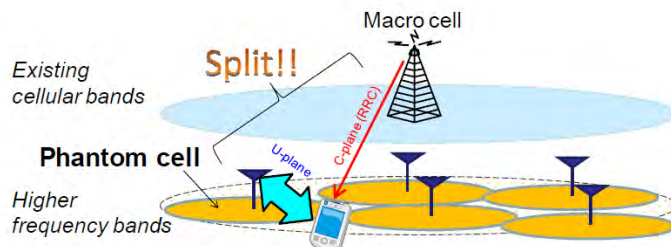
Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6-8, η DOCOMO [161] εκμεταλλεύεται την ιδέα του C-RAN στο σχεδιασμό του 5G RAN για να διαχωρίσει το Επίπεδο Ελέγχου (C) από το Επίπεδο Δεδομένων Χρήστη (U) και να μετακινήσει τη λειτουργικότητα ελέγχου στο cloud για μια κεντροποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου με απομακρυσμένο εξοπλισμό ασύρματης πρόσβασης. Επιπλέον, υιοθετεί τεχνολογίες συνάθροισης φορέων (CA - carrier aggregation) και μικρών κυψελών (small cells), δημιουργώντας μια προηγμένη αρχιτεκτονική C-RAN όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-8. Συγκεκριμένα, μικρές κυψέλες με κόμβους χαμηλής ισχύος αντιμετωπίζουν την έκρηξη της κίνησης των κινητών συσκευών (mobile traffic). Η βασική συνδεσιμότητα και η κινητικότητα διατηρείται κάτω από την κάλυψη των μακροκυψελών (macrocell) και οι μικρές κυψέλες (οι αποκαλούμενες πρόσθετες κυψέλες - add-on cells) επιτυγχάνουν υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Επιπλέον, η προηγμένη αρχιτεκτονική C-RAN χειρίζεται όλη την επεξεργασία για CA και των μεταπομπών μέσα σε μια κεντρική μονάδα BBU στο eNodeB, η οποία μειώνει δραστικά τη σηματοδότηση στο δίκτυο κορμού.



Σχήμα 6-8. Αρχιτεκτονική DOCOMO στο RAN (πηγή: DOCOMO 5G White Paper, 2014)

Μία από τις σημαντικότερες συνεισφορές της DOCOMO είναι το σενάριο των phantom cell όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-9. Συγκεκριμένα το phantom cell, βασιζόμενο σε αρχιτεκτονική δικτύου πολλαπλών επιπέδων, χωρίζει το επίπεδο ελέγχου (C) και το επίπεδο δεδομένων χρήστη (U) μεταξύ

των macro-cell και small-cells χρησιμοποιώντας διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Η ιδέα της DOCOMO χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική Phantom cell και ενσωματώνει τέτοιες πολλαπλές στρώσεις NW χρησιμοποιώντας χαμηλότερες και υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, τα small-cells χειρίζονται την κίνηση-κυκλοφορία για συνεδρίες δεδομένων υψηλής απόδοσης με το χρήστη (επίπεδο U) ενώ τα macrocells ελέγχουν τη σηματοδότηση του επιπέδου ελέγχου, π.χ. τον έλεγχο των ραδιοπόρων (RRC – Radio Resource Control). Τα macrocells και τα small-cells συνθέτουν μια σχέση master-slave, μέσω της οποίας το macro-cell αποστέλλει πληροφορίες ελέγχου στους χρήστες που συνδέονται στα small-cells δηλ. καθιστούν τα small-cells πρακτικά αόρατα για τον χρήστη, για αυτό και η ονομασία phantom-cell.

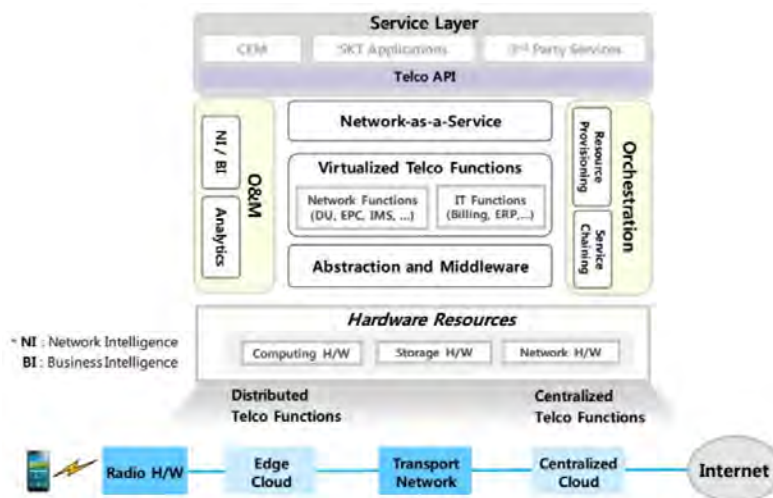


**Σχήμα 6-9. Αρχιτεκτονική phantom-cell με διαχωρισμό C/U επιπέδων**  
(πηγή: DOCOMO 5G White Paper, 2014)

## 6.8 SK-Telecom

Η SK Telecom [162] εισάγει μια πλατφόρμα 5G που βασίζεται σε λογισμικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-10, η οποία είναι μια βιομηχανική λύση για κυψελοειδή συστήματα 5G και η οποία προσφέρει ένα πλαίσιο προσανατολισμένο στο λογισμικό, εξετάζοντας από κοινού το SD-RAN και το SD-CN (SDN στο επίπεδο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού). Αποσυνδέει το επίπεδο ελέγχου (λειτουργικότητες λογισμικού) και το επίπεδο δεδομένων (συσκευές υλικού) και μια βασική λειτουργία στο πλαίσιο του λογισμικού είναι η παροχή μιας πλατφόρμας δικτύου ως υπηρεσία εξυπηρέτησης (Network as a Service - NaaS), η οποία επιτρέπει τη διαμόρφωση και αλλαγή των λειτουργιών τόσο σε επίπεδο τηλεπικοινωνιών όσο και υπηρεσιών.

Η SK Telecom παρέχει επίσης το Telco API για χρήση υπηρεσιών, επιτρέποντας την υλοποίηση υπηρεσιών βασισμένων σε αναλύσεις στοιχείων (analytics) π.χ. multi-Service carrier Ethernet 2.0 και MPLS edge solution. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική πραγματοποιεί από κοινού SD-CN και SD-RAN, όπου το SD-CN περιλαμβάνει προγραμματιζόμενους απλούς μεταγωγείς με πίνακες ροής, ενώ το SD-RAN διαθέτει μονάδες ραδιοσυχνοτήτων και κεραίες και εφαρμόζεται ένα ενιαίο συνεκτικό επίπεδο ελέγχου. Για το σκοπό αυτό, η SK Telecom εφαρμόζει και υλοποιεί πολλές υποσχόμενες τεχνολογίες 5G μέσω αυτής της πλατφόρμας που καθορίζεται από το λογισμικό.



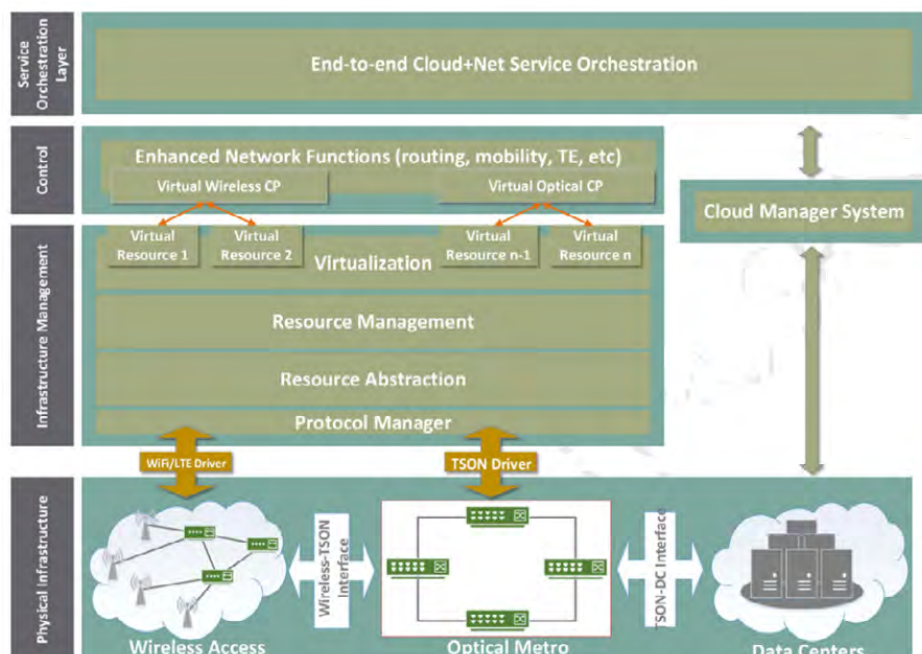
**Σχήμα 6-10. Πλατφόρμα 5G βασισμένη σε λογισμικό από την SK Telecom**  
(πηγή: SK Telecom 5G White Paper, 2014)

Τρεις σημαντικές τεχνολογίες υποστηρίζονται από την εξέλιξη του δικτύου της SK Telecom μέσω του NFV και του SDN: Εικονικοποίηση των λειτουργιών του δικτύου κορμού (CN) βασισμένη στο NFV, εικονικοποίηση του RAN και SDN με ολοκληρωμένη ενορχήστρωση. Πρώτον, μέσω του NFV, η SK Telecom δημιουργεί το cloud μέσω εικονικοποίησης ενός τυποποιημένου εξοπλισμού - hardware και χειρίζεται ένα σύνολο λειτουργιών δικτύου και υπηρεσιών σε αυτό το δίκτυο που βασίζεται σε λογισμικό. Δεύτερον, η SK Telecom επιτρέπει σε μια τεχνολογία να κεντριοκοποιεί και να εικονικοποιεί τη ψηφιακή μονάδα ενός σταθμού βάσης (BS) σε ένα τυποποιημένο βασισμένο σε υλικό cloud, με δυνατότητα επεξεργασίας των σημάτων στο RAN σε πραγματικό χρόνο. Τρίτον, παρέχει αποτελεσματικό έλεγχο και διαχείριση κύκλου ζωής των υπηρεσιών δικτύων βασισμένων σε λογισμικό από έναν κεντρικό και ενοποιημένο ενορχηστρωτή υπηρεσιών δικτύου (network service orchestrator).

## 6.9 CONTENT

CONTENT (Convergence of Wireless Optical Network and IT Resources in Support of Cloud Services - Σύγκλιση ασύρματου οπτικού δικτύου και πόρων IT για την υποστήριξη των υπηρεσιών Cloud) [163] ήταν ένα τριετές ευρωπαϊκό συγχρηματοδοτούμενο έργο (FP7), το οποίο ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2012 και έληξε τον Οκτώβριο του 2015. Στόχος του ήταν η αρχιτεκτονική δικτύων και η συνολική λύση υποδομής για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης συμβατικού cloud computing καθώς και του mobile cloud computing, που μπορεί να εισαγάγει νέα επιχειρηματικά μοντέλα και να διευκολύνει νέες ευκαιρίες για διάφορους επιχειρηματικούς τομείς. Το Σχήμα 6-11 δείχνει την πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που προτείνεται από το περιεχόμενο, η οποία περιλαμβάνει πολλά επίπεδα:

- ετερογενές επίπεδο φυσικής υποδομής (heterogeneous physical infrastructure layer),
- επίπεδο διαχείρισης της υποδομής, (infrastructure management layer),
- επίπεδο ελέγχου (control layer) και
- επίπεδο ενορχήστρωσης υπηρεσιών (service orchestration layer).



Σχήμα 6-11. CONTENT πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική (πηγή: A. Tzanakaki et al., 2012)

Πρώτον, το ετερογενές φυσικό επίπεδο περιλαμβάνει ένα τομέα υβριδικού ασύρματου δικτύου πρόσβασης (LTE / Wi-Fi) και έναν τομέα οπτικού δικτύου (TSON) που διασυνδέει γεωγραφικά κατακεντρωμένα κέντρα δεδομένων, υποστηρίζοντας τη μεταβλητότητα των καναλιών με βάση το πλαίσιο. Δεύτερον, το επίπεδο διαχείρισης της υποδομής διαχειρίζεται τη δημιουργία υποδομών

εικονικών δικτύων μέσω των υποκειμένων φυσικών πόρων. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των υποστηριζόμενων λειτουργιών είναι η ενορχηστρωμένη άντληση πόρων σε όλους τους τομείς, που περιλαμβάνουν ανταλλαγή πληροφοριών και συντονισμό μεταξύ τομέων. Τρίτον, το επίπεδο ελέγχου δημιουργεί απρόσκοπτη συνδεσιμότητα σε ετερογενείς τομείς τεχνολογίας μέσω μιας συντονισμένης προσέγγισης από άκρο σε άκρο για την υποστήριξη της βελτιστοποιημένης απόδοσης, των εγγυήσεων QoS καθώς και της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των πόρων. Τέλος, το επίπεδο ενοποίησης είναι υπεύθυνο για τον αποτελεσματικό συντονισμό των πόρων του cloud και του δικτύου, προκειμένου να καταστεί δυνατή η τελική σύνθεση και η παροχή ολοκληρωμένων υπηρεσιών cloud, και mobile cloud υπηρεσίες που υποστηρίζουν την απαιτούμενη QoE.

Συμπερασματικά, το CONTENT προτείνει μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική με στόχο να διευκολύνει τις βασικές αρχές της νέας πρότασής της, δηλαδή τη διασταυρούμενη τεχνολογική εικονικοποίηση για την υποστήριξη της βελτιστοποιημένης, ομαλής και συντονισμένης παροχής cloud και mobile cloud υπηρεσιών σε ετερογενείς τομείς δικτύων.

## 6.10 OpenRAN

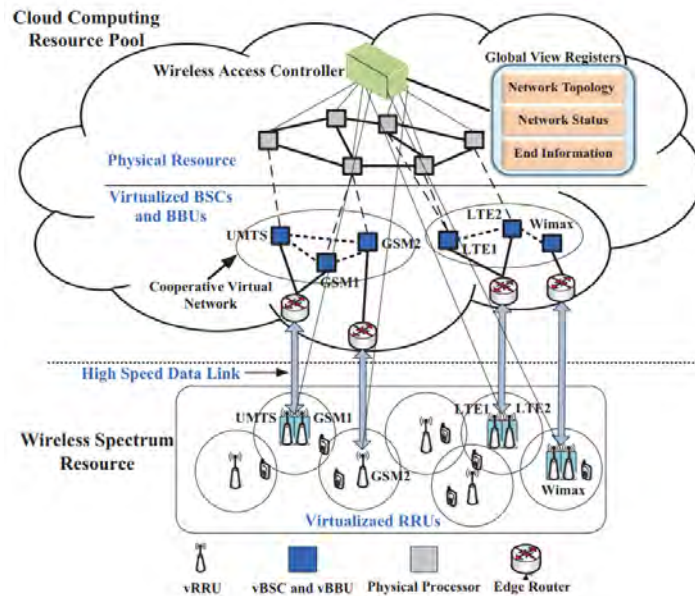
Η αρχιτεκτονική του OpenRAN [164] παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-12. Περιέχει τρία βασικά μέρη:

- wireless spectrum resource pool –WSRP (δεξαμενή πόρων ασύρματου φάσματος)
- cloud computing resource pool (CCRP) και
- SDN controller.

Το WSRP αποτελείται από πολλαπλές φυσικές απομακρυσμένες κεραίες (pRRU - physical Remote Radio Head) που είναι κατανεμημένες σε διάφορες τοποθεσίες. Για την αποτελεσματική υποστήριξη της σύγκλισης των ετερογενών δικτύων, το WSRP εικονικοποιεί το φάσμα μέσω τεχνολογίας virtualization RF, επιτρέποντας αρκετές εικονικές RRUs (vRRUs) με διαφορετικά ασύρματα πρωτόκολλα να συνυπάρχουν σε ένα κοινό pRRU. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-12, ένα pRRU μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίζει δύο vRRU που εκτελούν UMTS και GSM αντίστοιχα.

Το CCRP αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό φυσικών επεξεργαστών που κατασκευάζουν ένα δίκτυο υψηλής ταχύτητας cloud computing. Διαφορετικά από την μέθοδο κάθετης δικτύωσης που υιοθετείται από το τρέχον δίκτυο ασύρματης πρόσβασης, στο σύστημα αυτό δεν υπάρχουν πλέον παραδοσιακές μονάδες βάσης (BBU - base band units) και ελεγκτές σταθμών βάσης (BSC - base station controllers). Αυτά αντικαθίστανται από εικονικές (vBBUs και vBSCs) που αναπτύσσονται σε κοινόχρηστους επεξεργαστές με τεχνολογίες virtualization. Ως εκ τούτου, αυτά τα εικονικά στοιχεία πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένων των vBSC, vBBUs και vRRUs, αποτελούν ένα πλήρες RAN.

Ο ελεγκτής SDN είναι το επίπεδο ελέγχου των ετερογενών RAN, αφαιρώντας και συνδυάζοντας λειτουργίες ελέγχου των στοιχείων πρόσβασης. Καθορίζει τις στρατηγικές κάθε vBBU και vBSC και κάθε στοιχείο εικονικής πρόσβασης περιέχει έναν παράγοντα SDN που επικοινωνεί με τον ελεγκτή μέσω πρωτοκόλλου SDN.



**Σχήμα 6-12. Επισκόπηση Αρχιτεκτονικής του OpenRAN (πηγή: Mao Yang et al., 2013)**

Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τέσσερα επίπεδα εικονικοποίησης: επίπεδο εφαρμογής, επίπεδο cloud, επίπεδο φάσματος και επίπεδο συνεργασίας.

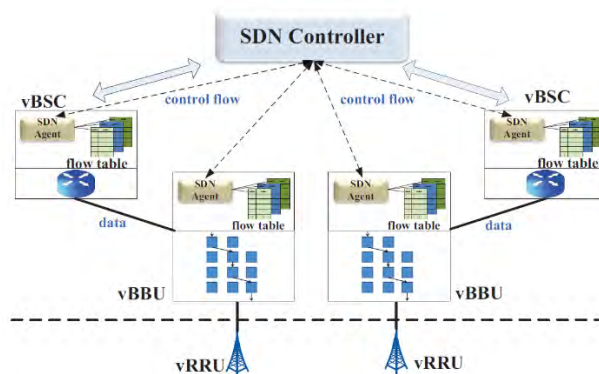
Με την εικονικοποίηση του επιπέδου εφαρμογών, ο χώρος ροών (flowspace) διαιρείται και κάθε εικονικός χώρος λειτουργεί και διαχειρίζεται τις δικές του στρατηγικές ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή, οι εικονικοί χώροι αντιστοιχούν σε πολλούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύου ή υπηρεσίες.

Με την εικονικοποίηση σε επίπεδο cloud, ο ελεγκτής SDN δημιουργεί vBBUs και vBSCs με εικονικοποίηση των φυσικών επεξεργαστών και την κατανομή κατάλληλων υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων.

Η εικονικοποίηση σε επίπεδο φάσματος αναφέρεται στην εικονικοποίηση του φάσματος μέσω τεχνολογίας εικονικοποίησης RF, η οποία επιτρέπει σε αρκετές vRRU με διαφορετικά ασύρματα πρωτόκολλα να συνυπάρχουν σε ένα κοινό pRRU.

Η εικονικοποίηση επιπέδου συνεργασίας κατασκευάζει αρκετά εικονικά δίκτυα, συμπεριλαμβανομένων των εικονικών κόμβων και των εικονικών συνδέσεων. Αυτό συμβαίνει επειδή η συνεργατική επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών vRRU έχει ως σκοπό την εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών και απαιτεί επικοινωνίες μεταξύ διαφορετικών vBBU και vBSC.

Στην αρχιτεκτονική OpenRAN υιοθετείται η μέθοδος του κεντρικού ελέγχου βάσει ροών. Ο ελεγκτής δημιουργεί και βελτιστοποιεί δυναμικά τα στοιχεία εικονικής πρόσβασης σύμφωνα με τις απαιτήσεις, αξιοποιώντας αποτελεσματικά και δίκαια την εικονικοποίηση και την κατανομή των ραδιοπόρων καθώς και των υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων σε στοιχεία εικονικής πρόσβασης. Υιοθετείται επίσης η στρατηγική ελέγχου "match-action" που βασίζεται στη ροή. Η κεφαλίδα πακέτου σε κάθε ροή έχει αρκετά πεδία αντιστοίχισης όπως διεύθυνση IP, διεύθυνση MAC και θύρα. Κάθε εικονικό στοιχείο πρόσβασης έχει έναν ενοποιημένο πράκτορα SDN (a unified SDN agent) για την επίλυση της ροής ελέγχου. Ο ελεγκτής ορίζει τους κανόνες σε κάθε εικονικό στοιχείο πρόσβασης. Όταν ένα στοιχείο λαμβάνει ένα πακέτο, ελέγχει πρώτα εάν η ροή αυτή μπορεί να ταιριάξει με τους κανόνες ελέγχου. Αν ναι, εκτελεί την αντίστοιχη ενέργεια. Οι ενέργειες σε διαφορετικά στοιχεία εικονικής πρόσβασης μπορεί να είναι διαφορετικές, π.χ. το vBSC μπορεί να δρομολογήσει τα δεδομένα αλλά το vBBU πιθανόν εκτελεί έλεγχο ισχύος. Η στρατηγική ελέγχου του SDN καθιστά το RAN πιο ανοικτό και πιο ευέλικτο.



Σχήμα 6-13. Στρατηγική ελέγχου SDN και προγραμματιζόμενο σχέδιο (πηγή: Mao Yang et al., 2013)

Η αρχιτεκτονική του OpenRAN είναι προγραμματιζόμενη τόσο σε επίπεδο ελέγχου όσο και σε επίπεδο δεδομένων, γεγονός που καθιστά το RAN πιο ελεγχόμενο και εξελίξιμο. Στο επίπεδο ελέγχου, ο ελεγκτής SDN έχει την ικανότητα να καθορίζει ή να τροποποιεί τους κανόνες σε κάθε στοιχείο εικονικής πρόσβασης, όπως η δρομολόγηση, η κατανομή του εύρους ζώνης και οι προτεραιότητες ροής. Στο επίπεδο δεδομένων, αν και διαφορετικά ασύρματα πρωτόκολλα λειτουργούν αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους, μοιράζονται πάντοτε μερικά στοιχεία, όπως διαμόρφωση, κωδικοποίηση και παρεμβολή. Εμπνευσμένο από το SDR, διαμορφώνονται ασύρματα πρωτόκολλα σε vBBU. Μετά από αυτό, κάθε vBBU επιλέγει και συνδυάζει τις κατάλληλες μονάδες για την υλοποίηση του ασύρματου πρωτοκόλλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-13.

### 6.11 Άλλες προτεινόμενες αρχιτεκτονικές

Το **SoftMobile** [165] προσφέρει μια εναλλακτική προσέγγιση κατανομής καθηκόντων που είναι λειτουργική και όχι διαρθρωτική. Συγκεκριμένα, αντιμετωπίζει τρία σημαντικά υπο-προβλήματα: (1) πώς γίνεται η κατανομή της πληροφορίας, (2) πώς να διαμορφωθούν οι κυψέλες με συνεκτικό τρόπο και (3) πώς να γίνεται ο χειρισμός των λειτουργιών μεταξύ των κυψελών σε πραγματικό χρόνο. Αναλύεται το συνολικό πρόβλημα σε συντονισμένες λύσεις αυτών των τριών υπο-προβλημάτων που διαχειρίζονται τρεις ανεξάρτητοι ελεγκτές.

Το **MyNET** [166] είναι μια παρόμοια αρχιτεκτονική με το SoftAir σχεδιασμένο για δίκτυο 5G. Η πιο ενδιαφέρουσα διαφορά στην αρχιτεκτονική είναι ότι το MyNet υλοποιεί ιεραρχική ανάπτυξη ελεγκτών, καθένας από τους οποίους είναι υπεύθυνος για ένα μέρος του δικτύου, για να μειώσει τη ροή της κυκλοφορίας ελέγχου και να βελτιώσει την αποκριτικότητα (responsiveness).

Το **CMaaS** [167], είναι μια ιεραρχική αρχιτεκτονική που αποτελείται από μια ιεραρχία ελεγκτών τεσσάρων επιπέδων. Ο κατώτατος ελεγκτής UE (UE controller) διαχειρίζεται την διαθέσιμη επιλογή τεχνολογίας πρόσβασης ραδιοσυχνότητας για έναν χρήστη που περιορίζεται από την πολιτική του τοπικού δικτύου και τις πολιτικές και τις εντολές των ανώτερων ελεγκτών. Ο επόμενος ελεγκτής πάνω από τον UE controller είναι ο ελεγκτής BS (BS controller) ο οποίος ελέγχει τη διαχείριση των ραδιοπόρων με μια τοπική επισκόπηση του δικτύου. Πάνω από τον ελεγκτή BS, ο ελεγκτής RAN (RAN controller) διαχειρίζεται ένα σύνολο σταθμών βάσης με δυνατότητα μιας περιφερειακής εποπτείας. Τέλος, ο ελεγκτής δικτύου (Network controller) έχει μια καθολική εικόνα του δικτύου και διαχειρίζεται υπηρεσίες όπως QoS, δρομολόγηση, διαχείριση της κινητικότητας κ.α. Βάσει αυτής της συνολικής προβολής, διαβιβάζει οδηγίες στους χαμηλότερους ελεγκτές. Στο CMaaS, ο έλεγχος είναι καταναμημένος έτσι ώστε η λειτουργία του ελεγκτή χαμηλότερου επιπέδου να περιορίζεται από τις αποφάσεις του ανώτερου επιπέδου. Ταυτόχρονα, τα ανώτερα επίπεδα αποκτούν εικόνα για την κατάσταση του δικτύου από υποκείμενους ελεγκτές ώστε να συλλέξουν μια συνολική άποψη και να λάβουν αποφάσεις ελέγχου.

