



UNIVERSITY OF  
**PATRAS**  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ &  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διδακτορική Διατριβή

---

Τεχνοοικονομική Διαχείριση Κινητών Δικτύων Πέμπτης Γενιάς (**5G**) & εξής

---

Φοιτήτρια:  
Αναστασία Α. Κόλλια  
Πάτρα, 09/03/2021

Επιβλέπων:  
καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας

Τριμελής Επιτροπή:  
καθ. Ιωάννης Γαροφαλάκης  
καθ. Γεώργιος Φ. Αλεξίου  
καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας

Εφταμελής Επιτροπή:  
καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας  
καθ. Ιωάννης Γαροφαλάκης  
καθ. Γεώργιος Φ. Αλεξίου  
καθ. Κυριάκος Βλάχος  
καθ. Ιωάννης Κούκος  
καθ. Κωνσταντίνος Τσεκούρας  
καθ. Σπύρος Δενάζης

Πανεπιστήμιο Πατρών,  
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής  
Αναστασία Α. Κόλλια  
©2021- Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

## Περίληψη

Σήμερα, η χρήση κινητών δικτύων αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Οι χρήστες χρησιμοποιούν το κινητό τόσο για κλήσεις και μηνύματα όσο και για κοινωνικά δίκτυα, βίντεο, ταινίες, εφαρμογές ασκήσεις και φυσικής κατάστασης, παιχνίδια, εφαρμογές γραφείου, ημερολόγια κλπ. Η χρησιμότητα των συσκευών όχι μόνο έχει αλλάξει άρδην τα τελευταία χρόνια, αλλά αναμένεται να μεταβληθεί ακόμα περισσότερο ιδίως όταν εφαρμογές **Internet of Things (IoT)** προστεθούν στην ήδη διευρυμένη χρήση των κινητών συσκευών. Ακόμα, εμφανίζεται η τάση προσθήκης στο δίκτυο άλλων απλών οικιακών συσκευών και άλλου επιπρόσθετου εξοπλισμού π.χ. ιατρικών μικροσυσκευών, συσκευών παρακολούθησης, καμερών ασφαλείας κλπ.

Η διδακτορική αυτή διατριβή αποτελεί μία συνολική μελέτη και περιλαμβάνει ένα πλαίσιο σχετικά με την πέμπτη γενιά κινητής τηλεπικοινωνίας. Αναλύεται η κατάσταση των Τηλεπικοινωνιών στην Ελλάδα σε βάθος. Ακόμα, περιγράφονται οι σημαντικότερες έννοιες και τα πιο βασικά βήματα και οι σημαντικότερες εξελίξεις των υπάρχουσών γενεών κινητών δικτύων επικοινωνίας.

Επιπρόσθετα, περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο για τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας, καθώς και διάφοροι όροι, που είναι απαραίτητοι για την κατανόηση της παρούσας διατριβής. Αναλύονται διεξοδικά οι σημαντικότερες τεχνολογίες, που αποτελούν δομικούς λίθους για την ανάπτυξη, αλλά και την εξέλιξη στη δόμηση και ύπαρξη της 5G γενιάς κινητής τηλεπικοινωνίας, όπως έχει ήδη περιγραφεί από πλήθος ερευνητικών δράσεων και περιλαμβάνουν τις τεχνολογίες: Υπέρπυκνες Αρχιτεκτονικές (**Ultra-dense**), **Distributed Antenna Systems (DAS)**, **Network Function Virtualization (NFV)**, **Software Defined Networks (SDN)**, **Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO)**, **Cognitive Radio (CR)**, **Milimeter Wave (mmWave)**, **Cloud Computing** και **IoT** και σύγκριση με τις σημερινές τεχνολογίες. Παρατίθενται τεχνο-οικονομικά μοντέλα, με βάση τις πιο σημαντικές τεχνολογίες, που συντελούν στην ανάπτυξη και προώθηση της 5G. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν σημαντικό όπλο, ώστε οι πάροχοι να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες, να έχουν κέρδη και να καινοτομούν. Για το σκοπό αυτό επεξηγούνται τα αρχιτεκτονικά μοντέλα, τα μαθηματικά μοντέλα, οι παράμετροι, που επιλέγονται αλλά και τα αντίστοιχα πειράματα, που διεξάγονται για τις τεχνολογίες **Ultra-density**, **DAS**, **NFV**, **SDN**, **Massive MIMO**, **CR**, **mmWave**.

Συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα βάση των επιμέρους μελετών, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα στον τομέα. Στα πλαίσια αυτά φιλοδοξείται ότι η συγκεκριμένη εργασία θα αποτελέσει ένα βασικό εργαλείο πληροφόρησης και ενημέρωσης για την επιστημονική και τηλεπικοινωνιακή κοινότητα σε ό,τι αναφορά στην τεχνο-οικονομική ανάλυση των τεχνολογιών, που αποτελούν τους θεμέλιους λίθους για τα δίκτυα Πέμπτης γενιάς.

# Abstract

Today, the usage of mobile networks is an integral part of everyday life. Users use the mobile phones for both calls and messages and for social networks, videos, movies, exercise and fitness apps, games, office applications, calendars, etc. The usability of the devices has not only changed dramatically in recent years, but it is expected to be altered even more especially when Internet of Things (IoT) applications are added to the already expanding use of mobile devices. There is also a tendency to add to the network other simplistic domestic appliances and equipment e.g. medical gadgets, surveillance devices, security cameras etc.

This PhD dissertation is a comprehensive study, that includes a framework for the fifth generation of mobile telecommunication networks. The situation of Telecommunications in Greece is analyzed in depth. The most important concepts and the most basic steps of the existing generations of mobile communication networks are described.

In addition, the theoretical framework for mobile communication networks is described, as well as the various terms necessary to understand this thesis. The most important technologies, which are the building blocks for the development and evolution of the 5G generation of mobile telecommunications, are analyzed in detail. As described by a multitude of research activities and technologies, they include: Ultra-dense deployments, Distributed Antenna Systems (DAS), Network Function Virtualization (NFV), Software Defined Networks (SDN), Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO), Cognitive Radio (CR), Milimeter Wave (mmWave), Cloud Computing and IoT and are compared and contrasted with the current network technologies. There are techno-economic models, based on the technologies that contribute to the development and promotion of 5G. These models consist important tools for providers to invest in new technologies, make profits and innovate. For this purpose, the architectural models, the mathematical models, the parameters chosen, and the corresponding experiments that are being carried out are explained.

The main conclusions are summarized based on the individual studies that were carried out in the context of this dissertation and ideas for future research are proposed in the field. In these terms, it is aspired that this research will become a key informative tool for the scientific, research and commercial telecommunication community in reference to the techno-economic analysis of technologies, which consist the cornerstones for the Fifth Generation Networks.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διδακτορικής διατριβής και καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα, για τις θεμελιώδους σημασίας συμβουλές του και την καθοδήγηση, που μου παρείχε σε ολόκληρο το διάστημα εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής, καθώς, επίσης, για τις γνώσεις, που μου μετέδωσε στη δεκαετή συνολική μου πορεία στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής ως προπτυχιακή, μεταπτυχιακή φοιτήτρια και υποψήφια διδάκτωρ, για την ευκαιρία, που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον ζήτημα, αλλά και για τη γενικότερη άψογη συνεργασία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα και τα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Κατανεμημένων Συστημάτων και Τηλεματικής για την άψογη συνεργασία, που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Ακόμα, επιθυμώ να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τα λοιπά μέλη της τριμελούς επιτροπής κρίσης της διδακτορικής διατριβής μου, δηλαδή τον καθηγητή κ. Γαροφαλάκη και τον καθηγητή κ. Αλεξίου. Οι δύο πιο πάνω διδάσκοντες μου έμαθαν πολλές γνώσεις και μου έδωσαν πολλά εφόδια κατά τη διάρκεια της πορείας μου στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, αφού ανελλιπώς παρακολούθησα μαθήματά τους και εν συνεχεία, με υποστήριζαν ιδιαίτερα με τη συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή της διδακτορικής μου διατριβής για την απονομή του Διδακτορικού Διπλώματος Ειδίκευσης στην «Επιστήμη και Τεχνολογία Υπολογιστών».

Επιπλέον, ευχαριστώ τον επίκουρο καθηγητή κ. Μακρή, τους αναπληρωτές καθηγητές κ. Χατζηλυγερούδη και κ. Χρηστίδη στα εργαστήρια των μαθημάτων των οποίων, πραγματοποίησα επικουρικό έργο και συνεργαστήκαμε άψογα κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών. Δεν είναι δυνατό να ξεχάσω τους διδάσκοντες στο τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, που με ιδιαίτερο ζήλο κατάφεραν να μεταλαμπαδεύσουν πλήθος από τις γνώσεις τους και μεταδώσουν την αγάπη τους για τον τομέα των υπολογιστών σε πολλές γενιές μηχανικών, αλλά και σε εμένα προσωπικά. Η εμπειρία τους αποτελεί σημείο υψίστης σημασίας για την πρόοδο, την πορεία και την εξέλιξή μου όλα αυτά τα χρόνια. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επταμελούς επιτροπής εξέτασης για τα σχόλια και τις συμβουλές τους.

Τελευταίο, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με υποστήριξε ηθικά, πνευματικά, ψυχολογικά και οικονομικά και που χωρίς τη δική τους αρωγή θα ήταν αδύνατο να ολοκληρώσω αυτόν τον κύκλο σπουδών. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να αναφέρω τον αείμνηστο παππού μου Δημήτριο Α. Λιάρο, που η προσωπική του ιστορία ζωής αποτέλεσε για μένα σημαντική πηγή έμπνευσης και με βοήθησε σύντομα να αναγνωρίσω τη σημασία της εκπαίδευσης και τη μόρφωσης και να ακολουθήσω το δρόμο της.

Πάτρα, Μάρτιος 2021

Αναστασία Α. Κόλλια

# Contents

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Κινητές Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα	1
1.2	Αντικείμενο της διατριβής	2
1.3	Οργάνωση των κεφαλαίων της διατριβής	5
<b>2</b>	<b>Ιστορική Αναδρομή Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας</b>	<b>7</b>
2.1	1G	10
2.1.1	Δομή	10
2.1.2	Ιστορική Αναδρομή	11
2.1.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	11
	Πλεονεκτήματα	11
	Μειονεκτήματα	11
2.1.4	Υπηρεσίες	12
2.2	2G	12
2.2.1	Δομή	13
2.2.2	Ιστορική Αναδρομή	14
2.2.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	15
	Πλεονεκτήματα	15
	Μειονεκτήματα	15
2.2.4	Υπηρεσίες	15
2.3	3G	15
2.3.1	Δομή	16
2.3.2	Ιστορική Αναδρομή	17
2.3.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	19
	Πλεονεκτήματα	19
	Μειονεκτήματα	20
2.3.4	Υπηρεσίες	20
2.4	4G	21
2.4.1	Δομή	22
2.4.2	Ιστορική Αναδρομή	23
2.4.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	23
	Πλεονεκτήματα	23
	Μειονεκτήματα	23
2.4.4	Υπηρεσίες	24
2.5	5G	25
2.5.1	Δομή	28
2.5.2	Ιστορική Αναδρομή	28
2.5.3	Έργα σχετικά με το 5G	32
2.5.4	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	38

	Πλεονεκτήματα . . . . .	38
	Μειονεκτήματα . . . . .	38
2.5.5	Υπηρεσίες . . . . .	39
2.5.6	Σύγκριση 4G-5G . . . . .	40
2.6	6G . . . . .	46
2.6.1	Υπηρεσίες και Εφαρμογές . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Τεχνολογίες στην Πέμπτη γενιά</b>	<b>51</b>
3.1	Μικροκυψέλες . . . . .	51
3.1.1	Δομή . . . . .	53
3.1.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	55
3.1.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	56
	Πλεονεκτήματα . . . . .	56
	Μειονεκτήματα . . . . .	57
3.2	Distributed Antenna Systems (DAS) . . . . .	58
3.2.1	Δομή . . . . .	60
3.2.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	62
3.2.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	64
	Πλεονεκτήματα . . . . .	64
	Μειονεκτήματα . . . . .	64
3.3	Software Defined Networking (SDN) . . . . .	66
3.3.1	Δομή . . . . .	67
3.3.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	69
3.3.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	71
	Πλεονεκτήματα . . . . .	71
	Μειονεκτήματα . . . . .	72
3.4	Network Function Virtualization (NFV) . . . . .	73
3.4.1	Δομή . . . . .	73
3.4.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	73
3.4.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	74
	Πλεονεκτήματα . . . . .	74
	Μειονεκτήματα . . . . .	75
3.5	Multiple Input Multiple Output (MIMO) . . . . .	75
3.5.1	Δομή . . . . .	76
3.5.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	78
3.5.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	79
	Πλεονεκτήματα . . . . .	79
	Μειονεκτήματα . . . . .	80
3.6	Cognitive Radio . . . . .	80
3.6.1	Δομή . . . . .	82
	Γνωσιακός Κύκλος . . . . .	83
3.6.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	84
3.6.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα	84
	Πλεονεκτήματα . . . . .	85
	Μειονεκτήματα . . . . .	85
3.7	Millimeter Wave (mmWave) communications . . . . .	86
3.7.1	Δομή . . . . .	87

3.7.2	Ιστορική Αναδρομή . . . . .	87
3.7.3	Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα . . . . .	87
	Πλεονεκτήματα . . . . .	87
	Μειονεκτήματα . . . . .	88
<b>4</b>	<b>Οικονομικοί Όροι</b>	<b>89</b>
4.1	Οικονομικοί Όροι και Ορισμοί . . . . .	89
4.2	Είδη Κόστους . . . . .	90
	4.2.1 Δαπάνες Κεφαλαίου ή Capital Expenditure (CAPEX) . . . . .	91
	4.2.2 Λειτουργικές Δαπάνες ή Operational Expenditure (OPEX) . . . . .	92
	4.2.3 Συνολικό Κόστος ή Total Cost of Ownership (TCO) . . . . .	92
4.3	Θεωρία παιγνίων ή Game Theory . . . . .	92
	4.3.1 Stackelberg game . . . . .	93
	4.3.2 Subgame perfect equilibrium ή Subgame Perfect Nash equilibrium . . . . .	93
4.4	Επιλογή Παραμέτρων . . . . .	93
	4.4.1 Μελέτη Εφικτότητας (ME) . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Σχετική Έρευνα</b>	<b>95</b>
5.1	Κινητά Δίκτυα 4ης & 5ης Γενιάς . . . . .	95
5.2	Μικροκυψέλες . . . . .	96
5.3	Distributed Antenna Systems (DAS) . . . . .	97
5.4	Software Defined Networking (SDN) . . . . .	98
5.5	Network Function Virtualization (NFV) . . . . .	98
5.6	Multiple Input Multiple Output (MIMO) . . . . .	99
5.7	Cognitive Radio . . . . .	99
5.8	Milimeter Wave (mmWave) communications . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Ultra-dense/Small cells</b>	<b>103</b>
6.1	Αρχιτεκτονική . . . . .	104
6.2	Μαθηματικό Μοντέλο . . . . .	106
	6.2.1 Κόστος κεφαλαίου . . . . .	106
	6.2.2 Λειτουργικό κόστος . . . . .	108
	6.2.3 Συνολικό κόστος . . . . .	108
6.3	Παράμετροι . . . . .	108
6.4	Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας . . . . .	108
<b>7</b>	<b>Distributed Antenna Systems (DAS)</b>	<b>119</b>
7.1	Αρχιτεκτονική . . . . .	119
7.2	Μαθηματικό Μοντέλο . . . . .	121
	7.2.1 Κόστος Κεφαλαίου . . . . .	123
	7.2.2 Λειτουργικό Κόστος . . . . .	125
	7.2.3 Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας . . . . .	126
7.3	Παράμετροι . . . . .	127
7.4	Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας . . . . .	128

