



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μοντέλο κοστολόγησης και ελαχιστοποίησης  
κόστους κινητών δικτύων 5G και εξής: Η  
περίπτωση της τεχνολογίας Cognitive Radio

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΑΛΙΓΙΑΝΝΗ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ

Επιβλέπων: Χρήστος Μπούρας

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2018



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Copyright ©–All rights reserved Μαλιγιάννη Ελευθερία, 2018.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.



# Πρόλογος

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα για την καθοδήγηση και την συνεργασία του. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα την υποψηφια διδάκτωρ κ. Αναστασία Κόλλια για τη συνεργασία, την εμπιστοσύνη, την υπομονή και την πολύτιμη συμβολή της.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την υπομονή και την κατανόηση που επέδειξαν.

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται μία τεχνο-οικονομική ανάλυση των Cognitive Radio Networks (CRN) συγκριτικά με το Software Defined Networking (SDN), δύο τεχνολογιών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αρχικά, παρουσιάζεται η δομή της διπλωματικής. Επιπλέον, αναλύονται οι βασικές εργασίες, μελέτες και επιστημονικές προσεγγίσεις, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα στοιχεία των Κινητών Δικτύων. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην βασική του δομή αλλά και στα είδη των κυψελών που συνυπάρχουν σε ένα συνολικό δίκτυο. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη κυψέλη Femtocell και στην αρχιτεκτονική της. Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η πέμπτη γενιά κινητών δικτύων (5G) και διάφορες τεχνολογίες της όπως το Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO), Network Function Virtualization (NFV), SDN, Evolved Packet Core (EPC). Η μελέτη επικεντρώθηκε στην τεχνολογία του Cognitive Radio (CR) στις αρχιτεκτονικές και τα πρωτόκολλα που την απαρτίζουν.

Επιπλέον, δημιουργήθηκε αρχιτεκτονικό μοντέλο δικτύου με την χρήση της τεχνολογίας CR και Femtocell κυψελών. Με βάση το μοντέλο αυτό κατασκευάστηκε οικονομικό μοντέλο με την χρήση του στρατηγικού "παιχνιδιού" Stalckelberg Game. Ακόμη μελετήθηκε η οικονομική ανάλυση του μοντέλου SDN/NFV και συγκεκριμένα οι κεφαλαιακές δαπάνες (CAPEX), οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) αλλά και το συνολικό κόστος της ιδιοκτησίας (TCO).

Με εφαρμογή των μαθηματικών τύπων που δημιουργήθηκαν αλλά και που προέκυψαν μετά από έρευνα σε παρόμοιες μελέτες, υπολογίζονται τα κέρδη και τα κόστη των παραπάνω μοντέλων. Ο υπολογισμός αυτός εκτελέστηκε με την βοήθεια του λογισμικού Mathworks Matlab, δημιουργώντας κώδικα υπολογισμού του κόστους.

Τέλος, εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα, όσον αφορά τις τεχνολογίες

που μελετήθηκαν αλλά και την σημασία της συνεχούς μελέτης και έρευνας των τεχνολογιών αυτών και όσων έχουν να προσφέρουν στην εξέλιξη των κινητών δικτύων στο άμεσο μέλλον.

# Executive Summary

This thesis refers to a techno-economic analysis of Cognitive Radio Networks (CRN) compared to the technology of Software Defined Networking (SDN) both of them presenting a technological interest. In the beginning, the structure of the thesis is being analysed. Furthermore, there are presented the most important works, reports and papers that were used for the creation of the techno-economic models.

Moreover, the most fundamental characteristics of the Cellular Networks are presented. In particular, their basic structure and the cell types that can be set in a network are studied. Special attention was given to the Femtocells and to their architecture. Another thing that has been studied is the 5th generation of cellular networks and a number of the technologies that are essential for it to be functional, like Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO), Network Function Virtualization (NFV), SDN, Evolved Packet Core (EPC). The study focused on the technology of Cognitive Radio (CR), its architectures and protocols.

Also, an architectural model of a network has been created with the use of CR and Femtocells. Based on this model an economic model was created using a stratigical game known as Stalckeberg's Game. Moreover, the techno-economic analysis of the SDN/NFV model was studied, particularly the Capital Expenditures (CAPEX) and the Opertional Expenditures (OPEX) as well as the Total Cost of Ownership (TCO). With the application of mathematical formulas that have been created and have emerged from the study of similar researches, the revenue and the cost of the models are calculated. This calculation has been executed with the use of the Mathworks Matlab software, by creating a cost calculating program.

Lastly, significant conclusions are drawn about the technologies that have been studied and also about the significance of the constant research of these technologies because of the plethora of advantages that can offer to the de-

velopment of cellular networks in the near future.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Κινητά Δίκτυα</b>	<b>18</b>
1.1	Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα . . . . .	18
1.2	Βασική Δομή . . . . .	19
1.2.1	Σταθμός Βάσης . . . . .	19
1.2.2	Κέντρα κινητής μεταγωγής . . . . .	20
1.3	Είδη Κυψελών . . . . .	21
1.3.1	Macrocells . . . . .	21
1.3.2	Metrocells . . . . .	22
1.3.3	Microcells . . . . .	24
1.3.4	Picocells . . . . .	24
1.3.5	Femtocells . . . . .	25
1.3.6	Πλεονεκτήματα Femtocells . . . . .	27
1.4	Αρχιτεκτονική Femtocell . . . . .	28
<b>2</b>	<b>5η Γενιά Κινητών Δικτύων (5G)</b>	<b>31</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	31
2.2	4η Γενιά Κινητών Δικτύων (4G) . . . . .	33
2.2.1	3GPP Long Term Evolution LTE . . . . .	34
2.2.2	LTE Advanced . . . . .	34
2.3	5η Γενιά Κινητών Δικτύων (5G) . . . . .	35
2.4	Τεχνολογίες 5G . . . . .	36
2.4.1	Multiple-Input and Multiple-Output MIMO . . . . .	36
2.4.2	Πλεονεκτήματα MIMO . . . . .	37
2.4.3	Network Function Virtualization NFV . . . . .	38
2.4.4	Αρχιτεκτονική NFV . . . . .	38
2.4.5	Εικονικοποίηση του πυρήνα του κινητού δικτύου . . . . .	39
2.4.6	Software-Defined Networking (SDN) . . . . .	40
2.4.7	Τρόπος Λειτουργίας . . . . .	40

2.4.8	Το πρωτόκολλο OpenFlow . . . . .	41
2.5	Σπουδαιότητα των 5G . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Cognitive Radio</b>	<b>43</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	43
3.2	Χαρακτηριστικά . . . . .	43
3.2.1	Γνωσιακός Κύκλος . . . . .	44
3.3	Αρχιτεκτονικές Cognitive Radio . . . . .	45
3.3.1	Infrastructure Architecture . . . . .	46
3.3.2	Ad-hoc Architecture . . . . .	46
3.3.3	Mesh Architecture . . . . .	47
3.3.4	Cognitive Radio και Ιεραρχία Πρωτοκόλων . . . . .	48
3.4	Πλεονεκτήματα CR . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Οικονομική Ανάλυση</b>	<b>50</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	50
4.2	Προτεινόμενο Αρχιτεκτονικό Μοντέλο . . . . .	51
4.3	Οικονομικό Μοντέλο Cognitive Radio . . . . .	52
4.3.1	Stackelberg Game . . . . .	52
4.3.2	Ανάστορφο Stackelberg Game . . . . .	53
4.4	Οικονομική Ανάλυση SDN/NFV . . . . .	56
4.4.1	Εισαγωγή . . . . .	56
4.4.2	Μοντέλο Συστήματος . . . . .	58
4.4.3	Κεφαλαιακές Δαπάνες - CAPEX . . . . .	59
4.4.4	Λειτουργικές Δαπάνες - OPEX . . . . .	61
4.4.5	Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας - TCO . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Πειραματική Ανάλυση</b>	<b>64</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	64
5.2	Πειράματα . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Μελλοντική έρευνα</b>	<b>75</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>77</b>
	<b>Παράρτημα Α: Κώδικας Υπολογισμού Του Κόστους</b>	<b>83</b>

# Λίστα Σχημάτων

1.1	Κυψελοειδές Δίκτυο [40]	18
1.2	Κέντρα κινητής μεταγωγής [42]	20
1.3	Metrocell [47]	23
1.4	Microcell [51]	24
1.5	Femtocell [52]	26
1.6	Αρχιτεκτονική Femtocell [18]	29
2.1	Εξέλιξη Κινητών Δικτύων [53]	32
2.2	4G VS 5G [54]	35
2.3	Massive MIMO Antenna [56]	37
2.4	Αρχιτεκτονική NFV [57]	39
2.5	Αρχιτεκτονική OpenFlow [58]	41
3.1	Cognitive Circle [62]	45
3.2	Infrastructure Architecture [63]	46
3.3	Ad-hoc Architecture [64]	47
3.4	Mesh Architecture [65]	47
3.5	Physical and DLL Layers [66]	48
4.1	Μοντέλο Συστήματος Cognitive Radio βασισμένο σε Femto-cell [1]	51
4.2	Stackelberg Game [1]	53
4.3	Μοντέλο Συστήματος SDN/NFV [4]	59
5.1	CR vs SDN	66
5.2	CR vs SDN	67
5.3	CR vs SDN	68
5.4	Κερδος με βάση των αριθμό πρωτευόντων δικτύων και των τιμών $c_q$	69

5.5	$\vartheta=0$ vs $\vartheta=-1$ . . . . .	70
5.6	Κερδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές $c_q$ . . . . .	71
5.7	Κερδος με βάση των αριθμό πρωτευόντων δικτύων . . . . .	72

# Λίστα Πινάκων

1.1	Πίνακας Κυφελών [48] . . . . .	25
4.1	Πίνακας Παραμέτρων . . . . .	56
4.2	Παραμέτροι CAPEX RAN . . . . .	59
4.3	Παραμέτροι CAPEX EPC . . . . .	60
4.4	Παραμέτροι OPEX RAN . . . . .	62

# Ακρωνύμια

1G	First Generation cellular technology
2G	Second Generation cellular technology
3G	Third Generation cellular technology
4G	Fourth Generation cellular technology
5G	Fifth Generation cellular technology
AP	Access Point
BS	Base Station
CAPEX	Capital Expenditures
CC	Cognitive Circle
CDMA	Code-division Multiple Access
CN	Core Network
CP	Cognitive Process
CR	Cognitive Radio
CRN	Cognitive Radio Network
EPC	Evolved Packet Core
FBS	Femtocell Base Station
FDMA	Frequency-division Multiple Access
FSUs	Femtocell Secondary Users
GPS	Global Positioning System
HSS	Home Subscriber Service

IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISP	Internet Service Provider
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MS	Mobile Stations
MSC	Mobile switching centre
MSUs	Multiple Secondary Users
MW	Microwave
NFV	Network Function Virtualization
OFDM	Femtocell Convergence Server
OPEX	Operational Expenditures
P-GW	Packet Data Network Gateway
QoI	Quality of Information
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAN BS	Radio Access Network Base Station
RF	Radio Frequency
SBS	Super Base Station
SDN	Software-Defined Networking
S-GW	Serving Gateway
SIP	Session Initiation Protocol
SPE	Subgame Perfect Equilibrium
TCO	Total Cost Of Ownership
TDMA	Time-division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

VM           Virtual Machine  
VoIP         Voice over Internet Protocol  
  
WCDMA      Wideband Code-division Multiple Access





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Κινητά Δίκτυα

### 1.1 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα

Ένα κυψελοειδές ή κινητό δίκτυο είναι ένα σύστημα επικοινωνιών το οποίο παρέχει ασύρματη επικοινωνία και είναι η πιο διαδεδομένη εφαρμογή ασύρματων δικτύων. Τα κυψελικά δίκτυα είναι ικανά να παρέχουν υπηρεσίες φωνής αλλά και δεδομένων στους χρήστες. Ο χώρος που καλύπτει ένα κυψελικό δίκτυο χωρίζεται σε κυψέλες (cells) με κάθε κυψέλη να εξυπηρετεί την κεραία αλλά και τον σταθμό βάσης της.

Η οργάνωση των κυψελών είναι τέτοια ώστε οι σταθμοί βάσης να είναι ισαπέχοντες και έτσι το σχήμα που προκύπτει είναι εξαγωνικό. Στην γενική περίπτωση πάντως η εικόνα των εξαγωνικών κυψελών είναι ένα μοντέλο που απλοϊκά αναπαριστά τον τρόπο οργάνωσης των κυψελικών δικτύων, στην πραγματικότητα οι κυψέλες δεν είναι απαραίτητα εξαγωνικές. [14, 15]



Figure 1.1: Κυψελοειδές Δίκτυο [40]

Σε κάθε σταθμό βάσης γίνεται εκχώρηση ενός μέρους των διαθέσιμων καναλιών επικοινωνίας του κυψελικού συστήματος. Διαμοιράζοντας λοιπόν την

διαθέσιμη χωρητικότητα αλλά και με την χρήση της πολυπλεξίας Time-division Multiple Access (TDMA), Frequency-division Multiple Access (FDMA), Code-division Multiple Access (CDMA) δημιουργούνται τα κανάλια.

Κάθε συσκευή διαθέτει ένα πομπό χαμηλής ισχύος που είναι ικανός να καλύψει μια μικρή γεωγραφική περιοχή. Ο χρήστης που ανήκει σε μια κυψέλη επικοινωνεί με το υπόλοιπο δίκτυο μέσω του σταθμού βάσης της κυψέλης, δηλαδή μέσω του σταθμού βάσης από τον οποίο έχει την καλύτερη λήψη ή το δυνατότερο σήμα. Τα μεγέθη των κυψελών διαφέρουν έχοντας μεγάλο εύρος δηλαδή υπάρχουν κυψέλες μεγέθους μερικών χιλιάδων μέτρων και άλλες μεγέθους εκατοντάδων χιλιομέτρων, οι κυψέλες αυτές ονομάζονται overlay cells και αφορούν κατά κύριο λόγο την δορυφορική κινητή τηλεφωνία.[14, 15]

## 1.2 Βασική Δομή

### 1.2.1 Σταθμός Βάσης

Βασικό κομμάτι ενός κυψελικού δικτύου είναι οι σταθμοί βάσης οι οποίοι αποτελούνται από διάφορα στοιχεία. Το πρώτο στοιχείο είναι το ηλεκτρονικό τμήμα το οποίο βρίσκεται στη βάση του πύργου κεραίας. Το τμήμα αυτό περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά που είναι απαραίτητα για την επικοινωνία με τα κινητά τηλέφωνα. Επιπλέον περιλαμβάνει ενισχυτές ραδιοσυχνοτήτων, ραδιοφωνικούς πομποδέκτες, συνδυασμούς ραδιοσυχνοτήτων και τροφοδοτικά με αντίγραφα ασφαλείας.

Το δεύτερο μέρος των σταθμών βάσης είναι η κεραία και ο τροφοδότης. Ακόμη υπάρχει η διεπαφή μεταξύ του σταθμού βάσης και του ελεγκτή η οποία αποτελείται από την λογική ελέγχου και το λογισμικό όπως επίσης από τον καλωδιακό σύνδεσμο στον ελεγκτή.

Οι σταθμοί βάσης μπορούν να τοποθετηθούν σε πληθώρα σημείων. Στις πόλεις οι κεραίες εμφανίζονται συχνά στη κορυφή κτιρίων ενώ στην υπόλοιπη χώρα χρησιμοποιούνται ξεχωριστοί ιστοί. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η θέση, το ύψος και ο προσανατολισμός είναι όλα σωστά για να εξασφαλιστεί επίτευξη της απαιτούμενης κάλυψης. Εάν η κεραία είναι πολύ χαμηλή ή σε κακή τοποθεσία, δεν θα υπάρχει επαρκής κάλυψη. Αντίθετα, αν η κεραία είναι πολύ υψηλή και κατευθυνθεί εσφαλμένα, τότε το σήμα θα ακουστεί πολύ πέρα από τα όρια της κυψέλης. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα παρεμβολές σε άλλη κυψέλη που χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες.

Τα συστήματα κεραίων που χρησιμοποιούνται με σταθμούς βάσης συνήθως αποτελούνται από δύο σειρές κεραίων λήψης. Αυτά παρέχουν αυτό που συχνά

ονομάζεται λήψη πολυμορφίας, επιτρέποντας την επιλογή του καλύτερου σήματος για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της πολλαπλής διάδοσης. Οι κεραιές του δέκτη είναι συνδεδεμένες με καλώδιο χαμηλής απώλειας που κατευθύνει τα σήματα προς τον σταθμό βάσης. Στο σημείο αυτό ένας πολυπυλώνας χωρίζει τα σήματα για να τροφοδοτήσει τους διάφορους δέκτες που απαιτούνται για όλα τα κανάλια. Ομοίως, το μεταδιδόμενο σήμα από τον συνδυαστή κατευθύνεται προς την κεραιά μετάδοσης χρησιμοποιώντας καλώδιο χαμηλής απώλειας για να εξασφαλίσει το βέλτιστο μεταδιδόμενο σήμα. [41]

### 1.2.2 Κέντρα κινητής μεταγωγής

Το Mobile Switching Centre (MSC) είναι το κέντρο ελέγχου για το κυψελοειδές σύστημα, συντονίζοντας τις ενέργειες των Base Station (BS), παρέχοντας συνολικό έλεγχο και ενεργώντας ως διακόπτης και σύνδεση στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Το MSC συντονίζει τις ενέργειες ενός συνόλου σταθμών βάσης (ισοδύναμα, ενός συνόλου κυψελών), και ασχολείται με την διάθεση των καναλιών στις κυψέλες, την δρομολόγηση των κλήσεων, την διατήρηση και ενημέρωση της πληροφορίας για την θέση των χρηστών, την ασφάλεια, την χρέωση, την διαχείριση της αλλαγής καναλιών (handoffs), και άλλα.



Figure 1.2: Κέντρα κινητής μεταγωγής [42]

Το MSC χρησιμεύει και ως η πύλη που συνδέει ολόκληρο το κυψελικό δίκτυο με το δημόσιο δίκτυο. Ως εκ τούτου έχει μια ποικιλία από συνδέσεις επικοινωνίας σε αυτό που θα περιλαμβάνει συνδέσεις οπτικών ινών, καθώς και μερικές

συνδέσεις μικροκυμάτων και μερικά καλώδια σύρμα χαλκού. Αυτά επιτρέπουν την επικοινωνία με (BS), τη δρομολόγηση κλήσεων προς αυτά και τον έλεγχο τους. Περιέχει επίσης τις εγκαταστάσεις του Κέντρου ελέγχου ταυτότητας, επιτρέποντας τη χρήση κινητών τηλεφώνων στο δίκτυο. [15, 41]

## 1.3 Είδη Κυψελών

Καθώς ο αριθμός των χρηστών των κινητών δικτύων αυξάνεται καθημερινά τόσο αυξάνονται οι προσδοκίες των συνδρομητών, για τον λόγο αυτό η χρήση των small cells είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος κάλυψης εσωτερικών, εξωτερικών και δημόσιων χώρων. Επιπλέον, τα small cells που τοποθετούνται σε στρατηγικές περιοχές είναι τα ιδανικά μέσα για την καινοτομία δικτύων, όπως εφαρμογές προστιθέμενης αξίας και υπηρεσίες Internet of Things (IoT).

Υπάρχουν λοιπόν πολλές πιθανές λύσεις για επιτευχθεί η συνδεσιμότητα ανάλογα πάντα με το γεωγραφικό χώρο που μπορούν να καλύψουν. Για εξωτερικούς χώρους κατάλληλη είναι η χρήση των Macrocells ενώ σε δύσβατες περιοχές, βουνά, βραχώδη εδάφη, θάλασσες, ωκεανούς η κάλυψη γίνεται δορυφορικά με οποιαδήποτε προβλήματα προκαλούν στη ταχύτητα, το κόστος και την ποιότητα μπορεί να εμφανίζουν. Οι Microcells από την άλλη τοποθετούνται σε κέντρα πυκνοκατοικημένων περιοχών με σκοπό την αποσυμφόρηση του δικτύου των Macrocells. Επιπρόσθετα σε γήπεδα, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα όπου ο αριθμός των ατόμων είναι αρκετά μεγάλος τοποθετούνται Picocells. Τέλος σε μικρούς εσωτερικούς χώρους με σκοπό την συνεχή εξυπηρέτηση των αναγκών των παρεχόμενων υπηρεσιών τοποθετούνται Femtocells. [16]

### 1.3.1 Macrocells

Μια Macrocell είναι μία κυψέλη που χρησιμοποιείται σε κυψελοειδή δίκτυα με σκοπό την κάλυψη πρόσβασης κινητού δικτύου σε μια μεγάλη περιοχή. Μια Macrocell κυψέλη διαφέρει από μία Microcell προσφέροντας μεγαλύτερη κάλυψη αλλά και υψηλή απόδοση.

Η απόσταση κάλυψης μιας Macrocell ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα και το εύρος ζώνης των σημάτων, καθώς και τα φυσικά εμπόδια στην περιοχή. Οι κεραίες Macrocell, από την άλλη πλευρά, πρέπει να είναι κατάλληλα τοποθετημένες σε ιστούς, στέγες ή άλλες υπάρχουσες κατασκευές και σε ύψη για μια απρόσκοπτη και καθαρή θέα του περιβάλλοντος χώρου. Η απόδοσή του μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της αποδοτικότητας του πομποδέκτη. Δεδομένου ότι

αυτός ο τύπος κυψελών προσφέρει τη μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, τοποθετείται σε σταθμούς κατά μήκος των εθνικών οδών και των αγροτικών περιοχών. [43]

Κατά μέσο όρο η ισχύς για μια Macrocell κυψέλη κυμαίνεται από 20-40 Watts πράγμα που σημαίνει ότι απαιτούν σχετικά χαμηλή ισχύ και άρα αποτελούν μία οικολογική επιλογή. Επιπρόσθετα, το τυπικό ύψος μίας τέτοιας κυψέλης είναι 15-25 μέτρα και έχει την δυνατότητα να καλύψει απόσταση 25-40 χιλιομέτρων. Ακόμη ένα χαρακτηριστικό των Macrocells είναι ότι έχουν την δυνατότητα εξυπηρέτησης περισσότερων από 200 χρηστών per sector/per frequency την ίδια στιγμή.