Το **SDWN** [168] δίνει έμφαση στο ότι το SDN μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του δικτύου με δυναμική και αποτελεσματική εικονικοποίηση που λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες καταστάσεις δικτύου και αντιδρά αναλόγως. Ενώ το SDWN είναι ουσιαστικά παρόμοιο με το OpenRoads και το



OpenRAN, μια ενδιαφέρουσα διαφορά είναι ότι η SDWN προσπαθεί να βελτιώσει το QoS και το QoE για τους χρήστες μέσω δυναμικής διαμόρφωσης της κυκλοφορίας και προγραμματισμό του RAN.

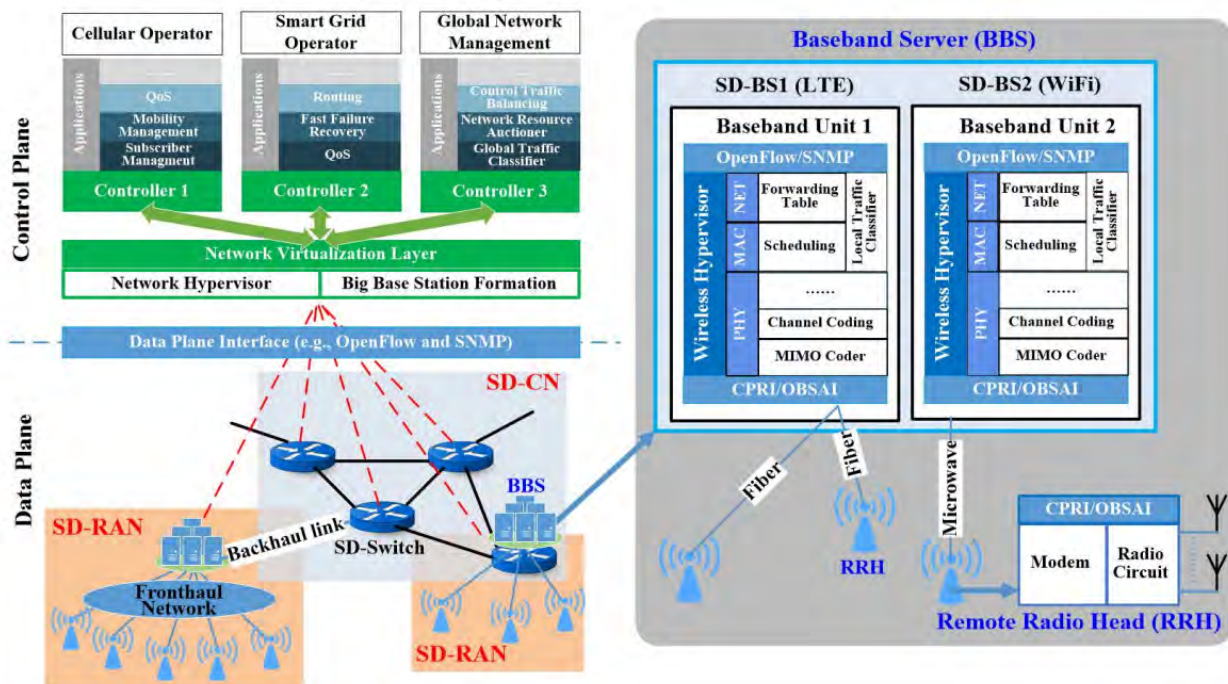
Το **CROWD** [169] υποστηρίζει την αποτελεσματική διαχείριση παρεμβολών και κινητικότητας σε πυκνά κυψελοειδή δίκτυα μέσω της ανάπτυξης ιεραρχικού ελεγκτή. Ο λογικός κεντροποιημένος ελεγκτής CRC (CROWD Regional Controller) εκτελεί μακροπρόθεσμη βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας τα συγκεντρωτικά δεδομένα δικτύου που συλλέγονται μέσω του τοπικού ελεγκτή CLC (CROWD Local Controller). Για παράδειγμα, οι παρεμβολές μεταξύ των σταθμών βάσης λαμβάνουν μέριμνα στο CRC χρησιμοποιώντας ένα πολυεπίπεδο προγραμματισμό. Επίσης, ο CRC χρησιμοποιεί τις συγκεντρωμένες πληροφορίες κατάστασης δικτύου για να διαχειρίζεται δυναμικά τη συσχέτιση των κυψελών για να εγγυηθεί καλύτερη εμπειρία χρήστη και βελτιστοποίηση της ενέργειας. Επιπλέον, το CROWD υποστηρίζει την απρόσκοπτη κινητικότητα μεταξύ τεχνολογιών όπως το LTE και 3G μέσω του τοπικού και περιφερειακού συντονισμού μεταξύ CLC και CRC.

**Πίνακας 6-1. Σύγκριση των WSDN**

Αρχιτεκτονική	Χαρακτηριστικά	Επίπεδο Δεδομένων (Data plane)	Εικονικοποίηση (Virtualization)	Συμβατότητα με OpenFlow
OpenRoads [154]	πολυ-τεχνολογία και εξέλιξη	RAN & Δίκτυο κορμού	3 επίπεδα εικονικοποίησης (FlowVisor, SNMPVisor)	NAI
OpenRadio [155]	Εξέλιξη πρωτοκόλλων	Δίκτυο κορμού	OXI	OXI
SoftCell [156]	Κλιμακωσιμότητα	Δίκτυο κορμού	vSwitch	OXI
CellSDN [158]	Κλιμακωσιμότητα μέσω του καταμερισμού των εργασιών	RAN & Δίκτυο κορμού	FlowVisor	NAI
SoftRAN [159]	κατανομή πόρων μέσω του καταμερισμού των εργασιών	RAN	Εικονικοποίηση BS	OXI
ADRENALINE [160]	Ρεαλιστικό περιβάλλον δοκιμών (testbed) – περιβάλλον πολλαπλών μισθωτών (multitenant) – δοκιμές υπηρεσιών 5G	Δίκτυο κορμού	Εικονικοποίηση από άκρο σε άκρο μέσω εικονικού ελεγκτή δικτύου (VNC) - openstack	NAI
DOCOMO [161]	Διαχωρισμός C/U επιπέδων (συνεργασία macro – small cells – phantom cell)	RAN	NAI	OXI
SK Telekom [162]	Πλατφόρμα για κυψελοειδή 5G συστήματα - NaaS	RAN & Δίκτυο κορμού	NAI	NAI
CONTENT [163]	Παροχή cloud & mobile cloud υπηρεσιών	RAN & Δίκτυο κορμού	NAI	OXI
OpenRAN [164]	Υποστήριξη της πολυ-τεχνολογίας	RAN	4 επίπεδα εικονικοποίησης	OXI
SoftMobile [165]	κατανομή πόρων μέσω της αφαίρεσης ελέγχου	RAN	NAI	OXI
MyNET [166]	ανάλυση δεδομένων, παροχή περιεχομένου και D2D	RAN & Δίκτυο κορμού	SONAC	OXI
CMaaS [167]	ιεραρχική αποσύνθεση των ελεγκτών	RAN	NAI	NAI
SDWN [168]	QoE μέσω εικονικοποίησης	RAN	3 επίπεδα εικονικοποίησης	NAI
CROWD [169]	Χωρητικότητα και ενέργεια	RAN	OXI	NAI
SoftAir [153]	Κλιμακώσιμη 5G αρχιτεκτονική	RAN & Δίκτυο κορμού	3 επίπεδα εικονικοποίησης	NAI

## 6.12 SoftAir

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14, η αρχιτεκτονική του SoftAir [153] αποτελείται από ένα επίπεδο δεδομένων και ένα επίπεδο ελέγχου. Το επίπεδο δεδομένων είναι μια ανοιχτή, προγραμματιζόμενη και εικονικοποιήσιμη υποδομή δικτύου προώθησης, η οποία αποτελείται από το καθοριζόμενο από το λογισμικό δίκτυο ραδιοπρόσβασης (SD-RAN) και από το καθοριζόμενο από το λογισμικό δίκτυο κορμού (SD-CN). Το SD-RAN αποτελείται από ένα σύνολο SD-BSs, (Software Defined Base Stations) ενώ το SD-CN αποτελείται από ένα σύνολο SD-switches. Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται κυρίως από δύο συνιστώσες: (1) εργαλεία διαχείρισης δικτύου και (2) προσαρμοσμένες εφαρμογές παρόχων υπηρεσιών ή εικονικών φορέων εκμετάλλευσης δικτύου. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε λεπτομερώς την αρχιτεκτονική του SoftAir, εξηγώντας την εικονικοποίηση του δικτύου και περιγράφουμε τα τρία βασικά εργαλεία διαχείρισης, δηλαδή α) την δυνατότητα ελέγχου και εξισορρόπησης του φόρτου στο δίκτυο, β) τη δημιουργία εικονικών πόρων του δικτύου (resource virtualization) και τον αποδοτικό διαμορισμό τους και γ) τη δυνατότητα συσχετισμού της κίνησης στο δίκτυο με τις εφαρμογές που τη δημιούργησαν και τη λήψη απαραίτητων μέτρων με τη δημιουργία πολιτικών (καταναμημένος-συνεργατικός ταξινομητής κυκλοφορίας).



Σχήμα 6-14. Συνολική αρχιτεκτονική του SoftAir (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

### 6.12.1 Η Αρχιτεκτονική

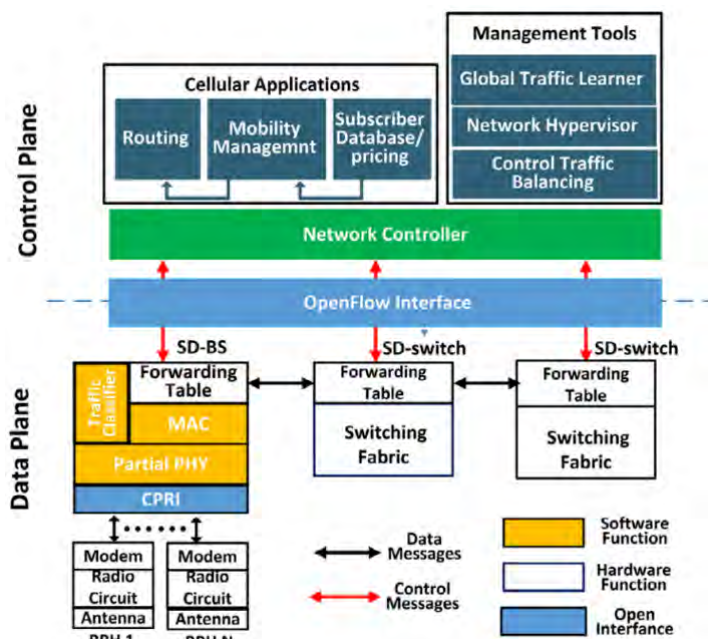
Όπως είναι γνωστό, με τη χρήση του NFV, αποσυνδέονται οι λειτουργίες δικτύου από το υποκείμενο υλικό και συγκεντρώνονται σε διακομιστές δικτύου (π.χ. data centers - cloudifying), καθιστώντας την αρχιτεκτονική του δικτύου εξαιρετικά ευέλικτη, γρήγορη και με δυνατότητες προσαρμοστικής αναδιάταξης ανά πάσα στιγμή. Πράγματι, το κύριο πλεονέκτημα του ενσύρματου SDN που βασίζεται στο OpenFlow στηρίζεται στην εικονικοποίηση της λειτουργίας δικτύου, η οποία αποσυνδέει τη λειτουργία δρομολόγησης - μεταγωγής από τους μεταγωγείς υλικού (switches - routers) και την συγκεντρώνει σε έναν ελεγκτή δικτύου (network controller) μέσω μιας ανοιχτής διασύνδεσης δικτύου του OpenFlow.

**SD-CN:** Για την παροχή υψηλής ευελιξίας στο δίκτυο κορμού, το SoftAir υιοθετεί SD-switches για να διαμορφώσει το SD-CN όπως φαίνεται στα Σχήματα 6-14 και 6-15. Στο SD-CN, οι προσαρμοσμένες εφαρμογές SDN, π.χ. διαχείριση της κινητικότητας, δρομολόγηση QoS και πολιτικές χρέωσης καθώς και ολοκληρωμένα εργαλεία διαχείρισης, π.χ. ταξινόμηση της κυκλοφορίας και η εικονικοποίηση δικτύου, μπορούν να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν στον

ελεγκτή δικτύου για να ταιριάζουν στις συγκεκριμένες και συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες. Η πρακτική σημασία και απόδοση του SD-CN μπορεί να προβλεφθεί λόγω της επιτυχούς ανάπτυξης του SDN, π.χ. της B4 από την Google [170], της SWAN από τη Microsoft [171] και της ADMCF από την Huawei [172]. Οι πρόσφατες αναπτύξεις SD-WAN, π.χ. B4 από την Google, απέδειξαν επιτυχώς την ελπιδοφόρα απόδοση του SDN, ενισχύοντας τη μέση αξιοποίηση συνδέσεων από το 30-40% σε πάνω από 70%.

Η δυνατότητα κλιμάκωσης του SD-CN βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό με την αξιοποίηση των ελεγκτών υψηλής απόδοσης και τη βελτιστοποιημένη διαχείριση του δικτύου. Για παράδειγμα, με την τρέχουσα τεχνολογία SDN, ένας μόνο ελεγκτής μπορεί να επιτύχει ταχύτητα επεξεργασίας 12 εκατομμυρίων requests ανά δευτερόλεπτο για τα μηνύματα ελέγχου (control messages) μεταξύ των switches και του controller. Αυτή η υψηλή ικανότητα επεξεργασίας ενισχύθηκε περαιτέρω με την υιοθέτηση συστοιχιών ελεγκτών (controller clusters) και την πρόοδο των πολυνηματικών τεχνολογιών (multi-threading technologies) [173].

Για να αυξήσουμε περαιτέρω την δυνατότητα κλιμάκωσης του SD-CN, μπορούμε να υιοθετήσουμε ένα σύστημα εξισορρόπησης της κυκλοφορίας που να λαμβάνει υπόψη την κινητικότητα, ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση προώθησης των μηνυμάτων ελέγχου, λαμβάνοντας υπόψη ότι, ο έλεγχος της κυκλοφορίας που προσανατολίζεται από το SD-RAN είναι δυναμικός αλλά ακολουθεί ορισμένα χωρικά και χρονικά μοτίβα - πρότυπα (spatial and temporal patterns).



Σχήμα 6-15. NFV του SoftAir (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

**SD-RAN:** Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14, η αρχιτεκτονική στο SD-RAN ακολουθεί μια κατακευματισμένη αρχιτεκτονική RAN. Εδώ, κάθε SD-BS χωρίζεται στην κεραία (RRH) που αποτελεί υλικό (hardware) και σε μονάδες βάσης (Base Band Stations) που έχουν υλοποιηθεί σε λογισμικό (αυτά τα δύο συστατικά δεν είναι αναγκαστικά συνεγκατεστημένα). Συγκεκριμένα, τα RRHs συνδέονται με τις μονάδες βάσης BBSs μέσω του fronthaul δικτύου - όπου η μετάδοση μπορεί να γίνεται είτε μέσω οπτικής ίνας, είτε μέσω της μικροκυματικής ζώνης ανάλογα με την διαθέσιμη υποδομή - χρησιμοποιώντας τυποποιημένες διεπαφές, όπως διασύνδεση CPRI (Common Public Radio Interface) ή OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative).

Η κατακευματισμένη αρχιτεκτονική RAN έχει πρόσφατα λάβει σημαντική προσοχή τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον ακαδημαϊκό κόσμο. Το C-RAN [108] είναι ένα παράδειγμα. Το πεδίο και η ικανότητα εφαρμογής καθώς και η πρακτική σημασία του κατακευματισμένου RAN καθίσταται δυνατή από την ταχεία εξέλιξη των SDR αρχιτεκτονικών (software-defined radio architectures).

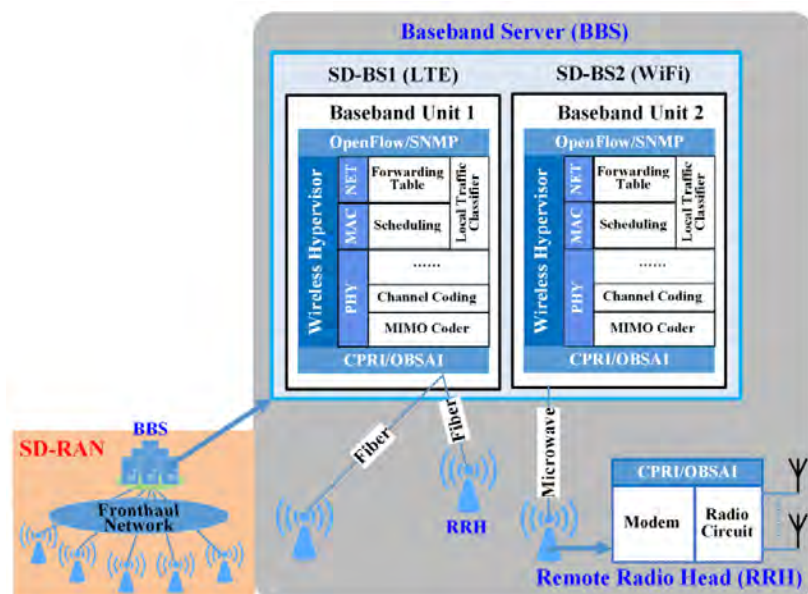
Έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την τυποποίηση ανοιχτών και ανεξάρτητων από την τεχνολογία διεπαφών επικοινωνίας για τη σύνδεση μεταξύ των RRHs και BBSs (BaseBand Servers). Η τυποποιημένη διεπαφή CPRI, η οποία αναπτύχθηκε από κοινού από την Ericsson, την Huawei, την NEC, την Alcatel Lucent και τη Nokia Siemens, μπορεί να ενεργοποιήσει υψηλή ταχύτητα (έως 10 Gbit/s), χαμηλό ποσοστό σφαλμάτων (τάξης μεγέθους  $10^{-12}$ ) καθώς και μεγάλες αποστάσεις (έως 40 μίλια) για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ RRHs και BBS, παρέχοντας παράλληλα συγχρονισμό υψηλής ανάλυσης.

Οι υπάρχουσες κατανεμημένες αρχιτεκτονικές RAN, όπως το C-RAN, επικεντρώνονται κυρίως στις υπολογιστικές λειτουργίες υψηλής απόδοσης των λειτουργιών επεξεργασίας βάσης (κυρίως για λειτουργίες φυσικού επιπέδου) που υλοποιούνται σε απομακρυσμένους διακομιστές ή κέντρα δεδομένων. Αντιμετωπίζουν όμως δύο βασικούς περιορισμούς. Πρώτον, δεν μπορούν να επιτύχουν κλιμάκωση της συγκέντρωσης στρώματος PHY / MAC. Δεύτερον, δεν υποστηρίζουν την εικονικοποίηση στο επίπεδο δικτύου (network-layer) όπως γίνεται στο SD-CN. Για το σκοπό αυτό, το SD-RAN που προτείνει η αρχιτεκτονική του SoftAir, προσφέρει σημαντικά βελτιωμένη δυνατότητα κλιμάκωσης και συνεργατικότητας μέσω μιας ποιοτικής και σε βάθος “αποσύνθεσης” του σταθμού βάσης (Fine-Grained BS Decomposition).

**Fine-Grained BS Decomposition.** Το υπάρχον κατανεμημένο RAN υιοθετεί μια γενικού σκοπού διάσπαση των λειτουργιών μεταξύ των RRHs και BBS, όπου ολόκληρη η επεξεργασία βασικής ζώνης μαζί με τις λειτουργίες στρώματος MAC βρίσκονται στο BBS, ενώ οι RRHs εφαρμόζουν μόνο τη ασύρματη σύνδεση. Μέσω αυτής της προσέγγισης, τα ψηφιακά δείγματα I-Q πρέπει να μεταφέρονται μεταξύ BBS και RRHs, πράγμα το οποίο αναπόφευκτα απαιτεί εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων στο δίκτυο μεταφορών (π.χ. fronthaul network, φαινόμενο bottleneck). Αυτή η γραμμική κλιμάκωση της απαίτησης για την ταχύτητα δεδομένων με το εύρος ζώνης συχνοτήτων, τον αριθμό των κεραιών και τον αμφίδρομο τρόπο (duplex mode), αντιφάσκει με την τρέχουσα τάση των ασύρματων τεχνολογιών που κινούνται προς τα μαζικά MIMO, τους αμφίδρομους πομποδέκτες, τα mm-waves και τη ζώνη TeraHertz, μειώνοντας έτσι σημαντικά την επεκτασιμότητα και την εξελικτική ικανότητα των κατανεμημένων RANs.

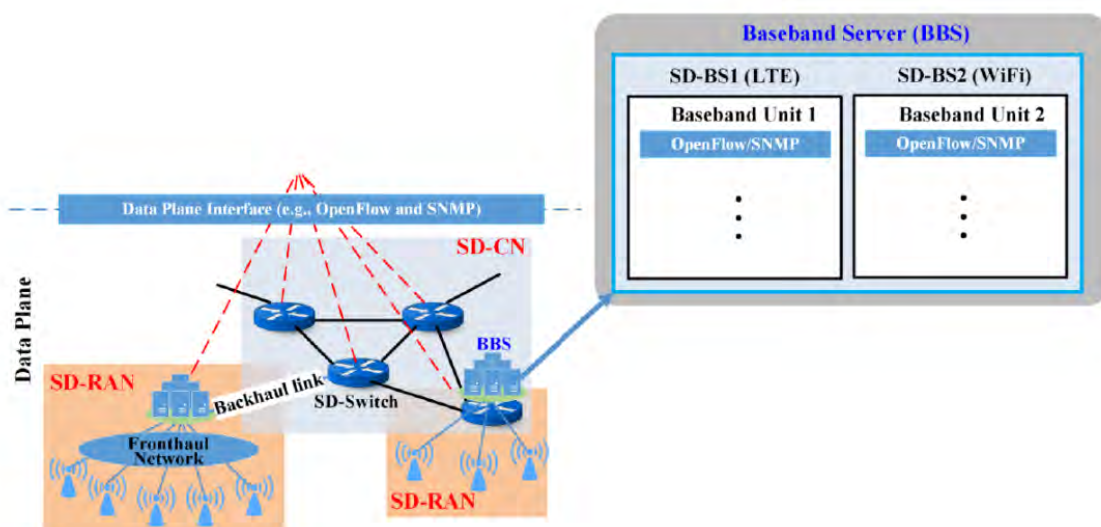
Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, το SoftAir υιοθετεί μια νέα αρχιτεκτονική ποιοτικής και σε βάθος “αποσύνθεσης” του σταθμού βάσης, δίνοντας στους RRHs τη δυνατότητα μερικής επεξεργασίας του σήματος βασικής ζώνης που φτάνει σε αυτούς (π.χ. διαμόρφωση/αποδιαμόρφωση, modem), εφαρμόζοντας τις υπόλοιπες λειτουργίες βασικής ζώνης στο BBS (π.χ. MIMO coding, source coding, και MAC), όπως φαίνεται στα Σχήματα 6-15 και 6-16. Αυτή η διάσπαση της λειτουργίας είναι βολική επειδή η διεπαφή CPRI, η οποία δεν ορίζεται μόνο για μεταφορά δειγμάτων I-Q, μπορεί ακόμη να υιοθετηθεί χωρίς να σχεδιαστούν νέες διεπαφές και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά μειωμένες απαιτήσεις ταχύτητας δεδομένων μεταξύ BBS και RRHs, εξαλείφοντας παράλληλα τα σημεία συμφόρησης στο fronthaul δίκτυο. Επιπλέον, αυτή η “αποσύνθεσή” εξακολουθεί να διατηρεί επαρκή ευελιξία που προσφέρεται από την κατανεμημένη αρχιτεκτονική RAN.

Συνοπτικά, οι μειωμένες απαιτήσεις για το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, προσφέρουν στο SD-RAN εξαιρετική δυνατότητα κλιμάκωσης, εξέλιξης και κερδοφορίας σε ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς, επιτρέποντας τη συσσωμάτωση μεγάλου αριθμού εξελισσόμενων τεχνολογιών RRHs στο BBS μέσω της μεγάλης ποικιλίας και της οικονομικής απόδοσης των τοπολογιών δικτύου fronthaul που υποστηρίζονται από τη διεπαφή CPRI.