<b>8</b>	<b>NFV Distributed Antenna Systems (DAS)</b>	<b>133</b>
8.1	Αρχιτεκτονική	134
8.2	Μαθηματικό Μοντέλο	134
8.3	Παράμετροι	135
8.4	Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας	137
<b>9</b>	<b>Software Defined Networks (SDN)</b>	<b>143</b>
9.1	Αρχιτεκτονική	144
9.1.1	Αρχιτεκτονική SDN	144
9.1.2	Αρχιτεκτονική LTE-A κινητού δικτύου	146
9.2	Μαθηματικό Μοντέλο SDN	147
9.2.1	Κόστος κεφαλαίου	149
9.2.2	Λειτουργικό κόστος	150
9.2.3	Συνολικό κόστος	152
9.3	Μαθηματικό Μοντέλο LTE-A κινητού δικτύου	152
9.3.1	Κόστος κεφαλαίου	152
9.3.2	OPEX	153
9.3.3	TCO	154
9.4	Παράμετροι	154
9.5	Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας	154
9.5.1	Σύγκριση του παραδοσιακού LTE-A και του SDN μοντέλου	157
9.5.2	Μελέτη εφικτότητας για το SDN μοντέλο	163
<b>10</b>	<b>Multiple Input Multiple Output (MIMO)</b>	<b>169</b>
10.1	Αρχιτεκτονική	169
10.2	Μαθηματικό Μοντέλο	173
10.2.1	Κόστος κεφαλαίου	174
10.2.2	Λειτουργικό κόστος	174
10.2.3	Συνολικό κόστος	175
10.3	Παράμετροι	175
10.4	Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας	176
10.4.1	Μελέτη Εφικτότητας για το MIMO με μία μεταβλητή	179
10.4.2	Μελέτη Εφικτότητας για το MIMO με δύο μεταβλητές	182
<b>11</b>	<b>Cognitive Radio (CR)</b>	<b>185</b>
11.1	Cognitive Radio-SDN	185
11.1.1	Αρχιτεκτονική	186
11.1.2	Μαθηματικό Μοντέλο	189
	Κόστος κεφαλαίου	190
	Λειτουργικό κόστος	190
	Συνολικό Κόστος	191
11.1.3	Παράμετροι	191
11.1.4	Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας	192
	Σύγκριση κόστους για SDN & CR	192
	Μελέτη Εφικτότητας για τη CR	193
11.2	Stalkerberg game για την τεχνολογία Cognitive Radio	200
11.2.1	Αρχιτεκτονική	200
11.2.2	Μαθηματικό Μοντέλο	200

Ανάστορφο Stackelberg Game . . . . .	201
11.2.3 Παράμετροι . . . . .	202
11.2.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας . . . . .	202
11.2.5 Σύγκριση των μοντέλων CR και SDN . . . . .	204
Μελέτη Εφικτότητας για την παράμετρο υποκατάστασης φάσματος $\theta = 0$ . . . . .	208
<b>12 Millimeter Wave (mmWave)</b>	<b>213</b>
12.0.1 Αρχιτεκτονική . . . . .	214
12.0.2 Μαθηματικό μοντέλο . . . . .	217
12.0.3 Μακροκυψέλες . . . . .	217
Κόστος Κεφαλαίου . . . . .	218
Λειτουργικό Κόστος . . . . .	218
Συνολικό κόστος . . . . .	219
12.0.4 Small cells . . . . .	219
Κόστος Κεφαλαίου . . . . .	219
Λειτουργικό Κόστος . . . . .	219
Συνολικό Κόστος . . . . .	220
12.0.5 Παράμετροι . . . . .	220
12.0.6 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας . . . . .	222
12.0.7 Μελέτη Εφικτότητας Μίας Μεταβλητής . . . . .	223
12.0.8 Μελέτη Εφικτότητας Δύο Μεταβλητών . . . . .	230
<b>13 Συμπεράσματα</b>	<b>233</b>
13.1 Συμπεράσματα . . . . .	233
<b>14 Μελλοντική έρευνα</b>	<b>237</b>
14.1 Μελλοντική έρευνα . . . . .	237
<b>A Δημοσιεύσεις, που υποστηρίζουν τη διδακτορική διατριβή</b>	<b>241</b>
A.1 Συνέδρια . . . . .	241
A.2 Περιοδικά . . . . .	243
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>247</b>



# List of Figures

2.1	Οι βασικότερες 5G τεχνολογίες. . . . .	29
3.1	Ένα βασικό σχήμα μοντέλου SDN. . . . .	69
3.2	Η βασική ιδέα πίσω από το μοντέλο της MIMO αρχιτεκτονικής. . .	77
3.3	Η βασική ιδέα πίσω από το μοντέλο της MIMO αρχιτεκτονικής. . .	77
3.4	Η βασική ιδέα του μοντέλου της τεχνολογίας Cognitive Radio. . . .	82
6.1	Η εγγύτητα των κυψελών στις Ultra-dense υλοποιήσεις. Η απόσταση από κυψέλη σε κυψέλη είναι 10m και η ακτίνα της κυψέλης είναι επίσης 10m. . . . .	106
6.2	Η εγγύτητα των κυψελών στις Ultra-dense υλοποιήσεις. Η απόσταση από κυψέλη σε κυψέλη είναι 10m και η ακτίνα της κυψέλης είναι επίσης 10m. . . . .	107
6.3	Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	109
6.4	Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB με βάση διαφορετικές τεχνολογίες υλοποίησης οπτική ίνα ή μικροκύματα συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	110
6.5	Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB, για πολύ μεγάλα κτήρια, συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	111
6.6	Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσε των ετών επένδυσης. . . . .	111
6.7	Δαπάνες λειτουργίας για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	112
6.8	Συνολικό κόστος κατοχής για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	113
6.9	Συνολικές δαπάνες κατοχής, για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB, με βάση διαφορετικές τεχνολογίες υλοποίησης οπτική ίνα ή μικροκύματα συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	113
6.10	Συνολικές δαπάνες κατοχής για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB, για πολύ μεγάλα κτήρια, συναρτήσε του πλήθους κεραιών. . . . .	114

6.11	Συνολικές δαπάνες κατοχής για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσει των ετών επένδυσης. . . . .	115
7.1	Μελέτη εφικτότητας κλασικού μοντέλου DAS σχετικά με το εύρος ζώνης. . . . .	130
7.2	Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με το σταθμό βάσης. . . . .	130
7.3	Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με τον εξοπλισμό στο σύστημα. . . . .	131
7.4	Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης για το σύστημα. . . . .	131
7.5	Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης της θέσης για το σύστημα. . . . .	132
8.1	Ένα μοντέλο για την τροποποίηση της αρχιτεκτονικής του DAS με βάση την τεχνική NFV για εσωτερικούς χώρους. . . . .	135
8.2	Μελέτη εφικτότητας virtualized μοντέλου DAS σχετικά με το εύρος ζώνης. . . . .	138
8.3	Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το eNB. . . . .	138
8.4	Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το EPC. . . . .	138
8.5	Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με τον εξοπλισμό στο σύστημα. . . . .	139
8.6	Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης για το σύστημα. . . . .	139
8.7	Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης της θέσης για το σύστημα. . . . .	139
8.8	Σύγκριση κόστους κεφαλαίου για τα δύο DAS συστήματα. . . . .	140
8.9	Σύγκριση λειτουργικού κόστους για τα δύο DAS συστήματα. . . . .	141
8.10	Σύγκριση συνολικού κόστους για τα δύο DAS συστήματα. . . . .	141
9.1	Μοντέλο Συστήματος SDN/NFV (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Paparzois, 2016). . . . .	145
9.2	Η αρχιτεκτονική LTE-A μαζί με τα βασικά συστατικά. . . . .	148
9.3	Η αρχιτεκτονική SDN/NFV μαζί με τα βασικά συστατικά στοιχεία της. . . . .	148
9.4	Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το πλήθος των σταθμών βάσης. . . . .	157
9.5	Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το πλήθος των σταθμών βάσης ανά $km^2$ . . . . .	158
9.6	Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το κόστος του εικονικού σταθμού βάσης. . . . .	158
9.7	Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το κόστος της δημιουργίας κυψελών του υπερ-σταθμού βάσης. . . . .	159
9.8	Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το πλήθος των υπερ-σταθμών βάσης. . . . .	159
9.9	Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ του μεταδότη. . . . .	159

9.10	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με την ισχύ του διορθωτή σήματος. . . . .	160
9.11	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με την ισχύ του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος. . . . .	160
9.12	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με την ισχύ του ενισχυτή ισχύος. . . . .	161
9.13	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με την ισχύ των μικρο-κυμάτων. . . . .	161
9.14	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με την ισχύ του κλιματισμού. . . . .	161
9.15	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με την ισχύ ανά εξυπηρετητή. . . . .	162
9.16	Σύγκριση των δύο μοντέλων <b>SDN LTE-A</b> σχετικά με το κόστος της <b>KWh</b> . . . . .	162
9.17	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με τα κόστη <b>HSS</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	163
9.18	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με το πλήθος των <b>HSS</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	163
9.19	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με τα κόστη <b>MME</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	164
9.20	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με τα κόστη <b>P-GW</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	164
9.21	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με τα κόστη <b>S-GW</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	165
9.22	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με τα κόστη <b>CoVS</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	165
9.23	Μελέτη εφικτότητας των <b>CAPEX, OPEX και TCO</b> σε σχέση με τα κόστη <b>COFController</b> του μοντέλου <b>SDN</b> . . . . .	166
10.1	Το μοντέλο για την τεχνολογία <b>MIMO</b> . . . . .	170
10.2	Η σύγκριση των κεφαλαιουχικών δαπανών της <b>MIMO</b> και της <b>DAS</b> . . . . .	177
10.3	Η σύγκριση των λειτουργικών δαπανών της <b>MIMO</b> και της <b>DAS</b> . . . . .	178
10.4	Η σύγκριση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας της <b>MIMO</b> και της <b>DAS</b> . . . . .	178
10.5	Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το πλήθος των σταθμών βάσης της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	180
10.6	Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το σχέδιο επένδυσης της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	180
10.7	Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το επιτόκιο της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	181
10.8	Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το κόστος θέσης της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	181
10.9	Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με τα λειτουργικά έξοδα της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	182
10.10	Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με τα κόστη καλωδίωσης της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	182
10.11	Μελέτη εφικτότητας δύο μεταβλητών σχετικά με τα κόστη κεραιών της τεχνολογίας <b>MIMO</b> . . . . .	183

10.12	Μελέτη εφικτότητας δύο μεταβλητών σχετικά με τα κόστη σταθμών βάσης της τεχνολογίας <b>MIMO</b> .	183
10.13	Μελέτη εφικτότητας δύο μεταβλητών σχετικά με τα κόστη εύρους ζώνης της τεχνολογίας <b>MIMO</b> .	184
11.1	Το βασικό μοντέλο της αρχιτεκτονικής της τεχνολογίας <b>Cognitive Radio</b> και της αλληλεπίδρασής του με τα βασικά συστατικά.	187
11.2	Η σύγκριση του κόστους κεφαλαίου για το <b>SDN &amp; CR</b> συγκριτικά με το πλήθος κεραιών.	193
11.3	Η σύγκριση του λειτουργικού κόστους για το <b>SDN &amp; CR</b> συγκριτικά με το πλήθος κεραιών.	193
11.4	Η σύγκριση του συνολικού κόστους για το <b>SDN &amp; CR</b> συγκριτικά με το πλήθος κεραιών.	194
11.5	Η ΜΕ του πλήθους των εικονικών σταθμών βάσης στο μοντέλο <b>CR</b> .	194
11.6	Η ΜΕ του πλήθους των σταθμών βάσης ανά ομάδα σταθμών στο μοντέλο <b>CR</b> .	195
11.7	Η ΜΕ του κόστους της κατασκευής των κυψελών ανά ομάδα σταθμών στο μοντέλο <b>CR</b> .	195
11.8	Η ΜΕ για το κόστος του αριθμού των σταθμών βάσης ανά $\tau\chi\mu^2$ στο μοντέλο <b>CR</b> .	196
11.9	ΜΕ του πλήθους των υλοποιημένων σταθμών βάσης στο μοντέλο <b>CR</b> .	196
11.10	Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον πομπό για το μοντέλο <b>CR</b> .	197
11.11	Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον ανορθωτή για το μοντέλο <b>CR</b> .	197
11.12	Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον ψηφιακό επεξεργαστή για το μοντέλο <b>CR</b> .	197
11.13	Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον κλιματισμό για το μοντέλο <b>CR</b> .	198
11.14	Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στα μικροκύματα για το μοντέλο <b>CR</b> .	198
11.15	Η ΜΕ για το πλήθος των παρόχων στο μοντέλο <b>CR</b> .	199
11.16	Η ΜΕ για το κόστος του αριθμού των σταθμών βάσης ανά $\tau\chi\mu^2$ στο μοντέλο <b>CR</b> .	199
11.17	Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές $c_l$ στο <b>CR</b> .	205
11.18	Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές $C_{csscb}$ στο <b>SDN</b> .	205
11.19	Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές $c_q$ <b>CR</b> .	206
11.20	Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές $C_{SBS}$ <b>SDN</b> .	206
11.21	Κέρδος με βάση τον αριθμό πρωτευόντων δικτύων στο <b>CR</b> .	207
11.22	Συνολικό Κόστος με βάση τον αριθμό των χρηστών <b>SDN</b> .	207
11.23	Κέρδος με βάση τον αριθμό πρωτευόντων δικτύων και των τιμών $c_q$ .	207
11.24	Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές $c_l$ , $\theta = 0$ .	208
11.25	Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές $c_l$ , $\theta = -1$ .	208
11.26	Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές $c_q$ .	209
11.27	Κέρδος με βάση τον αριθμό πρωτευόντων δικτύων.	209
11.28	Κέρδος με βάση τις παραμέτρους $c_l$ και $c_q$ .	210
11.29	Κέρδος με βάση τον αριθμό πρωτευόντων δικτύων.	210

12.1 Το βασικό μοντέλο της Ultra-dense αρχιτεκτονικής σε δίκτυα 5G. . . . .	216
12.2 Το κόστος κεφαλαίου σε σχέση με το πλήθος των κυψελών για το μοντέλο mmWave. . . . .	222
12.3 Το λειτουργικό κόστος σε σχέση με το πλήθος των κυψελών για το μοντέλο mmWave. . . . .	222
12.4 Το συνολικό κόστος σε σχέση με το πλήθος των κυψελών για το μοντέλο mmWave. . . . .	223
12.5 Μελέτη εφικτότητας για τα Macrocell σε σχέση με τα κόστη CAPEX, OPEX and TCO με κριτήριο το κόστος του eNB. . . . .	223
12.6 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το εύρος ζώνης. . . . .	224
12.7 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της μικροκυψέλης σε σχέση με το εύρος ζώνης. . . . .	224
12.8 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το EPC. . . . .	225
12.9 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το EPC. . . . .	225
12.10 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το $f_{BW}$ . . . . .	226
12.11 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το $f_{BW}$ . . . . .	226
12.12 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το $f_{st}$ . . . . .	227
12.13 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το $f_{st}$ . . . . .	227
12.14 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το $i$ . . . . .	228
12.15 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το $i$ . . . . .	228
12.16 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με τα έτη επένδυσης $n$ . . . . .	229
12.17 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με τα έτη επένδυσης $n$ . . . . .	229
12.18 Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το $C_{site}$ . . . . .	230
12.19 Μελέτη εφικτότητας για το OPEX της Μακροκυψέλης σε σχέση με το $f_{BW}$ και $BW$ . . . . .	230
12.20 Μελέτη εφικτότητας για το TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το $f_{BW}$ και $BW$ . . . . .	231