Αντίστοιχη κυψέλη με την Macrocell αποτελεί και η Mini-macro έχοντας μεταξύ τους ελάχιστες διαφορές. Μία από αυτές είναι ότι λειτουργεί σε μια μόνο συχνότητα. Επιπλέον, το ύψος της κυμαίνεται στα 8-10 μέτρα και έχει μικρότερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με την Macrocell. [44]

### 1.3.2 Metrocells

Η κίνηση των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας διπλασιάζεται ετησίως. Οι μελλοντικές προβλέψεις για τη συνολική ζήτηση χωρητικότητας δεδομένων κινητής τηλεφωνίας υποστηρίζουν την αύξηση μεταξύ 20 και 50 φορών μέσα στα επόμενα 5 χρόνια. Η μεγαλύτερη ζήτηση τόσο σήμερα όσο και στο μέλλον επικεντρώνεται στις πυκνές αστικές περιοχές.

Οι Metrocells αποτελούν βάσεις κινητής τηλεφωνίας που βρίσκονται χωρίς περιορισμούς σε αστικές περιοχές. Μπορούν να τοποθετηθούν στις πλευρές των κτιρίων, σε εσωτερικούς χώρους, σε γήπεδα, στους κόμβους μεταφοράς και σε άλλους κοινόχρηστους χώρους. Παρέχουν εξαιρετική υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας, με πολύ υψηλές ταχύτητες και χωρητικότητα δεδομένων, επιλύοντας έτσι το πρόβλημα της αυξανόμενης ζήτησης για αυξημένη κίνηση δεδομένων.

Αυτές λοιπόν οι κυψέλες συνήθως ανήκουν και εγκαθίστανται από τον πάροχο του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και σχεδιάζονται συντηρούνται και διαχειρίζονται όπως οι Macrocells. Υπάρχουν τρία σημαντικά χαρακτηριστικά που ορίζουν μία Metrocell. Αρχικά, λειτουργεί σε αδειοδοτημένο φάσμα. Αυτό σημαίνει ότι σε αντίθεση με το Wi-Fi, όπου οι συχνότητες μοιράζονται με όποιον θέλει να τις χρησιμοποιήσει, ο φορέας εκμετάλλευσης δικτύου μπορεί να σχεδιάσει και να διαχειριστεί την κάλυψη πράγμα που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα και είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιβάλλοντα μεγάλης κυκλοφορίας. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό τους είναι ότι είναι αρκετά μικρότερες σε μέγεθος σε σχέση με τις Macrocell κυψέλες. Το μέγεθός τους είναι παρόμοιο

με ένα φορητό υπολογιστή ή tablet, αντί ενός μεγάλου πύργου κυττάρων ή ιστού. Η απρόσκοπτη μορφή τους κάνει πολύ πιο εύκολο να βρεθούν κατάλληλες τοποθεσίες. Τέλος, έχουν χαμηλότερη ισχύ και χωρητικότητα RF από μια Macrocell. Οι Metrocells χειρίζονται συνήθως 16 ή 32 ταυτόχρονες φωνητικές κλήσεις και μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα με τις υψηλότερες ταχύτητες, όμως σε πολύ μικρότερη ακτίνα σε σύγκριση με τις Macrocell. [45, 46]

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη των Metrocells αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία διαφορετική από αυτή για τις Macrocell, κατά την οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως οι διάφορες backhaul τεχνολογίες που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση των Metrocells, η σωστή κατανομή των πόρων και άλλοι. [46]



Figure 1.3: Metrocell [47]

### 1.3.3 Microcells

Μια Microcell κυψέλη σε ένα κινητό δίκτυο είναι μία συσκευή η οποία είναι συνδεδεμένη σε ένα πύργο και χρησιμοποιείται για την ενίσχυση ή την επέκταση της ισχύος του σήματος σε μια συγκεκριμένη μικρή περιοχή. Αρκετά σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται σε δημόσιες περιοχές. Διαφορετικοί φορείς κινητών δικτύων κατέχουν διαφορετικό εύρος από Microcells.

Οι Microcells κυψέλες λοιπόν χρησιμοποιούνται για να παρέχουν κάλυψη σε μια περιορισμένη περιοχή και συνήθως σε δημόσιες περιοχές όπως τα αεροδρόμια, τα εμπορικά κέντρα αλλά και άλλα μέρη στα οποία υπάρχει μεγάλος αριθμός χρηστών σε μία μόνο κεραία και η ενίσχυση του σήματος είναι απαραίτητη. Σε αντίθεση με την Macrocell, η Microcell παρέχει ενισχυμένο σήμα σε μικρές περιοχές ώστε πληθώρα χρηστών να μπορεί να χρησιμοποιεί το δίκτυο. Έτσι, η περιοχή είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα και ελέγχεται από τον πύργο αλλάζοντας την τιμή τάσης. Οι περιοχές υψηλής πυκνότητας εξυπηρετούνται με την τοποθέτηση περισσότερων κυψελών στην περιοχή για τη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας. [50]



Figure 1.4: Microcell [51]

### 1.3.4 Picocells

Μία Picocell είναι ένας μικρός κυψελωτός σταθμός βάσης και αποτελεί μία επιλογή για ένα σύστημα κατανομημένης κεραίας. Χρησιμοποιείται για την βελτίωση του σήματος του κινητού δικτύου και για την επέκταση ασύρματων υπηρεσιών σε εσωτερικούς χώρους κτιρίων ή σε άλλες περιοχές που δεν είναι προσβάσιμες από δίκτυα που εξυπηρετούνται από μεγαλύτερους πύργους



κυψελών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για φωνητική σύνδεση και σύνδεση δεδομένων σε εσωτερικούς χώρους.

Διάφοροι τύποι τηλεπικοινωνιακών δικτύων χρησιμοποιούν Pico cell για την παροχή υπηρεσιών σε περισσότερους χρήστες. Κατά κάποιον τρόπο, αυτές οι ρυθμίσεις είναι σαν τα τοπικά δίκτυα (Local Area Network LAN) που εξυπηρετούνται από μεμονωμένους ασύρματους δρομολογητές, όπου ένας σταθμός Pico cell λαμβάνει ένα σήμα από ένα μεγαλύτερο δίκτυο και το διανέμει σε πολύ τοπικό εύρος. Τέλος, οι Pico cells διατηρούνται και λειτουργούν από έναν μεγαλύτερο πάροχο δικτύου. [49]

Table 1.1: Πίνακας Κυψελών [48]

Cell type	Typical cell size	Data rate limitation
Macro	1-30km	Propagation
Micro	200m-2km	Capacity and propagation
Pico	4-200m	Capacity and propagation
Femto	10m	Broadband connection and handset

Αν και οι Pico cells και οι Femto cells μπορεί να φαίνονται παρόμοιες, μία Pico συνδέεται με ένα ελεγχτή σταθμού βάσης για να επεκτείνει την κάλυψη σε περιοχές που δεν υπάρχει κάλυψη. Οι Femto cells μπορεί να περιλαμβάνουν κάποια μορφή ελεγχτή σταθμού βάσης και είναι πιο έξυπνες.

### 1.3.5 Femto cells

Μια Femto cell κυψέλη είναι ένας μικρός κυψελοειδής σταθμός βάσης σχεδιασμένος ώστε να χρησιμοποιείται κυρίως εντός μίας οικίας ή μίας μικρής επιχείρησης. Η σύνδεση μεταξύ της Femto cell κυψέλης και του παρόχου γίνεται μεταξύ μιας ευρυζωνικής σύνδεσης και έτσι ο πάροχος έχει την δυνατότητα να επεκτείνει την κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, ειδικά όπου η πρόσβαση είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη.

Μια Femto cell παρουσιάζει βελτιώσεις στο δίκτυο από άποψη καλύψεως και χωρητικότητας, κυρίως για εσωτερικούς χώρους έχοντας παράλληλα θετικές επιπτώσεις στις κεφαλαιουχικές και λειτουργικές δαπάνες. Με τον τρόπο αυτό οι χρήστες έχουν καλύτερη κάλυψη δικτύου, ποιότητα φωνής και χρόνο ζωής

μπαταρίας. Έτσι λοιπόν, η συσκευή επικοινωνεί με το κινητό τηλέφωνο και μετατρέπει τις φωνητικές κλήσεις σε πακέτα φωνής μέσω Internet Protocol (IP) (Voice over Internet Protocol (VoIP)). Τα πακέτα μεταδίδονται στη συνέχεια μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης στους διακομιστές του φορέα εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. [17]

Οι Femtocells είναι συμβατές με συσκευές κινητής τηλεφωνίας όπως WiMax, CDMA2000, Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) και χρησιμοποιούν το δικό τους φάσμα παρόχων για την λειτουργία τους. Οι Femtocells που χρησιμοποιούνται στις επιχειρήσεις μπορούν να έχουν περισσότερους από 16 ενεργούς χρήστες ενώ αυτές που χρησιμοποιούνται από τον καταναλωτή τον ίδιο έχουν την δυνατότητα υποστήριξης μέχρι 4 ενεργών χρηστών.

Καθώς οι εταιρείες παροχής κινητών δικτύων έχουν ως σκοπό την συνεχή ανάπτυξή τους τόσο αναγκαία είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών (Quality of Service (QoS)). Όπως έχει αναφερθεί η Femtocell ή προσωπικός σταθμός βάσης πραγματοποιείται με την τοποθέτηση ενός σταθμού βάσης στον χώρο ώστε να έχει καλύτερη ενδοοικιακή κάλυψη του χρήστη από τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας. Έτσι η κινητή συσκευή αναγνωρίζει την Femtocell και οι συνδέσεις γίνονται μέσω του οικιακού δικτύου (Internet Service Provider (ISP)) και στην περίπτωση αυτή το κινητό λειτουργεί σαν τυπικό ασύρματο τηλέφωνο. Ο χρήστης λοιπόν είναι ακόμη συνδεδεμένος αλλά έχει ελευθερώσει τους πόρους της δημόσιας Macrocell επιτρέποντας έτσι την εξυπηρέτηση περισσότερων χρηστών μέσω των νέων διαθέσιμων πόρων.



Figure 1.5: Femtocell [52]

Στο σημείο αυτό αναγκαίος είναι ο ορισμός του backhaul network το οποίο σε ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών αποτελεί το κομμάτι αυτό που περιέχει όλους τους διαθέσιμους συνδέσμους μεταξύ του core network ή backbone με τα υποδίκτυα. Οι κινητές συσκευές παραδείγματος χάρη επικοινωνούν με ένα κυψελοειδή πύργο και αποτελούν ένα τοπικό υποδίκτυο, η σύνδεση του πύργου αυτού με το υπόλοιπο δίκτυο γίνεται με ένα backhaul σύνδεσμο προς τον πυρήνα.

Οι κινητές λοιπόν συσκευές χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, για τον λόγο αυτό η Femtocell δεν έχει την δυνατότητα να μεταδίδει σε περιοχές όπου ο πάροχος δεν διαθέτει υπηρεσίες ή δεν έχει δικαίωμα χρήσης της συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων. Έτσι η γεωγραφική τοποθεσία της Femtocell έχει ιδιαίτερη σημασία. Αυτός είναι και ένας από τους σημαντικότερους λόγους που οι Femtocells διαθέτουν Global Positioning System (GPS) ώστε ο πάροχος να μπορεί οποιαδήποτε στιγμή αν γνωρίζει την τοποθεσία του χρήστη αλλά και για υπηρεσίες εκτάκτου ανάγκης. Ακόμη ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί η εξακρίβωση της τοποθεσίας αποτελεί και η χρήση των διευθύνσεων IP. [18]

### 1.3.6 Πλεονεκτήματα Femtocells

Οι Femtocells παρέχονται από τις εταιρείες κινητής τηλεφωνίας για ενδοοικιακή ή ενδοεπιχειρησιακή χρήση καταλαμβάνοντας ελάχιστο χώρο όσο δηλαδή ένα μόντεμ και συνδέεται μέσω μιας ευρυζωνικής σύνδεσης. Η Femtocell συνδέεται στη γραμμή του παρόχου και προσφέρει ενισχυμένη κάλυψη σε 30-50 m. Επιπλέον η τοποθέτηση μίας Femtocell αποτελεί μια πολύ απλή διαδικασία καθώς είναι plug and play δηλαδή μία απλή σύνδεση με παροχή ρεύματος, έτσι κάθε χρήστης μπορεί εύκολα να την τοποθετήσει. Ο χρήστης θα πρέπει εκ των προτέρων να έχει ορίσει ποιοι αριθμοί θα έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν στη κυψέλη του μέσω μίας διεπαφής που διαθέτει ο πάροχος. Όταν λοιπόν οι αριθμοί αυτοί βρίσκονται στη ακτίνα της κυψέλης αλλάζουν αυτομάτως απο την Microcell στην Femtocell. [18]

Επομένως η χρήση Femtocell προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων για τον χρήστη. Αρχικά αυξάνει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για τον χρήστη πιο συγκεκριμένα μειώνεται το block error rate καθώς ο χρήστης είναι πολύ κόντα στην κυψέλη. Επιπλέον προσφέρει καλύτερη ενδοοικιακή κάλυψη καθώς η τοποθέτηση της κυψέλης αυτής στο εσωτερικό της οικίας μειώνει την απώλεια στη σύνδεση κατά 10-15 db. Επιπρόσθετα, μειώνει την κατανάλωση ισχύος διότι ο χρήστης δε χρειάζεται να μεταδίδει δεδομένα με υψηλή ισχύ καθώς η Femtocell

είναι σε μικρή απόσταση από τον χρήστη. Αυτό σημαίνει χαμηλότερη κατανάλωση ρεύματος από την μπαταρία και ταυτόχρονα χαμηλότερη ηλεκτρομαγνητική επιβάρυνση για τον χρήστη. Ακόμη επιφέρει βελτιωμένη ποιότητα φωνής καθώς οι κωδικοποιητές φωνής μεταφέρουν δεδομένα με υψηλότερες ταχύτητες. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της χρήσης Femtocell αποτελεί η σημαντική βελτίωση της ασφάλειας του δικτύου. Επειδή η σύνδεση της κυψέλης γίνεται μέσω του δημοσίου ISP και η μεταφορά των δεδομένων δρομολογείται προς το ιδιωτικό κινητό δίκτυο κάθε νέος χρήστης θα πρέπει να έχει πιστοποιητικό αυθεντικότητας.

Έκτός όμως από τον χρήστη πολλά είναι και τα πλεονεκτήματα για τους παρόχους του δικτύου. Η αύξηση των εσόδων τους είναι ένα από αυτά καθώς με την χρήση των Femtocells έχουν την δυνατότητα εξυπηρέτησης επιπλέον χρηστών. Συγκεκριμένα οι χρήστες που συνδέονται προς το ιδιωτικό Femtocell δίκτυο απελευθερώνουν πόρους και με τον τρόπο αυτό άλλοι χρήστες μπορούν να συνδέονται στις δημόσιες Macrocells. Επίσης, προσφέρουν βελτιωμένη εσωτερική κάλυψη αφού η τοποθέτηση της Femtocell εντός ενός χώρου επεκτείνει την περιοχή την οποία ο πάροχος καλύπτει και τα επιπλέον 10-15 dB που απαιτούνται για να διαπεραστούν οι τοίχοι των κτιρίων και έτσι τα dB αυτά μπορούν να αφιερωθούν στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς δεδομένων. Τέλος έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν καλύτερες υπηρεσίες στο χρήστη λόγω της βελτιωμένης ενδοοικιακής κάλυψης και των υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. [19, 20]

## 1.4 Αρχιτεκτονική Femtocell

Σύμφωνα με τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες Wideband Code-division Multiple Access (WCDMA), CDMA2000, Long Term Evolution (LTE) και WiMAX η αρχιτεκτονική των Femtocells αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία. Αρχικά, υπάρχει τα σημεία πρόσβασης της Femtocell τα οποία διαθέτουν λειτουργίες ελέγχου των πόρων και επιτρέπουν αυτόνομη ρύθμιση και αυτοβελτίωση. Οι Femtocells χρησιμοποιούν σύνδεση ευρυζωνικής IP όπως καλώδια και μόντεμ. Στη συνέχεια πρέπει να αναφερθεί η Femtocell gateway στην οποία συγκεντρώνεται ένας μεγάλος αριθμός συνδέσεων IP από ένα μεγάλο αριθμό από Femtocells και εκεί πιστοποιείται η αυθεντικότητα τους και συνδέονται με τα κεντρικά σημεία ελέγχου του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Τέλος το σύστημα διαχείρισης και λειτουργίας το οποίο επιτρέπει ανανέωση του λογισμικού και διαγνωστικούς ελέγχους.

Η σημαντικότερη διεπαφή στην αρχιτεκτονική είναι αυτή ανάμεσα στο σημείο πρόσβασης της Femtocell και της Femtocell gateway. Για τις Femtocells που χρησιμοποιούν τεχνολογία WCDMA η διεπαφή αυτή ορίζεται ως διεπαφή Iuh. Στην αρχιτεκτονική αυτή η Femtocell gateway βρίσκεται μεταξύ της Femtocell και του πυρήνα του δικτύου. Κάθε Femtocell επικοινωνεί με την Femtocell gateway και αυτή με την σειρά της με το MSC. Το πρότυπο CDMA2000 διαφοροποιείται υιοθετώντας το πρωτόκολλο Session Initiation Protocol (SIP) για την σύνδεση της Femtocell με το Femtocell Convergence Server (FCS). Οι κλήσεις λοιπόν δρομολογούνται μέσω του FCS όπου λειτουργεί αντίστοιχα με ένα MSC.

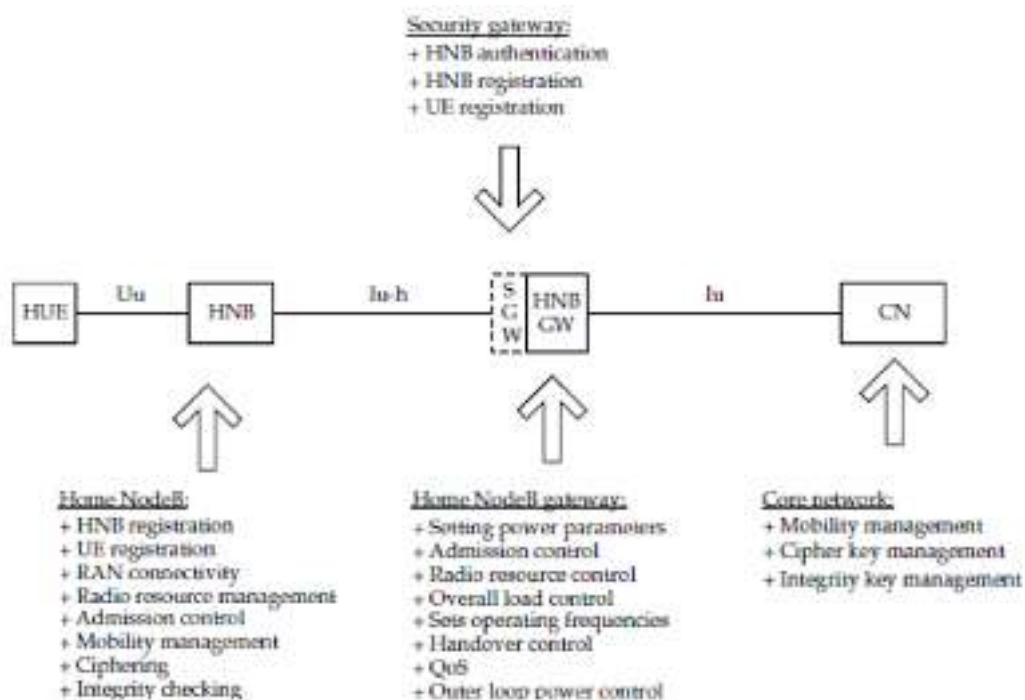


Figure 1.6: Αρχιτεκτονική Femtocell [18]

Στην πύλη λοιπόν ασφαλείας γίνεται καταχώρηση του HNB, του UE και έλεγχος αυθεντικότητας του HNB. Στο Home NodeB υπάρχει καταχώρηση του HNB και του UE, σύνδεση στο Radio Access Network (RAN), διαχείριση ραδιοπόρων, έλεγχος εισόδου, διαχείριση κινητικότητας, κρυπτογράφηση και

αποκρυπτογράφηση, έλεγχο ακεραιότητας, χρονοδραμολόγηση και έλεγχος φόρτου. Στην πύλη το Home NodeB διαθέτει καθορισμό παραμέτρων ισχύος, έλεγχο ειδόσου, έλεγχο ραδιοπόρων, συνολικό έλεγχο φόρτου, καθορισμό των συχνοτήτων λειτουργίας, έλεγχο παράδοσης(handover control), έλεγχο ποιότητας παροχής υπηρεσιών (QoS), εξωτερικό έλεγχο βρόγχου ισχύος. Τέλος, στον πυρήνα του δικτύου γίνεται διαχείριση κινητικότητας, διαχείριση κλειδιών κρυπτογράφησης, αποκρυπτογράφησης, διαχείριση κλειδιών ακεραιότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# 5η Γενιά Κινητών Δικτύων (5G)