Σχήμα 6-16. Fine-grained fronthaul network decomposition of SoftAir (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

**Ομοιογενής Ενσωμάτωση του OpenFlow (Seamless Incorporation of OpenFlow):** Διαφορετικό από το υπάρχον καταμεμημένο RAN, το προτεινόμενο SD-RAN του SoftAir ενσωματώνει το OpenFlow στο SD-BS. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-17 στον σχεδιασμό του SD-RAN υλοποιείται μια διεπαφή OpenFlow για κάθε SD-BS χρησιμοποιώντας το Open vSwitch (OVS) [174], που είναι ένας μεταγωγέας λογισμικού OpenFlow και μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί στο BBS. Με το OVS, κάθε SD-BS θα μπορεί να διερμηνεύει, να ανταλλάσσει και να ανταποκρίνεται στα μηνύματα του πρωτοκόλλου OpenFlow. Ο εξοπλισμός SD-BS με δυνατότητες OpenFlow παρέχει μια ενοποιημένη διεπαφή για τον έλεγχο και τη διαχείριση των σταθμών βάσης με διαφορετικά ασύρματα πρότυπα, οδηγώντας έτσι σε ένα πολυλειτουργικό RAN που επιτρέπει ομαλές μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης.



Σχήμα 6-17. Seamless OpenFlow incorporation of SoftAir (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

Για παράδειγμα, με τους SD-BSs που έχουν τη δυνατότητα του OpenFlow, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί απρόσκοπτη κάθετη κινητικότητα, η οποία επιτρέπει στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας να περιπλανηθούν διαφανώς μεταξύ των σταθμών βάσης με διαφορετικά ασύρματα πρότυπα, χωρίς να υφίστανται διακοπές στις υπηρεσίες δικτύου. Αυτό μπορεί να γίνει με απλή αναδρομολόγηση των ροών κυκλοφορίας στο δίκτυο κορμού μέσω των καλύτερων διαδρομών σε διαφορετικούς BSs μέσω της ανεξάρτητης από τεχνολογία διεπαφής OpenFlow που ενεργοποιείται και στους δύο

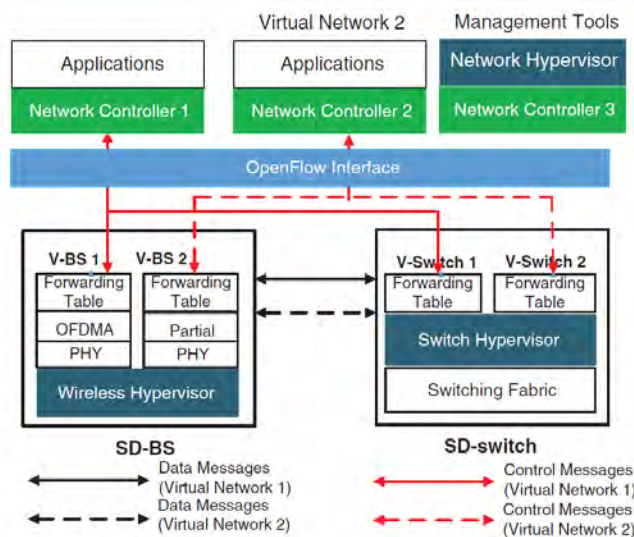
βασικούς μεταγωγείς τόσο στο δίκτυο κορμού όσο και στους BSs. Επιπλέον, η υιοθέτηση της κοινής διεπαφής OpenFlow στα SD-switches και SD-BSs υπόσχεται τη διαφανή διασύνδεση μεταξύ SD-CN και SD-RAN και επιτρέπει την ενοποιημένη διαχείριση ολόκληρου του SoftAir.

### 6.12.2 Εικονικοποίηση δικτύου

Η εικονικοποίηση δικτύων επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών μεμονωμένων εικονικών δικτύων, τα οποία μοιράζονται την ίδια υποδομή φυσικού δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-18. Εστιάζεται στον τεμαχισμό πόρων δικτύου (network slicing) για πολλαπλά εικονικά δίκτυα, ώστε να μπορούν να μοιράζονται ταυτόχρονα την ίδια αρχιτεκτονική φυσικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να υιοθετήσει τα προσαρμοσμένα πρωτόκολλα στρώματος PHY / MAC / NET, χωρίς να διακόπτει τις λειτουργίες και τις επιδόσεις άλλων εικονικών δικτύων. Αυτά τα εικονικά δίκτυα μπορούν επίσης να αναπτυχθούν κατόπιν ζήτησης και να διανεμηθούν δυναμικά.

Το SoftAir έχοντας τη δυνατότητα εικονικοποίησης δικτύου επιτρέπει μια ευρεία γκάμα αναδυόμενων εφαρμογών, π.χ. (1) επιτρέποντας στους MVNOs (Mobile Virtual Network Operators) να υιοθετήσουν διαφορετικά ασύρματα πρότυπα (π.χ. small cells, HetNets, LTE, WiMAX ή WiFi), (2) καθιστώντας ικανή την κοινή χρήση του RAN, η οποία θα μπορούσε να επιτρέψει στους operators να εξοικονομήσουν μέχρι 60 δισεκατομμύρια δολάρια σε περίοδο 5 χρόνων, μέσω της σημαντικής μείωσης των επενδύσεων εξοπλισμού σε περιοχές με χαμηλή κυκλοφορία [175], (3) εικονικοποίηση που επιτρέπει τη δρομολόγηση QoS ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις αυστηρές απαιτήσεις επιδόσεων από άκρο σε άκρο (π.χ. καθυστέρηση, jitter και throughput) των διαφορετικών υπηρεσιών δικτύου που δημιουργούν ριζικά διαφορετικές ροές κυκλοφορίας [176] και (4) επιτάχυνση της τεχνολογικής καινοτομίας μέσω της διάθεσης απομονωμένων ασύρματων πόρων για την ανάπτυξη και δοκιμή καινοτόμων τεχνολογιών στα επιχειρησιακά δίκτυα.

Για να υλοποιήσει αυτά τα απομονωμένα εικονικά δίκτυα, το SoftAir εφαρμόζει τρεις λειτουργίες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-18: network hypervisor (υπερεπότης δικτύου) για **εικονικοποίηση υψηλού επιπέδου** καθώς και wireless hypervisor (ασύρματο υπερεπότη) και switch hypervisor (υπερεπότη μεταγωγής) για **εικονικοποίηση χαμηλού επιπέδου**.



Σχήμα 6-18. Εικονικοποίηση δικτύου του SoftAir (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

- Ο **network hypervisor** είναι ένα υψηλού επιπέδου πλαίσιο διαχείρισης πόρων, το οποίο προσαρμοστικά κατανέμει τους μη αλληλοκαλυπτόμενους πολυδιάστατους πόρους δικτύου σε παρόχους υπηρεσιών ή φορείς εικονικών δικτύων.
- Ο **wireless hypervisor** είναι ένας χρονοδρομολογητής (scheduler) πόρων χαμηλού επιπέδου που επιβάλλει ή εκτελεί τις πολιτικές διαχείρισης πόρων που καθορίζει ο network hypervisor

χρησιμοποιώντας μια ποικιλία σχημάτων διαστασιολόγησης ασύρματων πόρων, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση μεταξύ των εικονικών δικτύων.

- Ο **switch hypervisor** επικεντρώνεται στη διαχείριση του εύρους ζώνης σε ένα μόνο SD-switch. Ειδικότερα, η παροχή εύρους ζώνης σε switches προσφέρει διασφάλιση εύρους ζώνης για το καθορισμένο εικονικό δίκτυο. Το SoftAir, υιοθετεί έναν πολύ γνωστό και ανοιχτού κώδικα switch hypervisor, το FlowVisor.

Με τη χρήση του προτεινόμενου wireless hypervisor στους SD-BSs μαζί με το Flowvisor σε SD-switches, το SoftAir θα έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιήσει την από άκρο σε άκρο εικονικοποίηση του δικτύου που διασχίζει τόσο το SD-RAN όσο και το SD-CN, πραγματοποιώντας έτσι μια πραγματική πολυλειτουργική υποδομή δικτύου.

### 6.12.3 SoftAir management tools

Η διαχείριση του δικτύου με τη βοήθεια της τεχνολογίας Cloud, στοχεύει στην αυτοματοποίηση της διαμόρφωσης, του συντονισμού και της διαχείρισης των λειτουργιών του δικτύου. Τα εργαλεία διαχείρισης του δικτύου, δημιουργήθηκαν για να απαντήσουν στα προβλήματα του παραδοσιακού σχεδιασμού των δικτύων, εισάγοντας νέες τεχνολογίες όπως το NFV, το SDN και το Cloud Computing. Για να ενεργοποιήσει τα πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά και να αυξηθεί η συνολική απόδοση του δικτύου, το SoftAir ανέπτυξε τα εξής τρία εργαλεία διαχείρισης:

- (1) η δυνατότητα ελέγχου και εξισορρόπησης της κυκλοφορίας με επίγνωση την κινητικότητα,
- (2) εικονικοποίηση των πόρων του δικτύου και αποδοτική κατανομή και χρήση αυτών και
- (3)κατανομημένος και συνεργατικός ταξινομητής κυκλοφορίας για τη δυνατότητα συσχετισμού της κίνησης στο δίκτυο με τις εφαρμογές που τη δημιούργησαν και την εφαρμογή των απαραίτητων πολιτικών.

#### 6.12.3.1 Mobility-Aware Control Traffic Balancing

Με την αποσυνδεδεμένη αρχιτεκτονική δικτύωσης, η έγκαιρη παράδοση των μηνυμάτων ελέγχου (control messages) για κάθε SD-switch ή SD-BS επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα των SDNs, ειδικά όταν η λειτουργία εντός ζώνης χρησιμοποιείται για έλεγχο κίνησης που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του συστήματος με τη συνδυασμένη κίνηση των αρχικών δεδομένων και των μηνυμάτων ελέγχου. Η μεταφορά της σηματοδότησης σε διαφορετική συχνοτική μπάντα δεν υφίσταται, καθώς το κόστος για μια τέτοια λύση είναι απαγορευτικό, αφού απαιτείται η δημιουργία νέου δικτύου σηματοδότησης.

Διαφορετικά από την εξισορρόπηση της κυκλοφορίας δεδομένων που αποσκοπεί στην ομοιόμορφη κατανομή των ροών κίνησης δεδομένων μεταξύ των δικτυακών συνδέσεων, ο έλεγχος της εξισορρόπησης της κυκλοφορίας είναι πολύ πιο δύσκολος. Σκοπό έχει, να βρει τις διαδρομές προώθησης των μηνυμάτων ελέγχου για κάθε switch με τέτοιο τρόπο ώστε η καθυστέρηση του μηνύματος ελέγχου να μπορεί να ελαχιστοποιηθεί. Αυτό το πρόβλημα του ελέγχου προώθησης της κυκλοφορίας είναι εξαιρετικά κρίσιμο για τα SDNs, επειδή η έγκαιρη παράδοση της κυκλοφορίας ελέγχου που ενεργοποιείται από τους μεταγωγείς Openflow, π.χ. το πρώτο πακέτο κάθε νέας ροής και η κατάσταση κυκλοφοριακής συμφόρησης, επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών δρομολόγησης που καθορίζει ο ελεγκτής.

Ειδικότερα, για το SoftAir όπως φαίνεται στο Σχήμα 619, κάθε SD-switch ή SD-BS, πρέπει να στείλει την κίνηση ελέγχου (control traffic), όπως τα αιτήματα ρύθμισης διαδρομής για νέες ροές και την κατάσταση συμφόρησης δικτύου σε πραγματικό χρόνο, στον ελεγκτή SDN. Με βάση τα συνεχώς ληφθέντα μηνύματα ελέγχου, ο ελεγκτής βελτιστοποιεί τις καλύτερες διαδρομές ροής δεδομένων σύμφωνα με τις δυναμικά μεταβαλλόμενα πρότυπα κυκλοφορίας (traffic patterns) και τις απαιτήσεις σε QoS και ρυθμίζει τους πίνακες προώθησης του SD-switch ή SD-BS κατά μήκος της βέλτιστης διαδρομής μέσω ορισμένων ασφαλών πρωτοκόλλων π.χ. Openflow, επιτρέποντας έτσι εξαιρετικά αποδοτικές μεταδόσεις δεδομένων και ιδανική αξιοποίηση των συνδέσμων.

Ενώ η αποτελεσματικότητα και η κλιμάκωση του SDN εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την έγκαιρη παράδοση των μηνυμάτων ελέγχου από τα switches ή τους BSs στους ελεγκτές, ο έλεγχος της εξισορρόπησης της κυκλοφορίας αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις που περιλαμβάνουν:

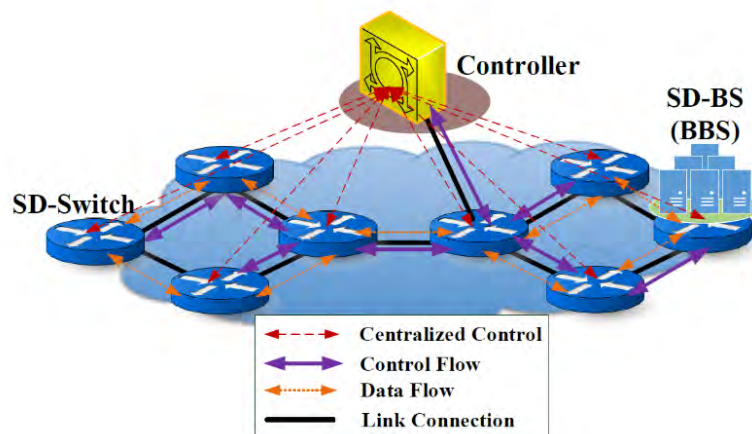
(i) την ανάγκη ενός αλγορίθμου ταχείας εξισορρόπησης που παρέχει το απαιτούμενο QoS στο σύστημα καθώς και να εγγυάται την έγκαιρη δυνατότητα σύνδεσης

(ii) την απόφαση των βέλτιστων τοποθεσιών του ελεγκτή που πρέπει να καθοδηγούνται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο εξισορρόπησης και

(iii) τα μοναδικά χαρακτηριστικά της κίνησης που λαμβάνονται από το SD-RAN θα πρέπει να αποτυπώνονται στον σχεδιασμό εξισορρόπησης για την ακριβή σχεδίαση μοντέλων κυκλοφορίας και την καλύτερη απόδοση του συστήματος.

Για να επιτευχθεί η on-line και προσαρμοστική μηχανική κυκλοφορίας (traffic engineering) στο SoftAir, τα μηνύματα ελέγχου θα πρέπει να προωθούνται από τα SD-switches ή τους SD-BSs στον ελεγκτή (ή στους ελεγκτές) με γρήγορο και ανθεκτικό τρόπο. Επιπλέον, λόγω των mobile χρηστών, τα μοναδικά χαρακτηριστικά της κινητής κυκλοφορίας στα SD-RANs θα πρέπει να εξεταστούν για τον έλεγχο της εξισορρόπησης κυκλοφορίας.

Το SoftAir παρέχει έναν νέο τρόπο ελέγχου εξισορρόπησης κυκλοφορίας με βάση την κινητικότητα, ο οποίος καθορίζει τις βέλτιστες θέσεις του ελεγκτή και τις βέλτιστες διαδρομές προώθησης των ροών ελέγχου σε σχέση με την κινητή κυκλοφορία (mobile traffic) [177]. Πρώτον, μέσω των μοναδικών χαρακτηριστικών του SoftAir, το μοντέλο κινητικότητας των χρηστών και το αντίστοιχο μοντέλο κυκλοφορίας χαρακτηρίζονται από την προέλευση της κατανομής της κινητής κυκλοφορίας. Στη συνέχεια, διαμορφώνεται ένα μη γραμμικό πλαίσιο βελτιστοποίησης για τον έλεγχο της εξισορρόπησης της κυκλοφορίας για να βρεθούν οι βέλτιστες διαδρομές προώθησης από το SD-switch και το SD-BS στον ελεγκτή με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η μέση καθυστέρηση ελέγχου κυκλοφορίας σε όλο το δίκτυο. Τέλος, τα ληφθέντα αποτελέσματα καθυστέρησης συνεισφέρουν μέσω ανατροφοδότησης, στην απόφαση τοποθέτησης και ενεργοποίηση του προσαρμοστικού ελέγχου για καλύτερη τοποθέτηση ελεγκτή με την εκπλήρωση της έγκαιρης παράδοσης μηνυμάτων ελέγχου.



Σχήμα 6-19. Control traffic balancing (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

### 6.12.3.2 Resource-Efficient Network Virtualization

Η εικονικοποίηση δικτύων είναι απαραίτητη για την υποστήριξη της υποδομής ως υπηρεσία (infrastructure-as-a-service, IaaS), επιτρέποντας έτσι ένα ευρύ φάσμα αναδυόμενων εφαρμογών. Τα εικονικά δίκτυα μπορούν να είναι αφιερωμένα (i) σε διαφορετικές υπηρεσίες / εφαρμογές δικτύου, έτσι ώστε κάθε υπηρεσία / εφαρμογή να μπορεί να αντιμετωπίζεται με προσαρμοσμένους και ανεξάρτητους αλγόριθμους παροχής πόρων, (ii) σε διαφορετικούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, ώστε πολλοί φορείς εκμετάλλευσης να μπορούν να μοιράζονται δυναμικά την ίδια υποδομή δικτύου (iii) να διευκολυνθεί η συνεργασία και η συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών, π.χ. multi-RATs.

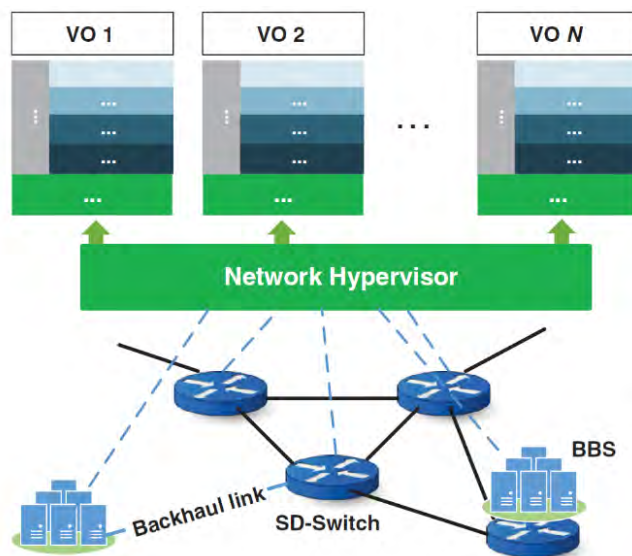


Δεδομένου ότι οι πόροι ασύρματου δικτύου είναι περιορισμένοι, οι λύσεις ασύρματης δικτύωσης που είναι αποδοτικές από πλευράς πόρων είναι ιδιαίτερα επιθυμητές.

Για να υλοποιηθούν αυτά τα απομονωμένα εικονικά δίκτυα, προτείνονται τρεις λειτουργίες όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 6-18: τον network hypervisor για virtualization υψηλού επιπέδου και τον wireless hypervisor και τον switch hypervisor για virtualization χαμηλού επιπέδου.

### **Network Hypervisor**

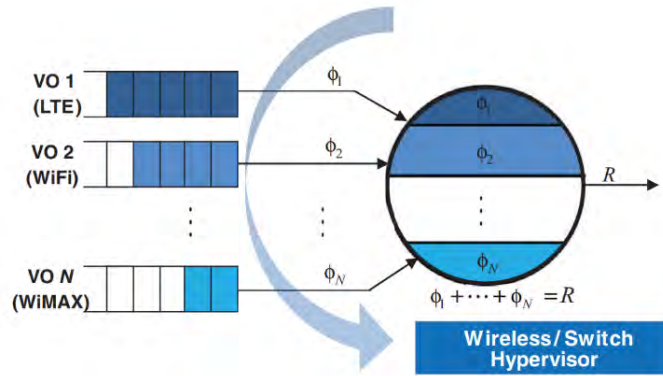
Επικεντρώνεται στη διαχείριση πόρων υψηλού επιπέδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-20, η οποία καθορίζει τον τρόπο διανομής των μη συγκρουόμενων - αλληλοκαλυπτόμενων τμημάτων πόρων δικτύου μεταξύ των εικονικών φορέων εκμετάλλευσης δικτύων βάσει των αιτημάτων τους. Προτείνεται ένας βελτιστοποιημένος *Network Hypervisor* για τη βελτιστοποίηση της συνολικής χρήσης των πόρων, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει τις απαιτήσεις ταχύτητας δεδομένων που απαιτούνται από κάθε εικονικό φορέα εκμετάλλευσης. Με δεδομένο ένα σύνολο εικονικών φορέων, ο ρυθμός δεδομένων που απαιτείται από ένα εικονικό δίκτυο μπορεί να σχηματιστεί, πράγμα που σημαίνει ότι εντός της περιοχής κάλυψης καθενός SD-BS, το εικονικό δίκτυο πρέπει να προσφέρει ένα συγκεκριμένο μέσο ρυθμό δεδομένων για τους χρήστες του με βάση κάποια χωρική κατανομή και πυκνότητα. Στη συνέχεια, σε κάθε SD-BS, μπορεί να ανατεθεί το τμήμα των ασύρματων πόρων για το εικονικό δίκτυο.



Σχήμα 6-20. Network hypervisor (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

### **Wireless Hypervisor**

Πρόκειται για έναν χρονοδρομολογητή (scheduler) πόρων χαμηλού επιπέδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-21, ο οποίος επιβάλλει ή εκτελεί τις πολιτικές διαχείρισης πόρων που καθορίζει ο network hypervisor, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία σχημάτων διαστασιολόγησης ασύρματων πόρων (π.χ. OFDMA ή ασύρματο προγραμματισμό), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται 100% η απομόνωση μεταξύ των εικονικών δικτύων. Κατά συνέπεια, κάθε εικονικό δίκτυο μπορεί να υλοποιήσει και να υιοθετήσει τα δικά του και εξατομικευμένα πρωτόκολλα επιπέδου NET / MAC / PHY. Εκτός από την 100% απομόνωση μεταξύ των εικονικών δικτύων, ο wireless hypervisor πρέπει να διασφαλίσει την αποτελεσματική χρήση των περιορισμένων πηγών φάσματος, οι οποίες παρουσιάζουν ενδογενή ποικιλία καναλιών και χρηστών.



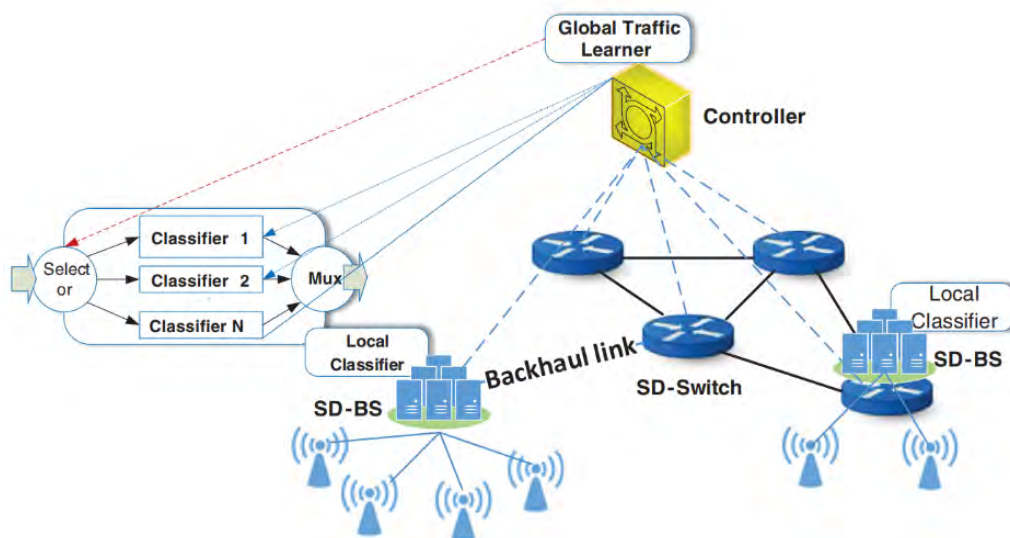
Σχήμα 6-21. Wireless and switch hypervisors (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

### Switch Hypervisor

Ο *Switch Hypervisor* (ή *switch fabric*), υποστηρίζοντας το πρωτόκολλο OpenFlow, επικεντρώνεται στο διαχωρισμό του εύρους ζώνης σε ένα μόνο SD-switch. Συγκεκριμένα, η παροχή εύρους ζώνης στους μεταγωγείς έχει ως στόχο να προσφέρει προκαθορισμένο εύρος ζώνης για κάθε συγκεκριμένη κυκλοφοριακή ροή ή εικονικό δίκτυο. Ο FlowVisor είναι ένα στρώμα (layer) υπεύθυνο για την απομόνωση μεταξύ των φετών της εικονικής υποδομής.