# List of Tables

2.1	Αξιολόγηση των κύριων παραγόντων 5G. . . . .	44
3.1	Τα διάφορα επίπεδα του SDN και η λειτουργικότητά τους. . . . .	69
6.1	Μεταβλητές συστήματος και παράμετροι για το σύστημα υπερ- πυκνών αρχιτεκτονικών. . . . .	109
7.1	Παράμετροι και μεταβλητές συστήματος για το DAS . . . . .	129
8.1	Παράμετροι και μεταβλητές κόστους για το τροποποιημένο DAS μοντέλο. . . . .	136
9.1	Παράμετροι και μεταβλητές του SDN δικτύου-Κόστη RAN. . . . .	155
9.2	Παράμετροι και μεταβλητές του SDN δικτύου- Κόστη EPC. . . . .	156
9.3	Εξυπηρετητές. . . . .	157
9.4	Blade Server Resources. . . . .	157
10.1	Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών για τα εξεταζόμενα μον- τέλα Massive MIMO και DAS. . . . .	171
10.2	Τεχνολογία MIMO: Παράμετροι κόστους και μεταβλητές συστή- ματος. . . . .	176
11.1	Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών CR και SDN των μοντέλων, που αναλύθηκαν παραπάνω. . . . .	188
11.2	Παράμετροι και μεταβλητές συστήματος για την τεχνολογία CR . . .	192
11.3	Παράμετροι και μεταβλητές κόστους για το CR Stackelberg σενάριο.	203
11.4	Παράμετροι και μεταβλητές κόστους για το CR Stackelberg σενάριο (Xie et al., 2012). . . . .	204
12.1	Παράμετροι κόστους TCO και μεταβλητές συστήματος για τη mmWave αρχιτεκτονική. . . . .	221



# List of Abbreviations

HIIA	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
<b>1G</b>	<b>1st Generation of Mobile Networks</b>
<b>2G</b>	<b>2nd Generation of Mobile Networks</b>
<b>2.5G</b>	<b>2.5nd Generation of Mobile Networks</b>
<b>2.75G</b>	<b>2.75nd Generation of Mobile Networks</b>
<b>3G</b>	<b>3rd Generation of Mobile Networks</b>
<b>3GPP</b>	<b>3rd Generation Partnership Project</b>
<b>4G</b>	<b>4th Generation of Mobile Networks</b>
<b>5G</b>	<b>5th Generation of Mobile Networks</b>
<b>AaaS</b>	<b>Anything as a Service</b>
<b>BBU</b>	<b>Base Band Unit</b>
<b>bps</b>	<b>bits per second</b>
<b>BS</b>	<b>Base Station</b>
<b>BSC</b>	<b>Base Station Controller</b>
<b>BW</b>	<b>BandWidth</b>
<b>cBBU</b>	<b>cellular Base Band Unit</b>
<b>CDMA</b>	<b>Code Division Multiple Access</b>
<b>CDN</b>	<b>Content Delivery Network</b>
<b>CDNaaS</b>	<b>Content Delivery Network as a Service</b>
<b>CO-MIMO</b>	<b>Cooperative Multiple Input Multiple Output</b>
<b>CORD</b>	<b>Central Office Rearchitected as a Data Center</b>
<b>CR</b>	<b>Cognitive Radio</b>
<b>CSDN</b>	<b>Cellular Software Defined Networks</b>
<b>DAS</b>	<b>Distributed Antenna System</b>
<b>DBaaS</b>	<b>Data Base as a Service</b>
<b>DCN</b>	<b>Data Center Network</b>
<b>DSA</b>	<b>Dynamic Spectrum Access</b>
<b>DS-CDMA</b>	<b>Direct Sequence CDMA</b>
<b>DSL</b>	<b>Digital Subscriber Loop/Line</b>
<b>ECSD</b>	<b>Enhanced Circuit Switch Data</b>
<b>EDGE</b>	<b>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</b>
<b>EGPRS</b>	<b>Enhanced GPRS</b>
<b>eNB</b>	<b>Node B</b>
<b>EPC</b>	<b>Evolved Packet Core</b>
<b>EPS</b>	<b>Evolved Packet System</b>
<b>ETSI</b>	<b>European Telecommunication Standard Institution</b>
<b>eUTRAN</b>	<b>evolved UMTS RAN</b>
<b>FDD</b>	<b>Frequency Division Duplexing</b>
<b>FDMA</b>	<b>Frequency Devision Multiple Access</b>
<b>ft</b>	<b>feet</b>

<b>FTTH</b>	<b>Fiber to the Home</b>
<b>GERAN</b>	<b>GSM EDGE RAN</b>
<b>GGSN</b>	<b>Gateway GPRS Support Node</b>
<b>GHz</b>	<b>Giga Hertz</b>
<b>GPON</b>	<b>Gigabit Passive Optical Network</b>
<b>GRAN</b>	<b>GSM RAN</b>
<b>GSM</b>	<b>Global System Mobile Communication</b>
<b>HNB</b>	<b>Home Node B</b>
<b>HNB-GW</b>	<b>Home Node B- GateWay</b>
<b>HSS</b>	<b>Home Subscriber Service</b>
<b>IaaS</b>	<b>Internet as a Service</b>
<b>ICIC</b>	<b>Inter Cell Interference Coordination</b>
<b>iDAS</b>	<b>indoor Distributed Antenna System</b>
<b>IMPEX</b>	<b>IMPlmentation EXpenditure</b>
<b>IoT</b>	<b>Internet of Things</b>
<b>IP</b>	<b>Internet Protocol</b>
<b>KM</b>	<b>KiloMeter</b>
<b>LAN</b>	<b>Local Area Network</b>
<b>LIPA</b>	<b>Local IP Access</b>
<b>LOS</b>	<b>Line Of Sight</b>
<b>LTE</b>	<b>Long Term Evolution</b>
<b>LTE-A</b>	<b>Long Term Evolution -Advanced</b>
<b>LSA</b>	<b>Licensed Shared Access</b>
<b>m</b>	<b>metres</b>
<b>MAC</b>	<b>Medium Access Control</b>
<b>Massive MIMO</b>	<b>Massive Multiple Input Multiple Output</b>
<b>MCORD</b>	<b>Mobile Central Office Rearchitected as a Data Center</b>
<b>MeSDN</b>	<b>Mobile Software Defined Network</b>
<b>MHz</b>	<b>Mega Hertz</b>
<b>MIMO</b>	<b>Multiple Input Multiple Output</b>
<b>MISO</b>	<b>Multiple Input Single Output</b>
<b>MME</b>	<b>Mobile Management Entity</b>
<b>MSC</b>	<b>Mobile Switching Center</b>
<b>MU-MIMO</b>	<b>Multiple User Multiple Input Multiple Output</b>
<b>NFV</b>	<b>Network Function Virtualization</b>
<b>oDAS</b>	<b>Outdoor Distributed Antenna System</b>
<b>OFDM</b>	<b>Orthogonal Frequency Division Modulation</b>
<b>OFDMA</b>	<b>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</b>
<b>ONF</b>	<b>Open Network Foundation</b>
<b>OPEX</b>	<b>OPerational EXpenditure</b>
<b>OpenRAN</b>	<b>Open Radio Access Network</b>
<b>OPNFV</b>	<b>Open Platform Network Function Virtualization</b>
<b>PaaS</b>	<b>Platform as a Service</b>
<b>PCFR</b>	<b>Policy Control and Charging Rules Function</b>
<b>PDCP</b>	<b>Packet Data Coverage Protocol</b>
<b>PEST</b>	<b>Political Economic Social Technological Strengths</b>
<b>P-GW</b>	<b>Packet Core Gateway</b>

<b>PHY</b>	<b>Physical Layer</b>
<b>PON</b>	<b>Passive Optical Network</b>
<b>PSTN</b>	<b>Public Switched Telephone Network</b>
<b>PU</b>	<b>Primary User</b>
<b>QoE</b>	<b>Quality Of Experience</b>
<b>QoI</b>	<b>Quality Of Information</b>
<b>QoS</b>	<b>Quality Of Service</b>
<b>QPSK</b>	<b>Quadrature Phase Shift Keying</b>
<b>RAN</b>	<b>Radio Access Network</b>
<b>RF</b>	<b>Radio Frequency</b>
<b>RLC</b>	<b>Radio Link Control</b>
<b>RNC</b>	<b>Radio Network Controller</b>
<b>SaaS</b>	<b>Software as a Service</b>
<b>SAE</b>	<b>System Architecture Evolution</b>
<b>SDCN</b>	<b>Software Defined Cellular Networks</b>
<b>SDMA</b>	<b>Space Division Multiple Access</b>
<b>SDN</b>	<b>Software Defined Networks</b>
<b>S-GW</b>	<b>Serving Gateway</b>
<b>SGSN</b>	<b>Serving GPRS Support Node</b>
<b>SIMO</b>	<b>Single Input Multiple Output</b>
<b>SIPTO</b>	<b>Selected IP Traffic Offload</b>
<b>SISO</b>	<b>Single Input Single Output</b>
<b>SLA</b>	<b>Service Level Agreement</b>
<b>SS-CDMA</b>	<b>Spread Spectrum Code Division Multiple Access</b>
<b>SU</b>	<b>Secondary User</b>
<b>SW</b>	<b>ShortWave</b>
<b>SWOT</b>	<b>Strengths Weaknesses Opportunities Threats</b>
<b>TCO</b>	<b>Total Cost of Ownership</b>
<b>TCP</b>	<b>Transport Control Protocol</b>
<b>TDMA</b>	<b>Time Division Multiple Access</b>
<b>TLS</b>	<b>Transport Layer Security</b>
<b>TRL</b>	<b>Technology Readiness Level</b>
<b>UDP</b>	<b>User Datagram Protocol</b>
<b>UMTS</b>	<b>Universal Mobile Telecommunication Systems</b>
<b>UTRAN</b>	<b>UMTS RAN</b>
<b>vBBU</b>	<b>virtual Base Band Unit</b>
<b>VTN</b>	<b>Virtual Tenant Network</b>
<b>WAN</b>	<b>Wide Area Network</b>
<b>WCDMA</b>	<b>Wideband Code Division Multiple Access</b>
<b>WiMax</b>	<b>Worldwide interoperability for Microwave Access</b>
<b>WSDN</b>	<b>Wireless Software Defined Networks</b>
<b>WWAN</b>	<b>Wireless Wide Area Network</b>
<b>XaaS</b>	<b>Anything as a Service</b>



Αφιερώνεται στην οικογένειά μου...



# Chapter 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Κινητές Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα

Στις μέρες μας, παρατηρείται συνεχής αύξηση της χρήσης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, καθώς και ευρεία ανάπτυξη των διασυνδεδεμένων συσκευών. Αυτό σημειώνεται όχι μόνο μέσα από μελέτες επίσημων αρχών και επιχειρήσεων (παρόχων) στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, αλλά και κάθε πολίτης, παρατηρεί και έρχεται σε επαφή με πληθώρα ανθρώπων να ανταλλάζουν εικόνες, να "ανεβάζουν" φωτογραφίες και βίντεο στα κοινωνικά δίκτυα, να πραγματοποιούν τηλεδιάσκεψεις. Υπάρχουν ακόμα έξυπνες στάσεις λεωφορείων, που ενημερώνουν για το επόμενο διαθέσιμο δρομολόγιο, έξυπνες κάμερες παρακολούθησης της κυκλοφορίας κλπ. Όλες αυτές οι συσκευές διασυνδέονται στο δίκτυο και χρησιμοποιούν τους υπέρχοντες διαθέσιμους πόρους.

Αυτές οι σημαντικές εφαρμογές και άλλες πολλές ακόμα, που θα αναπτυχθούν μελλοντικά, οδηγούν σταδιακά στην ανάγκη για μεγαλύτερη κάλυψη των πόλεων, αλλά και για την κάλυψη ακόμα και των πιο απίθανων και δυσπρόσιτων περιοχών με ασύρματη δικτυακή κάλυψη. Πέραν του μεγάλου όγκου των ανταλλασσόμενων δεδομένων, που πηγάζει από εφαρμογές **video streaming** και τηλεδιασκέψεων, σημειώνεται ότι οι συνδεδεμένες συσκευές το 2021 θα προσεγγίζουν τα 30 δισεκατομμύρια. Γίνεται, συνεπώς, αντιληπτό ότι οι υπάρχουσες δικτυακές υποδομές καθίστανται πολύ φτωχές και παρωχημένες και δεν θα είναι σε θέση να ανταποκρίνονται στις προκλήσεις που θα δημιουργήσουν τα δίκτυα του μέλλοντος.

Έτσι, γεννιέται η ανάγκη ύπαρξης νεών πιο εξελιγμένων γενιών κινητής τηλεπικοινωνίας. Οι υπάρχουσες γενιές 1 έως 4, καθώς και οι τεχνολογίες αυτών, που είναι σήμερα σε λειτουργία (από τη 2η έως την 4η γενιά) δε μπορούν πλέον να καλύψουν αυτά τα ζητήματα. Η πέμπτη γενιά κινητών τηλεπικοινωνιών, διαφοροποιείται σημαντικά και αποτελεί μία πολύ σημαντική εξέλιξη στον τομέα, η οποία θα αποτελέσει ένα σταθμό για μελλοντικές τεχνολογίες. Νέες τεχνολογίες εισάγονται σε αυτή την προσπάθεια. Αλγόριθμοι και άλλες προσεγγίσεις, που ωθούν σε πολύ διαφορετική κι αποδοτική χρήση των τεχνολογιών πρόκειται να ανανεώσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες και να συμβάλουν ενεργά στη δημιουργία καινοτόμων λύσεων. Οι σημερινές αρχιτεκτονικές φαίνεται πως θα αναβαθμιστούν ή θα λειτουργούν συνδυαστικά με μελλοντικές δημιουργώντας υβριδικές αρχιτεκτονικές.

Αυτό θα συμβεί μιας και θα είναι η πρώτη φορά, που οι συσκευές **Internet Of Things (IoT)**, δηλαδή του διαδικτύου των πραγμάτων απ' ό,τι φαίνεται θα ξεπεράσουν κατά πολύ τα διασυνδεδεμένα κινητά κλπ., αφού θα συνδέονται πολλές οικιακές συσκευές. Με βάση τις σημερινές καινοτόμες προτάσεις στο μέλλον διάφορες

συσκευές, κυρίως οικιακές, ενέργειας κλπ. θα συνδέονται στο διαδίκτυο και οι πολίτες θα είναι σε θέση να τις διαχειρίζονται εκ του μακρόθεν μέσω εφαρμογών στο κινητό τους. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι κάτι τέτοιο θα επιφέρει μεγαλύτερο φόρτο στο δίκτυο, ενώ θα σημειωθούν κι άλλα σημαντικά ζητήματα, όπως για παράδειγμα κοινωνικά, νομικά, ζητήματα αγοράς και προώθησης, θα τεθούν ζητήματα βιωσιμότητας επιχειρήσεων, οι οποίες από τη μία θα πασχίζουν να επιβιώσουν και από την άλλη θα πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθήσουν τις εξελίξεις στην τεχνολογία αν θέλουν να παραμένουν ανταγωνιστικές, αλλά και θα εγερθούν ερωτήματα ασφαλείας και υποκλοπής των δεδομένων των χρηστών.