### 2.1 Εισαγωγή

Οι κινητές επικοινωνίες είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένες με την καθημερινότητα του ανθρώπου για αυτό και ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσονται είναι εμφανώς μεγαλύτερος σε σχέση με εκείνον του παρελθόντος. Τα πρώτα κυψελωτά δίκτυα που δημιουργήθηκαν είναι τα κυψελωτά δίκτυα πρώτης γενιάς (First Generation cellular technology (1G)) και εμφανίστηκαν το 1980. Στόχος τους ήταν μέσω καναλιών αναλογικής σηματοδότησης να προσφέρουν δυνατότητες φωνητικής συνομιλίας ανάμεσα στους χρήστες τους. Η ανάγκη όμως για περισσότερα κανάλια και νέες υπηρεσίες σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας μας οδήγησαν στα κυψελωτά δίκτυα δεύτερης γενιάς (Second Generation cellular technology (2G)). Τα συστήματα σε αυτή τη γενιά χρησιμοποίησαν μεταγωγή πακέτου για πρόσβαση σε δεδομένα και έτσι νέες υπηρεσίες εμφανίστηκαν όπως η δυνατότητα αποστολής μηνύματος. Όμως η ανάπτυξη της ανάγκης για πρόσβαση στο διαδίκτυο κατέστησε αναγκαία την ανάπτυξη μίας κινητής τεχνολογίας που να επιτρέπει την σύνδεση σε αυτό. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία των συστημάτων τρίτης γενιάς (Third Generation cellular technology (3G)). Συστήματα τα οποία επιτρέπουν την ευζωνική διαχείριση δεδομένων δίνοντας μεγαλύτερη ευελιξία στις φωνητικές συνδιαλέξεις καθώς και κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Σήμερα, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (Fourth Generation cellular technology(4G)). Η εμφάνιση των smart phones και των

tablets επέφερε την ανάγκη για ανάπτυξη και χρήση πολυμεσικών εφαρμογών που δεν γινόταν να υποστηριχτούν επαρκώς από τα δίκτυα τρίτης γενιάς. Πλέον οι χρήστες χρησιμοποιούν όλο και πιο απαιτητικές εφαρμογές γεγονός που μεταφράζεται σε ανάγκη για αποστολή δεδομένων με μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης σε επαρκές χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό η μετάβαση στα δίκτυα πέμπτης γενιάς (Fifth Generation cellular technology (5G)) και επομένως η υποστήριξη ακόμα πιο απαιτητικών εφαρμογών, είναι ξεκάθαρη. [21]



Figure 2.1: Εξέλιξη Κινητών Δικτύων [53]



## 2.2 4η Γενιά Κινητών Δικτύων (4G)

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς δεν μπορούσαν να καλύψουν επαρκώς τις απαιτήσεις των χρηστών και έτσι υπήρξε μετάβαση στα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Τα 4G σχεδιάστηκαν, ώστε να χρησιμοποιούν IP σε όλες τους τις υπηρεσίες, σε συνδυασμό με τη χρήση ανεπτυγμένων τεχνικών πολυπλεξίας, και συγκεκριμένα Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) όπου είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης ψηφιακών δεδομένων σε πολλαπλές συχνότητες φορέων [23], αλλά και Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO) όπου είναι μια μέθοδος για τον πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας μιας ραδιοζεύξης χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές εκπομπής και λήψης για την εκμετάλλευση της πολλαπλής διάδοσης [22]. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι τα 4G να προσφέρουν ρυθμούς μετάδοσης που ξεκινούν από 100Mb/s και φτάνουν και το 1Gb/s, μικρότερη καθυστέρηση στις διαδραστικές εφαρμογές, μεγαλύτερη φασματική αποδοτικότητα και εξυπηρέτηση των χρηστών ανεξαρτήτως ώρα αιχμής χωρίς να υποβαθμίζονται οι υπηρεσίες που προσφέρουν(QoS).

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των 4G είναι η ανοικτή αρχιτεκτονική του. Συγκεκριμένα ένα τερματικό έχει τη δυνατότητα να συνδέεται απρόσκοπτα σε τοπικά υψηλής ταχύτητας δίκτυα όταν αυτά είναι διαθέσιμα και οι συνθήκες ευνοϊκές. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι η προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση, υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα άμεσης αλλαγής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σύμφωνα με τις αλλαγές που μπορεί να υπάρξουν στις συνθήκες του καναλιού. Επιλέγεται η βέλτιστη διαμόρφωση και κωδικοποίηση κάθε φορά. Επιπλέον, η υιοθέτηση των τεχνικών MIMO και OFDM όπου σε συνεργασία βελτιστοποιούν το κανάλι και παρέχουν γρήγορη και αξιόπιστη σύνδεση. Επιπρόσθετα, τα 4G υιοθέτησαν αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα για την υποστήριξη της ευρυζωνικότητας, δηλαδή η δικτύωση έγινε πολύ πιο ανοιχτή και πλέον όλες οι αρχιτεκτονικές συνεργάζονταν σε ένα ευρύτερο πλαίσιο δικτύου με σκοπό την απρόσκοπτη σύνδεση των τερματικών στο δίκτυο με παράλληλα υπηρεσίες ευρυζωνικότητας υψηλού επιπέδου. Τέλος, υπήρξε αναβάθμιση της χωρητικότητας από πλευράς εξυπηρέτησης συνδρομητών. Η βελτιστοποίηση της χρήσης του καναλιού και ο διαμοιρασμός των πόρων του δικτύου με δυναμικό τρόπο οδήγησαν στη εξυπηρέτηση ακόμα μεγαλύτερου όγκου συνδρομητών. [24]

Παρόλο που το σημερινό δίκτυο 4G καλύπτει σε μεγάλο ποσοστό τις απαιτήσεις των χρηστών, υπάρχει εμφανής τάση για πιο απαιτητικές υπηρεσίες που δεν γίνεται να υποστηριχθούν ικανοποιητικά από το παρόν δίκτυο.

### 2.2.1 3GPP Long Term Evolution LTE

Το LTE είναι το όνομα που δόθηκε στο επίπεδο τεχνολογιών που αναπτύχθηκε από την 3GPP για να αντεπεξέλθει στην συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση διέλευσης της αγοράς. Το LTE αποτέλεσε την εξέλιξη των συστημάτων δεύτερης και τρίτης γενιάς, ενώ ταυτόχρονα υπήρξε και το επόμενο βήμα για την επίτευξη και παροχή ασύρματων ρυθμών μεταφοράς δεδομένων. Είχε λοιπόν ως στόχο την υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης, με μέγιστη τιμή για το Downlink 100Mbps και για το Uplink 50Mbps. Επιπλέον είχαν την δυνατότητα εξοικονόμησης του εύρους ζώνης, για το λόγο αυτό οι ρυθμοί αυτοί υλοποιούνταν μέσα σε εύρος ζώνης 20MHz. Έτσι λοιπόν προσέφεραν ευελιξία φάσματος με συνύπαρξη των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών αλλά και μειωμένη πολυπλοκότητα και κόστος. Για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί ήταν αναγκαίο να γίνει ένας συνδυασμός μιας νέας αρχιτεκτονικής συστήματος μαζί με μια ενδυναμωμένη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι λειτουργιών μέσα σε ένα κυψελωτό σύστημα. Βασισμένοι σε αυτούς μπορεί να χωριστεί το δίκτυο σε δύο βασικά μέρη, το τμήμα ασύρματης πρόσβασης στο δίκτυο και το τμήμα πυρήνα του δικτύου. Το Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης για τα LTE ονομάζεται Evolved UMTS Radio Access Network (E-UTRAN) και βελτίωσε σημαντικά τους ρυθμούς διέλευσης των τελικών χρηστών, την χωρητικότητα των τομέων κυψελών αλλά και να μειώσει της καθυστέρησης. Ακόμη ο πυρήνας δικτύου είναι πρακτικά η σταδιακή εξέλιξη των πυρήνων που χρησιμοποιήθηκαν και στα δίκτυα τρίτης γενιάς. Στην προκειμένη περίπτωση καλύπτει μόνο το τμήμα μεταγωγής πακέτων και ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC). [67]

### 2.2.2 LTE Advanced

Αν και τα δίκτυα LTE κατάφεραν να επιτύχουν υψηλή ποιότητα υπηρεσιών παρέχοντας την δυνατότητα για ανάπτυξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης πληροφοριών δεν αποτέλεσαν δίκτυα τέταρτης γενιάς καθαρά. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε η εξέλιξη των δικτύων LTE η οποία και πήρε το όνομα LTE Advanced. Όπως γίνεται αντιληπτό τα δίκτυα LTE Advanced χρησιμοποίησαν βασικές δομές και τεχνολογίες των δικτύων LTE αλλά ταυτόχρονα τις συνδύασαν με καινοτόμες τεχνικές για την βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης τους είναι για την κίνηση downlink 1Gbps, και για την κίνηση uplink 500Mbps. Επιπλέον, το εύρος ζώνης μετάδοσης τους είναι μεγαλύτερο από περίπου 70MHz στην κίνηση downlink και 40MHz στην

κίνηση uplink. Επιπρόσθετα, ο ρυθμός διέλευσης ακραίου χρήστη είναι δύο φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στα LTE, όπως και ο μέσος ρυθμός διέλευσης χρήστη ο οποίος είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερος από αυτόν των LTE δικτύων. Τέλος η χωρητικότητα (Απόδοση Φάσματος) είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή των LTE ενώ η φορητότητα παραμένει στα ίδια επίπεδα με τα LTE. [67]

Παρόλο που το σημερινό δίκτυο 4G καλύπτει σε μεγάλο ποσοστό τις απαιτήσεις των χρηστών, υπάρχει εμφανής τάση για πιο απαιτητικές υπηρεσίες που δεν γίνεται να υποστηριχθούν ικανοποιητικά από το παρόν δίκτυο.

### 2.3 5η Γενιά Κινητών Δικτύων (5G)

Μετά από έρευνες και μελέτες, ακόμα και δοκιμαστικές τοποθετήσεις κεραιών 5G στο άμεσο μέλλον οι χρήστες θα εξυπηρετούνται πλέον από τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στόχος αυτής της γενιάς κινητών δικτύων είναι η επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης από αυτούς που δίνει το υπάρχον δίκτυο. Συγκεκριμένα αύξηση του συνολικού αριθμού δεδομένων αλλά και της ποσότητας των δεδομένων που μπορεί να εξυπηρετήσει το δίκτυο, ρυθμούς μετάδοσης τουλάχιστον 100Mbps για το μεγαλύτερο αριθμό των χρηστών που χρησιμοποιούν το δίκτυο αλλά και μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (Peak rate) να αγγίζει τα δεκάδες Gbps.

Άλλη μία πρόκληση των 5G είναι ο χρόνος απόκρισης (Latency). Στα 4G δίκτυα ο χρόνος που καθυστερεί ένα πλαίσιο για να πάει από την πηγή το δέκτη μπορεί να αγγίζει τα 15ms. Ενώ τα δίκτυα της νέας γενιάς προσφέρουν χρόνο του 1ms. [25]



Figure 2.2: 4G VS 5G [54]

Επίσης όσον αφορά το κομμάτι της ενέργειας τα 5G προσφέρουν μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, δηλαδή των Joules που χρειαζόμαστε για να στείλουμε ένα bit πληροφορίας, μέχρι και 100 φορές. Επιπλέον οι κυψέλες έχουν την δυνατότητα να καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες μέσα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αξιοποιώντας για παράδειγμα την ηλιακή ενέργεια, μειώνοντας έτσι τόσο το κόστος όσο και την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ζημιογόνους ρύπους. Ακόμη σημαντική είναι και η μείωση του κόστους λειτουργίας του δικτύου με τη χρήση νέων τεχνολογιών, όπως mmWave, καθιστώντας τις μικρές κυψέλες οικονομικά και ενεργειακά αποδοτικότερες σε σχέση με τις μακροκυψέλες. Μικρές κυψέλες σημαίνει επίσης και μικρότεροι σταθμοί βάσης. Δεν υπάρχει λοιπόν λόγος ένας σταθμός βάσης να κοστίζει περισσότερο από ότι μία συσκευή του χρήστη ή ένας κόμβος για Wi-Fi. Μείωση του κόστους υπάρχει και σε περίπτωση υιοθέτησης του Cloud-RAN, εφόσον η κεντροποίηση της βασικής ζώνης επεξεργασίας σημαίνει λιγότερη καταναλισκόμενη ενέργεια.

Ακόμη ένα πλεονέκτημα του 5G αποτελεί η επίτευξη καλύτερης φασματικής αποδοτικότητας (Spectral Efficiency) με τη χρήση πιο ενεργών κόμβων, ανά συσκευή, περιοχή και συχνότητα. Τα 5G επωφελούνται από την τεχνολογία MIMO σε συνδυασμό με το OFDM και με το TDMA στην χρήση των συχνοτήτων. Τέλος, στα 5G δίκτυα εξετάστηκαν τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται και άλλες συχνότητες (mmWave) πέρα από τις υπάρχουσες αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το φάσμα που χρησιμοποιείται και κατ' επέκταση, το εύρος ζώνης και την ικανότητα του δικτύου να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες μια δεδομένη χρονική στιγμή. Επιπλέον στα 5G οι σταθμοί βάσης απέχουν λιγότερο από 100m σχηματίζοντας Picocells ή βρίσκονται ακόμα πιο κοντά, σε απόσταση τέτοια ώστε να μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας Wi-Fi, σχηματίζοντας Femtocells. Έτσι αυξάνεται και ο αριθμός που μπορούν να εξυπηρετήσουν μια δεδομένη χρονική στιγμή. [25]

## 2.4 Τεχνολογίες 5G

### 2.4.1 Multiple-Input and Multiple-Output MIMO

Με σκοπό τα συστήματα της πέμπτης γενιάς δικτύων να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των χρηστών τους, έπρεπε η MIMO τεχνολογία να πάει ένα βήμα παραπέρα και έτσι διερευνήθηκε η εκδοχή να εξοπλίζεται κάθε BSs με μια σειρά από κεραίες, πολύ περισσότερες από τον αριθμός των ενεργών χρηστών, τοπο-

θετώντας τον αριθμό των κεραιών ανά σταθμό βάσης σε εκατοντάδες. Έτσι η κατάληξη τους ήταν τα συστήματα κεραιών ευρείας κλίμακας πιο γνωστά πλέον ως massive MIMO. [26]



Figure 2.3: Massive MIMO Antenna [56]

#### 2.4.2 Πλεονεκτήματα MIMO

Χρησιμοποιώντας λοιπόν την massive MIMO τεχνολογία μπορεί να επιτευχθεί τεράστια βελτίωση στη φασματική και ενεργειακή απόδοση, χωρίς να είναι αναγκαία η αυξημένη πυκνωση των σταθμών βάσης. Με τον τρόπο αυτό δίνεται 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 εξαλείφονται. Σημαντικά είναι τα πλεονεκτήματα που εμφανίζονται με την χρήση της τεχνολογίας MIMO και στον τομέα της ενέργειας καθώς οι κεραιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό για να αυξήσουν το κέρδος από τα μεταδιδόμενα σήματα. Αυτό σημαίνει ότι εκπέμπουν λιγότερη ενέργεια κατά τη μετάδοση δεδομένων, καθιστώντας έτσι ένα πιο ενεργειακά αποδοτικό σύστημα. Τέλος, το ίδιο πράγμα που προσφέρει την ενεργειακή απόδοση στα MIMO, επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό μεμονωμένων χρηστών. Καθώς οι δοκοί της κεραιάς είναι συγκεντρωμένοι για να παράγουν υψηλή απόδοση, τα πλάτη της δέσμης τους μειώνονται. Έτσι, ο πύργος πρέπει να εντοπίζει κάθε χρήστη με μία περιορισμένη δέσμη σημάτων. Αυτός ο εντοπισμός προσφέρει στους χρήστες μια καλύτερη και πιο αξιόπιστη σύνδεση από τα σήματα ευρείας περιοχής που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα. [55]

### 2.4.3 Network Function Virtualization NFV

Το Network Function Virtualization (NFV) είναι μια τεχνολογία των 5G η οποία υλοποιεί λειτουργίες του δικτύου μέσω τεχνικών εικονικοποίησης του λογισμικού και με την βοήθεια του υλικού. Αποσυνδέει λοιπόν τις λειτουργίες του δικτύου από τις συσκευές του υλικού και τις αναθέτει σε μια εφαρμογή λογισμικού που βασίζεται και τρέχει υποδομή πληροφορικής, switches, συσκευών αποθήκευσης και servers. Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του NFV είναι η διαθεσιμότητα του τόσο στα ενσύρματα όσο και στα ασύρματων δίκτυα χωρίς να χρειάζεται να λάβει χώρα κάποια εγκατάσταση νέου εξοπλισμού. [27]

Το NFV δίνει την ευκαιρία για ένα πιο ευέλικτο σχεδιασμό του δικτύου. Αρχικά έχει την δυνατότητα να προσφέρει διαχωρισμό του λογισμικού από το υλικό ο οποίος επιτρέπει στο λογισμικό να εξελίσσεται ανεξάρτητα από το hardware, και το αντίστροφο. Ακόμη επιτρέπει ευέλικτη υλοποίηση των λειτουργιών του δικτύου καθώς μπορεί αυτόματα να υλοποιήσει λογισμικό λειτουργιών δικτύου έχοντας ένα σύνολο από πόρους υλικού, η οποία μπορεί να τρέξει διαφορετικές λειτουργίες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. [27, 28]

### 2.4.4 Αρχιτεκτονική NFV

Η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας NFV αποτελείται από τέσσερα βασικά πλαίσια τον orchestrator, τον NFV manager, το virtualization layer και τον virtualized infrastructure manager. Ο orchestrator είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των πόρων λογισμικού και την προσφορά δικτυακών υπηρεσιών από την εικονικοποιημένη υποδομή του hardware. Ο NFV manager είναι υπεύθυνος για την συγκεκριμενοποίηση, την κλιμάκωση, τον τερματισμό και για τις ενημερώσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός NFV. Το virtualization layer αφαιρεί τους φυσικούς πόρους και τους τοποθετεί στις εικονικοποιημένες υποδομές. Τέλος ο virtualized infrastructure manager χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της αλληλεπίδρασης με τις συναρτήσεις, την εικονικοποίηση και τη διαχείριση των πόρων του δικτύου. Συγκεκριμένα μπορεί να διαχειρίζεται την συνδεσιμότητα των Virtual Machines (VMs) στο δίκτυο και αναλύει την αιτία διαφόρων ζητημάτων απόδοσης. [28]

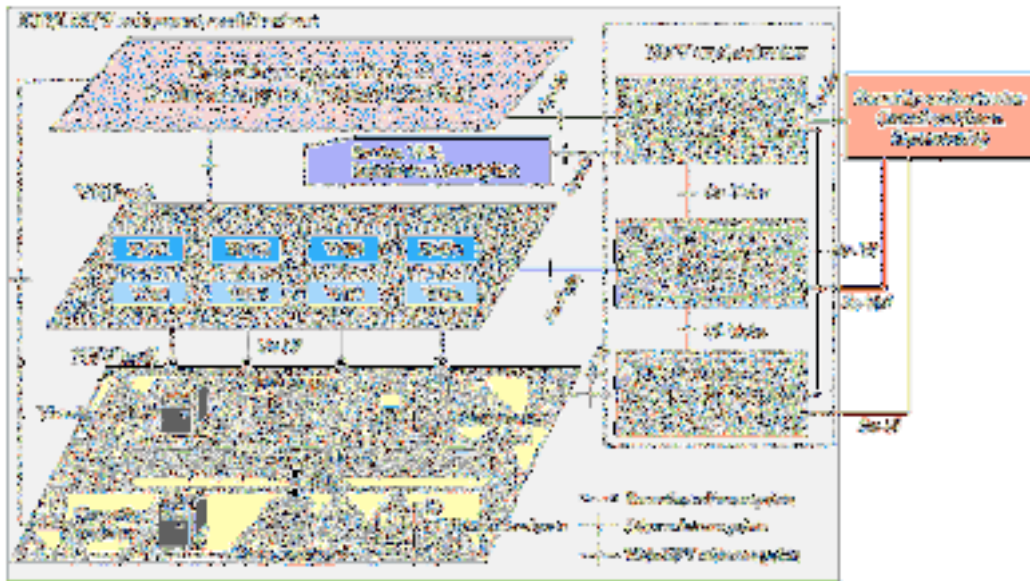


Figure 2.4: Αρχιτεκτονική NFV [57]

Σύμφωνα και με το σχήμα 2.4 είναι κατανοητό ότι απαραίτητοι παράγοντες για υλοποίηση του NFV είναι οι βιομηχανικά τυποποιημένοι servers και οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για το cloud computing. Χρησιμοποιώντας λοιπόν αυτούς τους servers γενικής χρήσης μπορεί να μειωθεί ο αριθμός των διαφορετικών αρχιτεκτονικών υλικού στα δίκτυα των διαχειριστών, και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του υλικού, ενώ οι τεχνολογίες εξελίσσονται. [28, 27]

#### 2.4.5 Εικονικοποίηση του πυρήνα του κινητού δικτύου

Τα δίκτυα πυρήνα κινητής επικοινωνίας έχουν τεράστια ποικιλία ακριβού και ιδιόκτητου εξοπλισμού, καθώς και άκαμπτα πρωτόκολλα σηματοδότησης. Το Cloud (EPC) μπορεί δυναμικά να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα εικονικοποιώντας το δίκτυο πυρήνα της κινητής επικοινωνίας, ώστε να ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς. [28]

Το EPC περιλαμβάνει το Packet Data Network Gateway (P-GW) το οποίο μπορεί να διασυνδέει το UE με το εξωτερικό packet data δίκτυο αλλά και φιλτράρει τα IP πακέτα που χρησιμοποιεί ο χρήστης στο downlink. Ένα ακόμη στοιχείο του EPC είναι το Serving Gateway (S-GW) το οποίο μεταφέρει IP πακέτα χρήστη και ταυτόχρονα αποτελεί και mobility anchor όταν το UE

μετακινείται μεταξύ διαφορετικών eNodeBs. Επιπλέον περιλαμβάνει το Mobility Management Entity (MME) το οποίο πραγματοποιεί την ταυτοποίηση του χρήστη αλληλοεπιδρώντας με το Home Subscriber Service (HSS), χειρίζεται τη διαχείριση φορέων ενώ, επιλέγει SGW όταν απαιτείται επαναπροσδιορισμός Core Network (CN). Το HSS περιέχει πληροφορίες των Packet Data Networks (PDNs) στα οποία ένα UE μπορεί να συνδεθεί, όπως το όνομα του σημείου πρόσβασης αλλά και στοιχεία συνδρομής του χρήστη όπως επίσης και πληροφορίες για το MME με το οποίο αλληλοεπιδρά το UE. [59]

#### 2.4.6 Software-Defined Networking (SDN)

Το Software-Defined Networking (SDN) είναι μία έξυπνη αρχιτεκτονική που έχει στόχο τον προγραμματισμό του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα η κύρια ιδέα πίσω από το SDN είναι να μετακινηθεί το επίπεδο ελέγχου έξω από τους switches και να γίνεται ο έλεγχος των δεδομένων εξωτερικά, μέσω μιας λογικής οντότητας λογισμικού που ονομάζεται ελεγκτής. Ο ελεγκτής έχει την δυνατότητα να εκτελέσει τις λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την εύκολη τροποποίηση της συμπεριφοράς του δικτύου μέσω του κεντρικοποιημένου επιπέδου ελέγχου. [29]

Η αρχιτεκτονική των δικτύων SDN περιγράφεται από μία δομή τριών επιπέδων: επιπέδου υποδομής, επιπέδου ελέγχου και επιπέδου εφαρμογών. Το επίπεδο υποδομής είναι το επίπεδο αυτό στο οποίο βρίσκεται όλο το υλικό και υλοποιείται η φυσική διασύνδεση του. Στις συσκευές υλικού εκτελείται το λογισμικό, το οποίο παρέχει μία διεπαφή ελέγχου του επιπέδου δεδομένων. Το επίπεδο ελέγχου αποτελεί το πιο σημαντικό επίπεδο της αρχιτεκτονικής αυτής. Σε αυτό το επίπεδο υπάρχει ένας ελεγκτής ο οποίος επικοινωνεί με όλες τις συσκευές δικτύωσης της υποδομής και παρακολουθεί την τοπολογία. Τέλος, το επίπεδο εφαρμογών είναι το επίπεδο στο οποίο ορίζονται όλα τα χαρακτηριστικά, οι υπηρεσίες και οι πολιτικές. Οι εφαρμογές ζητούν πληροφορίες σχετικά με τις συσκευές δικτύωσης και την τοπολογία του δικτύου ώστε να δρουν αναλόγως. Επιπλέον μπορούν να εισάγουν χαρακτηριστικά και να παίρνουν αποφάσεις με βάση τις αλλαγές που συμβαίνουν στο δίκτυο.