### Distributed and Collaborative Traffic Classification

Το SoftAir έχει τη μεγάλη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του φάσματος. Συγκεκριμένα, ένας καταναμημένος και συνεργατικός ταξινομητής κυκλοφορίας (traffic classifier) έχει προταθεί στο SD-BS [178], το οποίο συνεργάζεται με έναν global traffic learner στον ελεγκτή δικτύου για να επιτύχει ταχεία, λεπτομερή και ακριβή ταξινόμηση της κυκλοφορίας (Σχήμα 6-22). Ο στόχος αυτού του καταναμημένου ταξινομητή κυκλοφορίας είναι να προσδιορίσει την εφαρμογή, την απαίτηση QoS και τα στοχαστικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με κάθε ροή κυκλοφορίας. Με αυτές τις πληροφορίες κυκλοφοριακής ροής, μπορούν να υιοθετηθούν εξαιρετικά εξελιγμένες και προσαρμοστικές λύσεις μηχανικής κυκλοφορίας (traffic engineering) τόσο σε επίπεδο BS όσο και σε επίπεδο δικτύου κορμού. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από δύο συνιστώσες: (i) τους τοπικούς ταξινομητές κυκλοφορίας σε SD-BSs στην άκρη του δικτύου και (ii) τον global traffic learner στον ελεγκτή δικτύου που βρίσκεται στο δίκτυο κορμού (CN). Επομένως, το SoftAir θα επωφεληθεί από τον κεντρικό και υπολογιστικά ισχυρό ελεγκτή δικτύου για να εκμεταλλευτεί από κοινού τα πλεονεκτήματα της βαθιάς επιθεώρησης πακέτων (DPI - deep package inspection) και της ημι-εποπτευόμενης μηχανικής μάθησης [179].



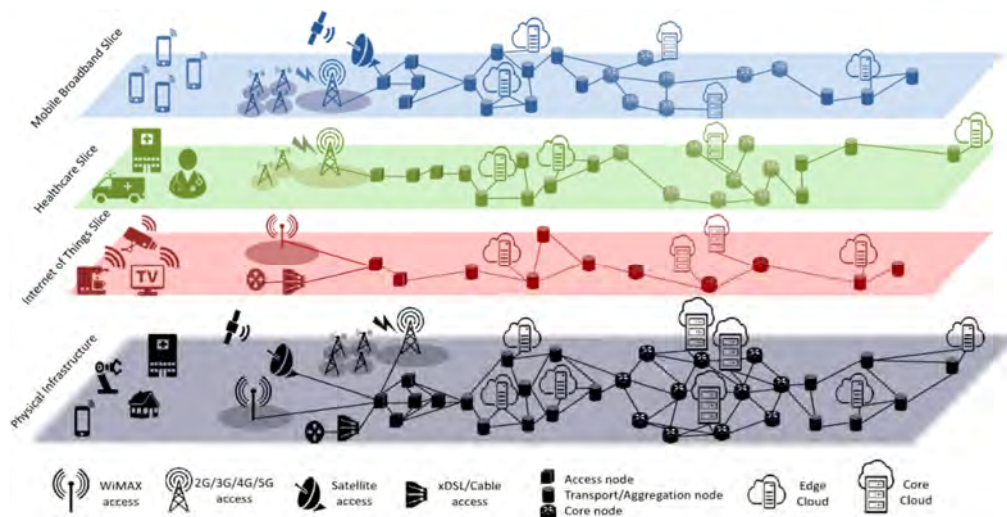
Σχήμα 6-22. Distributed traffic classification - Καταναμημένη ταξινόμηση κυκλοφορίας (πηγή: I.F. Akyildiz et al., 2015)

### 6.13 Network Slicing

Τα συστήματα 5G διερευνώνται σήμερα για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των καταναλωτών, των υπηρεσιών και των επιχειρήσεων από το 2020 και μετά. Ένας από τους βασικούς μοχλούς των συστημάτων 5G είναι η ανάγκη υποστήριξης μιας ποικιλίας κάθετων βιομηχανιών όπως η μεταποίηση, η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, η ενέργεια και τα μέσα ενημέρωσης και ψυχαγωγίας. Αυτές οι πολύ διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης, επιβάλλουν ένα ευρύτερο φάσμα απαιτήσεων από τις σημερινές υπάρχουσες υπηρεσίες. Τα σημερινά δίκτυα, με την αρχιτεκτονική τους προσέγγιση "one-size-fits-all", δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τις αποκλίνουσες απαιτήσεις απόδοσης που επιβάλλουν οι νέες υπηρεσίες όσον αφορά την καθυστέρηση, την επεκτασιμότητα, τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία. Για την αποτελεσματική προσαρμογή σε καταστάσεις κάθετης χρήσης, μαζί με αυξημένες απαιτήσεις για υπάρχουσες υπηρεσίες μέσω της ίδιας υποδομής δικτύου, γίνεται δεκτό ότι τα συστήματα 5G απαιτούν αρχιτεκτονικές βελτιώσεις όσον αφορά τις τρέχουσες αναπτύξεις.

Μια αναδυόμενη τάση που επιδιώκει να μετασχηματίσει τα δίκτυα χρησιμοποιώντας λύσεις βασισμένες σε λογισμικό, μπορεί να αποτελέσει έναν πιθανό παράγοντα για την επίτευξη αυτού του στόχου. Μέσω τεχνολογιών όπως το Software-Defined Networking (SDN) και το NFV (Network Function Virtualization), παρέχεται η προγραμματισσιμότητα και η ευελιξία που απαιτούνται για τη δημιουργία πολλαπλών λογικών (εικονικών) δικτύων, στην κορυφή ενός κοινού δικτύου. Αυτά τα λογικά δίκτυα αναφέρονται ως φέτες δικτύου (network slices) [180].

Η έννοια των διαχωρισμένων εικονικών δικτύων που αναπτύσσονται σε ένα και μόνο δίκτυο δεν είναι πράγματι νέα (π.χ. VPN), αν και υπάρχουν ιδιαιτερότητες που καθιστούν τις φέτες δικτύου μια νέα αντίληψη. Ορίζουμε τη φράση φέτες δικτύου (network slices) ως τα λογικά δίκτυα από άκρη σε άκρη (E2E) που εκτελούνται σε ένα κοινό υποκείμενο δίκτυο (φυσικό ή εικονικό), αμοιβαία απομονωμένα, με ανεξάρτητο έλεγχο και διαχείριση και τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν κατόπιν ζήτησης. Αυτά τα αυτοδύναμα δίκτυα πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτα ώστε να χωρέσουν ταυτόχρονα διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης από επιχειρήσεις και από πολλαπλούς παίκτες σε μια κοινή υποδομή δικτύου (Σχήμα 6-23).



**Σχήμα 6-23. 5G network slices σε ένα κοινό υποκείμενο δίκτυο πολλαπλών κατασκευαστών και πολλαπλής πρόσβασης. Κάθε slice διαχειρίζεται ανεξάρτητα και αντιμετωπίζει μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης. (πηγή: J. Ordonez-Lucena et al., 2017)**

Σε κάθε περίπτωση πάντως, υπάρχουν δύο κοινές απαιτήσεις που τα εικονικά δίκτυα θα πρέπει να ικανοποιούν:

- τη συνύπαρξη διαφορετικών εικονικών δικτύων που αντιστοιχίζονται στο ίδιο φυσικό δίκτυο

- την απομόνωση των εικονικών δικτύων έτσι ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις μεταξύ συνυπαρχόντων εικονικών δικτύων.

## Ορισμός

Για τον πιο γενικό ορισμό, μια φέτα (slice) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο ροών που ανήκουν σε διαφορετικούς τελικούς χρήστες. Στη συνέχεια, ένα slice υποστηρίζει τις ροές πολλών τελικών χρηστών, αλλά ταυτόχρονα ένας τελικός χρήστης μπορεί να συμμετέχει σε πολλαπλές φέτες. Μια ροή (ροή πακέτων) είναι μια οντότητα σε αυτήν την προσέγγιση, η οποία μπορεί να έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS και να είναι μέλος ενός ενιαίου slice. Για παράδειγμα, μια ροή σε ένα δίκτυο IP θα μπορούσε να οριστεί από την πλειάδα που αποτελείται από τις διευθύνσεις IP και τις θύρες IP πηγής και προορισμού.

Επιπλέον, ένα slice μπορεί να οριστεί ως ένα υποσύνολο πόρων δικτύου που διατίθεται σε έναν ενοικιαστή (*tenant*, εικονικό φορέα εκμετάλλευσης ή παροχέα υπηρεσιών), με πλήρη έλεγχο αυτών των πόρων. Μια σημαντική πτυχή της σχεδίασης του τεμαχισμού δικτύου είναι η διανομή εργαλείων προσαρμοστικότητας και προγραμματισμού στον ενοικιαστή. Παραδείγματα για slices μπορεί να είναι: όλες οι ροές των οποίων η πηγή ή ο προορισμός είναι ένας δεδομένος τύπος συσκευής όπως αισθητήρες, ή όλες οι ροές από μια υπηρεσία VoIP, ή όλες οι ροές με πηγή ή προορισμό τον τελικό χρήστη ενός συγκεκριμένου operator. Ανάλογα με τις προδιαγραφές ενός slice, ένας τελικός χρήστης μπορεί να συμμετέχει σε διαφορετικά slices, αλλά αυτά θα είναι πάντα ανεξάρτητα μεταξύ τους [181]. Στο πλαίσιο των ασύρματων δικτύων, υπάρχουν δύο μεγάλα σενάρια για τη χρήση των slices:

**Quality of Service Slicing** (Τεμαχισμός με βάση την ποιότητα υπηρεσίας): η ιδέα είναι να δημιουργηθούν slices για να προσφέρουν διαφορετικές υπηρεσίες και να εξασφαλίζεται κάποιος τύπος QoS μέσα στο κάθε slice. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργηθεί ένα slice για να παρέχεται εξυπηρέτηση σε μια συγκεκριμένη ομάδα συσκευών με τις ίδιες απαιτήσεις (αισθητήρες ή smartphones) ή ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής (π.χ. ένα slice για υπηρεσίες πολυμέσων) [182].

**Infrastructure Sharing Slicing** (Τεμαχισμός με βάση την κοινή χρήση της υποδομής): αυτή είναι η παραδοσιακή ιδέα της εικονικοποίησης δικτύου που εφαρμόζεται στον ασύρματο τομέα. Υπάρχει ένας ενοικιαστής (π.χ. ένας Mobile Virtual Network Operator - MVNO), στον οποίο δίνεται ένα slice του δικτύου. Ο μισθωτής - ενοικιαστής (*tenant*) έχει πλήρη έλεγχο της υποδομής δικτύου και των λειτουργιών εντός του συγκεκριμένου slice [182].

Ένα παράδειγμα - σενάριο για την εφαρμογή του QoS Slicing είναι όταν ένας μελλοντικός φορέας εκμετάλλευσης δικτύου 5G προσφέρει διαφοροποιημένους τύπους υπηρεσιών ανάλογα με την περίπτωση ειδικής χρήσης. Για παράδειγμα, μια υπηρεσία υψηλής απόδοσης (*high-throughput*) για smartphones, μια *low-rate* μη κρίσιμη υπηρεσία για επικοινωνίες Internet of Things (IoT) ή Machine to Machine (M2M) επικοινωνίες και μια υπηρεσία χαμηλής καθυστέρησης (*low-latency*) για κρίσιμες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, το σενάριο είναι ένας συνδυασμός αυτών των περιπτώσεων χρήσης, καθενιά με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της και ο φορέας εκμετάλλευσης (*operator*) θα πρέπει να παρέχει υπηρεσίες και διαχείριση για όλες αυτές τις περιπτώσεις από κοινού. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι απαιτήσεις, ορίζονται ξεχωριστά και απομονωμένα slices, καθένα από τα οποία παρέχει υπηρεσία σε μια συγκεκριμένη ομάδα χρηστών ή συσκευών (Σχήμα 6-23).

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

- **Τεμαχισμός σε επίπεδο φάσματος** (*Spectrum-level slicing*): Το φάσμα μπορεί να τεμαχιστεί με πολυπλεξία χρόνου, χώρου ή συχνότητας ή με επικάλυψη πρόσβασης. Μπορεί να θεωρηθεί ως εικονικοποίηση σύνδεσης (*link virtualization*).

- **Τεμαχισμός σε επίπεδο υποδομής (Infrastructure-level slicing):** Είναι ο τεμαχισμός φυσικών στοιχείων δικτύου όπως: κεραίες, σταθμοί βάσης (BSs), επεξεργαστές, μνήμη. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την εικονικοποίηση.
- **Τεμαχισμός σε επίπεδο δικτύου (Network-level slicing):** Πρόκειται για τον τεμαχισμό όλων των υποδομών δικτύου.

Τέλος, η ισχυρή **απομόνωση (isolation)** είναι μια σημαντική απαίτηση που πρέπει να ικανοποιηθεί για να λειτουργούν παράλληλα slices σε ένα κοινό (και κοινόχρηστο) υποκείμενο υπόστρωμα. Η απομόνωση πρέπει να γίνει κατανοητή ως εξής:

- **Απόδοση (Performance):** κάθε slice ορίζεται για να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις υπηρεσίας, συνήθως εκφρασμένες με τη μορφή KPIs. Η απομόνωση των αποδόσεων είναι ένα θέμα E2E και πρέπει να διασφαλίσει ότι οι απαιτήσεις απόδοσης για κάθε υπηρεσία καλύπτονται πάντα σε κάθε slice, ανεξάρτητα από τα επίπεδα συμφόρησης και απόδοσης των άλλων slices.
- **Ασφάλεια και ιδιωτικότητα (Security and privacy):** επιθέσεις ή βλάβες που εμφανίζονται σε ένα slice δεν πρέπει να έχουν αντίκτυπο σε άλλα slices. Επιπλέον, κάθε slice πρέπει να διαθέτει ανεξάρτητες λειτουργίες ασφαλείας που εμποδίζουν τις μη εξουσιοδοτημένες οντότητες να έχουν πρόσβαση, να διαβάζουν ή να γράφουν σε συγκεκριμένες πληροφορίες διαμόρφωσης / διαχείρισης και είναι σε θέση να καταγράφουν οποιαδήποτε από αυτές τις προσπάθειες, είτε είναι εξουσιοδοτημένες είτε όχι.
- **Διαχείριση (Management):** κάθε slice πρέπει να διαχειρίζεται ανεξάρτητα ως ένα ξεχωριστό δίκτυο.

Για να επιτευχθεί η απομόνωση, πρέπει να καθοριστεί ένα σύνολο κατάλληλων και συνεπών πολιτικών και μηχανισμών σε κάθε επίπεδο εικονικοποίησης. Οι πολιτικές (που πρέπει να εφαρμοστούν) περιέχουν λίστες κανόνων που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να απομονωθούν σωστά οι διαφορετικές διαχειρίσιμες οντότητες. Οι μηχανισμοί (πώς πρέπει να γίνει) είναι οι διαδικασίες που εφαρμόζονται για την επιβολή των καθορισμένων πολιτικών.

## Οφέλη

Στη συνέχεια, περιγράφουμε λεπτομερώς τα σημαντικά οφέλη που θα έχει η προσέγγιση του network slicing στα ασύρματα δίκτυα.

**1) Διαφοροποίηση ετερογενών υπηρεσιών (Heterogeneous Service Differentiation):** Στο σημερινό περιβάλλον, όπου υπάρχει μεγάλη ποικιλία υπηρεσιών και συσκευών που τα ασύρματα δίκτυα πρέπει να αντιμετωπίσουν, ο τεμαχισμός γίνεται ένας τρόπος για να απομονωθούν και να επιτευχθούν ταυτόχρονα διαφορετικές απαιτήσεις. Κατά την κοινή χρήση πόρων, ο τεμαχισμός θα επιτρέψει τη δημιουργία προσαρμοσμένων υπηρεσιών με εξαιρετικά χαρακτηριστικά ελέγχου του QoS [183]. Η ιδέα είναι να διαιρεθεί το δίκτυο σε slices που το καθένα θα έχει διαφορετικούς πόρους και ικανότητες, έτσι ώστε να προσφέρονται διαφοροποιημένες υπηρεσίες για περιπτώσεις ετερογενών χρήσεων. Επίσης ο τεμαχισμός παρουσιάζεται ως ένας από τους βασικούς παράγοντες που βοηθούν τα μελλοντικά δίκτυα 5G να διαχειριστούν τις αναμενόμενες ετερογενείς απαιτήσεις [184]. Είναι επίσης δυνατό να οριστούν slices για συγκεκριμένες εφαρμογές, οι οποίες μπορεί να απαιτούν προσαρμοσμένες δυνατότητες δικτύου [185]. Με την εικονικοποίηση, ένα στρώμα αφαίρεσης επάνω από το slice, μπορεί να οριστεί έτσι ώστε να ελέγχει το δίκτυο ως ένα *black box* για να καθορίζει εύκολα τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Μια άλλη πιθανή προσέγγιση είναι να έχουμε προσαρμοσμένα slices ανά τύπο συσκευής ή ανά τύπο πελάτη. Τα network slices θα προσφέρουν αποτελεσματική χρήση πόρων, καθώς κάθε slice μπορεί να προσαρμοστεί για μια συγκεκριμένη υπηρεσία και με δυναμικό τρόπο κατ' απαίτηση. Αυτός ο δυναμικός τρόπος κάνει τη βασική διαφορά από τις υπάρχουσες παρόμοιες προτάσεις όπως τα VPNs.

**2) Διαχείριση Δικτύου (Network Management):** Η διαχείριση διαφορετικών εφαρμογών με αντικρουόμενες απαιτήσεις σε μια κοινή υποδομή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω χωριστών network slices [186]. Ο τεμαχισμός του δικτύου θα επιτρέψει την ξεχωριστή διαμόρφωση των δικτύων από άκρη σε άκρη και τον καθορισμό συγκεκριμένων λειτουργιών για κάθε περίπτωση,

ενώ μοιράζονται την ίδια υποδομή και αποφεύγουν το υψηλότερο κόστος. Για παράδειγμα, ο τεμαχισμός θα επιτρέψει την κατανομή των διαθέσιμων πόρων μόνο στις απαραίτητες λειτουργίες σε ολόκληρη τη διαδρομή της επικοινωνίας, επιτρέποντας έτσι την προσαρμογή της διαμόρφωσης του δικτύου για κάθε περίπτωση. Με τη βοήθεια των NFV και SDN ο τεμαχισμός θα παρέχει επίσης ευελιξία για τη δυναμική δημιουργία και κατάργηση των slices ανάλογα με τις πολιτικές των operators. Ο στόχος είναι η εικονικοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων λειτουργιών ενώ εκείνες οι λειτουργίες που δεν μπορούν να εικονικοποιηθούν θα πρέπει να είναι προγραμματίσιμες και διαμορφώσιμες [4]. Ακόμη περισσότερο, στην περίπτωση των slices που ορίζονται ανά τύπο υπηρεσίας ή συσκευής - όπου θα είναι γνωστό ποια υπηρεσία εξυπηρετεί κάθε slice - το δίκτυο μπορεί να απλοποιηθεί αφαιρώντας λειτουργίες που δεν είναι απαραίτητες. Για παράδειγμα, εάν ένα slice παρέχει πρόσβαση σε στατικούς αισθητήρες, η διαχείριση της κινητικότητας μπορεί να μειωθεί στο ελάχιστο. Με αυτόν τον τρόπο, η διαχείριση απλοποιείται, καθιστώντας ευκολότερη την ανάπτυξη της αυτόνομης διαχείρισης για κάθε συγκεκριμένο slice.

**3) Ετερογενείς τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (*Heterogeneous Radio Access Technologies*):** Ο τεμαχισμός μπορεί επίσης να βοηθήσει στη διαχείριση δικτύων που χρησιμοποιούν ετερογενείς τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (RAT). Αποτελεί πλέον κανόνα η ύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών (multi-RATs) που εργάζονται στο ίδιο δίκτυο ως ένας τρόπος ανακούφισης από το πρόβλημα της έλλειψης φάσματος. Για παράδειγμα, το WiFi έχει γίνει ένας σημαντικός “παίκτης” στη κινητή τηλεφωνία ως ένας τρόπος για να αποφορτίσει (offloading) τη μετάδοση δεδομένων από κινητές συσκευές όπως τα smart-phones ή τα tablets. Με αυτόν τον τρόπο, οι τελικοί χρήστες αποφεύγουν την επιπλέον χρέωση όταν υπερβαίνουν το όριο χρήσης δεδομένων που έχει συμφωνηθεί. Η κατανομή πόρων από διαφορετικές τεχνολογίες μπορεί να αντιμετωπιστεί από μια προοπτική τεμαχισμού όπου, ανάλογα με παραμέτρους όπως η απόδοση, η θέση του χρήστη ή το κόστος, το καλύτερο RAT θα εκχωρείται και θα αντιστοιχίζεται σε κάθε slice. Η αποτελεσματικότητα του φάσματος μπορεί επίσης να βελτιωθεί με το τεμαχισμό, καθώς είναι δυνατόν να ταιριάζουν διαφορετικές απαιτήσεις με τους καλύτερους διαθέσιμους ραδιοπόρους. Για να επιτραπεί αυτή η δυνατότητα, το δίκτυο πρέπει να περιλαμβάνει ενσωματωμένες ή προγραμματιζόμενες ασύρματες διεπαφές, καθώς και διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες, όπως αναμένεται στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα. Όπως προβλέπεται, το μέλλον οδηγεί στη συνύπαρξη και σύγκλιση διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών που συνθέτουν μια υποδομή προσανατολισμένη στις υπηρεσίες. Ο τεμαχισμός εμφανίζεται ως μία πιθανή λύση για να επιτραπεί αυτή η συνύπαρξη απλοποιώντας τη διαχείριση.

**4) Κοινή χρήση υποδομής (*Infrastructure Sharing*):** Ένα άλλο σημαντικό κίνητρο για τον τεμαχισμό είναι η κοινή χρήση της υποδομής. Είναι παρόμοιο με την έννοια της διαφοροποίησης υπηρεσιών, αλλά στην περίπτωση αυτή, κάθε slice μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικό φορέα που προσφέρει τις δικές του υπηρεσίες. Για παράδειγμα, στο Ηνωμένο Βασίλειο υπάρχουν 41 mobile virtual operators (εικονικοί φορείς κινητής τηλεφωνίας), οι οποίοι είναι πελάτες των mobile infrastructure providers (κινητών παρόχων υποδομής) [187]. Οι περισσότερες από αυτές προσφέρουν παρόμοιες υπηρεσίες φωνής, SMS και δεδομένων όπως κάθε κατεστημένος φορέας εκμετάλλευσης. Ο τεμαχισμός θα διευκολύνει τη διαχείριση της υποδομής και θα προσφέρει απομόνωση μεταξύ διαφορετικών φορέων εκμετάλλευσης. Από μια άλλη άποψη, η ιδέα της κοινής χρήσης της υποδομής θα δώσει στους operators μεγαλύτερη ευελιξία να αλλάξουν το λογικό τους δίκτυο και να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά τους πόρους τους. Η ιδέα υποστηρίζεται επίσης από το Telemanagement Forum [188], το οποίο αναφέρει: “Η προσδοκία είναι ότι το 5G θα προσφέρει πολλαπλά εικονικά δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά κόστους / απόδοσης σε μια κοινή υποδομή”.

**5) Ευελιξία για νέες υπηρεσίες και επιχειρηματικά μοντέλα (*Flexibility for New Services and Business Models*):** Από επιχειρηματική άποψη, ο τεμαχισμός του δικτύου θα προωθήσει την εισαγωγή νέων περιπτώσεων χρήσης χωρίς αύξηση του κόστους χάρη στην ικανότητα να μοιράζονται την ίδια υποδομή διαφορετικά slices. Αυτό μπορεί να επιτρέψει την παροχή υπηρεσιών

σε συσκευές με χαμηλές απαιτήσεις κυκλοφορίας (low traffic) σε πολύ πυκνές περιοχές (π.χ. IoT) χωρίς αύξηση του κόστους όπως θα χρειαστεί να κάνει το 5G. Επιπλέον, καθώς μπορεί να προσφερθούν τυποποιημένα APIs για τον προγραμματισμό του δικτύου, ο τεμαχισμός θα εμπλουτίσει το επιχειρηματικό μοντέλο Everything as a Service (XaaS) και θα επιτρέψει σε τρίτα μέρη να διερευνήσουν νέες ευκαιρίες.

### 6.13.1 Υλοποίηση του Network Slicing - Ο ρόλος του SDN

Η αρχιτεκτονική SDN επιτρέπει την ευέλικτη υποστήριξη σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης και σεναρίων σε μια κοινή υποδομή, προσαρμόζοντας και βελτιστοποιώντας τις υπηρεσίες ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις τους. Μέσω της εικονικοποίησης και ενορχήστρωσης των υποκείμενων πόρων που θα χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες, το SDN επιτρέπει τον δυναμικό έλεγχο των πόρων. Το SDN επικεντρώνεται κυρίως στη χρήση των πόρων για την παροχή υπηρεσιών ενώ το NFV επικεντρώνεται κυρίως στη δημιουργία και την υποστήριξη των πόρων σε όλο τον κύκλο ζωής τους, οι οποίοι μπορούν να αποσυνδεθούν σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση υλικού.