Στα πλαίσια αυτά δεν υπάρχει ως σήμερα ένα συνολικό πλαίσιο, που να μελετά την πέμπτη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας, καθώς και διάφορα θέματα, που απτονται αυτής. Έτσι, υπογραμμίζονται πολύ σημαντικά ερωτήματα, που είναι σημαντικό να απαντηθούν, όπως:

- Ποιες τεχνολογίες θα είναι κατάλληλες αν αξιοποιηθούν να παρέχουν και να ικανοποιούν τις υψηλές απαιτήσεις της 5ης γενιάς;
- Πώς θα εξασφαλίζεται ότι οι πάροχοι, που θα επιλέξουν να επενδύσουν σε αυτές θα διατηρούν τα κέρδη τους υψηλά και οι επιχειρήσεις τους θα λειτουργούν με βιώσιμο τρόπο;
- Ποιοι είναι οι παράγοντες κόστους, που έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο σε κάθε τεχνολογία, αλλά και γενικότερα στην 5η γενιά κινητών δικτύων;
- Πώς μπορεί μία επιχείρηση στον τομέα να αντιμετωπίσει αυτά τα κόστη;
- Τι επιχειρησιακά πλάνα μπορούν να δημιουργηθούν για να απαντήσουν στα προβλήματα;
- Ποιες προτάσεις μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στα προβλήματα;
- Ποια μέτρα μπορούν ληφθούν ώστε να αμβλύνουν ή να εξαλείψουν τα προβλήματα;

## 1.2 Αντικείμενο της διατριβής

Λίγο πριν την έλευση της πέμπτης γενιάς κινητών δικτύων επικοινωνίας, νέες υπηρεσίες, νέες τεχνολογίες και νέες λειτουργικότητες θα εμφανίζονται συνεχώς και θα προσδίδουν μία νέα ελπίδα στην αγορά των τηλεπικοινωνιών και μία νέα ανάσα στον οικονομικό ορίζοντα, παρά τα όποια οικονομικά προβλήματα. Στα πλαίσια αυτά θα γεννηθεί η ανάγκη για νέες μεθόδους δόμησης, προώθησης, διαχείρισης, διοίκησης, κοστολόγησης, αγοραλογίας (**marketing**), συγκεκριμένου νομικού και διαχειριστικού πλαισίου, που θα ανταποκρίνεται στις νέες τεχνολογίες, στις υποδομές, που θα προκύψουν σε αυτές τις γενιές κινητής επικοινωνίας. Έτσι, ανακύπτει έντονα η ανάγκη να δομηθεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο τεχνοοικονομικής διαχείρισης κινητών δικτύων επικοινωνίας, εξιδεικευμένο και προσαρμοσμένο στις συγκεκριμένες ανάγκες και στα προβλήματα, τις απαιτήσεις, τις προκλήσεις, τα πλεονεκτήματα και τις ευκαιρίες να προωθηθούν και να επιφέρουν έσοδα αυτές οι νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις.

Η διδακτορική αυτή διατριβή με θέμα: «Τεχνοοικονομική Διαχείριση Κινητών Δικτύων Πέμπτης Γενιάς 5G & εξής» αναμένεται να απαντήσει σε βασικά ερωτήματα, που εγείρονται σε σχέση με τη διοίκηση και διαχείριση πιθανών τεχνολογικών προτάσεων, που πρόκειται να εμφανιστούν και να εφαρμοστούν για να καλύψουν τις υψηλές ανάγκες και απαιτήσεις, που τόσο επιστήμονες και τόσο μεγάλες επιχειρήσεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν θέσει και θα είναι απαραίτητες στις γενιές αυτές. Έτσι, η παρούσα διατριβή στοχεύει να μελετήσει, να προτείνει λύσεις, που θα καταστούν βιώσιμες στις συγκεκριμένες γενιές, καθώς και να είναι περισσότερο συμβατές με αυτές. Ακόμα, στόχο έχει να τροποποιήσει και να βελτιστοποιήσει ήδη υπάρχοντα μοντέλα και λύσεις τηλεπικοινωνιών, οι οποίες θα ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες, που αρχίζουν να προβάλλουν σιγά σιγά, αλλά και σε αυτές, που θα εμφανιστούν μελλοντικά στον τομέα.

Επίσης, εκτός από τη διαχείριση και διοίκηση των συγκεκριμένων γενιών, η παρούσα διατριβή επιδιώκει να σχηματίσει σημαντικά μοντέλα λογιστικής και κοστολόγησης των κινητών δικτύων. Ακόμα, αναμένεται να ερευνήσει και να συγκεντρώσει το νομικό πλαίσιο, που απαιτείται σε αυτές τις γενιές, προβλήματα, που είναι πιθανό να προκύψουν και πιθανές προτάσεις για νομική αντιμετώπιση διαφόρων μελλοντικών ζητημάτων. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη διατριβή σκοπεύει να λύσει ζητήματα, που σχετίζονται με την εμπορική διάθεση, αγοραλογία (**marketing**) και προώθηση υπηρεσιών και προϊόντων.

Για την αξιολόγηση, τον έλεγχο και την απόδειξη της ορθότητας αυτών των τεχνικών και αποτελεσμάτων θα αξιοποιηθούν εργαλεία ελέγχου και πειραμάτων για μελέτες περίπτωσης, όπως **Excel** και **Matlab**, που θα έχουν στόχο στην κοστολόγηση και απεικόνιση κόστους, στη διευρυμένη ανάλυση και μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και του νομικού πλαισίου. Ακόμα, ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν εργαλεία για τη δημιουργία ή παρουσίαση των αρχιτεκτονικών των δικτύων και των μοντέλων. Επίσης, θα χρησιμοποιηθούν στατιστικά εργαλεία και εργαλεία απεικόνισης για να αποφασιστεί ποιες μέθοδοι προώθησης αποτελούν την αποδοτικότερη μέθοδο ως προς τη δυνατότητα προώθησης των εν λόγω τεχνολογικών προτάσεων. Ακόμα, θα χρησιμοποιηθούν μελέτες εφικτότητας και αναλύσεις τύπου **Political, Economic, Social, and Technological (PEST)** ή **Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats (SWOT)** με σκοπό να αναδειχθούν πιθανές βελτιώσεις, που απαιτούνται, καθώς και ευκαιρίες, αδυναμίες, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των παραπάνω τεχνολογιών στο συγκεκριμένο τομέα.

Συνοψίζοντας, οι πιο βασικοί στόχοι της προτεινόμενης διδακτορικής διατριβής και της έρευνας στα πλαίσια της εργασίας είναι οι ακόλουθοι:

1. Αναλυτική σύνοψη πιθανών τεχνολογικών προτάσεων, εργαλείων και υπηρεσιών, που θα πρωταγωνιστήσουν στις γενιές 5G και εξής.
2. Προτάσεις για αρχιτεκτονικές δομές και λύσεις, που θα μπορούσαν να συμβάλουν ενεργά στις υψηλές απαιτήσεις αυτών των γενιών κινητής επικοινωνίας.
3. Βελτιστοποίηση υπάρχοντων μοντέλων και εξέλιξη υπάρχουσών λύσεων τηλεπικοινωνίας, με στόχο να ανταποκρίνονται στις 5G ανάγκες.
4. Παρουσίαση βασικών εννοιών, συστημάτων και υπηρεσιών προσανατολισμένων στα δίκτυα πέμπτης και εξής γενιάς.

5. Εκτενής βιβλιογραφική έρευνα στην περιοχή των 5G, νομικών, κανονιστικών, επιχειρησιακών, επιχειρηματικών, τεχνικών, οικονομικών κλπ. πλαισίων στα δίκτυα 5G και εξής.
6. Ανάλυση νομικού πλαισίου και σημείωση νομικών κενών με πιθανές προτάσεις για νομοθέτηση προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις για τις τεχνολογίες.
7. Λογιστική ανάλυση και κοστολόγηση με μελέτη μεθόδων ελαχιστοποίησης κόστους και κινδύνου στις εν λόγω τεχνολογίες αυτές.
8. Ανάπτυξη πλάνων επιχειρήσεων και αγορών, μελέτης εφικτότητας. μεθόδων διοίκησης κινητών δικτύων επικοινωνίας πέμπτης γενιάς και εξής.
9. Μελέτη μεθόδων αγοραολογίας (marketing) και προώθησης υπηρεσιών και προϊόντων κινητών δικτύων και στατιστική μελέτη της εφαρμογής της βέλτιστης μεθόδου στα κινητά δίκτυα επικοινωνίας 5G και εξής.

Ενδεικτικά, παρατίθενται μερικές βιβλιογραφικές πηγές, που μαζί με πολλές άλλες ακόμα θα αποτελέσουν τη βάση της μελέτης για τη συγκεκριμένη διατριβή και αποτελούν ικανή τροφή σκέψης και πληροφόρησης για τη φοιτήτρια. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετηθούν δημοσιεύσεις σχετικά με τις πολιτικές, που υπάρχουν στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, όπως οι (Frias and Martinez, 2017) και (Blackman, 2017). Ακόμα, θα αναγνωστούν ζητήματα σχετικά με τα νομικά προβλήματα, που έχουν ανακύψει στον τομέα (Sharma and Lawrence, 2015). Είναι σημαντικό να μελετηθούν οι κανόνες της αγοράς και του marketing στις τηλεπικοινωνίες (M.-H. Huang, P.-F. Huang, and Hsieh, 2017), (Michalakelis, Spicopoulos, and Varoutas, 2011), (Amin et al., 2015), (Hossain and Suchy, 2013). Λόγω του διευρυμένου χαρακτήρα και της πρότασης πλαισίου για τις τηλεπικοινωνίες των επόμενων ετών είναι σημαντικό να ερευνηθούν και οι κοινωνικοί κλάδοι και προεκτάσεις αυτών (Ford, n.d.), (Gruber and Koutroumpis, 2011), (Moazzem Hossain, Hecimovic, and Choudhury Lema, 2015), (Diakoumi et al., 2014) και να αναδειχθεί πώς είναι εφικτό να αποφευχθούν στερεότυπα ή αρνητικές συνέπειες με κοινωνική συσχέτιση. Διάφορες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα (Akyildiz, Nie, et al., 2016), (Larsson et al., 2014) αναμένεται να συμβάλουν και αποτελούν τους πιο σημαντικούς παράγοντες ανάπτυξης του 5G. Ενώ, τέλος είναι σημαντικό να εστιάσει κανείς στις Τηλεπικοινωνίες και σε γενικότερες θεμελιώδεις πληροφορίες σχετικά με αυτές (Dodd, 2002), αλλά και στη διοίκηση σχετικά με τις τηλεπικοινωνίες (Bormann, 2010).

Η σημαντική συνεισφορά της παρούσας διατριβής, εκτός από τη μετεξέλιξη των υπάρχουσών λύσεων, την παροχή νέων λύσεων, τη βαθύτατη μελέτη μελλοντικών κινητών τηλεπικοινωνιακών δικτύων έγκειται στη δημιουργία ενός ενιαίου επιχειρησιακού διαχειριστικού πλαισίου για επιχειρήσεις και τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς. Δυνατό σημείο αναφοράς αποτελεί η μελέτη των τηλεπικοινωνιών από πολλές απόψεις μεταξύ των οποίων, τηλεπικοινωνιών, κόστους, νομικές, επιχειρησιακές, μάρκετινγκ, βιωσιμότητας κλπ. Τελικά, επιδιώκεται ότι θα αποτελέσει ένα πραγματικό εργαλείο και ένα κείμενο αναφοράς για τις επόμενες γενιές κινητών τηλεπικοινωνιών και για την οργάνωση των σχετικών επιχειρήσεων. Βάση των όσων αναφέρθηκαν, είναι σημαντικό να μελετηθούν οι συγκεκριμένοι τομείς για λόγους επιστημονικούς και πρακτικούς. Επίσης, η διατριβή θα αποδώσει όχι μόνον

σημαντικά επιστημονικά δεδομένα και αποτελέσματα σε τεχνολογίες αιχμής, αλλά και τροφή σκέψης για άλλους επιστήμονες, αλλά και για την ίδια τη συγγραφέα, για μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα.

## 1.3 Οργάνωση των κεφαλαίων της διατριβής

Είναι σημαντικό να επεξηγηθεί με πιο τρόπο δομούνται τα κεφάλαια της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής. Επιγραμματικά, η διδακτορική αυτή διατριβή δομείται ως ακολούθως:

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στο θέμα της διατριβής
- Κεφάλαιο 2: Ανασκόπηση στις Γενιές Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας
- Κεφάλαιο 3: Σύνοψη τεχνολογιών, που αποτελούν θεμέλιους λίθους στη 5G
- Κεφάλαιο 4: Οικονομικοί όροι απαραίτητοι για την ανάπτυξη των μοντέλων
- Κεφάλαιο 5: Σχετική Έρευνα, για τα κινητά δίκτυα, τα τεχνο-οικονομικά μοντέλα, τις κύριες τεχνολογίες
- Κεφάλαιο 6-12: Τεχνο-οικονομική Ανάλυση των Τεχνολογιών για την 5G
- Κεφάλαιο 13: Ανάλυση των βασικότερων συμπερασμάτων
- Κεφάλαιο 14: Σημειώνονται οι πιο σημαντικές μελλοντικές κατευθύνσεις για ερευνητική δραστηριότητα

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι σημαντικότερες έννοιες και τα πιο βασικά βήματα, που συνετέλεσαν στην εξέλιξη των υπάρχουσών γενεών κινητών δικτύων επικοινωνίας. Αναλύονται θέματα σχετικά με τη δομή, την ιστορική αναδρομή, τις βασικές τεχνολογίες και τα σημαντικότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα, που σημειώνονταν και οδηγούσαν σε υψηλότερες απαιτήσεις, που έλειπαν, δηλαδή, από την εκάστοτε γενιά και συντελούσαν στο γεγονός να εμφανίζεται η αμέσως επόμενη γενιά.

Ακόμα, στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται διεξοδικά οι σημαντικότερες τεχνολογίες, που αποτελούν δομικούς λίθους για την ανάπτυξη, αλλά και την εξέλιξη στη δόμηση και ύπαρξη της 5G γενιάς κινητής τηλεπικοινωνίας. Αυτές οι γενιές εξετάζονται εκτενώς στη βιβλιογραφία, παρατηρείται η δομή τους, σημειώνονται διάφορα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα αυτών και επίσης, σημειώνεται με ποιον τρόπο συμβάλουν ενεργά στη 5G.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται διεξοδικά οι βασικότεροι οικονομικοί όροι, που θα αναλυθούν στην παρούσα διατριβή. Αποτελεί έναν οδηγό για τη βαθύτερη κατανόηση της τεχνο-οικονομικής ανάλυσης, που αναπτύσσεται παρακάτω. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται οι πιο βασικές μελέτες στον τομέα των κινητών δικτύων, μελέτες που αφορούν στα 5G δίκτυα, αλλά και μελέτες, που συμβάλουν ενεργά στη δημιουργία ενός υποβάθρου για την κατάρτιση των τεχνο-οικονομικών μοντέλων, που ακολουθούν.

Εν συνεχεία, στα Κεφάλαια 6, 7, 8, 9, 10, 11 και 12 αναλύονται τα Τεχνο-οικονομικά Μοντέλα, με βάση τις θεμελιώδεις τεχνολογίες, που συντελούν στην

ανάπτυξη και προώθηση της 5G. Αποτελούν σημαντικό εργαλείο μίας και μία αποδοτική προσέγγιση αυτών αναμένεται να πείσει τους παρόχους να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες, να έχουν κέρδη και να καινοτομούν. Στα εν λόγω κεφάλαια, αναλύονται τα αρχιτεκτονικά μοντέλα, που επιλέγονται, τα μαθηματικά μοντέλα, που αναπαριστούν τα κόστη των συγκεκριμένων τεχνολογιών, αιτιολογούνται και παρουσιάζονται οι επιλογές, που γίνονται για τις παραμέτρους και διεξάγονται πειράματα με βάση τα συγκεκριμένα δεδομένα, ώστε να σημειωθεί η βιωσιμότητα των λύσεων αυτών.