#### 2.4.7 Τρόπος Λειτουργίας

Μόλις ο μεταγωγέας λάβει το πρώτο πακέτο μίας ροής ενός αποστολέα, ελέγχει στη κρυφή μνήμη (cache) του SDN για να βρει έναν κανόνα ροής για το πακέτο.



Αν βρεθεί εγγραφή που να αντιστοιχεί τότε εκτελούνται οι οδηγίες που σχετίζονται με την συγκεκριμένη εγγραφή ροής. Στη συνέχεια, τα πακέτα προωθούνται στον παραλήπτη. Αν δε βρεθεί στον πίνακα ροών τότε το πακέτο μπορεί να προωθηθεί στον ελεγκτή μέσω ενός ασφαλούς καναλιού. Με την χρήση ενός Southbound API, ο ελεγκτής δύναται να προσθέσει, να ανανεώσει και να διαγράψει εγγραφές ροών, τόσο αντιδραστικά 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. Έπειτα, ο μεταγωγέας προωθεί το πακέτο στη κατάλληλη θύρα για να αποσταλεί στον τελικό παραλήπτη. [31]

#### 2.4.8 Το πρωτόκολλο OpenFlow

Το OpenFlow είναι το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της Southbound διεπαφής της γενικευμένης αρχιτεκτονικής του SDN. Είναι μία διεπαφή που ορίζεται για τη διευκόλυνση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και επιπέδου δεδομένων της αρχιτεκτονικής SDN. Το OpenFlow παρέχει πρόσβαση μέσω λογισμικού στους πίνακες προώθησης που καθοδηγούν τα switches και routers του δικτύου για το πώς να κατευθύνουν την κυκλοφορία του δικτύου. Επιπλέον το πρωτόκολλο OpenFlow παρέχει ένα βασικό σύνολο εργαλείων διαχείρισης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για λειτουργίες, όπως την αλλαγή της χρησιμοποιούμενης τοπολογίας και το φιλτράρισμα των πακέτων. [32]

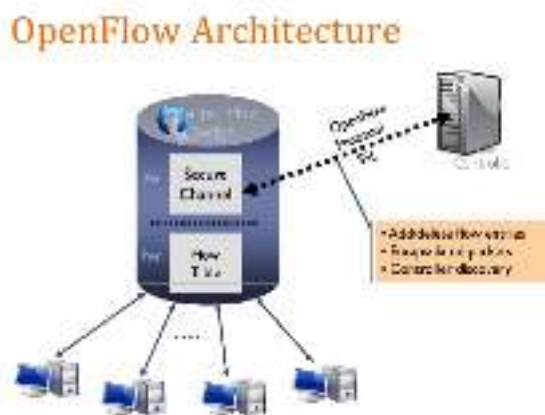


Figure 2.5: Αρχιτεκτονική OpenFlow [58]

Για να υπάρξει η δυνατότητα εργασίας σε περιβάλλον OpenFlow, οποιαδήποτε συσκευή που επιθυμεί να επικοινωνήσει με έναν ελεγκτή SDN πρέπει να υποστηρίζει το πρωτόκολλο OpenFlow. Μέσω αυτής της διασύνδεσης, ο ελεγκτής SDN ωθεί τις αλλαγές στον πίνακα ροής διακόπτη / δρομολογητή, επιτρέποντας στους διαχειριστές δικτύου να διαχωρίζουν την κυκλοφορία, να ελέγχουν τις ροές για βέλτιστη απόδοση και να ξεκινούν δοκιμές νέων διαμορφώσεων και εφαρμογών. [60]

## 2.5 Σπουδαιότητα των 5G

Πολλοί είναι εκείνοι οι άνθρωποι οι οποίοι αγνοούν την σημασία των δικτύων 5G, τα οποία θα προσφέρουν μεγάλη αύξηση την ταχύτητας αλλά ταυτόχρονα και σημαντική μείωση της καθυστέρησης. Η πραγματική σημασία του 5G δεν έγκειται μόνο στο γεγονός ότι θα επιτρέψει στους χρήστες βελτίωση της ταχύτητας και της ποιότητας, αλλά στις εντελώς νέες κατηγορίες προϊόντων που η επόμενη τεχνολογική επανάσταση θα φέρει.

Smart cities, αισθητήρες συνδεδεμένοι μέσω του διαδικτύου ικανοί να συλλέγουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε άσχημες καιρικές συνθήκες για μια δεκαετία με μόνο πλήρη φόρτιση και άλλες IoT εφαρμογές, είναι μερικές μόνο από τις προοπτικές που ανοίγονται. Η ιδέα της ανάπτυξης του 5G δεν βασίζεται μόνο στην ιδέα των καλύτερων επιδόσεων του δικτύου, αλλά στο να επιτρέψει νέα προϊόντα και υπηρεσίες μέσω βελτιωμένης συνδεσιμότητας, όχι μόνο ως προς την ταχύτητα αλλά και ως προς την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# Cognitive Radio

### 3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, διάφοροι ερευνητικοί οργανισμοί πραγματοποιούν έρευνες με στόχο να αυξήσουν την ευελιξία των ασύρματων επικοινωνιών. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας του Cognitive Radio (CR) αποτελεί ένα βήμα προς την κατεύθυνση αυτή. Το CR είναι μια τεχνολογία η οποία επιτρέπει στα ασύρματα τερματικά να διαθέτουν νοημοσύνη και να προσαρμόζουν κατάλληλα τις παραμέτρους λειτουργίας τους αποβλέποντας στη βελτίωση της επικοινωνίας. Κύριο χαρακτηριστικό του CR, αποτελεί η δυνατότητά του να λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο φάσμα και να το χρησιμοποιεί όσο αυτό παραμένει αδρανές.

Έτσι λοιπόν, μη αδειοδοτημένοι χρήστες έχουν την δυνατότητα να δρουν μέσα στα ίδια γεωγραφικά όρια με τους αδειοδοτημένους χρήστες, μπορούν δηλαδή να αποκτήσουν πρόσβαση μέσα σε ένα φασματικό κενό που υφίσταται για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. [61]

### 3.2 Χαρακτηριστικά

Ένα δίκτυο CR διαθέτει τρία σημαντικά χαρακτηριστικά. Αρχικά διαθέτει συνείδηση, για να μπορέσουν τα δίκτυα CR να συλλέξουν πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται και να λειτουργούν με την χρήση αισθητήρων. Έτσι τα CR λαμβάνουν τις πληροφορίες τις οποίες συλλέγουν από τους αισθητήρες ώστε να μπορέσουν να καλύψουν τον εκάστοτε χρήστη.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό τους αποτελεί η προσαρμοστικότητα. Ένα σύστημα τηλεπικοινωνιών μπορεί να περιέχει πολλές πτυχές της λειτουργίας του

οι οποίες είναι προσαρμοστικές όπως η συχνότητα φορέα, η ισχύς μετάδοσης, ο κώδικας διόρθωσης σφαλμάτων, ο ρυθμός δεδομένων, το σχήμα διαμόρφωσης και το εύρος ζώνης. Επομένως ένα σύστημα CR μπορεί να προσαρμόζεται κατάλληλα στις εκάστοτε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του χωρίς να έχει προγραμματιστεί εκ των προτέρων για τις συγκεκριμένες λειτουργίες.

Επίσης, ένα δίκτυο CR έχει την δυνατότητα της μάθησης. Έχοντας λοιπόν συλλέξει πληροφορίες με την χρήση των αισθητήρων που διαθέτει, μέσω της μάθησης αναλύει τα δεδομένα και μέσω των συμπερασμάτων προσαρμόζει τη συμπεριφορά του. [33]

### 3.2.1 Γνωσιακός Κύκλος

Γνωσιακός κύκλος ή Cognitive Circle (CC) ονομάζεται η διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων λειτουργίας της γνωσιακής διαδικασίας (Cognitive Process (CP)). Ο όρος αυτός εισήχθη από τον J.Mitola και έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως στα ασύρματα δίκτυα. Ο CC αποτελείται από έξι βασικά στάδια.

Το πρώτο λοιπόν στάδιο είναι η παρατήρηση. Το CR δίκτυο δέχεται μέσω των αισθητήρων διάφορες πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται και τις συγκρίνει με παρελθοντικές εμπειρίες έτσι ώστε να αποκτήσει χρήσιμα συμπεράσματα. Το δεύτερο βήμα είναι ο προσανατολισμός, σε αυτή τη φάση συνδέονται η παρατήρηση με τα ερεθίσματα. Όταν υπάρχει το απόλυτο ταίριασμα της τρέχουσας παρατήρησης με παρελθοντικές εμπειρίες τότε αναγνωρίζεται το ερέθισμα. Στη φάση λοιπόν του προσανατολισμού προκαλείται μια άμεση εκκίνηση ενέργειας ως μία αντανακλαστική συμπεριφορά. Το τρίτο βήμα αποτελεί ο σχεδιασμός κατά τον οποίο με την χρήση διάφορων σχεδιαστικών εργαλείων δημιουργείται σύνδεση μεταξύ των συμπεριφορών του φάσματος, των πληροφοριών σύμφωνα με την αντίληψη του περιβάλλοντος, τις προτιμήσεις του εκάστοτε χρήστη και τους κανόνες. Το τέταρτο στάδιο αποτελεί η απόφαση, στο στάδιο λοιπόν αυτό γίνεται η επιλογή μεταξύ των υποψήφιων σχεδίων τα οποία είναι διαθέσιμα. Η επιλογή της τρέχουσας απόφασης γίνεται έχοντας ως βάση το Quality of Information (QoI). Στη συνέχεια συμβαίνει η δράση. Σε αυτή τη φάση αρχικά υπάρχουν κάποιες επιλεγμένες διαδικασίες οι οποίες χρησιμοποιούν ενεργοποιητές έτσι ώστε να μπορέσουν να εισχωρήσουν στο εξωτερικό περιβάλλον ή στο εσωτερικό των CR δικτύων. Τέλος, η φάση της μάθησης στην οποία συμπεριλαμβάνεται η φάση της παρατήρησης όπου συλλέγονται οι διαθέσιμες πληροφορίες μέσω των αισθητήρων καθώς και παρελθοντικές εμπειρίες.

Ο CC αποτελείται από τρία στάδια διαδικασίας τα οποία είναι η παρακολούθηση

του φάσματος, ο μερισμός του φάσματος και η κινητικότητα του φάσματος τα οποία παρέχουν στοιχεία που αναφέρονται στις μεταβολές που παρουσιάζει η διαθεσιμότητα του ραδιο-φάσματος καθώς κι άλλων στοιχείων τα οποία επηρεάζουν την προσαρμοστικότητα των εκάστοτε συσκευών που επιθυμούν να εισχωρήσουν σε αυτό. [33]

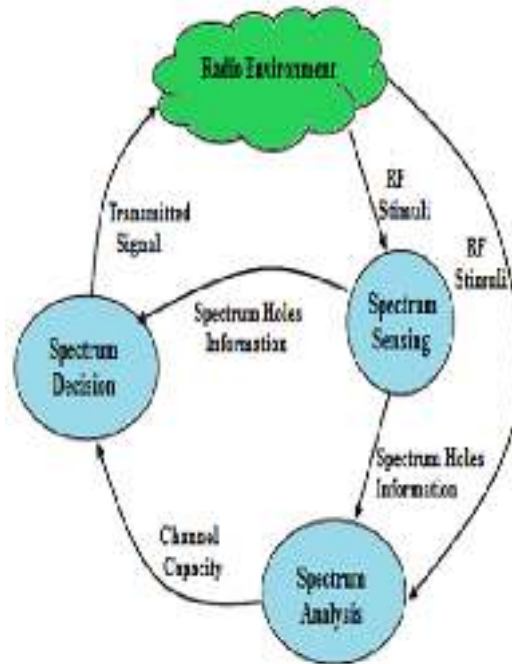


Figure 3.1: Cognitive Circle [62]

### 3.3 Αρχιτεκτονικές Cognitive Radio

Για την βέλτιστη αξιοποίηση του φάσματος μια συσκευή τεχνολογίας CR που λειτουργεί σε ένα Cognitive Radio Network (CRN) θα πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύει την διαθεσιμότητα του φάσματος καθώς και αριθμό των συστημάτων που επιθυμούν είσοδο σε αυτό. Τα CRNs μπορούν να αναπτύσσονται με network-centric, ad-hoc και mesh αρχιτεκτονικές ώστε να εξυπηρετούν τους πρωτεύοντες αλλά και τους δευτερεύοντες χρήστες. Για την δημιουργία αρχιτεκτονικών των CRN απαραίτητα συστατικά είναι τα Mobile Stations (MS), Base Station/Access Point (BS AP) αλλά και τα backbone/core networks.

Με τον συνδυασμό των παραπάνω συστατικών προκύπτουν οι αρχιτεκτονικές των CRN.

### 3.3.1 Infrastructure Architecture

Σε αυτή την αρχιτεκτονική ένα MS έχει την δυνατότητα πρόσβασης μόνο σε ένα BS/AP. Οι MSs, στους οποίους η εμβέλεια τους υποστηρίζεται από την ίδια BS/AP, μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω αυτής. Για την επικοινωνία ανάμεσα σε διαφορετικές περιοχές μετάδοσης χρησιμοποιείται ένα δίκτυο backbone/core. Οι σταθμοί μετάδοσης BS/AP είναι σε θέση να εφαρμόζουν διάφορα πρωτόκολλα/πρότυπα επικοινωνίας, ώστε να ικανοποιήσουν τις διαφορετικές απαιτήσεις των συστημάτων MS. [34]

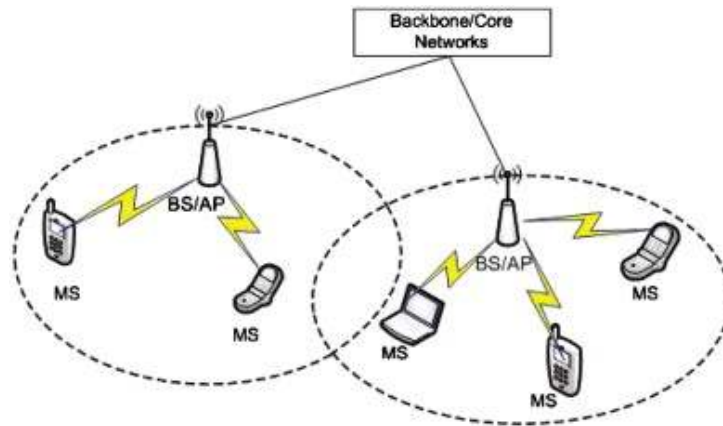


Figure 3.2: Infrastructure Architecture [63]

### 3.3.2 Ad-hoc Architecture

Σε αυτή την αρχιτεκτονική εάν ένα MS ανιχνεύσει ότι υπάρχουν άλλα MS στην ίδια εμβέλεια με αυτό και υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης μέσω ορισμένων προτύπων/πρωτοκόλλων επικοινωνίας, τότε δημιουργείται ένα Ad-hoc δίκτυο. Επιπλέον η αρχιτεκτονική αυτή μπορεί να δημιουργηθεί και μέσω δικτύων διαφορετικής τεχνολογίας. Δύο τερματικά CR μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας υπάρχοντα πρωτόκολλα επικοινωνίας (π.χ. Wi-Fi, Bluetooth) ή χρησιμοποιώντας δυναμικά φασματικά κενά. [34]

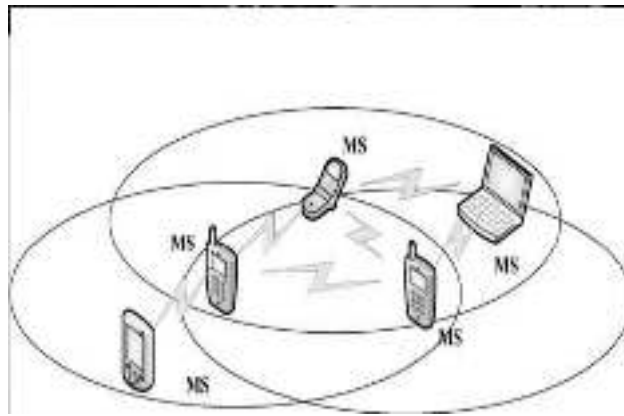


Figure 3.3: Ad-hoc Architecture [64]

### 3.3.3 Mesh Architecture

Αυτή η αρχιτεκτονική είναι ένας συνδυασμός της Infrastructure και Ad-hoc Architecture κι επιτρέπει τις ασύρματες συνδέσεις μεταξύ BSs/APs. Τα BSs/APs λειτουργούν ως ασύρματοι δρομολογητές και έχουν την μορφή των ασύρματων backbones. Τα MS μπορούν είτε να μεταβούν άμεσα σε BSs/APs, είτε να χρησιμοποιούν άλλα MS ως κόμβους αναμετάδοσης. Κάποια BSs/APs μπορούν να συνδεθούν με τα ενσύρματα backbone/core δικτύων και να λειτουργούν ως πύλες. Τέλος έχουν τις δυνατότητες των Cognitive Radio και μπορούν να χρησιμοποιούν τα φασματικά κενά για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. [34]

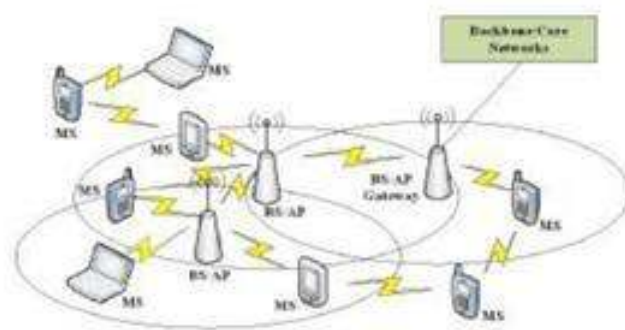


Figure 3.4: Mesh Architecture [65]

### 3.3.4 Cognitive Radio και Ιεραρχία Πρωτοκόλων

Μεγάλο ενδιαφέρον σε ένα Cognitive Radio συγκεντρώνουν τα δύο κατώτερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων, το φυσικό στρώμα (physical layer) αλλά και το στρώμα ζεύξης δεδομένων (data link layer).