Η αρχιτεκτονική SDN συγχωνεύει δύο μοντέλα που βασίζονται σε ξεχωριστές προοπτικές. Η προοπτική που προσανατολίζεται στον πόρο λαμβάνεται από την οπτική γωνία από κάτω προς τα επάνω, ενός παρόχου που κατανέμει πόρους στους πελάτες και επικεντρώνεται στις διαχειριστικές ανάγκες του παρόχου. Το μοντέλο προσανατολισμένο στις υπηρεσίες λαμβάνει την προοπτική από την κορυφή προς τα κάτω ενός πελάτη που επικαλείται και διαχειρίζεται υπηρεσίες που λαμβάνει από τον πάροχο (Σχήμα 6-24).

Τα κύρια αρχιτεκτονικά στοιχεία του SDN είναι οι πόροι και οι ελεγκτές [189]. Για το SDN, ένας πόρος είναι οτιδήποτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή υπηρεσιών ανταποκρινόμενος στις αιτήσεις των πελατών. Ο όρος πόρος στο SDN χρησιμοποιείται γενικά. Οι πόροι περιλαμβάνουν αποθήκευση, επεξεργασία και προώθηση, δηλαδή οτιδήποτε χρειάζεται για την παροχή μιας υπηρεσίας. Η έννοια του πόρου περιλαμβάνει επίσης λειτουργίες δικτύου που μπορεί να παρέχονται για παράδειγμα από την εικονικοποίηση (NFV).

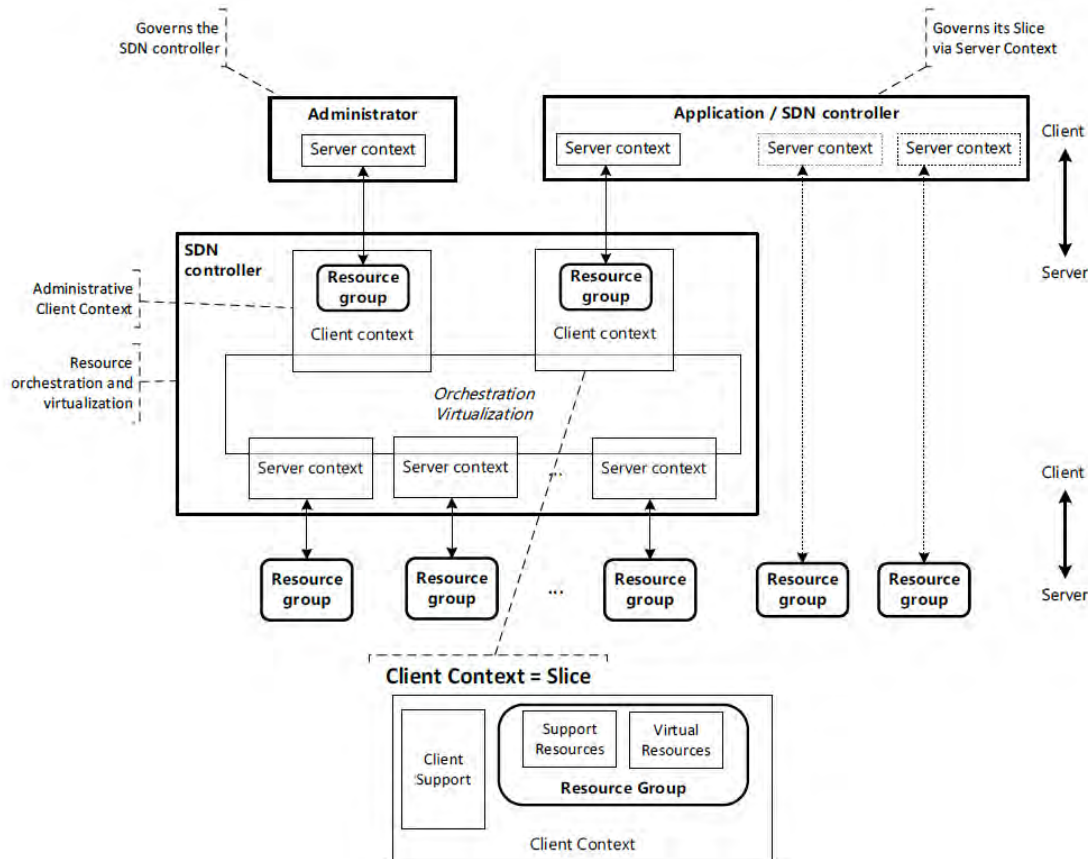
Οι διεπεφές μεταξύ των στοιχείων της αρχιτεκτονικής SDN (πόροι - ελεγκτής και ελεγκτής - εφαρμογές) εμφανίζουν σχέσεις πελάτη-διακομιστή (client – server) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-24 [146].

Ένας ελεγκτής είναι μια λογικά κεντρική οντότητα που έχει παρουσία στο επίπεδο ελέγχου, ο οποίος διαχειρίζεται πόρους SDN για την παροχή υπηρεσιών με έναν βέλτιστο τρόπο. Ως εκ τούτου, μεσολαβεί μεταξύ των πελατών (clients) και των πόρων. Αλληλεπίδρα με τον πελάτη του (client) μέσω του client context (πλαίσιο πελάτη) και με τους πόρους του μέσω του server context (πλαίσιο διακομιστή). Και τα δύο πλαίσια (contexts) είναι εννοιολογικά στοιχεία ενός ελεγκτή SDN που επιτρέπει τις σχέσεις client – server.

**Client context (Πλαίσιο πελάτη):** αντιπροσωπεύει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται ο ελεγκτής για να υποστηρίξει και να επικοινωνήσει με έναν συγκεκριμένο client. Περιλαμβάνει μια ομάδα πόρων (Resource Group) και μια λειτουργία υποστήριξης client (Client support function). Η Ομάδα Πόρων περιέχει μια αφαιρετική και προσαρμοσμένη προβολή όλων των πόρων που προσφέρει ο ελεγκτής προς τον client μέσω μιας από τις διεπαφές του στο βορρά, προκειμένου να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του και να διευκολύνει την αλληλεπίδρασή του με τον ελεγκτή. Η υποστήριξη πελάτη (Client support ) περιλαμβάνει όλα όσα είναι απαραίτητα για την υποστήριξη των λειτουργιών του client, συμπεριλαμβανομένων πολιτικών σχετικά με το τι επιτρέπεται ο client να δει και να κάνει [146], καθώς και πληροφορίες σχετικές με τις υπηρεσίες για τη χαρτογράφηση ενεργειών μεταξύ του client και του ελεγκτή.

**Server context (Πλαίσιο διακομιστή):** αντιπροσωπεύει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται ο ελεγκτής για να αλληλεπιδράσει με ένα σύνολο υποκείμενων πόρων, συναρμολογημένο σε μια

ομάδα πόρων (Resource Group), μέσω μιας από τις διεπαφές του προς νότο. Αποτελεί το συμμετρικό αντίγραφο σε ένα client context.



Σχήμα 6-24. Αρχιτεκτονική SDN Network Slicing από το ONF (πηγή: ONF TR-526) [189]

Η διαδικασία μετασηματισμού του συνόλου των ομάδων πόρων (Resource groups) που έχουν πρόσβαση μέσω των server contexts σε εκείνα που ορίζονται σε ξεχωριστά client contexts δεν είναι απλή και απαιτεί από τον ελεγκτή SDN να εκτελεί λειτουργίες εικονικοποίησης και ενορχήστρωσης.

Με τη λειτουργία της **εικονικοποίησης**, ο ελεγκτής SDN πραγματοποιεί την αφαίρεση και τη συσσώρευση / διαίρεση των υποκείμενων πόρων που διαχειρίζεται και ελέγχει. Οι προβολές σε τέτοιους εικονικοποιημένους πόρους ή ομάδες πόρων που είναι αφιερωμένοι σε συγκεκριμένους clients παρέχονται από τον ελεγκτή SDN σε πελάτες / εφαρμογές / χρήστες μέσω της διεπαφής NBI (με κατεύθυνση από κάτω προς τα επάνω). Χάρη στην εικονικοποίηση, κάθε client context προμηθεύεται μια συγκεκριμένη ομάδα πόρων (Resource Group) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον client που σχετίζεται με αυτό το context για να υλοποιήσει τις υπηρεσίες του. Η κατανομή πόρων που διατίθενται σε έναν client μπορεί να είναι εντελώς στατική, εντελώς δυναμική ή οτιδήποτε ενδιάμεσα.

Ο όρος **ενορχήστρωση** χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ευθύνη του ελεγκτή, για την αποστολή πόρων με βέλτιστο τρόπο σε αυτές τις ξεχωριστές ομάδες πόρων και ταυτόχρονα να ικανοποιεί τις απαιτήσεις εξυπηρέτησης από όλους τους πελάτες του (clients) όσο το δυνατόν πιο οικονομικά. Αυτό περιλαμβάνει τη δυναμική και εξαιρετικά λεπτομερή κατανομή των πόρων. Το μέτρο της βέλτιστης σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας καθορίζεται από την πολιτική του παρόχου. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι η ενορχήστρωση είναι μια συνεχής διαδικασία σε πραγματικό χρόνο καθώς αλλάζουν οι πόροι δικτύου, το φορτίο κυκλοφορίας και οι ανάγκες σε υπηρεσίες. Μερικές φορές, η ανάλυση της κατάστασης δικτύου, η πολιτική καθοδήγηση των προτεραιοτήτων και η συνεχής βελτιστοποίηση διακρίνονται από την ενορχήστρωση. Επειδή η αρχιτεκτονική SDN δεν απαιτεί σκόπιμα κάποια ιδιαίτερη διαίρεση της λειτουργικότητας του



ελεγκτή, χρησιμοποιεί τον όρο ενορχήστρωση με ευρεία έννοια για να συμπεριλάβει όλες αυτές τις λειτουργίες.

Η αλληλεπίδραση των δύο λειτουργιών του ελεγκτή (εικονικοποίηση – ενορχήστρωση) επιτρέπει την εκπλήρωση των διαφορετικών απαιτήσεων των υπηρεσιών από όλους τους clients διατηρώντας παράλληλα την απομόνωση μεταξύ τους.

Η αρχιτεκτονική SDN περιλαμβάνει επίσης έναν διαχειριστή (administrator). Ο διαχειριστής είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία και διατήρηση του περιβάλλοντος που απαιτείται για την παροχή υπηρεσιών στους clients. Έχει την αρμοδιότητα να διαμορφώνει τον ελεγκτή SDN, καθώς και να δημιουργεί και να διαχειρίζεται τα client και server contexts (πλαίσια πελάτη και διακομιστή). Η διαμόρφωση ενός ελεγκτή SDN περιλαμβάνει τη δημιουργία του ίδιου του ελεγκτή (π.χ. ως VNF) και την εγκατάσταση και την τροποποίηση της εσωτερικής πολιτικής του ελεγκτή όπως απαιτείται για τη συνεχή βελτιστοποιημένη χρήση των πόρων. Αρχικά, ως προεπιλογή, δημιουργείται ένας ελεγκτής SDN με ένα **administrator client context** που έχει απεριόριστη ορατότητα και εξουσιοδότηση για εκτέλεση όλων των άλλων λειτουργιών. Ο διαχειριστής ρυθμίζει τον ελεγκτή με τα server contexts για να αποκτήσει πρόσβαση σε υποκείμενους πόρους και τα ενημερώνει κάθε στιγμή ανάλογα με τις ανάγκες. Οι υποκείμενοι πόροι με τη σειρά τους διαμορφώνονται από τους δικούς τους διαχειριστές στα δικά τους (υποκείμενα) επίπεδα. Ο διαχειριστής στη συνέχεια δημιουργεί ένα client context για κάθε πελάτη του, το οποίο περιλαμβάνει την κατανομή των υποκείμενων πόρων στον κάθε client (εικονικοποίηση – ενορχήστρωση), καθώς και συμπληρωματικές ρυθμίσεις. Ο διαχειριστής διαμορφώνει κάθε client context με πολιτικές που ορίζει τις ενέργειες και τα όρια που επιτρέπονται στον client. Ένας διαχειριστής μπορεί να τροποποιήσει ένα client context κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του και μπορεί να καταργήσει ένα client context εάν λήξει η σχέση με τον client.

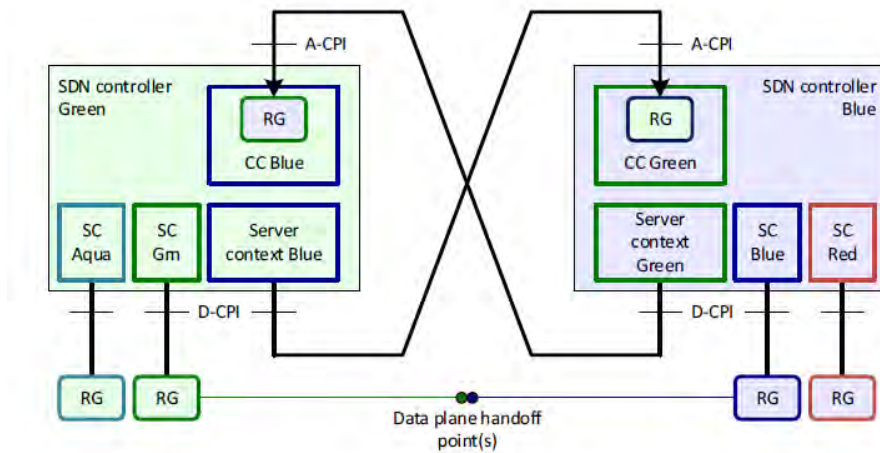
Η κατάσταση των πόρων που ανήκουν στον ελεγκτή προσαρμόζεται συνεχώς σύμφωνα με τις πολιτικές που παρέχονται από τον διαχειριστή. Αυτές οι πολιτικές περιλαμβάνουν παραμέτρους για την ικανοποίηση των υποχρεώσεων προς τους clients. Για όλες τις υπηρεσίες που ζητούν οι clients, παρέχονται και διατηρούνται πόροι καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Ειδικά όταν οι υπηρεσίες παρέχονται μέσω μιας κοινής υποδομής, ο ελεγκτής χειρίζεται δυναμικά τις ανάγκες και απαιτήσεις των υπηρεσιών για πόρους, λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές απαιτήσεις και την πολιτική περιορισμών.

**Σύμφωνα με το ONF, η αρχιτεκτονική SDN υποστηρίζει φυσικά το τεμαχισμό [189], καθώς το client context παρέχει το πλήρες αφηρημένο σύνολο πόρων (ως ομάδα πόρων - Resource Group) και την υποστήριξη της λογικής ελέγχου που συνιστά ένα slice, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους συλλογής των σχετικών χαρακτηριστικών υπηρεσίας πελάτη.**

Μια άλλη βασική λειτουργική πτυχή που καθιστά την αρχιτεκτονική SDN ιδανική για να αγκαλιάσει τον τεμαχισμό 5G είναι η αναδρομή (recursion).

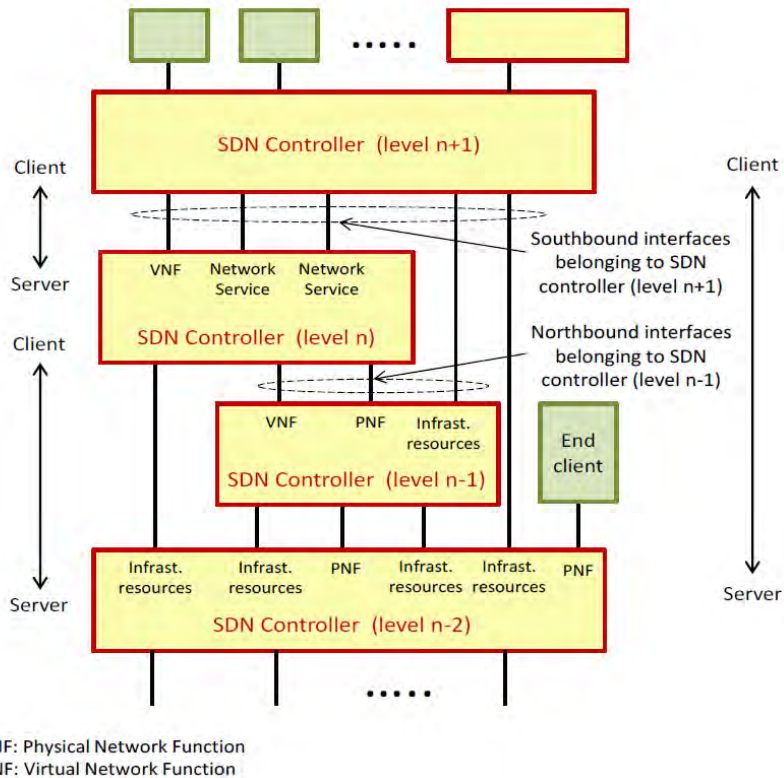
Η **ιεραρχική / κατακόρυφη αναδρομή** λαμβάνει χώρα όταν ένας ελεγκτής χρησιμοποιεί πόρους από ελεγκτές χαμηλότερου επιπέδου και παράλληλα παρέχει υπηρεσίες σε ελεγκτή υψηλότερου επιπέδου (Σχήμα 6-26). Η έννοια των ιεραρχικά επαναλαμβανόμενων επιπέδων εφαρμογών / ελεγκτών και τομέων εμπιστοσύνης επιτρέπει τη δημιουργία προγραμμάτων-εφαρμογών που μπορούν να συνδυάσουν μια σειρά εφαρμογών που συνθέτουν μια πιο ολοκληρωμένη υπηρεσία.

Η **οριζόντια αναδρομή** συμβαίνει όταν οι ελεγκτές ίσων επιπέδων αλληλεπιδρούν για να υλοποιήσουν υπηρεσίες που δεν θα μπορούσαν να εκπληρώσουν πλήρως οι ίδιοι και συνεπώς χρειάζονται συνεργασία από άλλους ομότιμους ελεγκτές (peers) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-25. Οι ομότιμοι ελεγκτές συνδέονται συνήθως μέσω συμφωνιών επιχειρηματικού επιπέδου και ανταλλάσσουν τις λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης όπως απαιτείται για τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν από κοινού.



**Σχήμα 6-25. Ομότιμοι ελεγκτές σε συμμετρικούς ρόλους αιτούντα - πάροχου υπηρεσιών (πηγή: ONF TR-521) [146]**

Λόγω των διαφορετικών επιπέδων αφαίρεσης που επιτρέπει η αρχή της αναδρομής, το επίπεδο ελέγχου στο SDN μπορεί να περιλαμβάνει πολλούς ιεραρχικά διευθετημένους ελεγκτές που επεκτείνουν τις σχέσεις client – server σε διάφορα επίπεδα (Σχήμα 6-26).



**Σχήμα 6-26. Σύνθετες σχέσεις client-server που ενεργοποιούνται από την επανάληψη - αναδρομή στο επίπεδο ελέγχου SDN (πηγή: J. Ordonez-Lucena et al., 2017)**

Σύμφωνα με αυτό το δεδομένο και λογική, είναι προφανές ότι το SDN μπορεί να υποστηρίξει μια αναδρομική (επαναληπτική) σύνθεση από slices [189]. Αυτό συνεπάγεται ότι οι πόροι (δηλ. Resource Group) όπου ένας συγκεκριμένος ελεγκτής αποδίδει σε έναν από τους clients με τη μορφή ενός αποκλειστικού slice (δηλ. client context) μπορούν με τη σειρά τους να εικονικοποιηθούν και ενορχηστρωθούν από τον εν λόγω client σε περίπτωση που είναι ελεγκτής SDN. Με αυτόν τον τρόπο, ο νέος ελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιήσει τους πόρους στους οποίους έχει πρόσβαση μέσω του server context, για να καθορίσει, να διαβαθμίσει και να παραδώσει νέους πόρους (και συνεπώς νέα slices) στους δικούς του clients, οι οποίοι μπορεί επίσης να είναι ελεγκτές SDN.

### 6.13.2 Ενσωμάτωση του SDN στην αρχιτεκτονική αναφοράς NFV

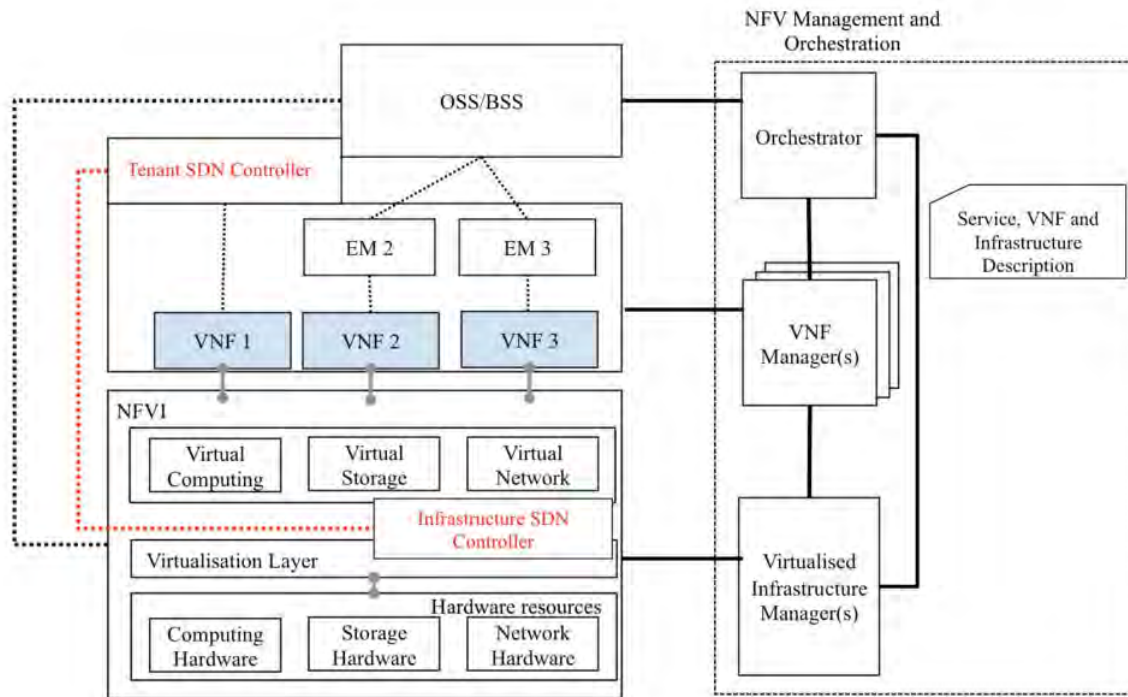
Παρόλο που η αρχιτεκτονική SDN που περιεγράφηκε παραπάνω, δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα των λειτουργιών του επιπέδου ελέγχου που επιτρέπει τον τεμαχισμό, δεν διαθέτει δυνατότητες ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση του κύκλου ζωής των slices του δικτύου και των συστατικών πόρων αυτών. Από αυτή την άποψη, η αρχιτεκτονική NFV [115] είναι ιδανική για να διαδραματίσει αυτόν τον ρόλο, καθώς διαχειρίζεται τους πόρους υποδομής και ενορχηστρώνει την κατανομή των απαραίτητων πόρων για την υλοποίηση των VNFs και των υπηρεσιών δικτύου. Για να επωφεληθούν από τις λειτουργίες διαχείρισης και ενορχήστρωσης από το NFV, απαιτείται η κατάλληλη συνεργασία μεταξύ του SDN και του NFV. Ωστόσο, η ενσωμάτωση των αρχιτεκτονικών SDN και NFV σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς δεν είναι εύκολο έργο [190] [191].

Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε συνοπτικά το προσωρινό πλαίσιο που παρουσιάζει το ETSI για την ενσωμάτωση του SDN στην αρχιτεκτονική αναφοράς NFV [191]. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει δύο ελεγκτές SDN, έναν λογικά τοποθετημένο στον ενοικιαστή και έναν άλλο στο επίπεδο του InP όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6-27.

Το αρχιτεκτονικό πλαίσιο NFV έχει περιγραφεί και αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όσον αφορά τον **NFV Orchestrator (NFVO)** σύμφωνα με το ETSI, έχει δύο ομάδες λειτουργιών που εκτελούνται από το **Resource Orchestrator (RO)** και ο **Network Service Orchestrator (NSO)** αντίστοιχα. Ο RO ενορχηστρώνει τους πόρους NFVI σε - πιθανώς διαφορετικά - VIMs. Ο NSO εκτελεί τη διαχείριση του κύκλου ζωής των υπηρεσιών δικτύου, χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχει ο RO και οι - δυνητικά διαφορετικοί - VNFMs. Επίσης στην αρχιτεκτονική NFV υπάρχει το Σύστημα διαχείρισης δικτύου (**Network Management System - NMS**). Αποτελεί το πλαίσιο που εκτελεί τις γενικές εργασίες διαχείρισης δικτύου. Το NMS αλληλεπιδρά με τις οντότητες MANO με ένα σαφή διαχωρισμό των ρόλων τους [192]. Το NMS περιλαμβάνει: το Element Management (EM) και το Operation/Business Support System (OSS/BSS).