Στο Κεφάλαιο 13 συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα, που είναι δυνατό να εξαχθούν με βάση τις επιμέρους μελέτες, που πραγματοποιήθηκαν και στο Κεφάλαιο 14 προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα και μελλοντικά κενά, που μπορεί να προκύψουν και δεν επιλύθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης ερευνητικής δραστηριότητας.

## Chapter 2

# Ιστορική Αναδρομή Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας

Τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας αποτέλεσαν και εξακολουθούν να αποτελούν επανάσταση για τον τομέα των επικοινωνιών. Γίνεται σαφές ότι η πρώτη βάση για την ασύρματη εκπομπή ήταν ο ισχυρισμός της ύπαρξης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το Maxwell, ενώ σημαντικό ορόσημο αποτέλεσε ο Γουλιέλμο Μαρκόνι, γνωστός και ως πατέρας της εκπομπής ραδιοκυμάτων σε μεγάλη απόσταση. Εντούτοις πολλές σημαντικές αλλαγές επήλθαν από τότε στον τομέα των Κινητών Δικτύων Επικοινωνίας και παρά τη μεγάλη επιτυχία στις συγκεκριμένες προσπάθειες, η ευρεία εξάπλωση των κινητών δικτύων δεν πραγματοποιήθηκε πριν τη δεκαετία του 1980.

Οι γενιές κινητής τηλεφωνίας έκαναν την εμφάνισή τους το 1981 και συντέλεσαν σημαντικά καθενιά με τη σειρά της να αναπτυχθεί η επόμενη. Αυτό πραγματοποιήθηκε, διότι, ενώ όλες διέθεταν συγκριτικά πλεονεκτήματα, βοηθούσαν τους πολίτες και είχαν σημαντικό αντίκτυπο, αφού διευκόλυναν την επικοινωνία εμφανίζοντας κάποια σημαντικά προβλήματα και ως αποτέλεσμα η επίλυσή τους οδηγούσε στη χρήση νέων τεχνολογιών και στην εξέλιξη των κινητών δικτύων.

Ακόμα, κάθε εποχή/ γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας παρείχε διαφορετικές υπηρεσίες και κάλυπτε συγκεκριμένες ανάγκες, που ήταν αρκετές για εκείνη τη συγκεκριμένη εποχή, από την άλλη μεριά, όμως θα προκαλούσαν ουσιαστικά έναν κάποιον κορεσμό και δε θα παρείχαν νέα κίνητρα και υπηρεσίες αν δεν υπήρχε μία καινοτομία, μία εξέλιξη και έτσι γινόταν απαραίτητο να σημειωθούν άλλες λύσεις, που να βοηθούν σημαντικά στην ανάπτυξη των επικοινωνιών και στη δημιουργία νέων υπηρεσιών.

Συνοπτικά, κάθε δέκα περίπου χρόνια, εμφανίζεται και μία νέα γενιά κινητών δικτύων. Μετά την πρώτη εμφάνιση των κινητών τηλεπικοινωνιών, όπου πραγματοποιήθηκε το 1981. Τότε πρωταγωνίστησε το πρώτο βασικό σύστημα πρώτης γενιάς, το **Nordic Mobile Phone**. Το 1992 εμφανίστηκε η δεύτερη γενιά κινητής τηλεπικοινωνίας **2G**. Η **3G** εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 2001. Η **4G** εμφανίστηκε σε εμπορικές εφαρμογές περίπου το 2011. Όλες οι γενιές κινητής επικοινωνίας αναφέρονται, συνήθως, σε κυψελοειδές πρότυπο, το οποίο δεν είναι συμβατό προς τα πίσω (**Non-backwards compatible**), δηλαδή κάθε επόμενη γενιά δεν είναι συμβατή τεχνολογικά με τις προηγούμενες. Η νέα γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας **5G** αναμένεται να υλοποιηθεί και να είναι εμπορικά διαθέσιμη το 2020.

Τα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα, όπως και το σύνολο των λοιπών ασύρματων δικτύων, έχουν συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες, όπως χαμηλό ρυθμό μετάδοσης, λόγω του μέσου στο οποίο διαδίδονται, δηλαδή τον αέρα, υψηλή μεταβλητότητα ρυθμού

μετάδοσης, πάλι λόγω του αέρα, αλλά και λόγω παρεμβολών από άλλες συσκευές από φυσικά φαινόμενα, από σύγκρουση με επιφάνειες κλπ. Παρουσιάζουν κινητικότητα και άρα, φαινόμενο **Doppler**, με αποτέλεσμα να είναι επιθυμητό να συγχρονιστούν πομπός και δέκτης, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο ειδικά, αν είναι και οι δύο κινούμενοι, κάτι διόλου απίθανο.

Ακόμα, σημειώνεται μεγάλη ετερογένεια στον τύπο αυτών των δικτύων, αλλά και των συσκευών, που εξυπηρετούν. Αν αναλογιστεί κανείς ένα δημόσιο χώρο μπορεί να εξυπηρετούνται από φανάρια έως υπολογιστές, κινητά κλπ. Ακόμα, εγείρονται θέματα ασφάλειας, δηλαδή κατά πόσο κακόβουλοι χρήστες «ακούνε» το δίκτυο υποκλέπτοντας δεδομένα. Επιπλέον, υπάρχει περιορισμένη ενέργεια στις κινητές συσκευές, αφού οι πιο πολλές λειτουργούν με μπαταρία και χρειάζεται να εξοικονομείται ενέργεια. Επιπρόσθετα, είναι αυξημένοι οι κίνδυνοι απώλειας δεδομένων, αφού τα ποσοστά τους στον αέρα είναι πολύ μεγαλύτερα από ότι στο κενό ή σε κάποια άλλα μέσα μετάδοσης. Τέλος, η επιφάνεια διεπαφής είναι μικρή.

Τα κυψελωτά δίκτυα δομούνται χρησιμοποιώντας χαμηλής ενέργειας και ισχύος μεταδότες, συχνά, καταναλώνουν ισχύ χαμηλότερη των **100W**. Η συνολική περιοχή, που επιδιώκεται να καλυφτεί ασύρματα, για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες κινητής επικοινωνίας, διαιρείται σε κυψέλες, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετείται από τη δική της κεραία. Όλες οι κυψέλες εξυπηρετούνται από ένα σταθμό βάσης, που περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος πομπών, ληπτών και ελεγκτών. Πάντοτε, κάποια συγκεκριμένα κανάλια συχνοτήτων αποδίδονται σε κάθε κυψέλη. Αυτό γίνεται με διάφορους τρόπους, ώστε να μην προκύπτει το πρόβλημα παρεμβολής των γειτονικών κυψελών. Οι κυψέλες εγκαθίστανται, έτσι ώστε, οι κεραίες σε κάθε γειτονική περιοχή να είναι δομημένες σε κανονικά εξάγωνα. Οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες δε μπορούν να επαναλαμβάνονται σε γειτονικά εξάγωνα.

Κάθε κινητό δίκτυο επικοινωνίας αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- Το σταθμό βάσης, ο οποίος περιλαμβάνει μία κεραία, έναν ελεγκτή δικτύου και ένα πλήθος από δέκτες σήματος.
- Τον κινητό σταθμό,
- Και το κινητό κέντρο μεταγωγής, το οποίο είναι υπεύθυνο για τις κλήσεις ανάμεσα στις κινητές μονάδες και για τα **handoffs**. Το **handoff** είναι το φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο, κατά τη μεταφορά ενός κινητού από μία κυψέλη σε μία γειτονική του αποφασίζεται ποια κυψέλη θα εξυπηρετεί τις ανάγκες επικοινωνίας για το συγκεκριμένο κινητό.

Στα κυψελωτά δίκτυα πραγματοποιείται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Αυτό συμβαίνει, εφόσον, είναι συστήματα, τα οποία περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την παρεμβολή και όχι από το θόρυβο. Στις γειτονικές κυψέλες αποδίδονται διαφορετικές συχνότητες, με σκοπό να αποφεύγεται η παρεμβολή. Ο βασικός στόχος είναι η εύρεση λύσεων για την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων σε γειτονικές κυψέλες. Με στόχο να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών κυψελών, σε γειτονικές κυψέλες δεν ανατίθενται ποτέ ίδιες συχνοτικές ζώνες. Αυτό συμβαίνει με αξιοποίηση των αλγορίθμων χρωματισμού γειτονικών περιοχών, ώστε να μην υπάρχουν ποτέ γειτονικές κυψέλες με τα ίδια χρώματα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, με το ίδιο συχνοτικό εύρος, και άρα, να μην δημιουργούνται ζητήματα

παρεμβολών λόγω της χρήσης κοινών συχνοτήτων. Έτσι, πρέπει να λυθούν προβλήματα, που σχετίζονται άμεσα με την αύξηση ή τη βέλτιστη αξιοποίηση του εύρους ζώνης.

Η αύξηση χωρητικότητας συντελείται με την προσθήκη νέων καναλιών, αφού αυτά εξασφαλιστούν, με το δανεισμό καναλιών από γειτονικές κυψέλες, οι οποίες δεν παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά συμφόρησης και περιέχουν αχρησιμοποίητες συχνότητες και άρα, μπορούν να εξυπηρετήσουν άλλες ανάγκες, με το διαχωρισμό της κυψέλης σε μικρότερες κυψέλες, με το διαχωρισμό των κυψελών σε τομείς με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών, δηλαδή κεραιών, που στρέφονται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση και εξυπηρετούν μόνο αυτή την περιοχή, στην οποία είναι στραμμένες, καθώς και τη χρήση **Small Cells**, όπου περιλαμβάνει την εισαγωγή **Microcells**, **Picocells**, **Femtocells** κλπ.

Επίσης, ακολουθούνται λογικές πολυπλεξίας στο κανάλι επικοινωνίας, ώστε να εξυπηρετούνται κάθε φορά επί μέρους ανάγκες. Η πολυπλεξία είναι μία μέθοδος, με την οποία, πολλαπλά αναλογικά σήματα μηνύματος ή ψηφιακές ροές δεδομένων συνδυάζονται σε ένα σήμα, ώστε να μεταδοθούν σε ένα κοινό μέσο. Οι σημαντικότερες μέθοδοι πολυπλεξίας, που συναντώνται στα κινητά δίκτυα επικοινωνίας, είναι **Time Division Multiple Access (TDMA)**, **Frequency Division Multiple Access (FDMA)**, **Code-Division Multiple Access (CDMA)**, **Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)**, δηλαδή πολυπλεξία βάση χρόνου, βάση συχνότητας, βάση κώδικα και ορθογώνια πολυπλεξία, αλλά και διάφορες πιο εξελιγμένες παραλλαγές αυτών των βασικών τεχνικών.

Τα κανάλια, τα οποία, συνήθως, συναντώνται μεταξύ των κινητών σταθμών και του σταθμού βάσης είναι δύο τύπων είναι δηλαδή, κανάλια ελέγχου και κανάλια κίνησης. Τα κανάλια ελέγχου χρησιμοποιούνται, με σκοπό την ανταλλαγή πληροφορίας για την εγκατάσταση και διατήρηση των κλήσεων σε κινητές συσκευές, ενέργειες, που είναι σημαντικές, τόσο για να εγκατασταθούν νέες κλήσεις από χρήστες, αλλά και να υπάρχει αδιάκοπη εξυπηρέτηση των υπαρχουσών. Τα κανάλια κίνησης διατηρούν τη φωνή ή τα δεδομένα μεταξύ των διαφόρων χρηστών, κάτι, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για να κατανοείται πλήρως το περιεχόμενο της επικοινωνίας και να μην διακόπτεται, ειδικά, για παράδειγμα για τη φωνή, που δεν είναι δυνατό να διακόπτεται σε μία κλήση.

Σε ένα κυψελωτό δίκτυο, ο έλεγχος επικοινωνίας πραγματοποιείται δυναμικά, αφού κατά κάποιον τρόπο είναι δυναμικό και το συνολικό δίκτυο, μίας και οι συσκευές δεν παραμένουν στατικά σε ένα συγκεκριμένο τόπο, αλλά μετακινούνται. Γενικά, η λαμβανόμενη ισχύς πρέπει να είναι αρκετά πάνω από το θόρυβο υποβάθρου για να είναι όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη η επικοινωνία. Ο θόρυβος υποβάθρου είναι ένα ποσοστό θορύβου, που τίθεται από το διαχειριστή του δικτύου ως κατώφλι και κάτω από αυτό, κάθε κλήση δεν θεωρείται καλής ποιότητας.

Η ελαχιστοποίηση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος από το κινητό είναι επιθυμητή και στοχεύει στο να ελαττωθούν οι παρεμβολές μεταξύ των διαφόρων διαύλων, αφού είναι εξαιρετικά πιθανό να υπερκαλύπτουν κλήσεις χρηστών κοντά στο κέντρο της κυψέλης, άλλες κλήσεις, που είναι πιο μακριά και συνεπώς, αυτές να μην εξυπηρετούνται ποτέ ή να εξυπηρετούνται με εξαιρετικά χαμηλή ποιότητα. Είναι σημαντικό ότι χαμηλής ισχύος σήματα συντελούν στο να αμβλυνθούν οι ανησυχίες για τις επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, αλλά και για να εξοικονομηθεί ενέργεια στις μπαταρίες των κινητών συσκευών, θέμα, που δυσχεραστεί μεγάλο

ποσοστό των χρηστών κινητών συσκευών επικοινωνίας.

Σε συστήματα, που χρησιμοποιούν πολυπλεξία τύπου **Spread Spectrum Code Division Multiple Access (SS-CDMA)**, δηλαδή μία εξελιγμένη μορφή πολυπλεξίας βάση κώδικα για διευρυμένο εύρος ζώνης, είναι επιθυμητό να εξισώνεται το λαμβανόμενο επίπεδο ισχύος από όλες τις κινητές μονάδες στο **Base Station (BS)**, το λεγόμενο κοντά-μακριά πρόβλημα ή **Near -Far problem**. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ελέγχου για το βρόγχο, αυτός του ανοικτού και αυτός του κλειστού βρόγχου, που είναι θεμελιωδώς διαφορετικοί. Ο έλεγχος ισχύος ανοικτού βρόγχου, εξαρτάται αποκλειστικά από την κινητή μονάδα και δεν είναι τόσο ακριβής, όσο του κλειστού βρόγχου, αλλά μπορεί να αντιδράσει γρηγορότερα στις διακυμάνσεις της ισχύος του σήματος. Από την άλλη μεριά, στον κλειστού βρόγχου έλεγχο ισχύος, ο σταθμός βάσης αποφασίζει για τη ρύθμιση της ισχύος και επικοινωνεί με το κινητό στο κανάλι ελέγχου.

## 2.1 1G

Η πρώτη γενιά **1G** αποτελείται από τα πρότυπα των αναλογικών τηλεπικοινωνιών, που εισήχθησαν στη δεκαετία του **1980** και κυριαρχούσαν μέχρι, που αντικαταστάθηκαν από τη δεύτερη γενιά **2G** ψηφιακών τηλεπικοινωνιών. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο αυτών διαδοχικών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας, **1G** και **2G**, είναι ότι τα ραδιοκύματα, που χρησιμοποιούνται στα **1G** δίκτυα είναι αναλογικά, ενώ στα δίκτυα **2G** είναι ψηφιακά. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν την ψηφιακή σηματοδότηση για τη σύνδεση των πύργων, η φωνή κατά τη διάρκεια μιας κλήσης είναι κωδικοποιημένη σε ψηφιακά σήματα στη **2G**, ενώ στην **1G** μόνο διαμορφώνεται σε υψηλότερη συχνότητα, συνήθως **150 MHz** και άνω. (Sharma and Lawrence, 2015)

### 2.1.1 Δομή

Η πρώτη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τους προπομπούς της, όπως τα τηλέφωνα επικοινωνίας εντός των αυτοκινήτων της δεκαετίας του **1970**. Τα βασικότερα πρότυπα, που ευδοκίμησαν εκείνη την εποχή ήταν στις **Η.Π.Α.**, στην **Ευρώπη** και την **Ιαπωνία**. Τότε υπήρχε αδειοδοτούμενο φάσμα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για κινητές τεχνολογίες. Οι πάροχοι είχαν τη δυνατότητα να δημιουργούν σταθμούς βάσης και να παρέχουν πρόσβαση σε χρήστες.