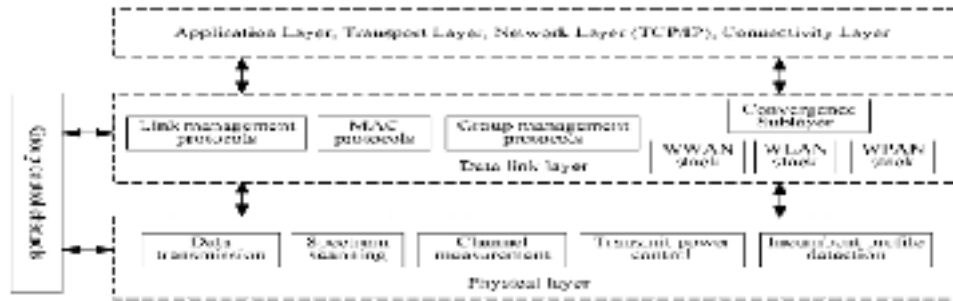


Figure 3.5: Physical and DLL Layers [66]

Στο physical layer επιτελούνται διάφορες λειτουργίες. Αρχικά η ανίχνευση του φάσματος η οποία αποτελεί την πλέον βασική λειτουργία του φυσικού στρώματος ενός CR. Μεγάλο εύρος συχνοτήτων σαρώνεται και αναλύεται με τα αποτελέσματα να ανταλλάσσονται μεταξύ των σταθμών ενός CRN. Ακόμη μία λειτουργία του επιπέδου αυτού είναι η μέτρηση του καναλιού όπου παραγματοποιούνται μετρήσεις με στόχο να καθοριστεί η ποιότητα των διαύλων. Με βάση τις μετρήσεις αυτές ρυθμίζονται οι διάφοροι παράμετροι του CR συστήματος. Τέλος ακόμη μία λειτουργία αποτελεί η μετάδοση των δεδομένων. Στα πλαίσια της μετάδοσης επιτελούνται λειτουργίες όπως η επιλογή του ρυθμού μετάδοσης, της τεχνικής διαμόρφωσης, της τιμής της ισχύος εκπομπής αλλά και της τεχνικής κωδικοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί. Μπορεί επίσης να γίνει χρήση της OFDM τεχνικής αλλά και μηχανισμών MIMO.

Στο data link layer περιλαμβάνονται επίσης σημαντικά πρωτόκολλα του συστήματος. Συγκεκριμένα, τα πρωτόκολλα διαχείρισης ομάδων όπου κάθε χρήστης ανήκει σε μία ομάδα χρηστών που σχηματίζει ένα δευτερεύον δίκτυο και κυρίως χρησιμοποιείται για τον συντονισμό των χρηστών που ανήκουν στην ίδια ομάδα. Επιπλέον τα πρωτόκολλα διαχείρισης ζεύξης όπου είναι υπεύθυνα για την εγκατάσταση και την συντήρηση της ζεύξης μεταξύ CR χρηστών. Ακόμη, τα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο που ελέγχουν την πρόσβαση των χρηστών στο φυσικό μέσο. Τέλος, το υπόστρωμα σύγκλισης όπου δίνει τη δυνατότητα στο CR να λειτουργεί σε εντελώς διαφορετικά



ασύρματα περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα σε ασύρματα τοπικά δίκτυα, ασύρματα προσωπικά δίκτυα αλλά και σε ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής.

### 3.4 Πλεονεκτήματα CR

Η δυναμική φύση των CRN αλλά και η νοημοσύνη με την οποία είναι εφοδιασμένα τα καθιστά κατάλληλα για πλήθος εφαρμογών. Από την χρήση τους προκύπτουν καινοτόμες εφαρμογές αλλά και οι ήδη υπάρχουσες βελτιώνονται και εκσυγχρονίζονται. Αρχικά τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και συγκεκριμένα τα 5G με την χρήση της τεχνολογίας του CR προσφέρουν βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας στις συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και δυναμική διαχείριση του φάσματος. Η τεχνολογία λοιπόν αυτή μπορεί να προσφέρει αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος και με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να καλυφθεί η παροντική και μελλοντική ζήτηση φάσματος.

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό πλεονέκτημα του CR είναι η βελτίωση του QoS καθώς από την πλευρά του χρήστη, θα βελτιωθεί η καταλληλότητα, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των ασύρματων υπηρεσιών. Ακόμη το CR προωθεί την απελευθέρωση του φάσματος, δηλαδή καθιστά πιο εύκολη την αγοραπωλησία του φάσματος μεταξύ των χρηστών. Σημαντική είναι και η βελτίωση που μπορεί να προσφέρει στην ευελιξία της συσκευής. Ένα CR είναι σε θέση να αλλάζει υπηρεσίες, πρωτόκολλα, διαμόρφωση, φάσμα, κλπ, χωρίς να έχει την ανάγκη ένας χρήστης ή κατασκευαστής, να κάνει αναβάθμιση σε μία νέα συσκευή. Τέλος προσφέρουν πληθώρα οφελών στους κατασκευαστές, διότι πλέον δεν θα χρειάζεται να κατασκευάζονται πολλές παραλλαγές υλικού, αλλά θα χρησιμοποιούν μια ενιαία κοινή πλατφόρμα για να τρέχουν μία πληθώρα από λογισμικά.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Οικονομική Ανάλυση

### 4.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση κόστους-οφέλους είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των αναμενόμενων οφελών, με τα σχετικά μεγέθη κόστους, ώστε να βοηθούνται οι χρήστες στον προσδιορισμό της εναλλακτικής λύσης με το μέγιστο καθαρό όφελος (οφέλη μείον κόστος). Όσο περισσότερο τα οφέλη υπερβαίνουν το κόστος, τόσο περισσότερο θα ωφεληθούν οι τελικοί χρήστες από τη δραστηριότητα του έργου. Η παρουσίαση του κόστους είναι ο καθοριστικός παράγοντας ώστε να αποφασιστεί αν η εκάστοτε τεχνολογία μπορεί να επιφέρει τα μέγιστα στον επενδυτή. [35]

Το κόστος λοιπόν κατανέμεται σε δύο βασικούς άξονες, η κεφαλαιακή δαπάνη που ονομάζεται Capital Expenditures (CAPEX) και η λειτουργική δαπάνη που ονομάζεται Operational Expenditures (OPEX). Οι κεφαλαιακές δαπάνες είναι τα κεφάλαια τα οποία οι επιχειρήσεις χρησιμοποιούν για να αγοράσουν τα κύρια φυσικά αγαθά αλλά και τις υπηρεσίες με σκοπό να επεκτείνουν τις δυνατότητες και να παράγουν κέρδος. Το CAPEX περιλαμβάνει τον προϋπολογισμό ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου με σκοπό να υλοποιηθεί νέος εξοπλισμός. Η εκτίμηση του CAPEX πραγματοποιείται σε ετήσια βάση. Το OPEX κάθε τεχνολογίας περιλαμβάνει το επαναλαμβανόμενο κόστος λειτουργίας που είναι συνδεδεμένο με τις δραστηριότητες λειτουργίας όπως η κατανάλωση ρεύματος, τα κόστη συντήρησης, κλπ. [36]

Τέλος η συνολική δαπάνη που καλείται κανείς να εκπληρώσει ώστε να μπορεί να εγκαθιστά, να επενδύει, να συντηρεί και να χρησιμοποιεί το σύστημα ονομάζεται Total Cost of Ownership (TCO). Το TCO εκτιμώντας τη συνο-

λική δαπάνη βοηθά τους αγοραστές και τους ιδιοκτήτες να καθορίσουν το ολικό κόστος, έμμεσο και άμεσο των προϊόντων ή των συστημάτων. Χρησιμοποιείται αρκετά συχνά για την ανάλυση προϊόντων πληροφορικής με σκοπό να αξιολογήσει το οικονομικό αντίκτυπο της δημιουργίας τους κατά την διάρκεια του κύκλου τους. [37]

## 4.2 Προτεινόμενο Αρχιτεκτονικό Μοντέλο

Το προτεινόμενο μοντέλο περιλαμβάνει ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα το οποίο αποτελείται από ένα δίκτυο Cognitive Radio βασισμένο σε Femtocells. Συνδυάζοντας το Cognitive Radio με Femtocells επιφέρουμε βελτίωση στην επίδοση του συστήματος. Το δίκτυο του Cognitive Radio αποτελείται από πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες (Multiple Secondary Users - MSUs), την BS, πολλαπλά Femtocells και πολλαπλούς δευτερεύοντες Femtocell χρήστες (Femtocell Secondary Users (FSUs)). Η Cognitive BS και τα Femtocells γνωρίζουν την κατάσταση του καναλιού [3]. Στη συνέχεια η Cognitive BS διαμοιράζει το φάσμα από τα πρωτεύοντα δίκτυα στα Femtocell ή απευθείας στους MSUs. Σε κάθε Femtocell υπάρχει μια Femtocell σταθμός βάσης η οποία παρέχει υπηρεσίες στους FSUs. Υποθέτουμε λοιπόν ότι υπάρχουν  $L$  πρωτεύοντα δίκτυα που κάθε ένα από αυτά προσφέρει μια τιμή  $c_i$  για μέρος  $w_i$  του συνολικού του φάσματος. Η Cognitive BS αγοράζει το φάσμα  $w_i$  από το πρωτεύον δίκτυο  $l$  και το διαμοιράζει. [1]

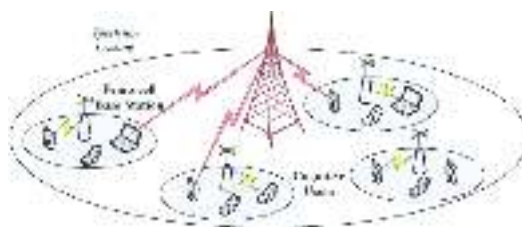


Figure 4.1: Μοντέλο Συστήματος Cognitive Radio βασισμένο σε Femtocell [1]

## 4.3 Οικονομικο Μοντέλο Cognitive Radio

### 4.3.1 Stackelberg Game

Το μοντέλο του Stackelberg είναι ένα στρατηγικό “παιχνίδι” που χρησιμοποιείται στον κλάδο της οικονομίας και αναφέρει ότι η εταιρεία αρχηγός κάνει την πρώτη κίνηση και οι ακόλουθοι της κινούνται διαδοχικά. Σύμφωνα με τους όρους της θεωρίας παιγνίων οι συμμετέχοντες στο “παιχνίδι” αυτό ονομάζονται leader, follower και ανταγωνίζονται με σκοπό το βέλτιστο κέρδος σε ποσότητα.

Επιπλέον υπάρχουν μερικοί περαιτέρω περιορισμοί ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία του Stackelberg. Ο ηγέτης πρέπει να γνωρίζει εκ των προτέρων ότι ο ακόλουθος παρακολουθεί τη δράση του. Ο ακόλουθος δεν πρέπει να έχει κανένα μέσο δέσμευσης σε μια μελλοντική μη Stackelberg δράση και ο ηγέτης πρέπει να το γνωρίζει αυτό.

Το παιχνίδι Stackelberg είναι το πιο συχνά αναγνωρισμένο μοντέλο παιχνιδιών που χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση των παιχνιδιών αλυσίδας εφοδιασμού λόγω της έντονης ομοιότητας με τα σενάρια πραγματικού κόσμου. Το “παιχνίδι” Stackelberg αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Γερμανό οικονομολόγο Heinrich Freiherr von Stackelberg το 1934, στο βιβλίο του *Marktform und Gleichgewicht*, στο οποίο επικεντρώθηκε στον ανταγωνισμό μεταξύ δύο εταιρειών που πωλούσαν ένα ομοιογενές αγαθό ως Stackelberg παιχνίδι [9]. Οι παίχτες ακολουθούν μια σχέση ηγέτη-ακόλουθου στα παιχνίδια του Stackelberg όπου ο ηγέτης κάνει τις αποφάσεις του πρώτα, και στη συνέχεια ο ακόλουθος παίρνει τις αποφάσεις του απαντώντας στην απόφαση του ηγέτη, αυτό συμβαίνει στο παιχνίδι με διαδοχικό τρόπο, σε αντίθεση με τα ταυτόχρονα παιχνίδια όπως τα παιχνίδια Nash και Cournot. Η ιδέα της αντίστροφης επαγωγής χρησιμοποιείται κατά το παιχνίδι Stackelberg, δηλαδή οι αποφάσεις του ακόλουθου λαμβάνονται υπόψη πρώτα καταλήγοντας έτσι σε αυτή του ηγέτη [10]. Ο ηγέτης δεν μπορεί να αναιρέσει την κίνησή του ωστόσο, έχει το λεγόμενο πλεονέκτημα της πρώτης κίνησης που του επιτρέπει να κερδίζει περισσότερα κέρδη. Έτσι, για να είναι δίκαιο για τον ακόλουθο, ο ηγέτης συνήθως εγγυάται ορισμένα κίνητρα στον ακόλουθο το οποίο επιτρέπει στον ηγέτη να διατηρήσει τον ακόλουθο του στο παιχνίδι της αλυσίδας εφοδιασμού [11].

Για την λύση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιείται το Subgame Perfect Equilibrium (SPE) αλλά και το θεώρημα ισορροπίας του Nash το οποίο αναφέρει ότι κάθε παίχτης πρέπει να επιλέγει την στρατηγική που τον εξυπηρετεί καλύτερα λαμβάνοντας όμως υπόψη τις στρατηγικές κάθε άλλου παίκτη. [9]

Για την δημιουργία του οικονομικού μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί το Stack-

Stackelberg Game. Θεωρούμε λοιπόν ένα "παιχνίδι" ανάμεσα στον χειριστή και τους χρήστες. Στο πρώτο στάδιο ο χειριστής, ο οποίος έχει τον ρόλο του Stackelberg leader, καθορίζει το κόστος του δικτύου. Στο δεύτερο στάδιο αποφασίζει την ζήτηση του φάσματος για τον Cognitive σταθμό βάσης. Τέλος στο τρίτο στάδιο διανομής της στρατηγικής που χρησιμοποιείται για τον διαμοιρασμό ισχύος βελτιστοποιεί την απόδοση της Femtocell βάσης σταθμού. [1, 2]

### 4.3.2 Ανάστροφο Stackelberg Game

Το Stackelberg game ανήκει στην κλάση των δυναμικών "παιχνιδιών". Μια κοινή λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι να χρησιμοποιηθεί το SPE. Ένας τρόπος ορισμού του SPE είναι η ανάστροφη επαγωγή [2]. Ξεκινώντας δηλαδή από το στάδιο III με σκοπό τον ποιοτικότερο διαμοιρασμό ισχύος. Στη συνέχεια στο στάδιο II αποφασίζεται το μέγεθος του φάσματος. Τέλος στο στάδιο I ο διαχειριστής καταλήγει στην βέλτιστη απόφαση σχετικά με την τιμή. [1]

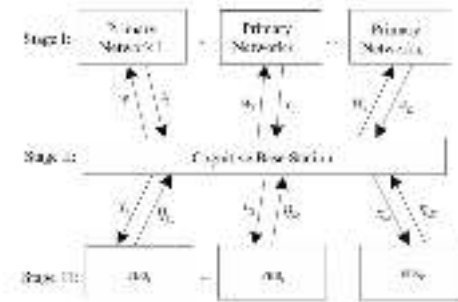


Figure 4.2: Stackelberg Game [1]

### Στάδιο III , Διαμοιρασμός Ισχύος

Όταν λοιπόν το φάσμα  $w_l$  διαμοιράζεται στην Femtocell Base Station (FBS)  $k$  αυτή έχει ως σκοπό να πετύχει τον βέλτιστο ενεργειακά διαμοιρασμό ισχύος. Σύμφωνα με [1]

$$\frac{\partial \pi_k(p_k)}{\partial p_k} = \frac{R'_k(p_k)(p_a + p_k) - R_k(p_k)}{(p_a + p_k)^2} = \frac{\varphi(p_k)}{(p_a + p_k)^2} \quad (4.1)$$

όπου  $p_k$  συμβολίζεται ο διαμοιρασμός της ισχύος ,το  $\pi$  αποτελεί την συνάρτηση του κόστους και  $R_k(p_k)$  ισούται με  $\sum_{l=1}^L ((s_k - c_b)x_{lk}w_l \log_2(1 + \frac{h_{lk}^2 p_k}{\sigma^2}))$  όπου το  $s_k$  είναι τα έσοδα του FBS  $c_b$  το κόστος διαμοιρασμού φάσματος απο την Cognitive BS ,  $x_{lk}$  ο δείκτης διαμοιρασμού φάσματος ,  $w_l$  το φάσμα,  $h_{lk}$  η ενεργειακά αποδοτική εκπομπή και τέλος  $\sigma^2$  ο λευκός θόρυβος.

### Στάδιο II , Απαίτηση Φάσματος του Σταθμού Βάσης του Cognitive Radio

Μετά την ολοκλήρωση του Σταδίου II ο Cognitive BS έχει την δυνατότητα να αποφασίσει το μέγεθος του φάσματος που θα πρέπει να αγοραστεί απο τα διάφορα πρωτεύοντα δίκτυα. Σύμφωνα με το [1] η συνάρτηση για το Cognitive BS ορίζεται ως

$$\frac{\partial \pi_b(w)}{\partial w_l} = \left( \sum_{k=1}^K c_b x_{lk} \eta_{lk} + \sum_{i=1}^I \xi_i x_{li} \eta_{li} \right) - w_l - \theta \sum_{q \neq l} w_q - c_l = 0 \quad (4.2)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση συμπεραίνεται ότι η ποσότητα του φάσματος που θα αγοραστεί απο τα πρωτεύοντα δίκτυα είναι :

$$w_l^* = \frac{(\sum_{k=1}^K c_b x_{lk} \eta_{lk} - c_l)(\theta(L-2) + 1)}{(1-\theta)(\theta(L-1) + 1)} - \frac{\theta \sum_{q \neq l} (\sum_{k=1}^K c_b x_{qk} \eta_{ki} + \sum_{i=1}^I \xi_i x_{qi} \eta_{qi} - c_q)}{(1-\theta)(\theta(L-1) + 1)} \quad (4.3)$$

όπου  $\theta$  η δυνατότητα αποκατάστασης φάσματος,  $L$  ο αριθμός των πρωτεύοντων δικτύων,  $I$  ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών και  $K$  ο αριθμός των Femtocells.

## Στάδιο I , Καθορισμός τιμής Δικτύων

Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου II γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος για κάθε πρωτεύον δίκτυο εξαρτάται από την δική του τιμή  $c_l$  αλλά και από τις τιμές  $c_{-l}$  άλλων πρωτευόντων δικτύων. Για τον λόγο αυτό ο καθόρισμός της τιμής ανάμεσα στα πρωτεύοντα δίκτυα είναι ένα "παιχνίδι"  $G = N, c_l, \pi_l(\cdot)$  όπου  $N = 1, 2, \dots, L$  είναι ο αριθμός των "παιχτών" που συμμετέχουν στο "παιχνίδι" και  $\pi_l(\cdot)$  είναι η συνάρτηση κόστους για κάθε ένα από τα πρωτεύοντα δίκτυα  $l$ . Στην παραπάνω περίπτωση υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής του θεωρήματος της ισορροπίας του Nash και σύμφωνα με το [1] προκύπτει η παραγοντοποιημένη για χάρη των μαθηματικών συνάρτηση κόστους.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_l(c)}{\partial c_l} = & a_1 k_l \frac{(\theta(L-2)+1)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} - \frac{c_l(\theta(L-2)+1)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} + \\ & \frac{(\sum_{k=1}^K c_b x_{lk} \eta_{lk} + \sum_{i=1}^I \xi_i x_{li} \eta_{li} - c_l)(\theta(L-2)+1)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} - \\ & \frac{\theta \sum_{q \neq l} (\sum_{k=1}^K c_b x_{qk} \eta_{qk} + \sum_{i=1}^I \xi_i x_{qi} \eta_{qi} - c_q)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Στον παρακάτω πίνακα αναλύονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο Stackelberg Game

Table 4.1: Πίνακας Παραμέτρων

Παράμετρος	Επεξήγηση
$l$	πρωτεύον δίκτυο
$k$	Femtocell
$L$	αριθμός πρωτευόντων δικτύων
$p_k$	διαμοιρασμός ισχύος
$\pi$	συνάρτηση κόστους
$a$	σχεδιαστική παράμετρος
$R_k(p_k)$	$\sum_{l=1}^L ((s_k - c_b)x_{lk}w_l \log_2(1 + \frac{h_{lk}^2 p_k}{\sigma^2}))$
$s_k$	έσοδα του FBS του k
$c_b$	κόστος διαμοιρασμού φάσματος απο την Cognitive BS
$\sigma^2$	λευκός θόρυβος
$p_a$	επιπρόσθετη κατανάλωση ισχύος
$\varphi(p_k)$	$R'_k(p_k)(p_a + p_k) - R(p_k)$
$w_l$	φάσμα
$c_l$	τιμή
$x_{lk}$	δείκτης διαμοιρασμού φάσματος
$\eta_{lk}$	ενεργειακά αποδοτική εκπομπή
$\xi_i$	κόστος που εκπληρώνεται απο τους MSUs στην Cognitive BS
$\theta$	δυνατότητα υποκατάστασης φάσματος

## 4.4 Οικονομική Ανάλυση SDN/NFV

### 4.4.1 Εισαγωγή

Το SDN είναι μια νέα προσέγγιση για το cloud computing η οποία διευκολύνει τη διαχείριση του δικτύου και επιτρέπει την αποδοτική διαμόρφωση του προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση και η παρακολούθηση του [7]. Το SDN έχει ως σκοπό να αποδείξει ότι η αρχιτεκτονική των παραδοσιακών δικτύων είναι αρκετά σύνθετη ενώ τα τρέχοντα δίκτυα απαιτούν μεγαλύτερη ευελιξία και ευκολότερη αντιμετώπιση προβλημάτων [8].

Ακόμη ένας παράγοντας του μοντέλου αυτού είναι το RAN το οποίο είναι μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική για τα μελλοντικά κυψελοειδή κινητά δίκτυα. Ειδικότερα το RAN (C-RAN , Centralized-RAN) είναι μια αρχιτεκτονική δικ-



τύων ασύρματης πρόσβασης βασιζόμενη στην ιδέα του cloud computing που υποστηρίζει 2G, 3G, 4G και μελλοντικά πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας [12].

Τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα ή τα δίκτυα πρόσβασης ραδιοσυχνότητας, αποτελούνται από πολλούς ανεξάρτητους σταθμούς βάσης. Κάθε BS καλύπτει μια μικρή περιοχή, ενώ μια ομάδα BS παρέχει κάλυψη σε μια συνεχή περιοχή. Κάθε BS επεξεργάζεται και μεταδίδει το δικό του σήμα προς και από το κινητό τερματικό και προωθεί το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων προς και από το κινητό τερματικό και κατευθύνεται προς το κεντρικό δίκτυο μέσω του backhaul.

Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική. Πρώτον, κάθε BS είναι δαπανηρό για την κατασκευή και τη λειτουργία του. Δεύτερον, όταν προστεθούν περισσότερα συστήματα σε ένα σύστημα για τη βελτίωση της χωρητικότητάς του, οι παρεμβολές μεταξύ των BS είναι πιο σημαντικές καθώς τα BS είναι πλησιέστερα μεταξύ τους και περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα.

Το RAN μπορεί να θεωρηθεί αρχιτεκτονική εξέλιξη του παραπάνω κατανεμημένου συστήματος σταθμών βάσης. Επωφελείται από πολλές τεχνολογικές εξελίξεις σε ασύρματα, οπτικά και πληροφοριακά συστήματα πληροφορικής. Εφαρμόζει την πρόσφατη τεχνολογία Data Center Network με σκοπό να δημιουργήσει ένα δίκτυο διασύνδεσης χαμηλού κόστους, υψηλής αξιοπιστίας, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης. Χρησιμοποιεί ανοιχτές πλατφόρμες και τεχνολογία εικονικοποίησης σε πραγματικό χρόνο για την επίτευξη δυναμικής κατανομής κοινών πόρων και υποστήριξης πολυ-τεχνολογικών περιβαλλόντων[13].

Ένα ακόμα στοιχείο που είναι αναγκαίο να αναφερθεί είναι το NFV το οποίο είναι μια προσέγγιση για την δικτύωση των τηλεπικοινωνιών, όπου οι οντότητες δικτύου που παραδοσιακά χρησιμοποιούσαν ειδικά αντικείμενα υλικού αντικαθίστανται τώρα με υπολογιστές στους οποίους τρέχει λογισμικό για την παροχή της ίδιας λειτουργικότητας. Εκτελώντας ένα δίκτυο που βασίζεται σε τεχνικές NFV, είναι ευκολότερο να επεκταθεί, να τροποποιηθεί και είναι σε θέση να προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ευελιξία καθώς και να τυποποιήσει το μεγαλύτερο μέρος του υλικού. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μειωθεί σημαντικά το κόστος [38].

Τέλος, το EPC είναι ένα πλαίσιο για την παροχή σύγκλισης φωνής και δεδομένων σε ένα δίκτυο 5G. Επιπλέον ενοποιεί τη φωνή και τα δεδομένα σε μια αρχιτεκτονική υπηρεσίας πρωτοκόλλου Internet και η φωνή αντιμετωπίζεται ως μια άλλη εφαρμογή IP. Αυτό επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης να αναπτύξουν και να λειτουργούν ένα δίκτυο πακέτων.

#### 4.4.2 Μοντέλο Συστήματος

Η τεχνο-οικονομική ανάλυση αποδεικνύει ότι το SDN και η λειτουργία αναπαράστασης του εξοπλισμού του δικτύου οδηγεί σε σημαντική μείωση του CAPEX για τους διαχειριστές του [4]. Το NFV υλοποιεί λειτουργίες δικτύου μέσω λογισμικού το οποίο λειτουργεί σε διακομιστές βασικών προϊόντων, σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα τα οποία υλοποιούν αυτές τις λειτουργίες με χρήση ειδικού υλικού. Όσον αφορά το SDN, διαχωρίζοντας το επίπεδο ελέγχου και δεδομένων είναι δυνατόν για τον χειριστή να αυξήσει την ταχύτητα εισαγωγής νέων λειτουργιών και να επιφέρει μείωση του TCO. Επιπλέον το OpenFlow, το οποίο είναι ενά τυπικό πρωτόκολλο επικοινωνίας επιτρέπει άμεση πρόσβαση και έλεγχο του επιπέδου προώθησης των συσκευών του δικτύου [4] και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα της μείωσης του CAPEX για το SDN [5].

Επιπρόσθετα, η κοινή χρήση εξοπλισμού μεταξύ διαχειριστών κινητών δικτύων επιτρέπει την αποδοτική χρήση των ήδη υπαρχόντων πόρων των δικτύων. Η λειτουργία αναπαράστασης του δικτύου (Network virtualization) είναι μια μέθοδος κατά την οποία οι φυσικοί πόροι του δικτύου διασπώνται σε διάφορα κομμάτια κάθε ένα από τα οποία είναι απομονωμένο από τα υπόλοιπα και ενσωματώνεται δυναμικά σε μια συσκευή του εκάστοτε δοθέντος δικτύου.

Με την τεχνολογία RAN η επεξεργασία πραγματοποιείται σε ένα κέντρο δεδομένων μειώνοντας έτσι το απαραίτητο κόστος για το δίκτυο. Επιπροσθέτως το RAN προσφέρει ευκολότερη ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και βελτιώνει σημαντικά τη συνολική λειτουργία του δικτύου με το να ενημερώνει το σήμα με την χρήση του EPC [4]. Η εικονικοποιημένη διεπαφή παρέχει πρόσβαση στο EPC μέσω μιας εικόνας των φυσικών πόρων που σχετίζονται με το δεδομένο RAN BS. [6]

Η απομόνωση του EPC από το RAN επιτρέπει την βελτιστοποίηση των δύο περιοχών χωρίς να επηρεάσει αρνητικά την μεταξύ τους επικοινωνία και δεν απαιτείται συνεχής σηματοδότηση για την λήψη πληροφοριών από το δίκτυο [4].

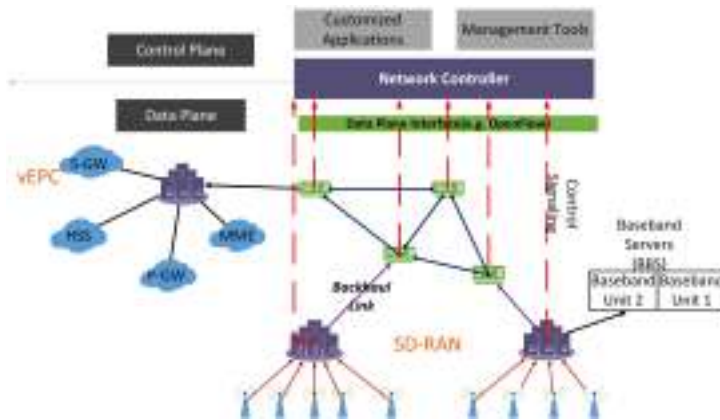


Figure 4.3: Μοντέλο Συστήματος SDN/NFV [4]

#### 4.4.3 Κεφαλαιακές Δαπάνες - CAPEX

##### Αρχιτεκτονική RAN

Οι παράμετροι της αρχιτεκτονικής του RAN σύμφωνα με το [4] παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Table 4.2: Παράμετροι CAPEX RAN

Παράμετρος	Επεξήγηση
$n_{us}$	Αριθμός virtual BS ανα Super Base Station (SBS)
$l_{SBS}$	Πυκνότητα χρηστών ανα περιοχή
$N_{SBS}$	Αριθμός SuperBS ανα περιοχή
$R_{max}$	Μέγιστη κάλυψη της BS
$C_{cs-sbs}$	Κόστος ανα cell site της SBS
$C_{SBS}$	Κόστος μιας SBS μονάδας

Ο αριθμός των χρηστών σε μια περιοχή  $A$  είναι :

$$N_{UE} = l_{SBS} * A = n_{us} * l * \pi * R_{max}^2 * N_{SBS} \quad (4.5)$$

Το συνολικό κόστος για την κατασκευή ενός cell site για ένα SBS δίκτυο είναι:

$$C_{site} = C_{cs-sbs} * N_{SBS} \quad (4.6)$$

Το συνολικό κόστος για το SBS του δικτύου είναι :

$$N_{sbs} = C_{SBS} * N_{SBS} \quad (4.7)$$

Επομένως οι συνολικές κεφαλαιακές δαπάνες για την αρχιτεκτονική του RAN είναι :

$$CAPEX_{RAN} = C_{site} + C_{sbs} = \frac{N_{UE}}{n_{us} * l * \rho_i * R_{max}^2} * (C_{cs-sbs} + C_{SBS}) \quad (4.8)$$

## Αρχιτεκτονική EPC

Οι παράμετροι της αρχιτεκτονικής του EPC σύμφωνα με το [4] παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Table 4.3: Παράμετροι CAPEX EPC

Παράμετρος	Επεξήγηση
$C_{place}$	Κόστος για το στήσιμο ή την ενοικίαση του κέντρου δεδομένων
$C_{servers}$	Συνολικό κόστος για τον εξοπλισμό των servers
$C_{license}$	Συνολικό κόστος άδειων για την απόκτηση του λογισμικού

Επομένως το συνολικό κόστος για την απόκτηση του απαιτούμενου αριθμού servers είναι:

$$C_{servers} = n_{servers} * C_{perServer} \quad (4.9)$$

όπου  $n_{servers}$  είναι ο συνολικός αριθμός των servers που απαιτείται απο το δίκτυο ,  $C_{perServer}$  είναι το κόστος που χρειάζεται κάθε μονάδα .

$$C_{license} = C_{HSS} + C_{MME} + C_{S-GW} + C_{P-GW} + C_{oVS} + C_{OFcontroller} \quad (4.10)$$

όπου  $C_{HSS}$  το κόστος υπηρεσίας συνδρομητών ,  $C_{MME}$  το κόστος για την οντότητα διαχείρισης κινητικότητας ,  $C_{S-GW}$  το κόστος για την εξυπηρέτηση πύλης ,  $C_{P-GW}$  το κόστος για την πύλη δικτύου πακέτων δεδομένων ,  $C_{oVS}$  το κόστος για το Open vSwitch και  $C_{OFcontroller}$  το κόστος για τον ρυθμιστή ροής.

Τέλος το συνολικό CAPEX είναι:

$$CAPEX_{vEPC} = C_{servers} + C_{license} + C_{place} \quad (4.11)$$

#### 4.4.4 Λειτουργικές Δαπάνες - OPEX

##### Αρχιτεκτονική RAN

Οι παράμετροι για την ανάλυση του OPEX για την αρχιτεκτονική RAN σύμφωνα με το [4] είναι:

Table 4.4: Παραμέτροι OPEX RAN

Παράμετρος	Επεξήγηση
$P_{trans}$	Ισχύς πομποδέκτη
$P_{rect}$	Ανορθωτική ισχύς
$P_{DSP}$	Ισχύς του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος
$P_{PA}$	Ισχύς ενισχυτή ισχύος
$P_{mw}$	Ισχύς εκπομπής MiroWave MW
$P_{air}$	Ισχύς ψύξης

Υποθέτοντας ότι ο αριθμός των SBSs σε μια περιοχή A είναι  $N_{SBS}$  και ο αριθμός κάθε μέρους σε κάθε SBS είναι  $n_{us}$  είναι φανερό ότι ένα SBS θα απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ για το σύστημα ψύξης του αλλά και για το MW link [4] και άρα η σχέση που το εκφράζει είναι :

$$P_{airSBS} = P_{air} * [1 + 0.2 * (n_{us} - 1)] \quad (4.12)$$

και

$$P_{mwSBS} = P_{mw} * [1 + 0.2 * (n_{us} - 1)] \quad (4.13)$$

Για ένα SBS η καταναλώμενη RF ισχύς είναι:

$$P_{rfSBS} = (P_{trans} + P_{rect} + P_{PA}) * [1 + 0.2 * (n_{us} - 1)] \quad (4.14)$$

Έτσι η κατανάλωση ισχύος για ένα SBS είναι:

$$P_{SBS} = n_a * P_{rfSBS} + n_{us} * P_{DSP} + P_{airSBS} + P_{mwSBS} \quad (4.15)$$

Άρα το συνολικό OPEX για την αρχιτεκτονική RAN είναι:

$$OPEX_{RAN} = P_{SBS} * N_{SBS} * C_{KWH} \quad (4.16)$$

### Αρχιτεκτονική EPC

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για το EPC δίκτυο λειτουργεί μέσω VM και άρα το OPEX για το EPC καθορίζεται από την κατανάλωση ισχύος των servers στους οποίους βρίσκονται τα VMs. Επομένως το συνολικό OPEX σύμφωνα με το [4] είναι :

$$OPEX_{uEPC} = n_{servers} * P_{perserver} * C_{KWH} \quad (4.17)$$

#### 4.4.5 Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας - TCO

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω τεchnο-οικονομική ανάλυση το TCO της παραπάνω αρχιτεκτονικής εκφράζεται

$$\begin{aligned} TCO &= Cost_{uEPC} + Cost_{RAN} \\ &= CAPEX_{RAN} + OPEX_{RAN} + CAPEX_{uEPC} + OPEX_{uEPC} \\ &= \frac{N_{UE}}{n_{us} * l * \rho_i * R_{man}^2} * (C_{cs-sbs} + C_{SBS}) + P_{SBS} * N_{SBS} * C_{KWH} \\ &\quad + n_{servers} * P_{perserver} * C_{KWH} + (C_{servers} + C_{license} + C_{place}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Πειραματική Ανάλυση

### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό διεξάγονται πειράματα σχετικά με το κέρδος του δικτύου και έχουν ως βάση τους μαθηματικούς τύπους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα πειράματα αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία για κάποιον, που θέλει να εισάγει την τεχνολογία στο σύστημά του.

Για να είναι δυνατή η διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών έχουν τεθεί συγκεκριμένες τιμές σε μεταβλητές του προτεινόμενου μοντέλου. Αρχικά θεωρήθηκαν οι τιμές για το Cognitive Radio μοντέλο, για την πάντοτε θετική σχεδιαστική παράμετρο  $a_1 = 1$ , η απόδοση εκπομπής ραδιοσυχνοτήτων  $k_l = 2$ . Επιπλέον η παράμετρος υποκατάστασης φάσματος  $\theta$  η οποία μπορεί να πάρει τιμές στο διάστημα  $[-1, 1]$  με το  $\theta = 1$  σημαίνει ότι οι μονάδες FBS ή MSUs μπορούν να αλλάξουν μεταξύ του φάσματος, με  $\theta = 0$  σημαίνει ότι οι μονάδες FBS ή MSUs δεν μπορούν να αλλάξουν μεταξύ του φάσματος και τέλος  $\theta < 0$  σημαίνει φάσμα που χρησιμοποιείται από FBS ή MSUs είναι συμπληρωματικό. Ακόμη, η παράμετρος  $c_i$  που συμβολίζει την τιμή του εκάστοτε πρωτεύοντος δικτύου εξετάζεται για διάφορες πιθανές τιμές της όπως και η  $c_q$  που συμβολίζει την τιμή άλλου πρωτεύοντος δικτύου, για την μεταβλητή του κόστους του διανομορασμού του φάσματος θεωρήθηκε  $c_b = 1$ . Επιπρόσθετα οι τιμές για την ενεργειακά αποδοτική εκπομπή από το εξεταζόμενο πρωτεύον δίκτυο στους δευτερεύοντες χρήστες και στις Femtocells είναι  $h_{li} = h_{lk} = 200$ , ενώ για την ενεργειακά αποδοτική εκπομπή από άλλο πρωτεύον δίκτυο στους δευτερεύοντες χρήστες και στις Femtocells είναι  $h_{qi} = h_{qk} = 50$ . Τέλος το κόστος που οι MSUs πρέπει να πληρώσουν στην Cognitive BS τέθηκε με την τιμή  $j_i = 1$ .



Στη συνέχεια θεωρήθηκαν οι τιμές για το SDN μοντέλο, ο αριθμός των virtual BS ανά SuperBS  $nus = 6$ . Επιπλέον, στην πυκνότητα των χρηστών ανά περιοχή δόθηκε η τιμή  $lsbs = 500$  και η μέγιστη κάλυψη της BS πήρε την τιμή  $Rmax = 200$ . Για το κόστος ανά cell site της SBS ( $C_{csscb}$ ), το κόστος μια SBS μονάδας ( $CSBS$ ) και τον συνολικό αριθμό χρηστών ( $Nue$ ) επιλέχτηκαν μεταβαλλόμενες τιμές κατά τα πειράματα. Ακόμη στην ισχύς του πομποδέκτη τέθηκε η τιμή  $P_{trans} = 100$ , στην ανορθωτική ισχύς  $P_{rect} = 100$  και στην ισχύ ενισχυτή ισχύος  $P_{PA} = 10.4$ . Επίσης, η ισχύς του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος πήρε την τιμή  $P_{DSP} = 100$ , η ισχύς ψύξης  $P_{air} = 225$  και η ισχύς εκπομπής MW  $P_{mw} = 80$ . Τέλος, το συνολικό κόστος αδειών για την απόκτηση του λογισμικού είναι  $C_{license} = 17$ , το συνολικό κόστος για τον εξοπλισμό των servers  $C_{servers} = 72$  και το κόστος για το στήσιμο ή την ενοικίαση του κέντρου δεδομένων  $C_{place} = 21$ .

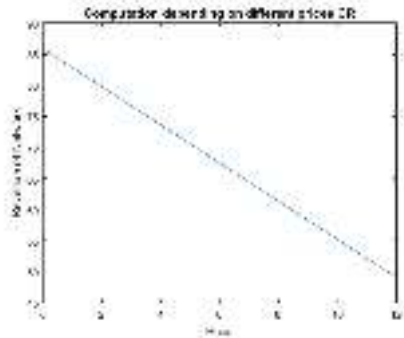
## 5.2 Πειράματα

### CR ΚΑΙ SDN

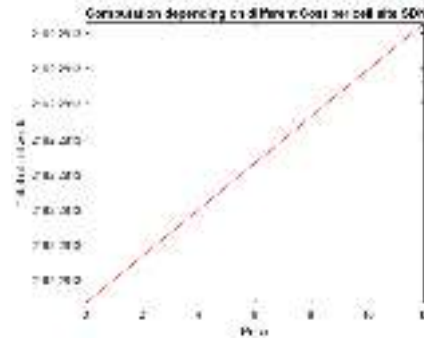
Στα παρακάτω πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για το μοντέλο του CR το  $\theta$  δηλαδή η παραμέτρος υποκατάστασης φάσματος πήρε την τιμή  $\theta = -1$ . Τιμή μικρότερη του μηδενός  $\theta < 0$  που σημαίνει ότι το φάσμα που χρησιμοποιείται από FBS ή MSUs είναι συμπληρωματικό.

Στο πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για το Cognitive Radio μοντέλο εξετάζεται το συνολικό κέρδος του πρωτεύοντος δικτύου για τις διάφορες τιμές του  $c_i$ , με τον αριθμό των πρωτεύοντων δικτύων  $L = 10$  και τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών και των Femtocells να είναι  $I = K = 5$ . Επιπλέον η τιμή των λοιπών πρωτεύοντων δικτύων έχει τεθεί  $c_q = 2$ .

Ενώ για το μοντέλο του SDN κατά το πείραμα που πραγματοποιήθηκε το κόστος ανά μονάδα SBS παρέμεινε σταθερό με  $CSBS = 2$  ενώ το κόστος ανα κυψέλη μεταβάλλονταν παίρνοντας τις τιμές  $C_{csscb} = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 12]$ . Τέλος ο αριθμός των χρηστών τέθηκε  $Nue = 5$ .



(a) Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_i$



(b) Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές  $C_{csscb}$

Figure 5.1: CR vs SDN

Παρατηρείται λοιπόν από το παραπάνω γράφημα 5.1.a ότι όσο αυξάνεται η τιμή  $c_i$  τόσο μειώνεται το κέρδος του δικτύου. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει διότι το κέρδος που επιφέρει στο δίκτυο η πώληση φάσματος στους δευτερεύοντες χρήστες αλλά και στις Femtocell δεν είναι ικανό να καλύψει τα έξοδα της συνεχώς αυξανόμενης τιμής του. Παράλληλα από το γράφημα 5.1.b παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της κυψέλης τόσο αυξάνεται και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και άρα και το κέρδος του δικτύου μειώνεται. Έτσι παρατηρείται ότι για τις παραπάνω περιπτώσεις και στα δύο μοντέλα υπάρχει μείωση του συνολικού κέρδους του δικτύου.

Στο δεύτερο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για το Cognitive Radio μοντέλο εξετάζεται το συνολικό κέρδος του πρωτεύοντος δικτύου για τις διάφορες τιμές των άλλων πρωτευόντων δικτύων  $c_q$ , με τον αριθμό των πρωτευόντων δικτύων  $L = 10$  και τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών και των Femtocells να είναι  $L = K = 5$ . Επιπλέον η τιμή του εξεταζόμενου πρωτεύοντος δικτύου έχει τεθεί  $c_i = 2$ .

Ενώ για το μοντέλο του SDN κατά το πείραμα το κόστος ανά κυψέλη παρέμεινε σταθερό με  $C_{csscb} = 2$  ενώ το κόστος ανά μονάδα SBS μεταβάλλονταν παίρνοντας τις τιμές  $CSBS = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 12]$ . Τέλος ο αριθμός των χρηστών τέθηκε  $Nue = 5$ .