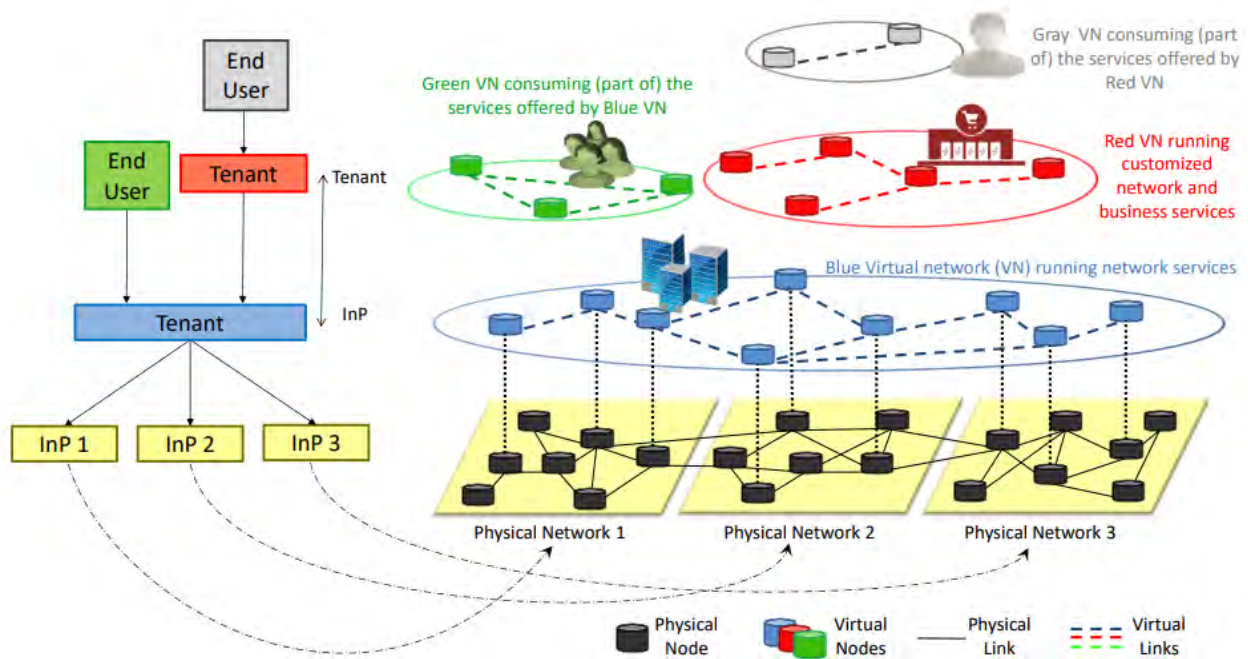
Η πρόταση ETSI περιλαμβάνει δύο ελεγκτές SDN στην αρχιτεκτονική. Κάθε ελεγκτής συγκεντρώνει τις λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου και παρέχει μια αφηρημένη εικόνα για όλα τα στοιχεία συνδεσιμότητας που διαχειρίζεται. Αυτοί οι ελεγκτές είναι:

- **Ελεγκτής SDN Υποδομής (Infrastructure SDN controller - IC):** δημιουργεί και διαχειρίζεται τους υποκείμενους πόρους δικτύωσης για την παροχή της απαιτούμενης συνδεσιμότητας για την επικοινωνία των VNFs (και των στοιχείων του [120]). Αυτός ο ελεγκτής διαχειρίζεται από τον VIM και μπορεί να αλλάξει τη συμπεριφορά της υποδομής κατ'απαίτηση σύμφωνα με τις προδιαγραφές του VIM, προσαρμοσμένες από τις αιτήσεις του ενοικιαστή (tenant).
- **Ελεγκτής SDN μισθωτή (Tenant SDN controller - TC):** αυτός ο δεύτερος ελεγκτής εμφανίζεται στον τομέα του ενοικιαστή [193] ως ένα από τα VNFs ή ως μέρος του NMS και διαχειρίζεται δυναμικά τα σχετικά VNFs που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των υπηρεσιών δικτύου του ενοικιαστή. Αυτά τα VNFs είναι οι βασικοί πόροι του επιπέδου προώθησης του TC. Η λειτουργία και η διαχείριση που εκτελεί ο TC ενεργοποιούνται από τις εφαρμογές που εκτελούνται επάνω από αυτόν, π.χ. το OSS.



**Σχήμα 6-27. Ενσωμάτωση των ελεγκτών SDN στο αρχιτεκτονικό πλαίσιο αναφοράς NFV στα δύο επίπεδα που απαιτούνται για την επίτευξη του τεμαχισμού (πηγή: ETSI GS NFV-EVE 005) [191].**

Και οι δύο ελεγκτές διαχειρίζονται και ελέγχουν τους υποκείμενους πόρους τους μέσω προγραμματιζόμενων διεπαφών προς το νότο, εφαρμόζοντας πρωτόκολλα όπως το OpenFlow, το NETCONF ή το I2RS [191]. Ωστόσο, κάθε ελεγκτής παρέχει ένα διαφορετικό επίπεδο αφαίρεσης. Ενώ ο **IC** παρέχει μια βάση (υπόστρωμα) για να υποστηρίξει την ανάπτυξη και τη συνδεσιμότητα των VNFs, ο **TC** παρέχει μια επικάλυψη που περιλαμβάνει τα VNFs του ενοικιαστή, που με σωστό τρόπο, ορίζει την υπηρεσία (ή υπηρεσίες) δικτύου που αυτός ο ενοικιαστής διαχειρίζεται ανεξάρτητα στο slice (ή slices). Αυτές οι διαφορετικές απόψεις που προσφέρει ο κάθε ελεγκτής μέσω των διεπαφών του, έχουν επιπτώσεις στον τρόπο λειτουργίας τους. Από τη μία πλευρά, ο IC δεν γνωρίζει τον αριθμό των slices που χρησιμοποιούν τα VNFs που συνδέει, ούτε τον μισθωτή που λειτουργεί αυτά τα slices. Από την άλλη πλευρά, για τον TC το δίκτυο αφαιρείται από την άποψη των VNFs, χωρίς να αντιλαμβάνεται για το πώς αυτά τα VNFs αναπτύσσονται φυσικά. Παρά τα διαφορετικά επίπεδα αφαίρεσης τους και οι δύο ελεγκτές πρέπει να συντονίζονται και να συγχρονίζουν τις ενέργειές τους [192]. Επίσης η έννοια της υπηρεσίας και του ενοικιαστή που αναφέρεται εδώ μπορεί να επεκταθεί σε υψηλότερα επίπεδα αφαίρεσης απλά εφαρμόζοντας την αρχή της αναδρομής (recursion). Η αναδρομή υποδηλώνει ότι ένας ενοικιαστής μπορεί να παρέχει υπηρεσίες δικτύου σε έναν τελικό χρήστη, αλλά και σε έναν άλλο μισθωτή (Σχήμα 6-28). Σε μια τέτοια περίπτωση, αυτός ο δεύτερος ενοικιαστής θα παρέχει πιο προχωρημένες υπηρεσίες δικτύου στους δικούς του χρήστες.



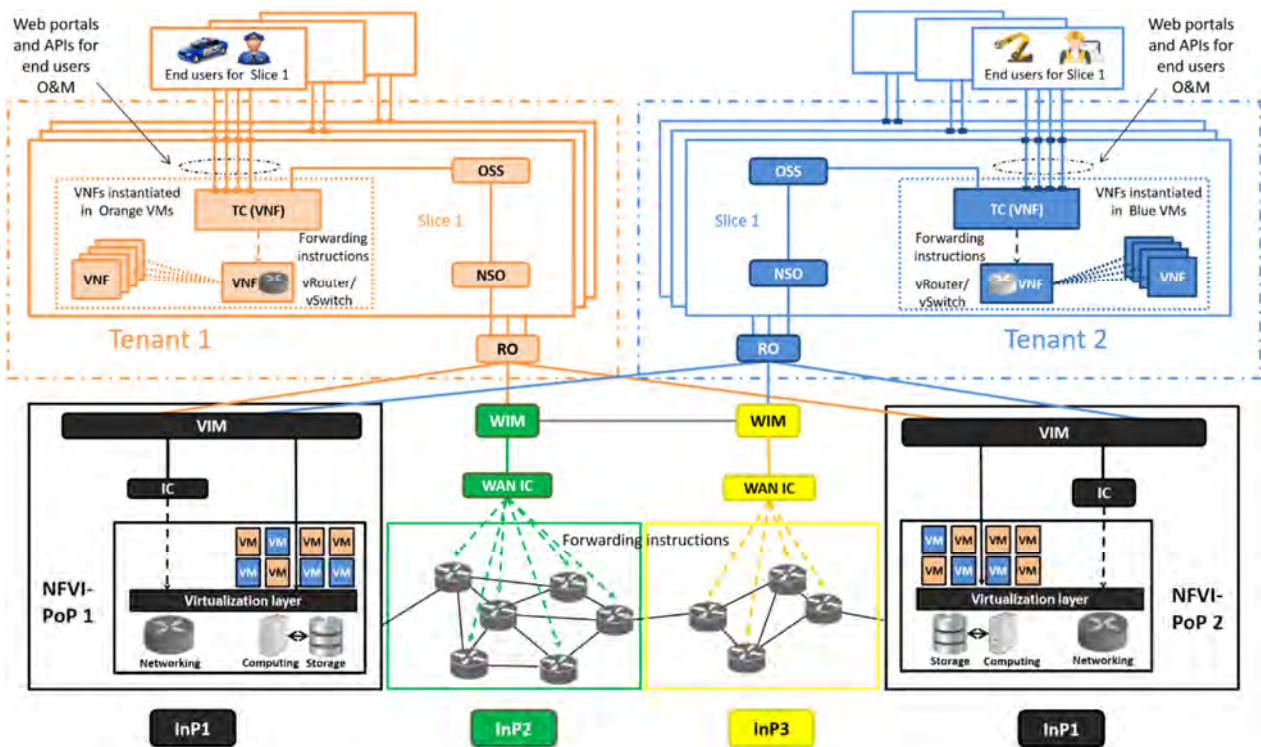
**Σχήμα 6-28. InPs και ενοικιαστές ως φορείς εικονικοποίησης. Αυτό το σενάριο δείχνει την αρχή της αναδρομής, όπου οι παράγοντες αυτοί παίρνουν μέρος σε ένα κατακόρυφο πολυεπίπεδο πρότυπο.**  
(πηγή: J. Ordonez-Lucena et al., 2017) [180]

### 6.13.3 Συνεργασία SDN-NFV για το Network Slicing

Σε αυτή την ενότητα, περιγράφουμε ένα παράδειγμα συνεργασίας SDN και NFV, το οποίο απεικονίζει την ιδέα του τεμαχισμού του δικτύου, με πολλά slices να τρέχουν σε ένα κοινό NFVI (Σχήμα 6-29) [180]. Αυτή η ανάπτυξη περιλαμβάνει δύο ενοικιαστές, καθένας από τους οποίους διαχειρίζεται ένα συγκεκριμένο σύνολο slices. Στο παράδειγμα, εξετάζουμε μόνο ένα επίπεδο αναδρομής και έτσι οι μισθωτές εξυπηρετούν άμεσα τους τελικούς χρήστες. Κάθε slice αποτελείται από VNFs που είναι κατάλληλα κατασκευασμένα για να υποστηρίξουν και να δημιουργήσουν την (-τις) υπηρεσία (-ες) δικτύου που παρέχει το slice (και επομένως ο ενοικιαστής) στους χρήστες του. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές φάσεις. Πρώτον, μια φάση της δημιουργίας του slice στην οποία ένας τελικός χρήστης ζητά ένα slice από έναν κατάλογο slice δικτύου και στη συνέχεια ο μισθωτής παράγει το slice αυτό. Στη συνέχεια, μια φάση χρόνου εκτέλεσης, όπου έχουν ήδη δημιουργηθεί και λειτουργούν οι διαφορετικές λειτουργικές ομάδες εντός κάθε slice. Για απλότητα, στο Σχήμα 6-29 παρουσιάζουμε μόνο τη φάση χρόνου εκτέλεσης.

Το παράδειγμα θεωρεί ότι οι ενοικιαστές έχουν πρόσβαση σε πόρους NFVI από τρεις InPs. Ο InP1 παρέχει υπολογιστικούς πόρους και πόρους δικτύωσης, οι οποίοι αναπτύσσονται σε δύο NFVI-Points of Presence (NFVI-PoPs) [194] με τη μορφή DCs. Ο InP2 και ο InP3 παρέχουν δίκτυα μεταφοράς WAN βασισμένα σε SDN, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία τέτοιων NFVI-PoPs. Τα VMs και το υποκείμενο υλικό τους, τα οποία παράγονται στα NFVI-PoPs είναι υπεύθυνα για τη φιλοξενία των VNFs (και των συστατικών τους, VNFCs) και διαχειρίζονται άμεσα από τα VIMs.

Οι πόροι δικτύωσης, οι οποίοι υποστηρίζουν τη διασύνδεση των VMs (και επομένως των VNFs) στο επίπεδο της υποδομής, διαχειρίζονται προγραμματιστικά από τους ICs και βρίσκονται στο χώρο των VIMs και WIMs (WAN Infrastructure Manager). Οι VIMs και οι WIMs λειτουργούν ως εφαρμογές SDN, αναθέτοντας τα καθήκοντα που σχετίζονται με τη διαχείριση των πόρων δικτύωσης στους υποκείμενους ICs τους. Παρόλο που σε αυτό το παράδειγμα οι ICs αναπτύσσονται στο NFVI, θα ήταν δυνατή η ενσωμάτωσή τους στους αντίστοιχους VIMs που τους διαχειρίζονται [192].



IC: Infrastructure SDN controller  
TC: Tenant SDN Controller

**Σχήμα 6-29.** Υλοποίηση του Network slicing σε ένα κοινό πλαίσιο, ενσωματώνοντας τόσο το SDN όσο και το NFV (πηγή: J. Ordonez-Lucena et al., 2017) [180].

Στην κορυφή των InPs, οι ενοικιαστές διαχειρίζονται ανεξάρτητα ένα σύνολο από network slices. Κάθε slice περιλαμβάνει ένα OSS (Operation/Business Support System), ένα TC (tenant controller) και ένα NSO (Network Service Orchestrator). Το OSS αποτελεί μια εφαρμογή SDN από την οπτική γωνία του TC, το οποίο δίνει εντολές στον ελεγκτή να διαχειρίζεται τα συστατικά VNFs του slice και να τα συνθέτει λογικά για την αποτελεσματική υλοποίηση της υπηρεσίας δικτύου που προσφέρει το slice. Ο κύκλος ζωής μιας τέτοιας υπηρεσίας δικτύου διαχειρίζεται από το NSO, ο οποίος αλληλεπιδρά με τον TC μέσω του OSS. Ο TC που αναπτύσσεται ως VNF, βασίζεται στις δυνατότητες που παρέχονται από τους εικονικούς μεταγωγείς / δρομολογητές (switches/routers με τη μορφή VNFs) για να ενεργοποιήσει τη σύνθεση των VNFs, προωθώντας τις σχετικές οδηγίες σε τέτοιους εικονικούς μεταγωγείς / δρομολογητές μέσω των διασυνδέσεων του προς νότο. [120]

Μέσω των διεπαφών του στο βορρά, ο TC παρέχει έναν μέσο για την ασφαλή έκθεση των επιλεγμένων δυνατοτήτων υπηρεσιών δικτύου στους τελικούς χρήστες. Αυτές οι διεπαφές, επιτρέπουν στους τελικούς χρήστες να ανακτούν πληροφορίες περιβάλλοντος (π.χ. πληροφορίες απόδοσης και σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο, πολιτικές χρηστών κ.λπ.), να λειτουργούν, να διαχειρίζονται και να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες δικτύου του slice, πάντα εντός των ορίων που θέτει ο ενοικιαστής. Το γεγονός ότι κάθε slice παρέχεται με τα δικά του ξεχωριστά NSO, OSS και TC, επιτρέπει την απαιτούμενη απομόνωση (isolation).

Κάθε ενοικιαστής πρέπει να ενορχηστρώσει αποτελεσματικά τους πόρους που του έχουν ανατεθεί για να ικανοποιήσει ταυτόχρονα τις διαφοροποιημένες απαιτήσεις των slices που βρίσκονται υπό τη διαχείριση του. Ο RO (Resource Orchestrator) είναι το λειτουργικό τμήμα που εκτελεί μια τέτοια λειτουργία για λογαριασμό του ενοικιαστή, παρέχοντας σε κάθε slice τους απαιτούμενους πόρους μέσω των διεπαφών με το NSO που έχει το κάθε slice ξεχωριστά. Ο RO πρέπει να πραγματοποιεί την κατανομή των πόρων μεταξύ των slices, εκπληρώνοντας παράλληλα τις απαιτούμενες αποδόσεις τους, ακολουθώντας ένα επαρκές και αποτελεσματικό πλαίσιο διαχείρισης πόρων το οποίο πρέπει να συμμορφώνεται τόσο με τις πολιτικές που αφορούν τους

μισθωτές όσο και με τις πολιτικές που αφορούν τα συγκεκριμένα slices. Τέτοιο πλαίσιο είναι απαραίτητο ώστε ο RO να επιτρέπει την αποδοτική απομόνωση μεταξύ των slices.

Όλοι οι πόροι NFVI που είναι διαθέσιμοι για χρήση από έναν μισθωτή (δηλ. εκείνους που ενορχηστρώνονται από τον RO) παρέχονται από τα διάφορα InPs. Κάθε InP μισθώνει μέρος των εικονικών πόρων σύμφωνα με μια συμφωνία μίσθωσης επιχειρήσεων που τόσο ο InP όσο και ο μισθωτής έχει προηγουμένως υπογράψει. Για να αποκτήσει πρόσβαση, να διατηρήσει και να ζητήσει τέτοιους πόρους, ο RO του ενοικιαστή αλληλεπιδρά με τα VIM(s) / WIM(s) μέσω των διεπαφών που τα λειτουργικά αυτά μέρη εκθέτουν και ο RO του ενοικιαστή καταναλώνει. Πράγματι, υποθέτουμε ότι τα VIMs και τα WIMs υποστηρίζουν την πολλαπλή μίσθωση (multi-tenancy). Υποθέτουμε επίσης ότι τα WIMs μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους σύμφωνα με προκαθορισμένες επιχειρηματικές συμφωνίες. Από την άποψη αυτή, η αλληλεπίδραση μεταξύ WIM και RO μπορεί να επιτευχθεί έμμεσα και μέσω άλλου WIM.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-29, η διαχείριση των πόρων πρέπει να πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα: στο επίπεδο της υποδομής, όπου ένας VIM / WIM παρέχει στους ενοικιαστές που έχει συμφωνηθεί, πόρους υποδομής και σε επίπεδο ενοικιαστή όπου ο RO παρέχει και αναθέτει πόρους στα αντίστοιχα slices. Τόσο ο VIM / WIM όσο και ο RO πρέπει να συλλέγουν ακριβείς πληροφορίες για τη χρήση των πόρων (καθένας στον τομέα του) και ο καθένας με τη σειρά του να προβλέπουν τη διαθεσιμότητα πόρων σε πολύ τακτά χρονικά διαστήματα για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των ενοικιαστών και των slices, αντίστοιχα.

Πρέπει να ληφθεί υπόψη, με εξαίρεση τους πόρους υλικού, ότι τα λειτουργικά τμήματα (π.χ. VIM, RO, NSO, ελεγκτές SDN κ.λπ.) σχεδιάζονται ως ανεξάρτητα στοιχεία λογισμικού. Η ανάγκη για ξεχωριστή πρόσβαση, διαμόρφωση και διαχείριση προτάσσει αυτή τη μοντελοποίηση, όπου οι σχέσεις λογισμικού υλοποιούνται με τη βοήθεια των APIs που παρέχει κάθε στοιχείο.

Για να διατηρηθεί η απομόνωση της ασφάλειας και ιδιωτικότητας μεταξύ των slices, κάθε λειτουργικό τμήμα και διαχειρίσιμος πόρος (π.χ. VNF) μέσα σε ένα δεδομένο slice πρέπει να έχει τους δικούς του μηχανισμούς ασφαλείας, διασφαλίζοντας τη λειτουργία εντός των αναμενόμενων παραμέτρων και εμποδίζοντας την πρόσβαση σε μη εξουσιοδοτημένες οντότητες. Αυτοί οι μηχανισμοί έχουν σκοπό να εγγυηθούν ότι τα σφάλματα ή οι προσβολές που εμφανίστηκαν σε ένα slice να περιορίζονται σε αυτό και μόνο, εμποδίζοντας τη διάδοσή τους κατά μήκος των ορίων του.

Τέλος, παρόλο που η αναδρομή - επανάληψη (recursion) δεν έχει αντιμετωπιστεί σε αυτό το παράδειγμα, είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε αυτό το σενάριο απλά υποθέτοντας ότι ορισμένοι από τους χρήστες του slice είναι ενοικιαστές οι οποίοι με τη σειρά τους μπορούν να αναπτύξουν και να λειτουργήσουν τα δικά τους slices.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το 5G αντιπροσωπεύει μια πλήρη επανάσταση των δικτύων κινητής επικοινωνίας για την κάλυψη των υπερβολικά αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών, των υπηρεσιών και των εφαρμογών. Αναμένεται ότι θα είναι η κορυφαία τεχνολογία κινητών επικοινωνιών μετά το 2020 για να ανταποκριθεί στην απαίτηση για πληροφορία της ανθρώπινης κοινωνίας μέσω της διασύνδεσης του ασύρματου κόσμου χωρίς εμπόδια. Ο αυξανόμενος αριθμός έξυπνων συσκευών που παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας δεδομένων, η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών και η διατήρηση παράλληλα μεγάλου εύρους ζώνης και ανεπαίσθητης καθυστέρησης θα αποτελούν μερικά από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά των μελλοντικών δικτύων. Αυτές οι απαιτήσεις δεν μπορούν να καλυφθούν από τις τρέχουσες υποδομές δικτύων λόγω τόσο του μονολιθικού σχεδιασμού όσο και του υψηλού κόστους επέκτασης των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας αρχικά περιγράφηκαν οι απαιτήσεις των δικτύων 5G όπως η μεγαλύτερη χωρητικότητα, ο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων, η μείωση της ελάχιστης καθυστέρησης, η μαζική συνδεσιμότητα των συσκευών, η μείωση του κεφαλαιακού κόστους και των λειτουργικών δαπανών. Τα σημερινά συμβατικά κυψελοειδή συστήματα παρουσιάζουν αρκετούς περιορισμούς για την κάλυψη όλων των παραπάνω απαιτήσεων. Χρειάζεται μια ριζική νέα προσέγγιση στον τρόπο που θα οικοδομηθούν τα δίκτυα της επόμενης γενιάς 5G. Για αυτό το λόγο το 5G βρίσκεται στο επίκεντρο τόσο της ακαδημαϊκής κοινότητας όσο και της βιομηχανίας της πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών. Τα δίκτυα 5G θα αποτελούνται από ένα κράμα τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών που θα αλληλοσυμπληρώνονται κατά περίπτωση με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων που έχουν τεθεί.

Μία από τις βασικές ιδέες για το σχεδιασμό της κυψελοειδούς αρχιτεκτονικής 5G είναι να διαχωριστούν τα σενάρια εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Αυτό θα ενισχυθεί από το σύστημα κατανομημένης κεραίας (DAS) και την τεχνολογία massive MIMO, όπου αναπτύσσονται γεωγραφικά κατανομημένες συστοιχίες κεραιών με δεκάδες ή εκατοντάδες στοιχεία κεραίας. Τα υπαίθρια BSs θα είναι εξοπλισμένα με μεγάλες συστοιχίες κεραίας που διανέμονται γύρω από την κυψέλη και συνδέονται με το BS μέσω οπτικών ινών, επωφελούμενα τόσο από τα συστήματα DAS όσο και από την τεχνολογία massive MIMO. Στο εσωτερικό των κτιρίων θα υπάρχουν ασύρματα σημεία πρόσβασης (APs) που θα συνδέονται ενσύρματα με τις εξωτερικές κεραιές του κτιρίου. Αυτό ασφαλώς θα αυξήσει βραχυπρόθεσμα το κόστος των υποδομών αλλά παράλληλα θα βελτιώσει σημαντικά τη μέση απόδοση των κυψελών, τη φασματική απόδοση, την ενεργειακή απόδοση και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του κυψελωτού συστήματος μακροπρόθεσμα. Χρησιμοποιώντας μια τέτοια κυψελοειδή αρχιτεκτονική, οι χρήστες θα επικοινωνούν μόνο με το ασύρματο δίκτυο στο εσωτερικό και οι μεγαλύτερες κεραιές θα βρίσκονται εκτός του κτιρίου. Επίσης για την επικοινωνία στο εσωτερικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν υφιστάμενες τεχνολογίες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, όπως Wi-Fi, femtocells, mm-Wave, ασύρματη επικοινωνία μέσω του ορατού φωτός (VLC). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες mmWave και VLC χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες που δεν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για κυψελοειδείς επικοινωνίες. Αυτά τα κύματα υψηλής συχνότητας δεν διαπερνούν πολύ καλά στα στερεά υλικά και μπορούν εύκολα να απορροφηθούν ή να διασκορπιστούν από τον αέρα ή και τη βροχή. Επομένως, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν αυτά τα κύματα για εφαρμογές σε υπαίθριες και μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, με τα διαθέσιμα μεγάλα εύρη ζώνης, οι τεχνολογίες mmwave και VLC μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για εσωτερικά σενάρια. Για την επίλυση του προβλήματος της έλλειψης φάσματος, εκτός από την εύρεση νέου φάσματος που δεν χρησιμοποιείται παραδοσιακά για ασύρματες υπηρεσίες μπορούμε επίσης να προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε τη χρήση του ραδιοφάσματος με τη χρήση των γνωσιακών δικτύων επικοινωνίας (Cognitive Radio Networks). Επίσης πρωταγωνιστικό ρόλο θα παίξει και η επικοινωνίες D2D με πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν κυρίως στο επίπεδο της



ιδιωτικότητας. Από μια άλλη οπτική, το Opportunistic networking φαίνεται να αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση στο πρόβλημα της επέκτασης της κάλυψης της υποδομής, προκειμένου να παρέχεται εξυπηρέτηση σε κόμβους που κανονικά δεν θα καλύπτονται από την υποδομή ή να παρέχουν αποσυμφόρηση της υπάρχουσας υποδομής επεκτείνοντας την χωρητικότητά της. Τα Orpnetts δημιουργούνται, διαχειρίζονται και τερματίζονται με δυναμικό τρόπο. Αποτελεί μια τεχνολογία που καλύπτει τις ανάγκες των αναπτυσσόμενων περιοχών του πλανήτη για επικοινωνία εκπληρώνοντας την πρόκληση των δικτύων 5ης γενιάς για κάλυψη παντού.