Βασική δυνατότητα των δικτύων αποτελούσε ο διαχωρισμός του χώρου μετάδοσης σε μικρότερες περιοχές, τις κυψέλες, κάτι που οδήγησε σταδιακά σε επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και κατ' επέκταση στη δυνατότητα κάλυψης περισσότερων χρηστών. Ο διαχωρισμός, που συντελέστηκε ήταν κυρίως γεωγραφικός και η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων επετεύχθη χωρίς να υπάρχουν ισχυρές παρεμβολές. Οι γειτονικές κυψέλες λειτουργούσαν σε διαφορετικές συχνότητες και έτσι αποφεύγονταν οι παρεμβολές. (Sharma and Lawrence, 2015)

Επίσης, αυτά τα δίκτυα παρείχαν αδιάκοπη σύνδεση και αδιάκοπη κινητικότητα στο χρήστη. Αυτό επετεύχθη μέσω της διαφανούς σύνδεσης μέσω γραμμής τύπου **Public Switched Telephone Network (PSTN)**, το οποίο φυσικά τότε ήταν αναλογικό.

### 2.1.2 Ιστορική Αναδρομή

Άλλα πρότυπα, που περιλαμβάνονται είναι τα **Advanced Mobile Phone System (AMPS)**, που χρησιμοποιούνται στη Βόρεια Αμερική και την Αυστραλία, τα **Total Communications System Access (TAC)** στο Ηνωμένο Βασίλειο, το **TACC-450** στη Δυτική Γερμανία, την Πορτογαλία και τη Νότια Αφρική, το **TAC Radiocom 2000** στη Γαλλία και το **TAC RTMI** στην Ιταλία. Στην Ιαπωνία, υπήρχαν πολλαπλά συστήματα, που δημιουργούνταν από τρία βασικά πρότυπα, **TZ-801**, **TZ-802** και **TZ-803** αναπτύχθηκαν από την **Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT)**, ενώ ένα ανταγωνιστικό σύστημα χρησιμοποιεί το Σύστημα Επικοινωνιών Πλήρους Πρόσβασης Ιαπωνίας ως πρότυπο.

Οι ταχύτητες (**1G**) κυμαίνονται μεταξύ των **28 kbps** και **56kbps**. Το πρώτο εμπορικά αυτοματοποιημένο κυψελοειδές δίκτυο, ξεκίνησε στην Ιαπωνία και την **Nippon Telegraph and Telephone (NTT)** το **1979**, αρχικά στη μητροπολιτική περιοχή του Τόκιο. Εντός πέντε ετών, το δίκτυο **NTT** είχε επεκταθεί για να καλύψει το σύνολο του πληθυσμού της Ιαπωνίας και έγινε το πρώτο εθνικό δίκτυο **1G**. Το **1981**, ακολούθησε την ταυτόχρονη έναρξη λειτουργίας του συστήματος **Nordic Mobile Τηλέφωνο (NMT)** στη Δανία, τη Φινλανδία, τη Νορβηγία και τη Σουηδία. Το **NMT** ήταν το πρώτο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, που χαρακτηρίστηκε από διεθνή περιαγωγή. Το πρώτο δίκτυο **1G** ξεκίνησε στις ΗΠΑ με έδρα το Σικάγο, **Ameritech** το **1983** χρησιμοποιώντας το **Motorola DynaTAC** κινητό τηλέφωνο. Αρχικές χώρες, στη συνέχεια, ακολούθησαν την πιο πάνω εξέλιξη για τη δόμηση ασύρματων δικτύων τηλεπικοινωνιών στις αρχές έως και τα μέσα της δεκαετίας του **1980**, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, το Μεξικό και ο Καναδάς.

### 2.1.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Η πρώτη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας, μπορεί να είχε πολλά μειονεκτήματα σε σχέση με το κόστος και τα πλεονεκτήματα, που αυτή περιλάμβανε εν τούτοις, αποτελεί σημαντικό σταθμό για την επιστήμη και την τεχνολογία των τηλεπικοινωνιών, καθώς αποτέλεσε τη βάση ανάπτυξης των επόμενων γενιών.

#### Πλεονεκτήματα

Τα εγγενή πλεονεκτήματα της πρώτης γενιάς κινητών δικτύων επικοινωνίας ήταν ότι:

- Αποτελούσαν μία πολύ σημαντική ανακάλυψη, που δημιούργησε μία ολόκληρη οπτική και δημιούργησε μία ολόκληρη βάση για τα κινητά δίκτυα.
- Όλα τα δίκτυα τότε ακολουθούσαν μοναδικό πρότυπο.
- Προσέδιδαν στο χρήστη τη δυνατότητα της κινητικότητας.

#### Μειονεκτήματα

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα, που συνετέλεσαν στην ώθηση προς την επόμενη γενιά είναι τα ακόλουθα:

- Υψηλό κόστος: καθιστούσε τα κινητά αυτής της γενιάς προσβάσιμα σε συγκεκριμένους χρήστες.
- Χρήση της αναλογικής τεχνολογίας, η οποία ήταν πολύ αναξιόπιστη.
- Η μετάδοση των σημάτων ήταν πολύ χρονοβόρα σε σχέση με τα σύγχρονα δίκτυα και σήματα.
- Δημιουργούνταν υψηλά επίπεδα παρεμβολών, κάτι που δυσχέραινε σημαντικά την επικοινωνία και ακόμα συντελούσε σε μη ακριβή και αξιόπιστα **hand-offs**.
- Η ποιότητα της σύνδεσης ήταν χαμηλή και οι σύνδεσμοι κλήσεων δεν ήταν πολύ αξιόπιστοι.
- Η χωρητικότητα, που μπορούσε να εξασφαλιστεί ήταν μικρή και χαμηλή.
- Τα δίκτυα είχαν προβλήματα ασφαλείας, ήταν ιδιαίτερα επισφαλή και δεν εγγυόνταν μη παρακολούθηση από τρίτους.
- Είχαν περιορισμένες δυνατότητες.

#### 2.1.4 Υπηρεσίες

Η βασικότερη υπηρεσία αυτής της γενιάς ήταν η μεταγωγή φωνής. Δεν υπήρχαν περαιτέρω δυνατότητες.

## 2.2 2G

Η δεύτερη γενιά (**2G**) είναι γενιά κυψελοειδών δικτύων τηλεπικοινωνιών και έχουν εμπορική λειτουργία στο πρότυπο **Groupe Special Mondiale (GSM)** στη Φινλανδία από τη **Radiolinja** (τώρα τμήμα της **Elisa Oyj**) από το έτος 1991 και έπειτα. Όσον αφορά στις **2G** τεχνολογίες διαιρούνται σε δύο κατηγορίες τις: **Time Division Multiple Access (TDMA)** και **Code Division Multiple Access (CDMA)** ανάλογα με τον τύπο της πολυπλεξίας, που χρησιμοποιείται.

Τα κύρια πρότυπα **2G** είναι τα ακόλουθα:

- **Global Systems for Mobile Communication (GSM) (TDMA based)**, τα οποία ξεκίνησαν αρχικά από την Ευρώπη, αλλά χρησιμοποιήθηκαν σε όλες σχεδόν τις χώρες, των κατοικημένων ηπείρων. Σήμερα, η χρήση της δεύτερης γενιάς αντιπροσωπεύει πάνω από το **80%** του συνόλου των συνδρομητών σε όλο τον κόσμο. Πάνω από **60** φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν, επίσης, **CDMA2000** τη ζώνη συχνοτήτων των **450 MHz (CDMA450)**.
- **Interim Standard-95 (IS-95)**, δηλαδή **CDMAOne** (λειτουργεί με βάση το **CDMA** και συνήθως αναφέρεται ως απλά **CDMA** στις ΗΠΑ), και χρησιμοποιείται στην Αμερική και σε διάφορα μέρη της Ασίας. Σήμερα, αντιπροσωπεύει, περίπου το **17%** του συνόλου των συνδρομητών σε παγκόσμιο επίπεδο. Πάνω από δώδεκα **CDMA** φορείς έχουν μεταναστεύσει στο **GSM** συμπεριλαμβανομένων του Μεξικό, της Ινδίας, της Αυστραλίας και της Νότιας Κορέας.

- Τα PDC (TDMA - based), που χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην Ιαπωνία, ενώ υπάρχει και ιδιόκτητο δίκτυο, που χρησιμοποιείται από τη Nextel στις Ηνωμένες Πολιτείες.
- Το IS-136 aka D-AMPS (TDMA -based, που συνήθως αναφέρονται ως απλά TDMA στις ΗΠΑ), ήταν κάποτε διαδεδομένο στην Αμερική, αλλά οι περισσότεροι χρησιμοποιούν πλέον το GSM.

Για το General Packet Radio Service (GPRS) υπάρχει μια θεωρητική μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς στα 50 kbps, που πρακτικά περιορίζεται στα 40 kbps. Τα Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) υπάρχει μια μέγιστη θεωρητική ταχύτητα μεταφοράς 250 kbps, που πρακτικά περιορίζεται στα 150 kbps.

Σε λιγότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές, το ασθενέστερο ψηφιακό σήμα, που μεταδίδεται από ένα κινητό τηλέφωνο μπορεί να μην είναι επαρκές για την επίτευξη ενός πύργου κυψελών. Αυτό τείνει να είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα για τα συστήματα 2G, που αναπτύχθηκαν σε υψηλότερες συχνότητες, αλλά δεν είναι κυρίως ένα πρόβλημα για τα συστήματα 2G, που έχουν αναπτυχθεί σε χαμηλότερες συχνότητες. Οι εθνικές ρυθμίσεις, που υπαγορεύονται από κάθε χώρα διαφέρουν σημαντικά οπουδήποτε μπορεί να αναπτυχθεί το 2G. Κάτω από καλές συνθήκες, η ψηφιακή μετάδοση θα αποδίδει σίγουρα πολύ καλύτερα.

Ενώ, οι ψηφιακές κλήσεις τείνουν να είναι στατικές και το υπόβαθρο του θορύβου σχετικά υψηλό, η συμπίεση με απώλειες, μειώνει την ποιότητα των κλήσεων, πράγμα, που σημαίνει ότι το φάσμα του ήχου, που μεταφέρουν μειώνεται. Μιλώντας σε ένα ψηφιακό κινητό τηλέφωνο, ο καλών ακούει λιγότερο ήχο, που προέρχεται από την τονικότητα της φωνής κάποιου.

### 2.2.1 Δομή

Σχετικά με την αρχιτεκτονική GPRS εισάγεται μία νέα κλάση κόμβων δικτύου, οι οποίοι καλούνται Κόμβοι Υποστήριξης GPRS, με σκοπό την ενσωμάτωση του GPRS στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική GSM. Υπάρχουν συνολικά δύο διαφορετικοί τύποι GSN:

- **Serving GPRS Support Node (SGSN):** μεταφέρει πακέτα δεδομένων από και προς τους κινητούς σταθμούς, που βρίσκονται στην περιοχή υπηρεσίας του. Επίσης:
  - Δρομολογεί και μεταφέρει πακέτα
  - Πραγματοποιεί έλεγχο κινητικότητας
  - Εκτελεί λειτουργίες ταυτοποίησης και χρέωσης
- **Gateway GPRS Support Node (GGSN):** Διασυνδέει το δίκτυο κορμού του δικτύου GPRS και των εξωτερικών δικτύων δεδομένων πακέτων. Ακόμα, μετατρέπει τα πακέτα GPRS, που προέρχονται από το SGSN σε πακέτα του πρωτοκόλλου Packet Data Protocol (PDP).

Το EDGE αποτελεί βελτίωση της 2G τεχνολογίας. Προσφέρει νέο σύνολο φορέων ασύρματης πρόσβασης. Δημιουργήθηκε με στόχο την παροχή υψηλότερων ρυθμών δεδομένων. Σημαντικές βελτιώσεις συγκριτικά με το GPRS:

- Χρησιμοποιήθηκε κωδικοποίηση 8PSK αντί GMSK, που χρησιμοποιείται στο GSM και στο GPRS
- Λειτουργεί με μεταγωγή πακέτου και μεταγωγή κυκλώματος
- Λειτουργεί με βάση το Enhanced GPRS (EGPRS)
- Βελτιώνει τα δεδομένα μεταγωγής κυκλώματος Enhanced Circuit Switched Data (ECSD)

(Μπούρας, 2017b)

### 2.2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η 2.5G γενιά χρησιμοποιείται για να περιγράψει 2G συστήματα, που έχουν εφαρμόσει έναν τομέα μεταγωγής πακέτων πέραν του τομέα της μεταγωγής κυκλώματος. Δεν παρέχει αναγκαστικά πιο γρήγορες υπηρεσίες, λόγω ομαδοποίησης των χρονοθυρίδων, όμως, χρησιμοποιείται για Circuit-Switched Data Services (HSCSD), καθώς και το πρώτο σημαντικό βήμα στην εξέλιξη των δικτύων GSM σε 3G συνέβη με την εισαγωγή της General Packet Radio Service (GPRS).

Τα δίκτυα CDMA2000 παρουσιάζουν παρόμοια εξέλιξη με την εισαγωγή του 1xRTT (CDMA2000 1X- IS-2000). Τα πρότυπα GPRS θα μπορούσαν να παρέχουν ρυθμούς δεδομένων από 56 kbps έως 115 kbps, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπηρεσίες, όπως το Wireless Access Protocol (WAP), Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων (Multimedia Messaging Service-MMS), καθώς και για υπηρεσίες επικοινωνιών στο Διαδίκτυο, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail).

Η μεταφορά GPRS δεδομένων, συνήθως, χρεώνεται ανά megabyte δεδομένων, που μεταφέρονται, ενώ η επικοινωνία δεδομένων μέσω της παραδοσιακής μεταγωγής κυκλώματος χρεώνεται ανά λεπτό από το χρόνο σύνδεσης, ανεξάρτητα από το αν ο χρήστης πράγματι αξιοποιεί την ικανότητα ή είναι σε κατάσταση αναμονής. Το πρωτόκολλο 1xRTT υποστηρίζει αμφίδρομη ροή δεδομένων έως 153,6 kbps, παρέχοντας ένα μέσο μετάδοσης δεδομένων του χρήστη 80-100 kbps σε εμπορικά δίκτυα. Μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για WAP, SMS και MMS υπηρεσίες, καθώς και για πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Η τεχνολογία, που είναι γνωστή ως 2.75G, περιλαμβάνει τα δίκτυα GPRS, που εξελίχθηκαν σε EDGE δίκτυα με την εισαγωγή της 8PSK κωδικοποίησης. Οι ενισχυμένες ταχύτητες δεδομένων για EDGE, Enhanced GPRS (EGPRS), ή IMT-SC(IMT) αποτελούν μια συμβατή ψηφιακή τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας, που επιτρέπει βελτιωμένες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, ως προέκταση στην κορυφή του προτύπου GSM.