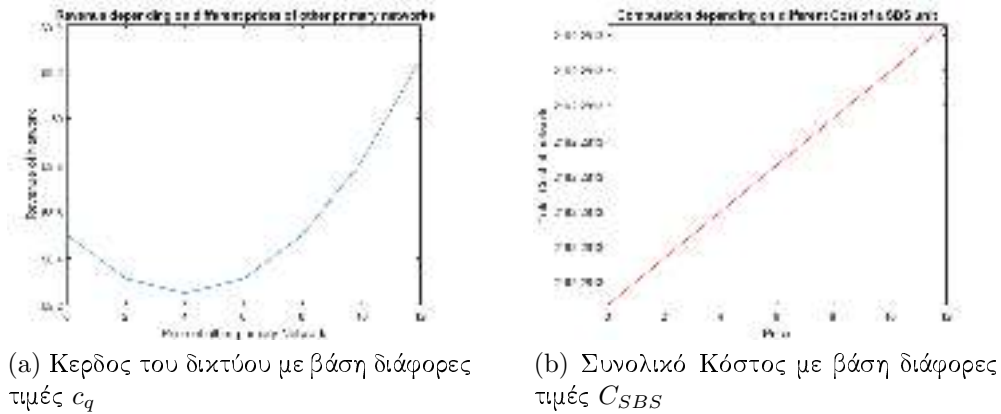
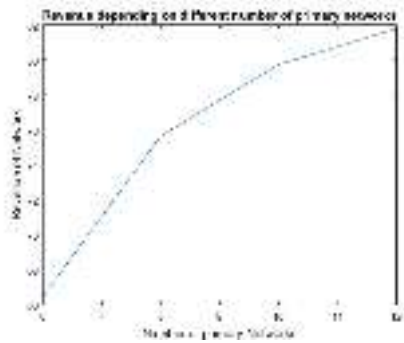


Figure 5.2: CR vs SDN

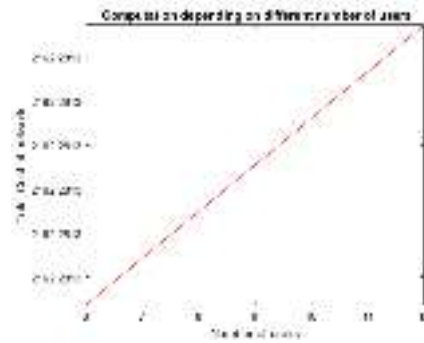
Από το παραπάνω γράφημα 5.2.a παρατηρείται ότι αρχικά το κέρδος έχει μια μικρή μείωση αλλά στη συνέχεια καθώς η τιμή των άλλων πρωτεύοντων δικτύων αυξάνεται το ίδιο συμβαίνει και στο κέρδος διότι η Cognitive BS θα αγοράσει περισσότερο φάσμα από το πρωτεύον δίκτυο όταν τα άλλα πρωτεύοντα δίκτυα έχουν υψηλότερες τιμές. Από το παραπάνω γράφημα 5.2.b παρατηρείται ότι καθώς το κόστος ανά μονάδα SBS αυξάνεται και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και άρα και το κέρδος του δικτύου μειώνεται. Στη προκειμένη περίπτωση στο μοντέλο του CR παρατηρείται αρχικά μείωση ενώ στη συνέχεια αύξηση του συνολικού κέρδους ενώ στο SDN παρατηρείται συνεχής μείωση.

Στην συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση για το μοντέλο του Cognitive Radio κατά την οποία οι τιμές των πρωτεύοντων δικτύων παραμένουν σταθερές με  $c_l = c_q = 2$  αλλά ο αριθμός των πρωτεύοντων δικτύων μεταβάλλεται όπως και ο αριθμός των Femtocells και των δευτερευόντων χρηστών. Κατά την δημιουργία του μοντέλου θεωρήθηκε ότι το άθροισμα του αριθμού των Femtocells με τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών ισούται με τον συνολικό αριθμό πρωτεύοντων δικτύων.

Ενώ για το μοντέλο του SDN κατά το πείραμα παρέμειναν σταθερές οι τιμές του κόστους ανά κυψέλη αλλά και του κόστους ανά μονάδα SBS  $C_{SSSB} = C_{SBS} = 2$  και μεταβάλλεται ο αριθμός των χρηστών παίρνοντας τις τιμές  $N_{ue} = [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]$ .



(a) Κέρδος με βάση των αριθμό πρωτευόντων δικτύων



(b) Συνολικό Κόστος με βάση τον αριθμό των χρηστών

Figure 5.3: CR vs SDN

Από το σχήμα 5.3.a, είναι κατανοητό ότι το κέρδος αυξάνεται όταν ο αριθμός των πρωτευόντων δικτύων αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι όταν υπάρχουν περισσότερες πρωτεύοντα δίκτυα, το Cognitive BS μπορεί να αγοράσει περισσότερο φάσμα από τα δίκτυα με χαμηλότερη τιμή. Έτσι, τα έσοδα της Cognitive BS αυξάνονται, και υπάρχει περισσότερη ζήτηση φάσματος. Από το σχήμα 5.3.b είναι φανερό ότι με την αύξηση του αριθμού των χρηστών αυξάνεται και συνολικό κόστος ιδιοκτησίας άρα και κατά συνέπεια μειώνεται το συνολικό κέρδος του δικτύου. Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι το μοντέλο του CR εμφανίζει συνεχή αύξηση του συνολικού κέρδους σε αντίθεση με το SDN μοντέλο που εμφανίζει συνεχή μείωση.

Τέλος εξετάζεται η περίπτωση για το Cognitive Radio μοντέλο κατά την οποία μεταβάλεται ο αριθμός των πρωτευόντων δικτύων αλλά και η τιμή  $c_q$  με την τιμή του εξεταζόμενου πρωτεύοντος δικτύου να παραμένει σταθερή.

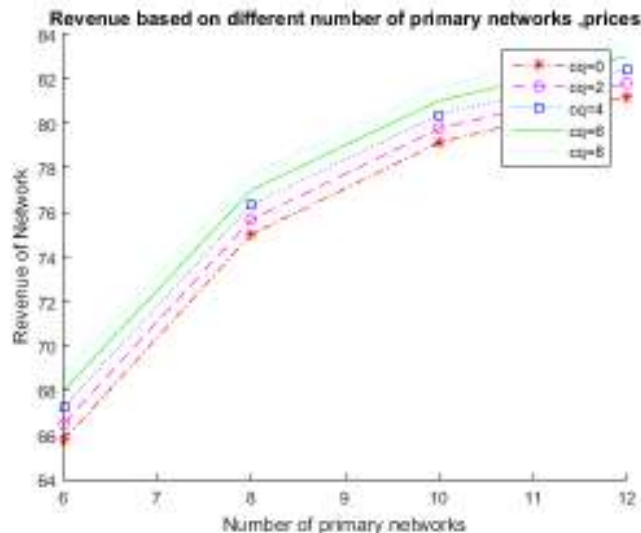


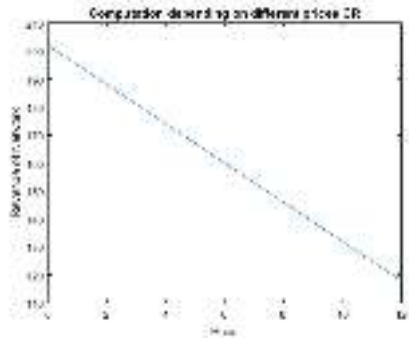
Figure 5.4: Κέρδος με βάση των αριθμό πρωτεύοντων δικτύων και των τιμών  $c_q$

Όπως και στο προηγούμενο γράφημα έτσι και σε αυτό παρατηρείται αύξηση του κέρδους κατά την αύξηση του αριθμού των χρηστών διότι η Cognitive BS θα αγοράσει περισσότερο φάσμα από το πρωτεύον δίκτυο όταν τα άλλα πρωτεύοντα δίκτυα έχουν υψηλότερες τιμές αλλά και μπορεί να αγοράσει περισσότερο φάσμα από τα δίκτυα με χαμηλότερη τιμή. Έτσι, τα έσοδα της Cognitive BS αυξάνονται, και υπάρχει περισσότερη ζήτηση φάσματος.

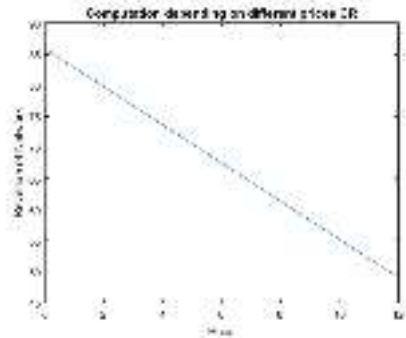
### Παράμετρος υποκατάστασης φάσματος $\theta = 0$

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν παρακάτω για το μοντέλο του CR το  $\theta$  δηλαδή η παράμετρος υποκατάστασης φάσματος πήρε την τιμή  $\theta = 0$ . Το οποίο σημαίνει ότι οι μονάδες FBS ή MSUs δεν μπορούν να αλλάξουν μεταξύ του φάσματος.

Εξετάζεται λοιπόν και πάλι η περίπτωση για το μοντέλο του CR κατά την οποία Cognitive Radio το συνολικό κέρδος του πρωτεύοντος δικτύου για τις διάφορες τιμές του  $c_l$ , με τον αριθμό των πρωτεύοντων δικτύων  $L = 10$  και των αριθμό των δευτερευόντων χρηστών και των Femtocells να είναι  $L = K = 5$ .



(a) Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_i$ ,  $\theta = 0$



(b) Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές  $c_i$ ,  $\theta = -1$

Figure 5.5:  $\theta=0$  vs  $\theta=-1$

Από το παραπάνω γράφημα είναι κατανοητό ότι και στις δύο περιπτώσεις καθώς αυξάνεται η τιμή τόσο μειώνεται το συνολικό κέρδος του δικτύου όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω. Παράλληλα όμως παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου το  $\theta = 0$  και οι μονάδες FBS ή MSUs δεν μπορούν να αλλάξουν μεταξύ του φάσματος το συνολικό κέρδος του δικτύου είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτό στην περίπτωση όπου το  $\theta = -1$ . Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει διότι το φάσμα δεν διαμοιράζεται και με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσφερθεί περισσότερο προς πώληση.

Στο επόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για το Cognitive Radio μοντέλο εξετάζεται το συνολικό κέρδος του πρωτεύοντος δικτύου για τις διάφορες τιμές των άλλων πρωτεύοντων δικτύων  $c_q$ .

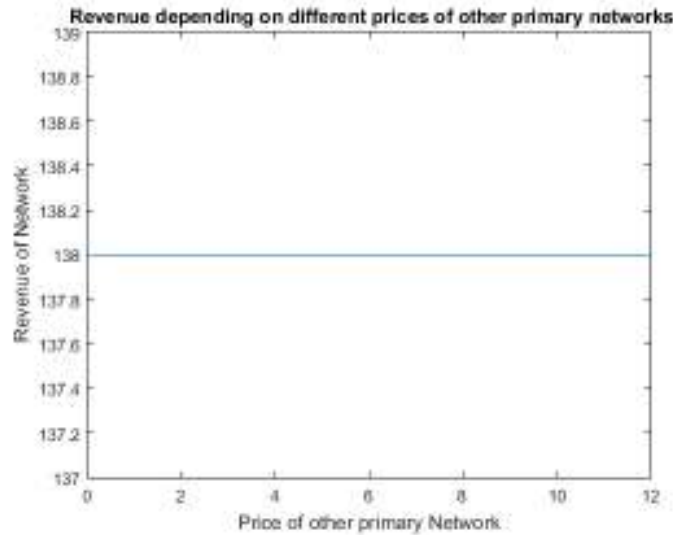


Figure 5.6: Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_q$

Από το γράφημα παρατηρείται λοιπόν ότι το συνολικό κέρδος του δικτύου παραμένει σταθερό για οποιαδήποτε αλλαγή της τιμής των λοιπών πρωτεύοντων δικτύων. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει διότι το φάσμα δεν διαμοιράζεται στα λοιπά πρωτεύοντα δίκτυα και επομένως η τιμή τους δεν επηρεάζει το συνολικό κέρδος του δικτύου.

Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση για το μοντέλο του Cognitive Radio κατά την οποία οι τιμές των πρωτεύοντων δικτύων παραμένουν σταθερές με  $c_l = c_q = 2$  αλλά ο αριθμός των πρωτεύοντων δικτύων μεταβάλλεται όπως και ο αριθμός των Femtocells και των δευτερευόντων χρηστών. Κατά την δημιουργία του μοντέλου θεωρήθηκε ότι το άθροισμα του αριθμού των Femtocells με τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών ισούται με τον συνολικό αριθμό πρωτεύοντων δικτύων.

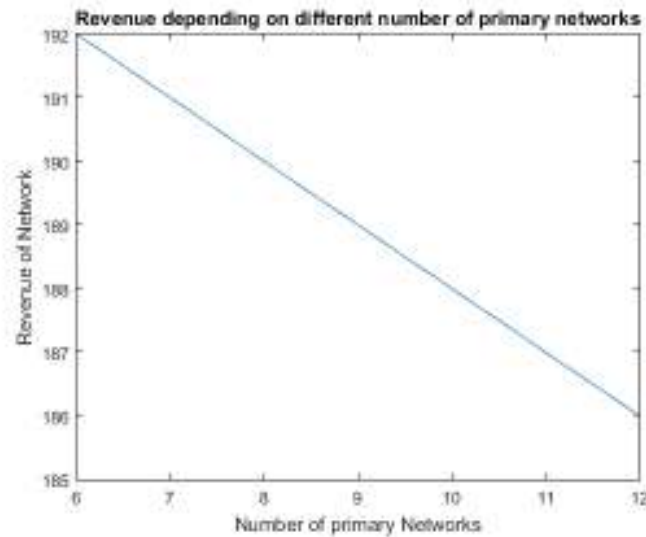


Figure 5.7: Κέρδος με βάση των αριθμό πρωτεύοντων δικτύων

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρείται μικρή μείωση στο συνολικό κέρδος του δικτύου κατά την αύξηση του αριθμού των πρωτεύοντων δικτύων άρα και των Femtocells και των δευτερευόντων χρηστών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Αποτελέσματα

Σε κάθε μελέτη και ανάλυση είναι υψίστης σημασίας να παρουσιαστούν τα βασικά συμπεράσματα, τα οποία έχουν εξαχθεί από την ερευνητική και πειραματική διαδικασία, ώστε να επιβεβαιώσει κανείς αν και κατά πόσο αυτό το οποίο γνώριζε θεωρητικά συμπληρώνεται και ενισχύεται μέσα από την έρευνα, που διεξάγεται ή καταρρίπτεται η θεωρητική προσέγγιση, η οποία είχε αναπτυχθεί και σχετιζόταν άμεσα με το συγκεκριμένο τεχνολογικό τομέα.

Το Cognitive Radio λοιπόν είναι μία μορφή ασύρματης επικοινωνίας που μπορεί να ανιχνεύσει έξυπνα ποια κανάλια επικοινωνίας είναι σε χρήση και τα ποια δεν είναι και αμέσως μετακινούνται σε κενά κανάλια, αποφεύγοντας τα κατειλημμένα. Έτσι βελτιστοποιεί τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων ενώ ελαχιστοποιεί την παρεμβολή σε άλλους χρήστες.

Η σπουδαιότητα του Cognitive Radio εναπόκειται κυρίως στη δυνατότητα του για δημιουργία ευέλικτων προγραμματιστικών δικτύων. Η προγραμματιστικότητα υποβοηθά στο χειρισμό ολόκληρου του δικτύου. Οι διαδικασίες του ελέγχου και της διαχείρισης των δεδομένων διευκολύνονται ενώ υπάρχει αισθητή διαφορά στην καθυστέρηση αλλά και στις ταχύτητες εξυπηρέτησης των χρηστών.

Τα δίκτυα Cognitive Radio έχουν την δυνατότητα να αποφεύγουν σενάρια παρεμβολής ραδιοσυχνοτήτων. Με την ανίχνευση της διαθεσιμότητας του καναλιού μπορούν να αποφύγουν το μπλοκάρισμα με δυναμική και προληπτική μετάβαση σε κανάλια υψηλότερης ποιότητας, ιδιότητα η οποία οδηγεί στη καλύτερη εξυπηρέτηση αλλά και βελτίωση του Quality of Service. Επιπλέον η τεχνολογία του Cognitive Radio μπορεί να προσφέρει στα δίκτυα 5G ευφυΐα, αποδοτικότητα, προσαρμοστικότητα καθώς και συνείδηση.

Συνεπώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ολοκληρωθεί μία οικονομική ανάλυση για το συγκεκριμένο είδος δικτύων με την χρήση του κατάλληλου εργαλείου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το εργαλείο αυτό αποτέλεσε το Stackelberg Game σε συνδυασμό με το Subgame Perfect Equilibrium αλλά και το Nash Equilibrium. Το Stackelberg Game το οποίο είναι ένα στρατηγικό "παιχνίδι" κατά το οποίο οι κινήσεις των ακολούθων εξαρτώνται από αυτή του αρχηγού.

Με την εφαρμογή λοιπόν των εργαλείων αυτών παρατηρήθηκαν σημαντικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου μοντέλου. Για την περίπτωση όπου το  $\theta = -1$  κατά την οποία το φάσμα μεταξύ των FBS και των MSUs είναι συμπληρωματικό παρατηρείται αύξηση του κέρδους του δικτύου στην περίπτωση αύξησης της τιμής των άλλων πρωτευόντων δικτύων αλλά και κατά την περίπτωση αύξησης του αριθμού των πρωτευόντων δικτύων. Ενώ μείωση του συνολικού κέρδους του δικτύου παρατηρείται στην περίπτωση αύξησης την τιμής  $c_i$  του πρωτεύοντος δικτύου.

Στη συνέχεια αναλύθηκε η περίπτωση κατά την οποία το  $\theta = 0$  στην οποία οι μονάδες FBS, MSUs δεν έχουν την δυνατότητα αλλαγής μεταξύ του φάσματος. Συγκριτικά λοιπόν με την περίπτωση όπου  $\theta = -1$  και κατά την μελέτη του συνολικού κέρδους όταν η τιμή  $c_i$  αυξάνεται και στις δύο περιπτώσεις το συνολικό κέρδος του δικτύου μειώνεται αλλά παράλληλα παρατηρείται ότι όταν το  $\theta = 0$  το συνολικό κέρδος παίρνει μεγαλύτερες τιμές. Επιπλέον όπως είναι λογικό το συνολικό κέρδος του δικτύου παραμένει σταθερό κατά την μεταβολή των τιμών των λοιπών πρωτευόντων δικτύων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## Μελλοντική έρευνα

Ο τομέας των δικτύων την πέμπτης γενιάς και η τεχνολογία του Cognitive Radio παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς έχουν πολλά να προσφέρουν στην τεχνολογία των κινητών δικτύων αλλά και στην βελτίωση του Quality of Service. Κατά συνέπεια μπορούν να προσφέρουν τους χρήστες και στην βελτίωση της καθημερινότητας και της ποιότητας ζωής.

Τα δίκτυα αυτά χρειάζονται περαιτέρω μελέτη και έρευνα καθώς συνεχώς βγαίνουν καινούριες λύσεις. Επομένως αναγκαία είναι η συνεχής μελέτη και έρευνα με σκοπό την συνεχή βελτίωση και εξέλιξη. Αρχικά, τα 5G δίκτυα είναι κοντά καθώς σύμφωνα με μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί και δοκιμαστικές τοποθετήσεις κεραιών σε συγκεκριμένες περιοχές, έχει καθοριστεί ότι μέχρι το 2020 θα είναι στη καθημερινότητα του μέσου χρήστη. Αυτό λοιπόν καθιστά απαραίτητη την συνεχή έρευνα με σκοπό την συνεχή βελτίωση και αξιοπιστία ως προς τον χρήστη.

Όσον αφορά την τεχνολογία του Cognitive Radio πολλά είναι τα θέματα τα οποία πρέπει να ερευνηθούν στο μέλλον καθώς είναι μία νέα τεχνολογία η οποία σύμφωνα με πολλούς θα κατακτήσει την αγορά μέσα στα επόμενα χρόνια. Θα πρέπει κατ' αρχάς να ξεπεραστεί η δυσπιστία ενός τμήματος του εμπορικού κόσμου απέναντι στη νέα αυτή τεχνολογία όπως επίσης και οι χρήστες να πεισθούν ότι το νέο προϊόν θα καλύψει τις ανάγκες τους.

Ένα μεγάλο ζήτημα για την τεχνολογία αυτή είναι η αναζήτηση των ζωνών συχνοτήτων οι οποίες είναι κατάλληλες για την εφαρμογή του. Ο David Cleavelly, ιδρυτής της ερευνητικής ομάδας Analysys, θεωρεί ότι αρχικά η πλέον κατάλληλη ζώνη είναι αυτή των 5GHz στην οποία υπάρχει σχετική ελευθερία για να λειτουργήσουν τα CR τεμαχικά.

Έτσι λοιπόν, το ερευνητικό ενδιαφέρον πρέπει να στραφεί προς τον σχεδιασ-

μός υλικού (hardware) και λογισμικού (software) για CR πλατφόρμες. Ένας ακόμη τομέας ο οποίος πρέπει να ερευνηθεί είναι η ανάπτυξη των μοντέλων και αλγορίθμων για τα Cognitive Radio Networks, καθώς και σχετικών πρωτοκόλλων όπως επίσης και η αξιολόγηση και η μέτρηση των διαφορετικών μοντέλων. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό ευέλικτων δικτύων επικοινωνιών αποτελούμενων από CR τερματικά.