Γενικά η αρχιτεκτονική ενός κυψελωτού συστήματος 5G είναι ετερογενής, καθώς περιλαμβάνει κυψέλες διαφορετικού μεγέθους όπως macrocells, microcells, small cells και αναμεταδότες (relays). Με στόχο μια πιο επίπεδη και πιο ευέλικτη αρχιτεκτονική, διάφορα σχέδια για τα μελλοντικά δίκτυα 5G έχουν αναπτυχθεί και προταθεί. Η βάση για τέτοια σχέδια παρέχεται από τεχνολογίες αιχμής, όπως πύκνωση δικτύου (Ultra Dense Networks), SDN, NFV, cloud computing, έξυπνη διαχείριση με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και αρχιτεκτονικές με σκοπό την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα Ultra Dense Networks (UDNs), αντιμετωπίζουν την υψηλή κίνηση στη μετάδοση δεδομένων μέσω της πύκνωσης της υποδομής. Ο στόχος είναι να αυξηθεί η χωρητικότητα, να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα και να υπάρξει καλύτερη εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος. Έτσι, από τα βελτίωση της χωρητικότητας, προσδοκούμε ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα αποτελούνται από διαφορετικές μικρές κυψέλες με διαφορετικούς τύπους από small cell BSs. Αυτοί οι διαφορετικοί τύποι των small cell BSs θα στοχεύουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και κίνηση.

Οι κινητές συσκευές είναι πανταχού παρούσες στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων, με αξιοσημείωτη αύξηση της κίνησης δεδομένων. Καθώς οι εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας γίνονται όλο και πιο “πεινασμένες” για πόρους, το χάσμα μεταξύ των απαιτούμενων πόρων και εκείνων που διατίθενται σε κινητές συσκευές διευρύνεται. Επίσης η καθυστέρηση αποτελεί μια από τις βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουν τα δίκτυα 5ης γενιάς. Για να γεφυρωθεί αυτό το κενό και να αντιμετωπιστεί το latency, το cloud computing μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επέκταση των πόρων των φορητών συσκευών. Πίσω από την έννοια της “επέκτασης” κρύβεται το Edge Computing, που σκοπό έχει οι υπηρεσίες cloud να μετακινούνται πιο κοντά στον εξοπλισμό των χρηστών (UEs), δηλ. στην άκρη του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (edge network). Με βάση αυτή την προτεραιότητα της ελαχιστοποίησης της καθυστέρησης κινείται τόσο ο ακαδημαϊκός όσο και ο χώρος της βιομηχανίας όπου μελετώνται τεχνολογίες οι οποίες θα ωθήσουν το CC πιο κοντά στην άκρη του δικτύου ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του τελικού χρήστη για χαμηλή καθυστέρηση. Τέτοιες τεχνολογίες είναι το Fog Computing, το Mobile Edge Computing και τα Cloudlets.

Το C-RAN είναι μια πρωτοποριακή αρχιτεκτονική δικτύου ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται στην τάση των σημερινών συνθηκών δικτύου και της τεχνολογικής προόδου. Ως ένα είδος καθαρού συστήματος, βασίζεται στην κεντρική επεξεργασία, στην ασύρματη συνεργασία και στην cloud υποδομή σε πραγματικό χρόνο. Η ουσία είναι να μειώσει τον αριθμό των σταθμών βάσης ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, να υιοθετήσει την τεχνολογία της εικονικοποίησης για να πραγματοποιήσει την ανταλλαγή πόρων και τον δυναμικό προγραμματισμό τους, να βελτιώσει την απόδοση του ραδιοφάσματος και να επιτύχει χαμηλό κόστος, υψηλό εύρος ζώνης και ευέλικτη λειτουργία. Ο γενικός στόχος του C-RAN είναι να αντιμετωπίσει μια σειρά προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι φορείς των mobile networks όπως η κατανάλωση ενέργειας, το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης, επιδιώκοντας βιώσιμη επιχειρηματικότητα και αύξηση κέρδους στο μέλλον, προσπαθώντας να υποστηρίξει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των τελικών χρηστών προς την 5η γενιά κινητών δικτύων.

Τα δίκτυα πρέπει επίσης να γίνουν πιο “έξυπνα”. Η προσθήκη τεχνητής νοημοσύνης σε μια προγραμματιζόμενη υποδομή δικτύου θα μας επιτρέψει να μετατρέψουμε μεγάλους όγκους δεδομένων σε πολύτιμες γνώσεις δίνοντας ώθηση σε νέες εφαρμογές και υπηρεσίες. Οι πάροχοι

υπηρεσιών επικοινωνίας μπορούν να ενισχύσουν τα δίκτυά τους και να αναπτύξουν ευελιξία και νοημοσύνη εφαρμόζοντας μηχανική μάθηση, η οποία μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων μπορεί να βοηθήσει να εντοπιστούν τάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν προληπτικά, προστατευτικά ή επαναλαμβανόμενα. Ένα παράδειγμα περισσότερης νοημοσύνης στην άκρη του δικτύου σήμερα είναι η χρήση της μηχανικής μάθησης για να καθορίσει τον καλύτερο τρόπο μεγιστοποίησης της ισχύος του σήματος από τους ασύρματους σταθμούς βάσης στις συνδεδεμένες συσκευές. Με τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την τοπογραφία και τα πρότυπα κυκλοφορίας, οι πάροχοι υπηρεσιών επικοινωνίας μαθαίνουν πώς να τοποθετούν τις έξυπνες κεραίες τους σε διάφορες ώρες της ημέρας για την επίτευξη ισχυρότερων συνδέσεων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ένα καλά συντονισμένο δίκτυο που χρησιμοποιεί μόνο τους βέλτιστους πόρους και την απαιτούμενη χωρητικότητα για κάθε χρήστη και την κάθε περίπτωση χρήσης.

Οι δύο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που ευελπιστούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην οικοδόμηση των δικτύων 5G είναι το SDN σε συνδυασμό με το NFV. Η αρχιτεκτονική SDN επιτρέπει την ευέλικτη υποστήριξη σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης και σεναρίων σε μια κοινή υποδομή, προσαρμόζοντας και βελτιστοποιώντας τις υπηρεσίες ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις τους. Μέσω της εικονικοποίησης και ενορχήστρωσης των υποκείμενων πόρων που θα χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες, το SDN επιτρέπει τον δυναμικό έλεγχο των πόρων. Το SDN επικεντρώνεται κυρίως στη χρήση των πόρων για την παροχή υπηρεσιών ενώ το NFV επικεντρώνεται κυρίως στη δημιουργία και την υποστήριξη των πόρων σε όλο τον κύκλο ζωής τους, οι οποίοι μπορούν να αποσυνδεθούν σε μεγάλο βαθμό από την υλοποίηση υλικού. Το SDN προσφέρει επιπλέον ευελιξία στο δίκτυο, προγραμματισσιμότητα και κεντρική διαχείριση. Στόχος του είναι τα δίκτυα μέσω κεντροποιημένων ελεγκτών, που διαθέτουν τεχνητή νοημοσύνη και είναι βασισμένοι σε λογισμικό, να επεξεργάζονται τα στοιχεία κίνησης του δικτύου και ανάλογα με τις ανάγκες του να κατευθύνουν και να ανακατέμουν τον όγκο κίνησης. Τα SDN μέσω του κεντροποιημένου και αυτοματοποιημένου ελέγχου φαίνεται να ανταποκρίνεται σε αρκετές από τις προκλήσεις των σύγχρονων δικτύων, διασφαλίζοντας βελτιωμένη αξιοποίηση των δικτυακών πόρων, μειώνοντας τόσο τις κεφαλαιουχικές δαπάνες όσο και τις λειτουργικές, και αυξάνοντας την ποιότητα της εξυπηρέτησης, τόσο σε ενσύρματα όσο και ασύρματα δίκτυα. Από την άλλη πλευρά το NFV μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στο δίκτυο εικονικοποιώντας λειτουργίες που μέχρι πρότινος επιτελούνταν από υλικές οντότητες, γεγονός που σημαίνει ευκολία μετατροπών και αναβάθμισης, λιγότερα έξοδα υποδομής και ενεργειακής κατανάλωσης. Επιπλέον, διαχωρίζοντας τις λειτουργίες του δικτύου από τις υποκείμενες συσκευές υλικού, το NFV επιτρέπει μια λειτουργία δικτύου να εφαρμοστεί σε λογισμικό είτε τοπικά είτε σε απομακρυσμένους διακομιστές και data centers. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να βελτιώσει την δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου, πράγμα που επιτρέπει τη βέλτιστη οργάνωση και την εύκολη διαχείριση και έλεγχο ολόκληρου του δικτύου. Το σημαντικότερο όφελος που επιφέρει το NFV είναι η ευελιξία να εκτελούνται και να βελτιώνονται οι λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου έγκαιρα και ανεξάρτητα από την υποκείμενη φυσική υποδομή του δικτύου.

Παρόλο που το NFV και το SDN δεν είναι αλληλοεξαρτώμενα, μπορούν συνδυαστικά και συμπληρωματικά να αποφέρουν τεράστια οφέλη στα δίκτυα 5G. Μια αναδυόμενη τάση που επιδιώκει να μετασχηματίσει τα δίκτυα χρησιμοποιώντας λύσεις βασισμένες σε λογισμικό, μπορεί να αποτελέσει έναν πιθανό παράγοντα για την επίτευξη του στόχου της ανάπτυξης καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών. Μέσω του συνδυασμού SDN & NFV παρέχεται η προγραμματισσιμότητα και η ευελιξία που απαιτούνται για τη δημιουργία πολλαπλών λογικών (εικονικών) δικτύων, στην κορυφή ενός κοινού δικτύου. Αυτά τα λογικά δίκτυα αναφέρονται ως φέτες δικτύου (network slices) και τα οποία θα αποτελούν αυτοδύναμα δίκτυα, αρκετά ευέλικτα ώστε να χωρέσουν ταυτόχρονα διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης από επιχειρήσεις και από πολλαπλούς παίκτες σε μια κοινή υποδομή δικτύου. Αυτό το νέο κύμα καινοτομίας και εφαρμογών έχει σκοπό να δημιουργήσει νέες επιχειρηματικές ιδέες και κοινωνική αξία. Η μεγαλύτερη αλλαγή σε στρατηγικό και οικονομικό επίπεδο θα επέλθει από την είσοδο πολλών νέων και ως επί το

πλείστον μικρών εταιριών στους κλάδους που θα υιοθετήσουν το συνδυασμό και την ενσωμάτωση των SDN & NFV. Επιπλέον, μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες για την κάλυψη εφαρμογών με διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις. Αυτή η προσπάθεια μπορεί επίσης να επιταχυνθεί για να μειώσει το κόστος με την αξιοποίηση ανοιχτών προτύπων και την κοινότητα ανοιχτού κώδικα μέσω διαφόρων πρωτοβουλιών. Με τη βελτιστοποίηση των φετών δικτύου για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, οι επιχειρήσεις μπορούν να προσφέρουν μοναδικές και εξατομικευμένες υπηρεσίες με βάση την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS), τη συμφόρηση του δικτύου, τις προτιμήσεις των χρηστών και τις απαιτήσεις ασφαλείας.

Η μετάβαση σε προγραμματιζόμενα δίκτυα που βασίζονται στην εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) και στη δικτύωση καθοριζόμενη από λογισμικό (SDN) θα οδηγήσει σε ένα πολύ πιο δυναμικό περιβάλλον, όπου εφαρμογές και υπηρεσίες θα μπορούν να ενεργοποιούνται, να κλιμακώνονται και να μετακινούνται με τρόπο άμεσο και αυτοματοποιημένο. Η αυξημένη χρήση των στοιχείων ανάλυσης δικτύου (analytics), θα επιτρέψει στους παρόχους την δυναμική και με ακρίβεια βελτιστοποίηση του δικτύου τους, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις, στους παρόχους περιεχομένου και στους τελικούς χρήστες να ζητούν και να λαμβάνουν άμεσα εξειδικευμένες υπηρεσίες δικτύου.

Το 5G θέλει να είναι η γενιά που φέρνει την επανάσταση, η γενιά που δεν καλύπτει μόνο τις ανάγκες των φορέων εκμετάλλευσης και των χρηστών για υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών, αλλά ανοίγει νέες προοπτικές και επιτρέπει μια εξαιρετικά ευρεία ποικιλία εφαρμογών και χρήσης, ενοποιημένη μέσα σε μια ενιαία τεχνολογία. Το 5G καθιερώνεται ως ένας παράγοντας που επιτρέπει την ψηφιοποίηση της κοινωνίας και της οικονομίας.

## Βιβλιογραφία

- [1] N. Panwar, S. Sharma, A.K. Singh., A Survey on 5G: The Next Generation of Mobile Communication. Special Issue on Radio Access Network Architectures and Resource Management for 5G, Elsevier Physical Communication, November 6, 2015.
- [2] Cisco, The Zettabyte Era: Trends and Analysis, June 2017.
- [3] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021, February 7, 2017.
- [4] NGMN Alliance, NGMN 5G White Paper, February 17, 2015.
- [5] Samsung White Paper. 5G Vision, August 2015.
- [6] 5GPPP. 5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services., February 2015.
- [7] <https://www.eurescom.eu/news-and-events/eurescommessage/eurescom-message-1-2015/launch-of-eur35bn-european-programme-on-5g.html>
- [8] Huawei White Paper. 5G: A Technology Vision, 2013.
- [9] R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi, D. Soldani, SDN-based 5G mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility. Enabling 5G: energy and spectrally efficient communication systems. Volume 26, Issue 1, pages 82–92, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies Special Issue, January 2015.
- [10] D. Trossen, D. Soldani, NetWorld 2020 ETP, What is 5G (Really) About? White Paper, 2014.
- [11] N. M. Mosharaf, Kabir Chowdhury, Raouf Boutaba, Network Virtualization: State of the art and research challenges. IEEE Communications Magazine, August 2009.
- [12] Hugo Tullberg, Petar Popovski, Zexian Li, Mikko A. Uusitalo, Andreas Höglund, Ömer Bulakci, Mikael Fallgren, Jose F. Monserrat, The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements, IEEE Communications Magazine. 54(12):132-139, December 2016.
- [13] Ericsson White paper, 5G radio access CAPABILITIES AND TECHNOLOGIES, April 2016.
- [14] METIS, Deliverable 1.5 Version 1, ICT-317669 , “Updated scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system with recommendations for future investigations”, April 2015.
- [15] ITU-R Working Party WP 5D: Draft New Recommendation, “IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”, June 2015.
- [16] Salah Eddine Elayoubi, Mikael Fallgren, Panagiotis Spapis, Gerd Zimmermann, David Martín-Sacristán, Changqing Yang, Sébastien Jeux, Patrick Agyapong, Luis Campoy, Yinan Qi, Shubhranshu Singh, 5G Service Requirements and Operational Use Cases: Analysis and METIS II Vision, 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), 27-30 June 2016.
- [17] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, A. Gatherer, Femtocell Networks: A Survey, Sept. 2008.
- [18] Rusek F., «Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays» IEEE Sig. Proc. Mag, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.
- [19] Bleicher A., Millimeter Waves May Be the Future of 5G Phones, Aug. 2013.
- [20] H. Haas, “Wireless Data from Every Light Bulb,” TED.
- [21] Hong X., «Secondary Spectrum Access Networks: Recent Developments on the Spatial Models,» IEEE Vehic. Tech. Mag., vol. 4, no. 2, pp. 36–43, June 2009.
- [22] A. Gupta and R.K., «A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies» IEEE Access 3, 2015.
- [23] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Wan Choi, Stephen Hanly, Angel Lozano, Anthony C.K. Soong, Jianzhong Charlie Zhang, What Will 5G Be?, IEEE special issue on 5g wireless communication systems, May 2014.
- [24] Cheng-Xiang Wang, Heriot-Watt, Fourat Haider, Heriot-Watt, Xiqi Gao, Xiao-Hu You, Yang Yang, Dongfeng Yuan, Hadi M. Aggoune,, «Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks» IEEE Communications Magazine, Feb 2014.
- [25] Yong Niu, Yong Li, Depeng Jin, Li Su, Athanasios V. Vasilakos, «A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges» Feb. 2015.
- [26] Brajlata Chauhan, Sandip Vijay, S.C. Gupta, Millimeter-Wave Mobile Communications Microstrip Antenna for 5G - A Future Antenna, International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 99– No.19, August 2014.

- [27] Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, Halim Yanikomeroglu, «Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions, IEEE Communications Magazine, Volume:52, Issue: 5» May 2014.
- [28] Lei L, «Operator Controlled Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Networks» IEEE Wireless Communications, vol. 19, no. 3,, June 2012.
- [29] G. Fodor, «Design Aspects of Network Assisted Device-to-Device Communications» IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 3, Mar. 2012.
- [30] Arslan Tevfik Yucek, Huseyin, «A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications,» IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 11, NO. 1, FIRST QUARTER 2009.
- [31] Federal Communications Commission, «Notice of proposed rule making and order: Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies» ET Docket No. 03-108, Feb. 2005.
- [32] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, «A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks,» Georgia Institute of Technology, 2008.
- [33] The DAS forum, «DISTRIBUTED ANTENNA SYSTEMS (DAS) AND SMALL CELL TECHNOLOGIES DISTINGUISHED» February 4, 2013.
- [34] Liu Z., «Techno-economical Analysis of Indoor Enterprise Solutions,» PhD thesis, Aalborg University, December 2013.
- [35] Z. Liu, T. Kolding, P. Mogensen, B. Vejgaard, and T. Sorensen, «Economical comparison of enterprise in-building wireless solutions using DAS and femto» Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE, pages 1–5, Sept 2012.
- [36] Omer HALILOGLU, «Energy Efficient Radio Resource Management in a Coordinated Multi-Cell Distributed Antenna System,» 5 September 2014.
- [37] <http://www.att.com/gen/press-room?pid=23351>
- [38] Qualcomm Presentation, 1000x: More small cells, Taking HetNets to the Next Level, June 2012.
- [39] Jeffrey G. Andrews, Holger Claussen, Mischa Dohler, Sundeep Rangan, Mark C. Reed, Femtocells: Past, Present, and Future, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 30, NO. 3, APRIL 2012.
- [40] <https://sites.google.com/site/eeg473femtocellproject/femtocell-concept>
- [41] Chandrasekhar, W., Andrews, «Femtocell Networks: A Survey,» IEEE Communications Magazine, September 2008.
- [42] Small Cell Forum, HeNB (LTE Femto), Network Architecture, Release 1, Document 025.01.01, May 2011.
- [43] Tuan Nguyen, Mostafa Zaman Chowdhury, Yeong Min Jang, «A novel link switching scheme using pre-scanning and RSS prediction in visible light communication networks,» EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013.
- [44] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, «Indoor optical wireless communication: Potential and state-of-the-art,» IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 9, Sep 2011.
- [45] Rajbhandari Z. Ghassemlooy W. Popoola S., «Optical Wireless Communications,» 2012.
- [46] P. Demestichas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, Y. Kritikou, A. Georgakopoulos, «Technical Challenges for Merging Opportunistic Networks with Respective Cognitive Management Systems in the Future Internet».
- [47] P. Demestichas, D. Boscovic, V. Stavroulaki, A. Lee, J. Strassner, «m@ANGEL: Autonomic Management Platform for Seamless Cognitive Connectivity to the Mobile Internet,» IEEE Communications Magazine. , Vol. 44, No. 6, pp. 118-127, June 2006.
- [48] L. Lilien, Z. H. Kamal, V. Bhuse, A. Gupta, «Opportunistic Networks: The Concept and Research Challenges in Privacy and Security,» Department of Computer Science, Western Michigan University, Kalamazoo, USA, 2006.
- [49] L. Lilien, Z. H. Kamal, A. Gupta, «Opportunistic Networks: Challenges in Specializing the P2P Paradigm,» 17th International Conference on Database and Expert System Applications (DEXA), Krakow, 16 October 2006.
- [50] L. Pelusi, A. Passarella, M. Conti, «Opportunistic Networking: Data Forwarding in Disconnected Mobile Ad hoc Networks,» IEEE Communications Magazine, Vol. 44, No. 11, pp. 134-141, 20 November 2006.
- [51] P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess, A. Benjebbour, Design considerations for a 5G network architecture, IEEE Communications Magazine , Vol. 52 No. 11, pp. 65–75, 2014.