Το EDGE έχει αναπτυχθεί σε δίκτυα GSM αρχής γενομένης από το 2003 αρχικά από την AT&T στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το EDGE έχει τυποποιηθεί από το 3rd Generation Partnership Project (3GPP), ως μέρος της οικογένειας GSM και είναι μια αναβάθμιση, που παρέχει μία δυναμικά τριπλάσια αύξηση της παραγωγικής ικανότητας του GSM/GPRS δικτύου.

### 2.2.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

Τα τρία κυριότερα πλεονεκτήματα των δικτύων **2G** έναντι των προκατόχων τους, ήταν ότι:

- Οι τηλεφωνικές συνομιλίες, κρυπτογραφούνται ψηφιακά.
- Τα συστήματα **2G** ήταν πολύ αποτελεσματικότερα ως προς το φάσμα, που επέτρεπε πολύ υψηλότερα επίπεδα διείσδυσης της κινητής τηλεφωνίας.
- Η τεχνολογία **2G** εισήγαγε υπηρεσίες δεδομένων κινητής τηλεφωνίας, αρχής γενομένης με μηνύματα κειμένου **Short Message Service (SMS)**.
- Τα ψηφιακά δεδομένα φωνής είναι δυνατό να συμπιεστούν και να πολυπλεχτούν πολύ πιο αποτελεσματικά από την αναλογική κωδικοποίηση φωνής μέσω της χρήσης των διαφόρων **codecs (coder-decoder)**, επιτρέποντας περισσότερες κλήσεις, που διαβιβάζονται στην ίδια ποσότητα του εύρους ζώνης ραδιοκυμάτων.
- Τα ψηφιακά συστήματα είναι σχεδιασμένα, έτσι ώστε να εκπέμπουν λιγότερη ισχύ ραδιοκυμάτων από τα αναλογικά.
- Οι κυψέλες έπρεπε να είναι μικρότερες, έτσι ώστε περισσότερες να είναι δυνατό να τοποθετούνται στο ίδιο μέγεθος χώρου.
- Οι κυψέλες και ο συναφής εξοπλισμός είχε γίνει λιγότερο δαπανηρός.

#### Μειονεκτήματα

Ύστερα το **2G** αντικαταστάθηκε από νεότερες τεχνολογίες. Ωστόσο, τα δίκτυα **2G** χρησιμοποιούνται, ακόμη σε πολλά μέρη του κόσμου, όπου το κόστος ανάπτυξης των μετεξελίξεων του είναι σχεδόν απαγορευτικό. Δεν παρέχουν τόσο υψηλού επιπέδου υπηρεσίες όσο τα δίκτυα επόμενων γενιών.

### 2.2.4 Υπηρεσίες

Οι υπηρεσίες σε αυτή τη γενιά κινητών δικτύων είναι οι φωνητικές κλήσεις, η ανταλλαγή απλών μηνυμάτων κειμένου **SMS**, το πρωτόκολλο **WAP**, Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων **MMS**, καθώς και για υπηρεσίες επικοινωνιών στο Διαδίκτυο, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (**e-mail**).

## 2.3 3G

Η τρίτη γενιά (**3G**) κινητής επικοινωνίας εμφανίστηκε το **2001**. Αυτή η γενιά βασίζεται σε ένα σύνολο προτύπων, που χρησιμοποιούνται για κινητές συσκευές και υπηρεσίες κινητής χρήσης τηλεπικοινωνιών και δικτύων, που υπακούνε στις προδιαγραφές των διεθνών κινητών τηλεπικοινωνιών (**IMT - 2000**) της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών. Η τρίτη γενιά (**3G**) βρίσκει εφαρμογή στην ασύρματη φωνητική

τηλεφωνία, στην κινητή πρόσβαση στο διαδίκτυο, στη σταθερή ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο, σε κλήσεις βίντεο και στην τηλεόραση.

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα **3G** με τις υπηρεσίες υποστήριξης παρέχουν μια ταχύτητα μεταφοράς πληροφοριών τουλάχιστον **200 kbps**. Αργότερα, το δίκτυο **3G** απελευθερώνεται και μετεξελίσσεται, ενώ συχνά συμβολίζεται με **3.5G** και **3.75G**, θέλοντας να σηματοδοτηθεί η ανάπτυξη γρηγορότερων και ταχύτερων υπηρεσιών. Επίσης, παρέχεται κινητή ευρυζωνική πρόσβαση πολλών **Mbps** σε έξυπνα τηλέφωνα και σε κινητά μόντεμ για φορητούς υπολογιστές. Η επέκταση αυτή είναι δυνατό να εφαρμοστεί στις υπηρεσίες, που εφαρμόζεται και η **3G** τεχνολογία. Η πρώτη έκδοση του **3GPP Long Term Evolution (LTE)** προτύπου δεν πληροί απολύτως τις απαιτήσεις της **ITU 4G** και ονομάζεται **IMT - Advanced**. Η πρώτη **LTE** έκδοση δεν είναι συμβατή με **3G**, αλλά είναι μία προ-**4G** τεχνολογία ή, όπως αλλιώς λέγεται **3.9G**. Ωστόσο, η εξέλιξή του **LTE Advanced (LTE-A)** είναι μια τεχνολογία **4G**, ενώ η **WiMAX** είναι μια άλλη τεχνολογία, που αγγίζει τα όρια του ή διατίθεται στην αγορά ως **4G**.

Πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιακών αγορών παρέχουν ασύρματες υπηρεσίες διαδικτύου μέσω κινητού τηλεφώνου, όπως για παράδειγμα το **3G**, υποδεικνύοντας ότι η διαφημιζόμενη υπηρεσία παρέχεται μέσω ασύρματου δικτύου **3G**. Οι υπηρεσίες, που διαφημίζονται ως **3G** απαιτούνται για την κάλυψη **IMT-2000** τεχνικών προτύπων, συμπεριλαμβανομένων των προτύπων για την αξιοπιστία και την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Για να πληρούνται τα πρότυπα **IMT-2000**, απαιτείται ένα σύστημα για την παροχή αιχμής δεδομένων τουλάχιστον **0,2 Mbps**. Ωστόσο, πολλές υπηρεσίες, που διαφημίζονται ως **3G** παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες από ό, τι σηματοδοτούν οι ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις για την παροχή υπηρεσιών **3G**. Τα **3.5G** και **3.75G** παρέχουν, επίσης, κινητή ευρυζωνική πρόσβαση πολλών **Mbps** σε έξυπνα τηλέφωνα και σε κινητά μόντεμ για φορητούς υπολογιστές.

### 2.3.1 Δομή

Το **Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)** επέκτεινε τις δυνατότητες των κινητών, καθώς και την επέκταση των ασύρματων και δορυφορικών τεχνολογιών. Ακόμα, παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα, ιδίως συγκριτικά με την προηγούμενη γενιά κινητών δικτύων, όπως για παράδειγμα:

- Αυξημένη χωρητικότητα
- Υποστήριξη δεδομένων
- Πολλές και συνάμα διαφορετικές υπηρεσίες, που χρησιμοποιούν ένα σχήμα ασύρματης πρόσβασης και αναπτυσσόμενο καλωδιακό δίκτυο.

Οι ταχύτητες, που υποστηρίζει ξεπερνούν τα **2000Kbps**. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η τεχνολογία **Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)**. Στη συγκεκριμένη μετάδοση, χρησιμοποιείται το εύρος καναλιού **5MHz**. Οι μέθοδοι πρόσβασης, που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

- **Direct Sequence Code Division Multiple Access (DS-CDMA)**
- **Frequency Division Duplexing (FDD)**

Η αρχιτεκτονική του UMTS περιλαμβάνει το δίκτυο κορμού Core Network, το UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) και το τερματικό του χρήστη:

- Core Network:
  - SGSN
  - GGSN
  - Κόμβοι GSM
- UTRAN
  - RNC
  - Node B
- Το τερματικό χρήστη

Η αρχιτεκτονική UMTS βασίζεται σε διάφορα πρωτόκολλα:

- Packet Data Coverage Protocol (PDCP): είναι υπεύθυνο για την αποστολή και παραλαβή πακέτων δεδομένων
- Radio Link Control (RLC) layer: εκτελεί τη διαχείριση λαθών του δικτύου και λειτουργεί με τις ακόλουθες λειτουργίες:
  - Acknowledged mode
  - Unacknowledged mode
  - Transparent mode
- Medium Access Control (MAC)
- Physical Layer (PHY)

Στο UMTS υπάρχουν λογικά, μεταφοράς και φυσικά κανάλια, που διασυνδέουν το RLC με το MAC, το MAC με το PHY και μεταδίδουν δεδομένα στο ασύρματο μέσο αντίστοιχα. (Μπούρας, 2017b)

### 2.3.2 Ιστορική Αναδρομή

Τα 3G συστήματα είναι επώνυμα και συνοψίζονται στα πιο κάτω:

- Το σύστημα UMTS, που προσφέρθηκε για πρώτη φορά το 2001, έχει τυποποιηθεί από το 3GPP και χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη, την Ιαπωνία, την Κίνα και σε άλλες περιοχές, ενώ κυριάρχησε με βάση την υποδομή του συστήματος GSM 2G. Τα κινητά τηλέφωνα είναι, συνήθως υβρίδια UMTS και GSM. Πολλές ραδιοεπαφές προσφέρονται, μοιράζονται την ίδια υποδομή. Το πρωτότυπο και η πιο διαδεδομένη διεπαφή ραδιοσυχνοτήτων ονομάζεται W-CDMA. Η διεπαφή των ραδιοσυχνοτήτων TD-SCDMA εμφανίστηκε στο εμπόριο το 2009 και προσφέρεται μόνο στην Κίνα. Η τελευταία έκδοση UMTS, HSPA+, μπορεί να προσφέρει μέγιστη ταχύτητα δεδομένων έως 56 Mbps στην κάθοδο (downlink) θεωρητικά και πρακτικά έως 28 Mbps, που εμφανίζονται στις υπέρχουσες υπηρεσίες και 22 Mbps στην άνοδο (uplink).

- Το σύστημα **CDMA2000** εμφανίστηκε για πρώτη φορά το **2002**, το οποίο έχει τυποποιηθεί από **3GPP2**, που χρησιμοποιείται κυρίως στη Βόρεια Αμερική και τη Νότια Κορέα, για την ανταλλαγή των υποδομών με το πρότυπο **IS-95 2G**. Τα κινητά τηλέφωνα είναι συνήθως υβρίδια **CDMA2000** και **IS-95**.
- Η τελευταία έκδοση **Enhanced Voice-Data Optimized (EVDO) Rev B** προσφέρει μέγιστες ταχύτητες των **14,7 Mbps**. Τα παραπάνω συστήματα και οι διεπαφές λειτουργούν με βάση το φάσμα της ασύρματης τεχνολογίας μετάδοσης. Ενώ, το πρότυπο **GSM EDGE "2,9G"**, τα ασύρματα τηλέφωνα **DECT** και τα πρότυπα **Mobile WiMAX** επίσημα πληρούν, τις απαιτήσεις **IMT -2000** και έχουν εγκριθεί ως πρότυπα **3G** από την **ITU**, αυτά συνήθως, δεν έχουν την επωνυμία **3G** και βασίζονται σε εντελώς διαφορετικές τεχνολογίες.

Τα ακόλουθα κοινά πρότυπα συμμορφώνονται με το πρότυπο **IMT2000/3G**:

- Το **EDGE**, με αναθεώρηση από τον οργανισμό **3GPP** με τις παλαιότερες **2G GSM** μεθόδους μετάδοσης, χρησιμοποιώντας τους ίδιους κόμβους μεταγωγής, τους ίδιους σταθμούς βάσης και τις ίδιες συχνότητες, όπως το **GPRS**, αλλά με νέο σταθμό βάσης και **RF κυκλώματα** κινητών τηλεφώνων. Βασίζεται στο σύστημα αποτελεσματικής διαμόρφωσης **8PSK** ως συμπλήρωμα του αρχικού συστήματος διαφοροποίησης. Το **EDGE** εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευκολίας της αναβάθμισης υπό την υπάρχουσα υποδομή των **2G GSM** και των κινητών τηλεφώνων.
- Το **EDGE** σε συνδυασμό με την τεχνολογία **GPRS 2.5G** ονομάζεται **EGPRS**, και επιτρέπει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των **200 kbps**, όπως ακριβώς οι αρχικές εκδόσεις **UMTS WCDMA**, και επομένως πληροί τις απαιτήσεις τυπικά για το **IMT2000** σε συστήματα **3G**. Ωστόσο, στην πράξη το **EDGE** σπάνια αναφέρεται στο εμπόριο ως ένα σύστημα **3G**, αλλά ως ένα σύστημα **2.9G**. Το **EDGE** είναι ένα σύστημα με καλύτερη φασματική απόδοση από ό,τι τα πρωτότυπα συστήματα **UMTS** και **CDMA2000**, αλλά είναι δύσκολο να επιτευχθούν πολύ υψηλότερα ποσοστά δεδομένων αιχμής λόγω του περιορισμένου φασματικού εύρους ζώνης του **GSM**, που κυμαίνεται στα **200 KHz** και κατά συνέπεια, είναι ένα αδιέξοδο.
- Το **EDGE** λειτουργεί, επίσης, στο σύστημα **TDMA IS - 135** και έχει σταματήσει σήμερα.
- Το **Evolved EDGE**, του οποίου η τελευταία αναθεώρηση, έχει κορυφές στο **1 Mbps** και **400 kbps** και το οποίο δε χρησιμοποιείται για εμπορικούς σκοπούς.
- Το **UMTS** δημιουργήθηκε και αναθεωρήθηκε από το **3GPP**. Η οικογένεια αυτή είναι πλήρως αναθεωρημένη σε σχέση με το **GSM** όσον αφορά τις μεθόδους κωδικοποίησης και το υλικό, αν και μερικές περιοχές του **GSM** μπορεί να τοποθετηθούν και να μεταδίδονται στο **UMTS/format W-CDMA**.
- Το **W-CDMA** είναι η πιο κοινή ανάπτυξη, που συνήθως λειτουργεί στη ζώνη των **2100 MHz**. Μερικοί άλλοι χρησιμοποιούν τις **850, 900** και **1900 MHz**.

- Το HSPA είναι ένα αμάλγαμα από διάφορες αναβαθμίσεις για το αρχικό πρότυπο W-CDMA και προσφέρει ταχύτητες 14,4 Mbps προς τα κάτω και 5,76 Mbps προς τα πάνω. Το HSPA είναι συμβατό και χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με το W-CDMA.
- Το HSPA+ περιλαμβάνει μια περαιτέρω αναθεώρηση και αναβάθμιση του HSPA και μπορεί να προσφέρει θεωρητικά ποσοστά με κορυφή δεδομένων έως 168 Mbps στο downlink και 22 Mbps στο uplink, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό βελτιώσεων της διεπαφής αέρα, καθώς και HSPA multi-carrier και Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO). Τεχνικά όμως, το MIMO και το DC - HSPA μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς τις " + " βελτιώσεις του HSPA +.
- Το σύστημα CDMA2000, ή IS-2000, συμπεριλαμβανομένων του CDMA2000 1x και του CDMA2000, τα οποία είναι αρκετά υψηλής συχνότητας, έχει τυποποιηθεί από 3GPP2, που εξελίσσεται από το αρχικό σύστημα IS- 95 CDMA, χρησιμοποιείται κυρίως στη Βόρεια Αμερική, στην Κίνα, στην Ινδία, στο Πακιστάν, στην Ιαπωνία, στη Νότια Κορέα, στη Νοτιοανατολική Ασία, στην Ευρώπη και στην Αφρική.
- Το CDMA2000 διαθέτει μια αυξημένη ικανότητα φωνής και προσφέρει 14,7 Mbps.
- Τα DECT ασύρματα τηλέφωνα και τα πρότυπα Mobile WiMAX επίσημα πληρούν, επίσης, τις απαιτήσεις IMT-2000, δε λαμβάνονται υπόψη συνήθως, λόγω της σπανιότητας και της ακαταλληλότητάς τους ως προς τη χρήση των κινητών τηλεφώνων.