# Βιβλιογραφία

- [1] F.Richard Yu, Hong Ji, Yi Li, Renchao Xie. *Energy-Efficient Resource Allocation for Heterogeneous Cognitive Radio Networks with Femtocells*. Article in IEEE Transactions on Wireless Communications November 2012 .
- [2] DUAN, Lingjie . *Some Economics of Cellular and Cognitive Radio Networks* . The Chinese University of Hong Kong July 2012 .
- [3] S. Haykin . *Cognitive radio: brain-empowered wireless communications*,. IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005
- [4] Christos Bouras, Panagiotis Ntarzanos, Andreas Papazois *Cost Modeling for SDN/NFV Based Mobile 5G Networks* Computer Engineering and Informatics Dept., University of Patras, Greece
- [5] B. Naudts, M. Kind, F.-J. Westphal, S. Verbrugge, D. Colle, and M. Pickavet, “*Techno-economic analysis of software defined networking as architecture for the virtualization of a mobile network*,” in *Software Defined Networking (EWSDN) 2012 European Workshop on*, pp. 67–72, IEEE, 2012.
- [6] I. F. Akyildiz, P. Wang, and S.-C. Lin, “*Softair: A software defined networking architecture for 5g wireless systems*,” *Computer Networks*, vol. 85, pp. 1–18, 2015.
- [7] Benzekki Kamal et al *Software-defined networking (SDN): a survey*,. *Security and Communication Networks* 9, no. 18 (2016): 5803-5833.
- [8] Benzekki Kamal et al *Devolving IEEE 802.1 X authentication capability to data plane in software-defined networking (SDN) architecture*,. *Security and Communication Networks* 9.17 (2016): 4369-4377.

- [9] Bib:H. von Stackelberg, *Bib:H. von Stackelberg, Market Structure and Equilibrium: 1st Edition Translation into English*, Bazin, Urch Hill, Springer 2011, XIV, 134 p., ISBN 978-3-642-12585-0
- [10] Y. Qin *A stackelberg-game model in a two-stage supply chain* Syst Eng Proc, 3 (2012), pp. 268-274
- [11] D. Yue, F. You *Game-theoretic modeling and optimization of multi-echelon supply chain design and operation under Stackelberg game and market equilibrium* Comput Chem Eng, 71 (2014), pp. 347-361
- [12] China Mobile Research Institute (2011). *C-RAN: The Road Toward Green RAN (PDF)*. K.Chen et al.
- [13] Pompili, Dario; Hajisami, Abolfazl; Viswanathan, Hariharasudhan "Dynamic Provisioning and Allocation in Cloud Radio Access Networks (C-RANs)". *Ad Hoc*
- [14] Guowang Miao; Jens Zander; Ki Won Sung; Ben Slimane (2016). *Fundamentals of Mobile Data Networks* Cambridge University Press. ISBN 1107143217.
- [15] Εμμανουήλ Βαρβαρίγος *Διάλεξη 1 «Κυψελωτά Ασύρματα Δίκτυα»*, μάθημα: Κινητά Δίκτυα Επικοινωνίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- [16] the DAS forum, *DISTRIBUTED ANTENNA SYSTEMS (DAS) AND SMALL CELL TECHNOLOGIES DISTINGUISHED* February 4, 2013.
- [17] Gabriel, Caroline (2010-06-30). "Softbank to offer femtocells for free". *Rethink Wireless*. Retrieved 2012-07-26.
- [18] J. Boccuzzi and M. Ruggiero, *Femtocells: Design and Application*, 2011, McGraw-Hill
- [19] S.R. Saunders (editor), S. Carlaw, A. Giustina, R. R. Bhat, V. S. Rao, R. Siegberg, *Femtocells: opportunities and challenges for business and technology*, 2009, John Wiley and Sons
- [20] J. Zhang and G. de la Roche, *Femtocells: technologies and deployment*, 2010, John Wiley and Sons
- [21] Nokia, *5G Use Cases and Requirements*", white paper, July 2014

- [22] Lipfert, Hermann (August 2007). *MIMO OFDM Space Time Coding – Spatial Multiplexing, Increasing Performance and Spectral Efficiency in Wireless Systems, Part I Technical Basis*
- [23] Yang, James Ching-Nung (October 10, 2001). "What is OFDM and COFDM?" Department of Computer Science and Information Engineering National Dong Hwa University. Retrieved 2017-04-16.
- [24] Parkvall, Stefan; Astely, David (April 2009). "The evolution of LTE toward LTE Advanced". *Journal of Communications*. 4 (3): 146–54. doi:10.4304/jcm.4.3.146-154. Archived from the original on August 10, 2011
- [25] Jeffrey G. Andrews, Fellow, IEEE, Stefano Buzzi, Senior Member, IEEE, Wan Choi, Senior Member, IEEE, Stephen Hanly, Member, IEEE, Angel Lozano, Fellow, IEEE, Anthony C.K. Soong, Fellow, IEEE, Jianzhong Charlie Zhang, Senior Member, IEEE, "What Will 5G Be?", IEEE jsac special issue on 5g wireless communication systems, May 2014
- [26] Cheng-Xiang Wang, Heriot-Watt University and University of Tabuk Fourat Haider, Heriot-Watt University Xiqi Gao and Xiao-Hu You, Southeast University Yang Yang, ShanghaiTech University Dongfeng Yuan, Shandong University Hadi M. Aggoune, University of Tabuk Harald Haas, University of Edinburgh Simon Fletcher, NEC Telecom MODUS Ltd. Erol Hepsaydir, Hutchison 3G UK, "Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks", IEEE Communications Magazine, Feb 2014
- [27] Alcatel, "NETWORK FUNCTIONS VIRTUALIZATION CHALLENGES AND SOLUTIONS", Strategic White Paper, Jun. 2013
- [28] Sherif Abdelwahab, Oregon State University, Bechir Hamdaoui, Oregon State University, Mohsen Guizani, Qatar University, and Taieb Znati, University of Pittsburgh, "Network Function Virtualization in 5G" , IEEE Communications Magazine, Apr. 2016
- [29] Tao Chen, Marja Matinmikko, Xianfu Chen, Xuan Zhou, and Petri Ahokangas, "Software Defined Mobile Networks: Concept, Survey, and Research Directions", IEEE Communications Magazine, Nov. 2015

- [30] Akram Hakiri and Pascal Berthou, Univ de Toulouse "*Leveraging SDN for The 5G Networks: Trends, Prospects and Challenges*", Jun. 2015
- [31] Taha, A, 2014. *Software-Defined Networking and its Security*. School of Electrical Engineering, Aalto University
- [32] Wolfgang Braun and Michael Menth, Department of Computer Science, University of Tuebingen, "*Software-Defined Networking Using OpenFlow: Protocols, Applications and Architectural Design Choices*", Future Internet, Jun. 2014
- [33] Mitola, Joseph (2000), *Cognitive Radio – An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio* KTH Royal Institute of Technology, ISSN 1403-5286
- [34] Bruce A. Fette *Cognitive Radio Technology*
- [35] <http://www.publicprocurementguides.treasury.gov.cy/OHSGR/HTML/index.html?1512costbenefitanalysis.htm>
- [36] <https://www.researchgate.net/publication/283565745>  
Techno-economicAnalysisofUltra-denseandDASDeploymentsinMobile5G
- [37] <https://www.appa.org/documents/TC0ArticleJun-Jul2016.pdf>
- [38] <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/nfv-network-functions-virtualisation/what-is-nfv-basics.php>
- [39] <https://searchtelecom.techtarget.com/definition/Evolved-Packet-Core-EPC>
- [40] <https://patents.google.com/patent/US4144411>
- [41] <https://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/cellular-concepts/cellular-network-basics.php>
- [42] <http://www.qumak.pl/en/qumak-s-a-performed-mobile-switching-centre-and-data-center-for-polkomtel-and-cyfrowy-polsat/>
- [43] <https://www.techopedia.com/definition/2950/macrocell>
- [44] <https://www.slideshare.net/3G4GLtd/an-introduction-to-macrocells-small-cells>
- [45] <https://www.thinksmallcell.com/Metrocells/what-is-a-metrocell.html>



- [46] <https://www.thinksmallcell.com/Metrocells/why-and-when-to-deploy-metrocells.html>
- [47] <http://stopthecap.com/2013/01/14/att-shifting-to-small-metrocell-wi-fi-technology-in-project-velocity-ip-initiative/>
- [48] <https://www.slashdata.co/blog/2007/12/do-we-really-need-femto-cells>
- [49] <https://www.techopedia.com/definition/16860/picocell>
- [50] <https://www.techopedia.com/definition/8330/microcell>
- [51] <https://www.att.com/>
- [52] <https://ldcinfrastructure.com.au/femtocells-mobile-broadband-whats-the-connection/>
- [53] <https://www.dreamstime.com/g-wireless-cellular-network-speed-wireless-cellular-network-speed-evolution-g-g-g-d-render-image113361315>
- [54] <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/getting-to-5g-comparing-4g-and-5g-system-requirements>
- [55] <https://resources.altium.com/pcb-design-blog/advantages-of-massive-mimo-for-5g-cellular-infrastructure-2>
- [56] <https://resources.altium.com/pcb-design-blog/advantages-of-massive-mimo-for-5g-cellular-infrastructure-2>
- [57] <https://www.researchgate.net/figure/High-level-architecture-of-security-extension-for-NFV-orchestrator-aligned-with-ETSI-NFV-fig8-318283090>
- [58] <https://www.slideshare.net/waqasdaar/introduction-to-openflow>
- [59] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [60] <https://www.sdxcentral.com/sdn/definitions/what-is-openflow/>
- [61] <https://www.slideshare.net/xgtechnology/what-is-cognitive-radio-presentation>
- [62] <https://www.semanticscholar.org/paper/Realisation-of-Cognitive-Radio>

- [63] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804512001518>
- [64] <https://www.slideshare.net/AmeerSameer/cognitive-radio-networks-56423169>
- [65] <https://www.researchgate.net/figure/Fig-3-Mesh-Architecture-Networks-Cognitive-Radio-Base-Station-CR-BSfig3317090863>
- [66] <https://www.researchgate.net/figure/Simplified-OSI-model-for-a-cognitive-radio-contextfig2225127197>
- [67] <http://www.3gpp.org/>

## Παράρτημα Α: Κώδικας Υπολογισμού Του Κόστους

```
1 L= zeros(1,4); %total number of primary networks%
2 K= zeros(1,4); %femtocells%
3 I= zeros(1,4); %secondary users%
4 L(1,1)= 6;
5 for i=2:4
6 L(1,i) = L(1,i-1) +2;
7 end
8
9 I(1,1)=3;
10 for i=2:4
11 I(1,i)= I(1,i-1) +1;
12 end
13
14 for i=1:4
15     K(1,i)= I(1,i);
16 %K+I has to be equal to L%
17 end
18 a1=1; %always positive design paameter%
19 kl=2; %spectrum transmission efficiency of l%
20
21 % the spectrum substitutability parameter%
22 prompt = 'Set the theta parameter.Give a number from -1
23         to 1.. \n';
24 %theta paremeter shoud be in [-1,1]
25 theta = input(prompt);
26 %cl always has to be >= a1*kl%
27
28 cl = [0,2,4,6,8,10,12];
29 cb=1; %cost of spectrum sharing%
30
31
32
33 hqi=50;
```

```

34 hqk=50;
35 hli=200;
36 hlk=200;
37
38
39 %ji is the cost paid by MSUs to the cognitive BS%
40 ji=1;
41 cq=[0,2,4,6,8,10,12];
42
43
44 %Total Cost Computation%
45 %Total Cost Computation depending on diffent prices%
46 %Number of primary networks L=10 and K=5,I=5%
47 xli = 0.5 / I(1,3);
48 xlk = 0.5 / K(1,3);
49 xqi= 0.5 / I(1,3);
50 xqk= 0.5 / K(1,3) ;
51 tc = zeros(1,7);
52 for j=1:7
53 tc(1,j) = (a1 * kl) * (((theta * (L(1,3)-2) + 1) - (cl
      (1,j)*(theta * (L(1,3)-2) + 1)))/((1-theta)*(theta*(
      L(1,3)-1)+1)));
54 sum1=0;
55 for i=1:K(1,3)
56     sum1 = sum1 + (cb * xlk * hlk);
57
58 end
59
60 sum2=0;
61 for i=1:I(1,3)
62     sum2 = sum2 + ((ji * xli * hli) - cl(1,j));
63 end
64
65 sum3 = 0;
66 sum3 = sum1 + sum2;
67 sum3 = (sum3 * (theta * (L(1,3)-2) + 1)) / ((1-theta)*(
      theta*(L(1,3)-1)+1));
68

```

```

69
70 ath1 = 0;
71 for i=1:K(1,3)
72     ath1 = ath1 + (cb * xqk * hqk);
73 end
74
75 ath2=0;
76 for i=1:I(1,3)
77     ath2 = ath2 + ((ji * xqi * hqi) - cq(1,2));
78 end
79
80 ath3 = 0;
81 ath3 = ath1 + ath2;
82 ath3 = (ath3) / ((1-theta)*(theta*(L(1,3)-1)+1));
83
84 tc(1,j) = tc(1,j) + sum3 - (theta * ath3);
85 end
86
87 %sdn/nfv computations
88 Nue = 5;
89 Nue1 = zeros(1,7); % number of users %
90 Nue1 = [6,7,8,9,10,11,12];
91 nus = 6 ; % number of virtual BS per SuperBS %
92 lsbs = 500 ; % User density per each area.%
93 R = 200 ; % Maximum coverage radius of a BS. %
94 Ccsscb = [ 0,2,4,6,8,10,12]; %Cost per cell site.
95 %
96 CSBS = [0,2,4,6,8,10,12]; % Cost of a SBS unit %
97 l = 500 ;
98 for i=1:7
99     var1(1,i) = ((Nue) / (nus * l * pi * (R^2))) * (Ccsscb
100         (1,i) + CSBS(1,2)) ;
101 end
102 Ptrans = 100;
103 Prec = 100 ;
104 Ppa = 10.4 ;
105 Prfsbs = (Ptrans + Prec +Ppa) * (1+0.2 * (nus -1));
106 Pdsp = 100 ;

```

```

105 Pair = 225 ;
106 Pairsbs = Pair * (1+0.2*(nus-1));
107 Pmw = 80;
108 Pmwsbs = Pmw * (1+0.2 * (nus - 1));
109 na = 4;
110 Psbs = na * Prfsbs + nus * Pdsp + Pairsbs + Pmwsbs ;
111 Nsbs = 45 ;
112 Ckwh = 0.015625 ;
113 var2 = Psbs * Nsbs * Ckwh ;
114 nservers = 32 ;
115 Pserver = 36 ;
116 var3 = nservers * Pserver * Ckwh ;
117 Cservers = 72 ;
118 Clicense = 17 ;
119 Cplace = 21 ;
120 var4 = Cservers + Clicense + Cplace ;
121 for i=1:7
122 TCO(1,i) = var1(1,i) + var2 + var3 + var4 ;
123 end
124 for i=1:7
125 met1(1,i) = ((Nue) / (nus * l * pi * (R^2))) * (Ccsscb
    (1,2) + CSBS(1,i)) ;
126 end
127 for i=1:7
128 TCO1(1,i) = met1(1,i) + var2 + var3 + var4 ;
129 end
130 for i=1:7
131 v1(1,i) = ((Nue1(1,i)) / (nus * l * pi * (R^2))) * (
    Ccsscb(1,2) + CSBS(1,2)) ;
132 end
133 for i=1:7
134 TCO2(1,i) = v1(1,i) + var2 + var3 + var4 ;
135 end
136
137
138
139
140 %create the plot of total cost vs the price%

```

```

141
142
143 figure ;
144 plot(cl ,tc);
145 title('Computation depending on different prices CR');
146 xlabel('Price');
147 ylabel('Revenue of Network');
148
149
150 figure ;
151 plot(Ccsscb ,TCO, 'r');
152 title(' Computation depending on different Cost per
        cell site SDN');
153 xlabel('Price');
154 ylabel('Total of network');
155
156
157
158 %Total Cost Computation depending on diffent prices of
        other primary networks%
159 %Number of primary networks L=10 and K=5,I=5%
160 kos = zeros(1,7);
161 cost = zeros(1,7);
162 for i=1:7
163 kos(1,i) = (a1 * k1) * (((theta * (L(1,3)-2) + 1) - (cl
        (1,2)*(theta * (L(1,3)-2) + 1)))/((1-theta)*(theta*(
        L(1,3)-1)+1)));
164 end
165
166
167 pro2=zeros(1,7);
168 pro3=zeros(1,7);
169 pro2(1,1)=((ji * xqi * hqi) - cq(1,1));
170 for m=2:7
171 for i=1:I(1,3)
172     pro2(1,m) = pro2(1,m-1) + ((ji * xqi * hqi) - cq(1,
        m));
173 end

```

```

174 end
175
176 for m=1:7
177 pro3(1,m) = ath1 + pro2(1,m);
178
179 end
180 for m=1:7
181     pro3(1,m) = (pro3(1,m)) / ((1-theta)*(theta*(L(1,3)
        -1)+1));
182 end
183
184 for m=1:7
185     cost(1,m)= kos(1,m) + sum3 - (theta * pro3(1,m));
186 end
187
188
189 %create the plot of total cost vs the price of other
        primary network%
190
191
192 figure;
193 plot(cq, cost);
194 title(' Revenue depending on different prices of other
        primary networks');
195 xlabel('Price of other primary Network');
196 ylabel('Revenue of Network');
197
198
199 figure;
200 plot(CSBS,TCO1, 'r');
201 title(' Computation depending on different Cost of a
        SBS unit ');
202 xlabel('Price');
203 ylabel('Total Cost of network');
204
205 %Total Cost Computation%
206 %For different number of primary networks%
207 kostos=zeros(1,4);

```



```

208 for n=1:4
209 xili = 0.5 / I(1,n);
210 xilk = 0.5 / K(1,n);
211 xiqi= 0.5 / I(1,n);
212 xiqk= 0.5 / K(1,n) ;
213
214 kostos(1,n) = (a1 * kl) * (((theta * (L(1,n)-2) + 1)- (
      cl(1,2)*(theta * (L(1,n)-2) + 1)))/((1-theta)*(theta
      *(L(1,n)-1)+1)));
215 summary1=0;
216 for i=1:K(1,n)
217     summary1 = summary1 + (cb * xilk * hlk);
218
219 end
220
221 summary2=0;
222 for i=1:I(1,n)
223     summary2 = summary2 + ((ji * xili * hli) - cl(1,2))
      ;
224 end
225
226 summary3 = 0;
227 summary3 = summary1 + summary2;
228 summary3 = (summary3 * (theta * (L(1,n)-2) + 1)) / ((1-
      theta)*(theta*(L(1,n)-1)+1));
229
230
231 athrisma1 = 0;
232 for i=1:K(1,n)
233     athrisma1 = athrisma1 + (cb * xiqk * hqk);
234 end
235
236 athrisma2=0;
237 for i=1:I(1,n)
238     athrisma2 = athrisma2 + ((ji * xiqi * hqi) - cq
      (1,2));
239 end
240

```

```

241 athrisma3 = 0;
242 athrisma3 = athrisma1 + athrisma2;
243 athrisma3 = (athrisma3) / ((1-theta)*(theta*(L(1,n)-1)
      +1));
244
245 kostos(1,n) = kostos(1,n) + summary3 - (theta *
      athrisma3);
246 end
247
248
249
250 %create the plot of total cost vs the diffent number of
      primary networks%
251
252
253 figure;
254 plot(L,kostos);
255 title('Revenue depending on different number of primary
      networks');
256 xlabel('Number of primary Networks');
257 ylabel('Revenue of Network');
258
259 figure;
260 plot(Nue1,TCO2,'r');
261 title('Computation depending on different number of
      users');
262 xlabel('Number of users');
263 ylabel('Total Cost of network');
264
265
266 %Total Cost Computation depending on diffent prices of
      primary network and number of primary networks%
267
268 c=zeros(5,4);
269 for n=1:4
270 xili = 0.5 / I(1,n);
271 xilk = 0.5 / K(1,n);
272 xiqi= 0.5 / I(1,n);

```

```

273 xiqk= 0.5 / K(1,n) ;
274 for m=1:5
275 c(m,n) = (a1 * k1) * (((theta * (L(1,n)-2) + 1)- (cl
      (1,2)*(theta * (L(1,n)-2) + 1)))/((1-theta)*(theta*(
      L(1,n)-1)+1)));
276 su1=0;
277 for i=1:K(1,n)
278     su1 = su1 + (cb * xilk * hlk);
279
280 end
281
282 su2=0;
283 for i=1:I(1,n)
284     su2 = su2 + ((ji * xili * hli) - cl(1,2));
285 end
286
287 su3 = 0;
288 su3 = su1 + su2;
289 su3 = (su3 * (theta * (L(1,n)-2) + 1)) / ((1-theta)*(
      theta*(L(1,n)-1)+1));
290
291
292 at1 = 0;
293 for i=1:K(1,n)
294     at1 = at1 + (cb * xiqk * hqk);
295 end
296
297 at2=0;
298 for i=1:I(1,n)
299     at2 = at2 + ((ji * xiqi * hqi) - cq(1,m));
300 end
301
302 at3 = 0;
303 at3 = at1 + at2;
304 at3 = (at3) / ((1-theta)*(theta*(L(1,n)-1)+1));
305
306 c(m,n) = c(m,n) + su3 - (theta * at3);
307 end

```

```

308 end
309
310
311
312 %create the plot of total cost vs the different number
      of primary networks and different prices%
313
314
315 figure;
316 title('Revenue based on different number of primary
      networks ,prices');
317 hold on
318 plot(L,c(1,:), '-.r*');
319 plot(L,c(2,:), '—mo');
320 plot(L,c(3,:), ':bs');
321 plot(L,c(4,:), '-g');
322 plot(L,c(5,:), ':c');
323 legend('cq=0', 'cq=2', 'cq=4', 'cq=6', 'cq=8');
324
325 xlabel('Number of primary networks');
326 ylabel('Revenue of Network');
327 hold off

```