- [52] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, R. Gilmore, D. Brenner, A. Damnjanovic, R. Sukhavasi, C. Patel, S. Geirhofer, Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Communications Magazine* (Volume:52, Issue:2), February 2014.
- [53] S. Larew, T. Thomas, A. Ghosh, "Air interface design and ray tracing study for 5G millimeter wave communications," in *Proc., IEEE Globecom B4G Workshop*, Dec. 2013.
- [54] Xiaohu Ge, Song Tu, Guoqiang Mao, Cheng-Xiang, Wang<sup>3</sup>, Tao Han, 5G Ultra-Dense Cellular Networks, *IEEE Wireless Communications*, December 2015.
- [55] Jeffrey G. Andrews, Xinchun Zhang, Gregory D. Durgin, Abhishek K. Gupta, «Are We Approaching the Fundamental Limits of Wireless Network Densification?», *IEEE Communications Magazine*, October 2016.
- [56] Qualcomm, "Extending LTE advanced to unlicensed spectrum", Feb. 2014.
- [57] X. Ge, H. Cheng, M. Guizani, T. Han, "5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advances" *IEEE Netw.*, Vol. 28, No. 6, pp. 6–11, Nov. 2014.
- [58] S. F. Yunas, M. Valkama, J. Niemela, "Spectral and Energy Efficiency of Ultra-Dense Networks under Different Deployment Strategies," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 53, Vol. 1, pp. 90–100, Jan. 2015.
- [59] N. Bhushan, J. Li, D. Malladi, "Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution in 5G," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, Vol. 2, pp. 82–89, Feb. 2014.
- [60] C.X. Wang, F. Haider, X. Gao, "Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, No. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [61] David Lopez-Perez, Ming Ding, Holger Claussen, Amir H. Jafari, Towards 1 Gbps/UE in Cellular Systems: Understanding Ultra-Dense Small Cell Deployments, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Volume: 17, Issue: 4, pp.2078-2101, June 2015.
- [62] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Vraun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. Uusitalo, B. Timus, M. Fallgren, Scenarios for the 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS, *IEEE Communications Magazine* (Volume:52, Issue: 5), Pages 26-35, May 2014.
- [63] F. Richter, A. Fehske, G. P. Fettweis, Energy Efficiency Aspects of Base Station Deployment Strategies for Cellular Networks. *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall)*, IEEE 70th, 2009.
- [64] D. Sabella, A. De Domenico, E. Katranaras, M. Ali Imran, M. Di Girolamo, U. Salim, M. Lalam, K. Samdanis, A. Maeder. Energy Efficiency Benefits of RAN as-a-Service Concept for a Cloud-Based 5G Mobile Network Infrastructure. *IEEE Access* (Volume:2), December 2014.
- [65] K.P.Saharan A.Kumar, "Fog in Comparison to Cloud: A Survey", *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 122, No.3, July 2015.
- [66] E. Calvanese Strinati, *NetWorld 2020 ETP, Next Generation of Wireless Networks White Paper*, 2014.
- [67] <http://searchcio.techtarget.com/definition/green-IT-green-information-technology>
- [68] Hoang T. Dinh, Chonho Lee, Dusit Niyato, Ping Wang, A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Dec. 2013.
- [69] Han Qi, Abdullah Gani, Research on mobile cloud computing: Review, trend and perspectives, *DICTAP*, 14 June 2012.
- [70] [http://badunetworks.com/wp-content/uploads/2014/09/WLH\\_0818\\_14.pdf](http://badunetworks.com/wp-content/uploads/2014/09/WLH_0818_14.pdf)
- [71] Bonomi, Flavio, "Fog computing and its role in the internet of things." *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*. ACM, 2012.
- [72] F.Bonomi, R.Milito, J.Zhu, and S.Addepalli, "Fog computing and its role in the Internet of Things," in *ACM SIGCOMM Workshop on Mobile cloud Computing*, Helsinki, Finland, 2012, pp. 13-16, 2012.
- [73] <http://www.openfogconsortium.org/resources/#definition-of-fog-computing>
- [74] L.M. Vaquero, L.Rodero-Merino, "Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing", *ACM SIGCOMM Computer Comm. Review*, Vol. 44, No 5, October 2014 .
- [75] Shuo Wang, Xing Zhang, Yan Zhang, Lin Wang, Juwo Yang, Wenbo Wang, A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications, *IEEE Access*, Special section on security analytics and intelligence for cyber physical systems, Volume: 5, June 2017.
- [76] L.M. Vaquero, L.Rodero-Merino, "Finding your Way in the Fog: Towards a Comprehensive Definition of Fog Computing", *ACM SIGCOMM Computer Comm. Review*, Vol. 44, No 5, October 2014.
- [77] [https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobile-edge\\_computing\\_-\\_introductory\\_technical\\_white\\_paper\\_v1%2018-09-14.pdf](https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobile-edge_computing_-_introductory_technical_white_paper_v1%2018-09-14.pdf)

- [78] Yun Chao Hu, Milan Patel, Dario Sabella, Nurit Sprecher and Valerie Young, *Mobile Edge Computing. A key technology towards 5G*, ETSI White Paper No. 11, First edition, September 2015.
- [79] M.Satyanarayanan, "Cloudlets: at the Leading Edge of Mobile-Cloud Convergence", 2014 6th International Conference on Mobile Computing, Applications and Services (MobiCASE), 2014.
- [80] Mahadev Satyanarayanan, Zhuo Chent, Kiryong Hat, Wenlu Hut, Wolfgang Richtert, Padmanabhan Pillai, *Cloudlets: at the Leading Edge of Mobile-Cloud Convergence*, 2014 6th International Conference on Mobile Computing, Applications and Services (MobiCASE), 6-7 Nov. 2014.
- [81] <https://www.networkworld.com/article/2979570/cloud-computing/microsoft-researcher-why-micro-datacenters-really-matter-to-mobiles-future.html>.
- [82] <http://openedgecomputing.org>.
- [83] Soyata, T., Ba, H., Heinzelman, W., Kwon, M., & Shi, J., *Accelerating mobile cloud computing: A survey. Communication Infrastructures for Cloud Computing*, 175-197, 2013.
- [84] Long Jin, Wei Song, Ping Wang, Dusit Niyato, Peijian Ju, *Auction Mechanisms Toward Efficient Resource Sharing for Cloudlets in Mobile Cloud Computing*, *IEEE Transactions on Services Computing*, Volume: 9, Issue: 6, Nov-Dec. 2016 .
- [85] Z. Liu, Y. Feng, and B. Li, "Socialize spontaneously with mobile applications" in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1942–1950, Mar. 2012.
- [86] M. Satyanarayanan, P. Bahl, R. Caceres, and N. Davies, "The case for VM-based cloudlets in mobile computing," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 8, no. 4, pp. 14–23, 2009.
- [87] <http://www.gartner.com/newsroom/id/3412017>
- [88] Rodrigo Roman, Javier Lopez, Masahiro Mambo, *Mobile Edge Computing, Fog: A Survey and Analysis of Security Threats and Challenges*, *Future Generation Computer Systems*, February 2016.
- [89] Aleksandra Checko, Henrik L. Christiansen, Ying Yan, Lara Scolari, Georgios Kardaras, Michael S. Berger, Lars Dittmann, *Cloud RAN for Mobile Networks – a Technology Overview*, *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 2014.
- [90] Rui. L. Aguiar, *NetWorld 2020 ETP, Mobility/Connectivity and Networking Layer White Paper*, 2014.
- [91] A. Dawson, M K. Marina, F. J. Garcia, *On the Benefits of RAN Virtualization in C-RAN Based Mobile Networks*. *EWSDN '14 Proceedings of the 2014 Third European Workshop on Software Defined Networks*, Pages 103-108, 2014.
- [92] Checko A., Berger M, Kardaras G., Dittmann L., Christiansen, *Cloud Radio Access Network architecture. Towards 5G mobile networks*, Technical University of Denmark, 2016.
- [93] Clark Chen, *China Mobile Research Institute. C-RAN: The Road Towards Green Radio Access Network*, August 2012.
- [94] X. Zhou, "Network Slicing as a Service: Enable Industries Own Software-Defined Cellular Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 146–53, Jul. 2016.
- [95] Rongpeng Li, Zhifeng Zhao, Xuan Zhou, Guoru Ding, Yan Chen, Zhongyao Wang, Honggang Zhang, *Intelligent 5G: When Cellular Networks Meet Artificial Intelligence*, *IEEE Wireless Communications*, Volume: PP Issue: 99, 27 March 2017 .
- [96] A. Imran, A. Zoha, A. Abu-Dayya, "Challenges in 5G: How to Empower SON with Big Data for Enabling 5G," *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 27–33, Nov. 2014.
- [97] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4 , pp. 13–18, Aug. 1999.
- [98] L. Venturino, A. Zappone, C. Risi, S. Buzzi, "Energy-efficient scheduling and power allocation in downlink ofdma networks with base station coordination," *IEEE Transactions Wireless Communications*, vol. 14, no. 1, pp. 1–14, 2015.
- [99] Kieran Sullivan, Michael Taynman Barros, Angel Martin, *An Energy Efficient Architecture for 5G Network Management*, *Conference: 1st International Workshop on Network Management, Quality of Service and Security for 5G Networks allocated with the EuCNC 2016*, Athens, May 2016.
- [100] F. Meshkati, H. V. Poor, S. C. Schwartz, "Energy-efficient resource allocation in wireless networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 58–68, May 2007.
- [101] S. Buzzi, H. V. Poor, "Joint receiver and transmitter optimization for energy-efficient cdma communications," *Selected Areas in Communications*, *IEEE Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 459–472, April 2008.
- [102] Shanzhi Chen, Fei Qin, Bo Hu, Xi Li, Zhonglin Chen, *User-Centric Ultra-Dense Networks for 5G: Challenges, Methodologies, and Directions*, *IEEE Wireless Communications*, April 2016.

- [103] S. Z. Chen, "LTE-Hi: A New Solution to Future Wireless Mobile Broadband Challenges and Requirements" IEEE Wireless Communications., vol. 21, no. 3, pp. 70–78, June 2014.
- [104] 5G Vision, Samsung Electronics Co., Ltd., August 2015.
- [105] Boccardi Federico, W. Heath Jr., Robert, Lozano, Angel, L. Marzetta, Thomas, Popovski, Petar, Five disruptive technology directions for 5G, IEEE Communications Magazine, February 2014.
- [106] J. Andrews, "The Seven Ways HetNets Are a Paradigm Shift," IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 3, pp. 136–44, Mar. 2013.
- [107] Y. Kishiyama, "Future Steps of LTE-A: Evolution towards Integration of Local Area and Wide Area Systems," IEEE Wireless Commun., vol. 20, no. 1, pp. 12–18, Feb. 2013.
- [108] China Mobile Research Inst., Beijing, China, white paper, v. 2.5, "C-RAN: The Road Towards Green RAN", Oct. 2011.
- [109] A. Lozano, R. W. Heath Jr., J. G. Andrews, "Fundamental Limits of Cooperation," IEEE Trans. Info. Theory, vol. 59, no. 9, pp. 5213–26, Sept. 2013.
- [110] T. Thai, "Multi-Flow Scheduling for Coordinated Direct and Relayed Users in Cellular Systems," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 2, pp. 669–678, Feb. 2013.
- [111] Sherif Abdelwahab, Bechir Hamdaoui, Mohsen Guizani, Taieb Znati, "Network Function Virtualization in 5G", IEEE Communications Magazine, Apr. 2016.
- [112] Bo Han, Vijay Gopalakrishnan, Lusheng Ji and Seungjoon Lee AT&T Labs Research, "Network Functions Virtualization: Challenges and Opportunities for Innovations", IEEE Communications Magazine, Feb. 2015.
- [113] VNF Benchmarking, Case Study, Spirent Communications, Inc., 2017, <https://www.spirent.com/-/media/Case-studies/Virtual/VNF-Benchmarking-Case-Study.pdf>
- [114] R. Mijumbi, J. Serrat, J. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, R. Boutaba, Network Function Virtualization: State-of-the-art and Research Challenges. IEEE Communication Surveys and Tutorials, September 25, 2015.
- [115] ETSI GS NFV 002 V1.2.1, Network Function Virtualization (NFV); Architectural Framework, ETSI, Dec. 2014.
- [116] Rajendra Chayapathi, Syed Farrukh Hassan, Paresh Shah, Network Functions Virtualization (NFV) with a Touch of SDN, Pearson Education, Inc., 2017.
- [117] ETSI GS NFV 004 v1.1.1, Network Function Virtualization (NFV); Virtualisation Requirements, ETSI, Oct. 2013.
- [118] ETSI GS NFV-SWA 001 V1.1.1, Network Functions Virtualisation (NFV); Virtual Network Functions Architecture, ETSI, Dec 2014.
- [119] ETSI GS NFV-PER 001 v1.1.1, Network Functions Virtualisation (NFV); NFV Performance and Portability Best Practices, ETSI, Jun 2014.
- [120] ETSI GS NFV-INF 001 V1.1.1, Network Functions Virtualisation (NFV); Infrastructure Overview, ETSI, Jan. 2015.
- [121] ETSI GS NFV 001 v1.1.1, Network Function Virtualization (NFV); Use Cases, ETSI, Oct 2013.
- [122] [https://portal.etsi.org/nfv/nfv\\_white\\_paper2.pdf](https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper2.pdf)
- [123] Konstantinos Samdanis, Xavier Costa-Perez, Vincenzo Sciancalepore, From network sharing to multi-tenancy: The 5G network slice broker, IEEE Communications Magazine, Vol: 54, Issue: 7, July 2016.
- [124] Network Functions Virtualisation – Update White Paper, "SDN and OpenFlow World Congress", Frankfurt-Germany, October 2013.
- [125] Patrick Kelly, Grant Lenahan, Managing the Telco Cloud: NFV and SDN role in the Existing OSS Domain, Appledore Research Group, April 2015.
- [126] J. Rexford, A. Greenber, G. Hjalmtysson, D. Maltz, A. Myers, G. Xie, J. Zhan, H. Zhang, "Network-wide decision making: Toward a wafer-thin control plane," in Proceedings of HotNets III, 2004.
- [127] Evangelos Haleplidis, Spyros Denazis, Kostas Pentikousis, Jamal Hadi Salim, David Meyer, Odysseas Koufopavlou, "SDN Layers and Architectures Terminology", RFC7426, IRTF SDNRG research group, January 2015.
- [128] SDN architecture Issue 1, ONF TR-502, June 2014.
- [129] Kreutz, D., Ramos, F.M.V., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., Uhlig, S., Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. Proceedings of the IEEE 103, 14–76., January 2015.
- [130] SDN Architecture Overview Version 1.0, ONF, December 12, 2013.



- [131] A. Doria, J. Hadi Salim, R. Haas, H. Khosravi, W. Wang, L. Dong, R. Gopal, J. Halpern, "Forwarding and Control Element Separation (ForCES) Protocol Specification," RFC 5810, March 2010.
- [132] R. Enns, M. Bjorklund, J. Schoenwaelder, A. Bierman, "Network Configuration Protocol (NETCONF), RFC6241", June 2011.
- [133] M. Bjorklund, "YANG - A Data Modeling Language for the Network Configuration Protocol (NETCONF)" RFC 6020, 2010.
- [134] A. Farrel, J.-P. Vasseur, J. Ash, "A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture," RFC 4655, 2006.
- [135] J. Vasseur, J. Le Roux, "Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP)," RFC 5440, 2009.
- [136] Cisco, "OpFlex: An Open Policy Protocol", 2015.
- [137] Puppet Labs, "Puppet: Defusing the Server Management Explosion" [https://puppetlabs.com/wpcontent/uploads/2011/08/PL\\_WP\\_Defusing\\_Server\\_Management\\_Explosion.pdf](https://puppetlabs.com/wpcontent/uploads/2011/08/PL_WP_Defusing_Server_Management_Explosion.pdf) 2011.
- [138] CFEngine, "Adopting CFEngine in Your Organization," <https://auth.cfengine.com/archive/manuals/st-adopt>, 2009.
- [139] Akram Hakiri, Pascal Berthou, "Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges", Jun. 2015.
- [140] Wolfgang Braun, Michael Menth, "Software-Defined Networking Using OpenFlow: Protocols, Applications and Architectural Design Choices", Future Internet, Jun. 2014.
- [141] OpenFlow-Enabled Mobile and Wireless Networks ONF Solution Brief, September 30, 2013.
- [142] <https://www.opennetworking.org/>
- [143] OpenFlow Switch Specification Version 1.5.1 ( Protocol version 0x06 ) ONF TS-025, March 26, 2015.
- [144] OpenFlow Switch Specification Version 1.4.0 (Wire Protocol 0x05) ONF TS-012, October 14, 2013.
- [145] Sakir Sezer, Sandra Scott-Hayward, Pushpinder Kaur Chouhan, Barbara Fraser, David Lake, Jim Finnegan, Niel Viljoen, Marc Miller, Navneet Rao, Are we ready for SDN? - Implementation Challenges for Software-Defined Networks, IEEE Communications Magazine, Vol: 51, Issue: 7, July 2013.
- [146] ONF TR-521, SDN Architecture Issue 1.1, Feb. 2016.
- [147] Hakiri A., Gokhale A., Berthou P., Schmidt D., Gayraud T., Software-Defined Networking: Challenges and research opportunities for Future Internet. Computer Networks 75, Part A, 453–471, 2014.
- [148] Slavica Tomovic, Milica Pejanovic-Djurisic, Igor Radusinovic, SDN Based Mobile Networks: Concepts and Benefits, Wireless Personal Communications, Springer Science+Business Media New York, October 2014.
- [149] Martin Casado, Teemu Koponen, Rajiv Ramanathan, Scott Shenker, "Virtualizing the network forwarding plane", in Proceedings of the Workshop on Programmable Routers for Extensible Services of Tomorrow (PRESTO '10), ACM, New York, USA, Article 8, 2010.
- [150] R. Sherwood, G. Gibb, K. Yap, G. Appenzeller, M. Casado, N. McKeown, G. Parulkar, "Can the production network be the testbed?" in Proceedings of USENIX OSDI, Vancouver, Canada, October 2010.
- [151] Ian F. Akyildiz, Shih-Chun Lin, Pu Wang, Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation. Computer Networks 93, pp 66–79, 2015.
- [152] Israat Tanzeena Haque, Nael Abu-Ghazaleh, Wireless Software Defined Networking: A Survey and Taxonomy, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, Issue: 4, Fourth quarter 2016.
- [153] I.F. Akyildiz, P. Wang, S.C. Lin, Softair: A software defined networking architecture for 5g wireless systems, Comput. Netw.,pp 1–18, 2015.
- [154] K.-K. Yap, R. Sherwood, M. Kobayashi, T.-Y. Huang, M. Chan, N. Handigol, N. McKeown, G. Parulkar, Blueprint for introducing innovation into wireless mobile networks, VISA 10: Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures, New York, NY, pp. 25–32, 2010.
- [155] M. Bansal, J. Mehlman, S. Katti, P. Levis, Openradio: a programmable wireless dataplane, in: Proceedings of the of the first workshop on Hot topics in software defined networks (HotSDN '12), Helsinki, Finland, pp. 109–114, 2012.
- [156] X. Jin, L. E. Li, L. Vanbever, and J. Rexford, "SoftCell: Scalable and flexible cellular core network architecture," in Proc. ACM Conf. Emerg. Netw. Exper. Technol. (CoNEXT), Santa Barbara, CA, USA, pp. 163–174, 2013.
- [157] <http://openvswitch.org>

- [158] L. Li, Z. Mao, J. Rexford, Toward software-defined cellular networks, in: Proceedings of the of European Workshop on Software Defined Networking (EWSNDN), Darmstadt, Germany, pp. 7–12, 2010.
- [159] A. Gudipati, D. Perry, L. Li, S. Katti, Softran: software defined radio access network, in: Proceedings of the first workshop on Hot topics in software defined networks (HotSDN '13), Hong Kong, pp. 25–30, 2013.
- [160] Centre Tecnologic Telecomunicacions Catalunya (CTTC), SDN/NFV Cloud Computing Platform and Core Network for 5G Services, Technical Report, <http://networks.cttc.es/ons/adrenaline/sdn-nfv-cloud-computing-platform-and-core-network-for-5g-services>
- [161] NTT DOCOMO, INC, DOCOMO 5G White Paper: 5G Radio Access: Requirements, Concept and Technologies, Technical Report, 2014.
- [162] SK Telecom, SK Telecom 5G White Paper: SK Telecom's View on 5G Vision, Architecture, Technology, and Spectrum, Technical Report, 2014.
- [163] A.Tzanakaki, M. Anastasopoulos, K. Georgakilas, E. Escalona, J. Ferrer Riera, G. Landi, G. Bernini, N.Ciulli, R.Monno, A.Martucci, B.Rofoe, S.Peng, G.Zervas, R.Nejabati, D.Simeonidou, K.Katsalis, Th.Korakis, L.Tassioulas, D.Christofi, G.Dimosthenous, Convergence of Wireless Optical Network and IT Resources in Support of Cloud Services, Deliverable 2.3, Overall System Architecture Definition and Specifications,, November 1st, 2012.
- [164] Mao Yang, Yong Li, Depeng Jin, Li Suy, Shaowu Ma, Lieguang Zeng, "OpenRAN: A software-defined RAN architecture via virtualization," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 43, no. 4, pp. 549–550, 2013.
- [165] T. Chen, H. Zhang, X. Chen, O. Tirkkonen, "SoftMobile: Control evolution for future heterogeneous mobile networks," IEEE Wireless Commun., vol. 21, no. 6, pp. 70–78, Dec. 2014.
- [166] H. Zhang, "5G wireless network: MyNET and SONAC," IEEE Netw., vol. 29, no. 4, pp. 14–23, Jul./Aug. 2015.
- [167] V. Yazici, U. C. Kozat, M. O. Sunay, "A new control plane for 5G network architecture with a case study on unified handoff, mobility, and routing management," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 11, pp. 76–85, Nov. 2014.
- [168] C. Bernardos, P. Serrano, Antonio de la Oliva, L.M. Contreras, "An architecture for software defined wireless networking," IEEE Wireless Communications., vol. 21, no. 3, pp. 52–61, Jun. 2014.
- [169] Hassan Ali-Ahmad, Claudio Cicconetti, Antonio de la Oliva, Vincenzo Mancuso, Malla Reddy Sama, Pierrick Seite, Sivasothy Shanmugalingam, "An SDN-based network architecture for extremely dense wireless networks," in Proc. IEEE SDN Future Netw. Services (SDN4FNS), Trento, Italy, pp. 1–7, Nov. 2013.
- [170] S. Jain, A. Kumar, S. Mandal, J. Ong, L. Poutievski, A. Singh, S. Venkata, J. W-anderer, J. Zhou, M. Zhu, J. Zollila, U. Hölzle, S. Stuart, Amin Vahdat, B4: Experience with a Globally-Deployed Software Defined WAN. CONFERENCE PAPER in ACM SIGCOMM Computer Communication Review 43(4):3-14, August 2013.
- [171] C. Y. Hong, S. Kandula, R. Mahajan, M. Zhang, V. Gill, M. Nanduri, R. Wattenhofer., Achieving High Utilization with Software-Driven WAN. SIGCOMM '13 Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference, August 2013.
- [172] Huawei technologies sdn showcase at sdn and openflow world congress 2013, [http://www.eantc.de/fileadmin/eantc/downloads/events/2011-2015/SDNOF2013/EANTC-Huawei\\_SDN\\_Showcase-White\\_Paper\\_Final\\_Secure.pdf](http://www.eantc.de/fileadmin/eantc/downloads/events/2011-2015/SDNOF2013/EANTC-Huawei_SDN_Showcase-White_Paper_Final_Secure.pdf)
- [173] I.F.Akyildiz, A.Lee, P.Wang, M.Luo, W.Chou, A roadmap for traffic engineering in sdn-openflow networks, Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Volume 71, Pages 1-30, October, 2014.
- [174] B.Pfaff, J.Pettit, K.Amidon, M.Casado, T.Koponen, S.Shenker, Extending networking into the virtualization layer, in: ACM Workshop on Hot Topics in Networks 2009, October 2009.
- [175] <http://www.cellular-news.com/story/36831.php>
- [176] A.X.Porxas, S.C.Lin, M.Luo, Qos aware virtualization enabled routing in software-defined networks, in: IEEE ICC 2015, London, UK, 2015.
- [177] S.C.Lin, P.Wang, M.Luo, Control traffic balancing in software defined networks, Computer Networks, 2015.
- [178] Pu Wang, Shih-Chun Lin, Min Luo, A Framework for QoS-aware Traffic Classification Using Semi-supervised Machine Learning in SDNs, 2016 IEEE International Conference on Services Computing, 2016.
- [179] Brandon F. Lo, Ian F. Akyildiz, Reinforcement learning for cooperative sensing gain in cognitive radio ad hoc networks, Wireless Networks, Vol. 19, Issue 6, pp 1237–1250, August 2013.
- [180] J. Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J.J. Ramos-Munoz, J. Lorca, J. Folgueira, Network Slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, Architectures and Challenges, IEEE Communications Magazine, Vol. 55 Issue: 5, pp. 80-87, May 2017.

- [181] M. Richart, J. Baliosian, J. Serrat, J. L. Gorricho, "Resource slicing in virtual wireless networks: A survey," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 3, pp. 462–476, Sept. 2016.
- [182] Mohammad Asif Habibi, Bin Han, Hans D. Schotten, *Network Slicing in 5G Mobile Communication: Architecture, Profit Modeling, and Challenges*, Conference: 14th International Symposium on Wireless Communication Systems, August 2017.
- [183] M. Derakhshani, X. Wang, T. Le-Ngoc, A. Leon-Garcia, "Virtualization of multi-cell 802.11 networks: Association and airtime control," arXiv preprint arXiv:1508.03554, 2015.
- [184] Ericsson, "5G systems (white paper)," Ericsson, Tech. Rep, January 2015.
- [185] H. Wen, P. K. Tiwary, T. Le-Ngoc, "Current trends and perspectives in wireless virtualization," in *Mobile and Wireless Networking (MoWNeT)*, 2013 International Conference on Selected Topics in. IEEE, pp. 62–67, 2013.
- [186] K. Kusume, M. Fallgren, O. Queseth, V. Braun, D. Gozalvez-Serrano, I. Korthals, G. Zimmermann, M. Schubert, M. I. Hossain, A. A. Widaa, K. Chatzikokolakis, R. Holakouei, S. Jeux, J. L. Hernando, M. Boldi, "Deliverable D1.5. Updated scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system with recommendations for future investigations." ICT-317669 METIS Project, Public Deliverable ICT-317669-METIS/D1.5, April 2015.
- [187] U. Ofcom, The Office of Communications, "Infrastructure report 2014. ofcom's second full analysis of the UK's communications infrastructure." Ofcom, The Office of Communications, UK., Tech. Rep., 2014. [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0011/46010/infrastructure-14.pdf](https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0011/46010/infrastructure-14.pdf)
- [188] B. Graham, "NFV and SDN answer or question?" 2015 TM Forum, 2015, <http://www.cnsm-conf.org/2015/files/sdnnfv-keynote.pdf>
- [189] ONF TR-526 "Applying SDN Architecture to 5G Slicing", Issue 1, April 2016.
- [190] ONF TR-518, "Relationship of SDN and NFV", Oct. 2015.
- [191] ETSI GS NFV-EVE 005, "Network Functions Virtualisation (NFV); Ecosystem; Report on SDN Usage in NFV Architectural Framework", V1.1.1, Dec. 2015..
- [192] ETSI GS NFV-MAN 001, "Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration", V1.1.1, Dec. 2014.
- [193] ETSI GS NFV-SEC 003, "Network Functions Virtualisation (NFV); NFV Security; Security and Trust Guidance", V1.1.1, Dec. 2014.
- [194] ETSI GS NFV 003, "Network Functions Virtualisation (NFV); Terminology for Main Concepts in NFV", V1.2.1, Dec. 2014.