Η τρίτη γενιά (3G) άργησε να εγκριθεί σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα δίκτυα 3G δε χρησιμοποιούνται τις ίδιες ραδιοσυχνότητες, συνεπώς, δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί εκμετάλλευση των κινητών επικοινωνιών 2G και άρα, γίνεται αντιληπτό ότι, έπρεπε να οικοδομηθούν εντελώς νέα δίκτυα και εντελώς νέες συχνότητες, που απαιτούνται για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Άλλες πιθανές καθυστερήσεις οφείλονταν, στις δαπάνες αναβάθμισης του εξοπλισμού μετάδοσης, ειδικά για το UMTS, του οποίου η ανάπτυξη απαιτεί την αντικατάσταση των περισσότερων πύργων μετάδοσης. Έτσι, τον Δεκέμβριο του 2007, υπήρχαν 190 3G δίκτυα, που λειτουργούσαν σε 40 χώρες και 154 HSDPA δίκτυα, που λειτουργούσαν σε 71 χώρες. Στην Ασία, στην Ευρώπη, στον Καναδά και στις ΗΠΑ, οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία W-CDMA.

### 2.3.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα, που συνοψίζονται σε αυτή τη γενιά είναι τα εξής:

- Υψηλότερη ταχύτητα από τους προκατόχους της
- Ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση

- Πολλές υπηρεσίες, όπως τηλεόραση, δορυφορικές μεταδόσεις, βιντεοκλήσεις κλπ.
- Μείωση τιμών λόγω του μεγάλου ανταγωνισμού
- Μεταγωγή δεδομένων για κοινωνικά δίκτυα

#### Μειονεκτήματα

Διάφορα μειονεκτήματα, τα οποία υπήρξαν σε αυτή τη γενιά και ώθησαν στην εξάπλωση της επόμενης ήταν:

- Οριακό κέρδος για τους παρόχους λόγω του μεγάλου ανταγωνισμού και του κόστους.
- Ανάγκη αδειοδότησης χρήσης κατάλληλου φάσματος.
- Δυσπιστία από χρήστες εξαιτίας της αντίληψης για υψηλή ακτινοβολία λόγω των μαγνητικών κυμάτων.
- Τα κινητά εκείνης της γενιάς δεν ήταν κατασκευασμένα ιδίως για τηλεοπτικές εκπομπές.

#### 2.3.4 Υπηρεσίες

Το πρότυπο 3G έγινε, ίσως, ιδιαίτερα γνωστό, λόγω της μαζικής επέκτασης της κινητής τηλεφωνίας. Μια ιδιαίτερα σημαντική εξέλιξη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου είναι το έξυπνο τηλέφωνο, που συνδυάζει τις δυνατότητες ενός **Personal Digital Assistant (PDA)** με ένα κινητό τηλέφωνο και κατ' επέκταση οδηγεί σε ευρεία ζήτηση για κινητή συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο. Η 3G είναι η πρώτη γενιά, που εισήγαγε τον όρο «κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες», επειδή η ταχύτητα της για την περιήγηση και η ευελιξία της την καθιστούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση.

Ένα ελάχιστο ποσοστό των δεδομένων, που παρέχεται είναι αυτό των **2Mbps** για σταθερή θέση ή για περπάτημα από τους χρήστες, ενώ **384kbps** για χρήστες μέσα σε ένα κινούμενο όχημα.

Τα δίκτυα 3G προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια από ό,τι οι προκάτοχοί τους. Το εύρος ζώνης και οι πληροφορίες για τη θέση στη διάθεση των συσκευών 3G δημιουργούν εφαρμογές, που δεν ήταν προηγουμένως διαθέσιμες για τους χρήστες κινητών τηλεφώνων. Μερικές από τις εφαρμογές είναι:

- **Mobile TV,**
- **Video on demand,**
- **Video Conferencing,**
- **Τηλεϊατρική,**
- **Location-based services,**
- **Global Positioning System (GPS),** που έχουν βοηθήσει σε πολλούς τομείς της σύγχρονης ανθρώπινης δραστηριότητας.

Όμως, η αυξημένη πρόοδος στον τομέα κατέστησε την εν λόγω τεχνολογία σύντομα παρωχημένη και άρχισε να αντικαθίσταται από την επόμενη γενιά τεχνολογία, τη 4G.

## 2.4 4G

Η τέταρτη γενιά 4G αναπτύχθηκε προκειμένου να βελτιώσει την ποιότητα παροχής υπηρεσιών **Quality of Service (QoS)** και να θέσει τα θεμέλια για επερχόμενες τεχνολογικές εφαρμογές, όπως η ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, **Multimedia Messages (MMS)**, **video chat**, **mobile TV**, **Digital Video Broadcasting (DVB)** κ.ά. Οι στόχοι, που ικανοποιήθηκαν από το πρότυπο του 4G είναι οι παρακάτω:

- Αποτελεί ένα φασματικά αποδοτικό σύστημα
- Παρέχει υψηλή χωρητικότητα συστήματος (περισσότεροι ταυτόχρονοι χρήστες ανά κυψέλη) και μικρότερο κόστος ανά δυαδικό ψηφίο. Η χωρητικότητα για τα 4G συστήματα είναι τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των 3G, ενώ το κόστος ανά δυαδικό ψηφίο μειώθηκε σημαντικά, έτσι ώστε η χρέωση να γίνει χαμηλή και για το λόγο αυτό εξαπλώθηκε σημαντικά η χρήση του διαδικτύου σε κινητές συσκευές.
- Προσδίδει υψηλό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας. Τα συστήματα τέταρτης γενιάς προσφέρουν μέχρι 1 Gbps για ταχύτητα **download** και τουλάχιστον 500Mbps για **upload** ταχύτητες, ενώ για τα κινούμενα οχήματα η ελάχιστη ταχύτητα αγγίζει τα 100Mbps.
- Περιλαμβάνει αρκετά καλή χωρική κάλυψη, με μεταβλητή ταχύτητα μετάδοσης. Καθώς οι ταχύτητες μετάδοσης αυξάνονται, το απαιτούμενο επίπεδο λαμβανόμενου σήματος, αυξάνεται ανάλογα.
- Ένας ρυθμός μετάδοσης τουλάχιστον 100Mbps μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων στον κόσμο είναι ήδη πραγματικότητα.
- Επίσης, είναι σημαντική η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και δυνατότητα περιαγωγής σε πολλαπλά δίκτυα.
- Παροχή εξαιρετικής ποιότητας υπηρεσιών (QoS) για τις εφαρμογές πολυμέσων, όπως MMS, video chat, mobile TV, DVB.
- Δημιουργία ομαλών διασυνδέσεων με συστήματα 3G, ασύρματα δίκτυα υπολογιστών WLAN και σταθερά δίκτυα. Με τη χρήση τεχνολογίας βασισμένης σε πρωτόκολλα IP μεταγωγής πακέτων καθίσταται ομαλή η διασύνδεση διαφορετικών τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα, ο κάθε χρήστης μπορεί να διαλέγει το καλύτερο δίκτυο ανά περίπτωση (ανάλογα με τον χρόνο, χώρο και κόστος).

### 2.4.1 Δομή

Σε ένα δίκτυο LTE παρέχεται πλήρης κάλυψη και συνδεσιμότητα IP μεταξύ της συσκευής και του δικτύου πακέτου δεδομένων. Το LTE και το System Architecture Evolution (SAE), το οποίο περιλαμβάνει το EPC σχηματίζουν το Evolved Packet System (EPS). Το EPS αποτελείται από το δίκτυο κορμού EPC και το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (eUTRAN). Το δίκτυο κορμού αποτελείται από πολλούς κόμβους, το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από μόνο έναν κόμβο τον evolved NodeB (eNB), ο οποίος συνδέεται με τον εξοπλισμό χρήστη.

Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του εξοπλισμού χρήστη, καθώς και για την εγκατάσταση των bearers. Οι βασικότεροι κόμβοι, που περιλαμβάνονται στο EPC είναι οι ακόλουθοι:

- PDN Gateway (P-GW)
- Serving Gateway (S-GW)
- Mobility Management Entity (MME)
- Home Subscriber Server (HSS)
- Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)

Το δίκτυο πρόσβασης σε ένα LTE δίκτυο αποτελείται από ένα δίκτυο eNode BS. Δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής στο eUTRAN. Για το λόγο αυτό, η αρχιτεκτονική του eUTRAN θεωρείται επίπεδη. Το eUTRAN είναι ικανό να εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Διαχείριση των ασύρματων πόρων
- Συμπύεση κεφαλίδων
- Ασφάλεια
- Συνδεσιμότητα με το EPC

Η Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων (User Plane) του LTE καθορίζει ότι ένα IP πακέτο ενθυλακώνεται σε ένα πρωτόκολλο καθορισμένο από το EPC και μεταφέρεται από το P-GW προς το eNodeB για μετάδοση προς τον εξοπλισμό χρήστη. Υπάρχουν διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς, τα οποία λειτουργούν ανάλογα με την εκάστοτε διεπαφή.

Η στοίβα των πρωτοκόλλων eUTRAN αποτελείται από τα ακόλουθα υπό-επίπεδα:

- Packet Data Convergence Protocol (PDCP)
- RLC
- MAC

Οι σημαντικότερες τεχνολογίες, οι οποίες λαμβάνουν καθοριστικό ρόλο στην υλοποίηση και δόμηση των δικτύων αυτής της γενιάς τηλεπικοινωνιών είναι οι ακόλουθες (Μπούρας, 2017a):

- OFDM-OFDMA
- Channel-Dependent Scheduling and Rate Adaptation
- Inter-Cell Interference Coordination (ICIC)
- Hybrid ARQ with Soft Combining
- Μετάδοση πολλαπλών κεραιών
- Multicast and Broadcast
- Positioning/Dual-Layer Beam-Forming

### 2.4.2 Ιστορική Αναδρομή

Η διαδικασία προτυποποίησης του LTE ξεκίνησε στο Τορόντο του Καναδά το Νοέμβριο του 2004 από τον οργανισμό 3GPP και η πρώτη επίσημη έκδοση ανακοινώθηκε το 2008. Το πρότυπο καλύπτει θέματα, που αφορούν στην ασύρματη διεπαφή, καθώς και την αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου. Το LTE της πρώτης έκδοσης δεν κάλυπτε πλήρως τις απαιτήσεις, που είχαν οριστεί για τα 4ης γενιάς συστήματα για αυτό τυπικά θεωρείται 3.9G. Κάτω από την πίεση του μάρκετινγκ, όμως, τελικά αναφέρεται και προωθείται πλέον εμπορικά ως 4η γενιά. Μπούρας, 2017a

### 2.4.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα, τα οποία εμφανίστηκαν στην τέταρτη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας ήταν τα εξής:

- Τα δίκτυα αυτής της γενιάς διαθέτουν υψηλές ταχύτητες, οι οποίες είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με όλες τις άλλες ταχύτητες, που επετεύχθησαν στις προηγούμενες τηλεπικοινωνιακές γενιές. Κάτι τέτοιο συμβάλει ενεργά σε εφαρμογές, που καταναλώνουν πολλά δεδομένα, όπως για παράδειγμα η συνομιλία μέσω video και η προβολή ταινιών.
- Τα δίκτυα αυτά προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα, ιδίως συγκρινόμενα με άλλες ασύρματες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα η 802.11.
- Επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ασφάλεια και ιδιωτικότητα.
- Είναι πιθανές μεγαλύτερες προσφορές λόγω του ανταγωνισμού, που επικρατεί μεταξύ των παρόχων.

#### Μειονεκτήματα

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα, που εμφανίζει αυτή η γενιά και οδήγησαν στην εμφάνιση της 5G, είναι τα ακόλουθα:

- Περιορισμένη συνδεσιμότητα σε ορισμένες απομακρυσμένες και δύσβατες περιοχές.

- Υπάρχουν πολλά συμβατά μέσα, υλικό και συσκευές, όμως, απαιτούνται πολύπλοκες διαδικασίες για να εγκατασταθούν.
- Η τεχνολογία αυτή είναι νέα και έτσι, εμφανίζονται σημαντικά μειονεκτήματα και κενά ασφαλείας.
- Η σύνδεση και η αλληλεπίδραση των συσκευών με τους σταθμούς βάσης δημιουργούν προβλήματα στη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η οποία εξαντλείται άμεσα.
- Πληρωμή για υπηρεσίες 4G, ενώ σε κάποια σημεία του δικτύου δεν καλύπτονται από τέτοιου είδους δίκτυα και καλύπτονται από προηγούμενες κινητές ή άλλες ασύρματες τεχνολογίες.

#### 2.4.4 Υπηρεσίες

Κρισιμότερες υπηρεσίες, που κυριάρχησαν στα δίκτυα τέταρτης γενιάς είναι η εξής:

- **Εικονική πλοήγηση (virtual navigation).** Μια απομακρυσμένη βάση δεδομένων περιέχει γραφική αναπαράσταση δρόμων, κτιρίων και τοπογραφικών γνωρισμάτων. Κομμάτια αυτής της βάσης δεδομένων μεταδίδονται γρήγορα σε ένα όχημα, όπου ένα υπολογιστικό πρόγραμμα επιτρέπει στους επιβάτες να προβλέπουν τη μελλοντική διαδρομή, να επιλέγουν δρόμους με τη μικρότερη κίνηση, να εντοπίζουν αξιοθέατα ή μουσεία ή να επιλέγουν εναλλακτικούς δρόμους σε περιπτώσεις ατυχημάτων ή συμφόρησης του οδικού δικτύου.
- **Τηλεϊατρική (telemedicine).** Τα πληρώματα των ασθενοφόρων σε απομακρυσμένες περιοχές μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ιατρικά αρχεία και να τηλεδιασκέπτονται με γιατρούς, όπως και να μεταδίδουν κρίσιμες πληροφορίες του ασθενούς σε κεντρικά νοσοκομεία, έτσι ώστε να ελαττώνεται ο χρόνος για την ενημέρωση των ιατρών σε περιπτώσεις διακομιδής ασθενών από ένα νοσοκομείο σε άλλο ή για παράδειγμα, παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως μπορεί να είναι ένα κέντρο υγείας, που δεν παρέχει εξειδικευμένους ιατρούς, αλλά είναι βασικό να γίνει μία κρίσιμη θεραπεία σε κάποιον ασθενή.
- **Σταθμός πληροφορίας (info-station).** Ένας οδηγός αυτοκινήτου μπορεί να λαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό αρχείων ή πολυμέσων από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της οδήγησης σε ένα αυτοκινητόδρομο από και προς το χώρο εργασίας.
- **Εφαρμογές διαχείρισης κρίσεων.** Αυτές οι εφαρμογές είναι χρήσιμες σε περιόδους φυσικών καταστροφών, όταν ολόκληρος ο τηλεπικοινωνιακός ιστός έχει παραλύσει. Η αυξημένη χωρητικότητα των ασύρματων συστημάτων ευρείας ζώνης 4G, τα οποία περιλαμβάνουν υπηρεσίες διαδικτύου και video επιτρέπουν την αποκατάσταση σε διάστημα ωρών σε αντιδιαστολή με τα ενσύρματα συστήματα, που θα απαιτούσαν ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες για να αποκατασταθούν.

- Εκπαίδευση μέσω **Internet**. Δίνει τη δυνατότητα σε άτομα από πολύ διαφορετικές χώρες του κόσμου να παρακολουθούν μαθήματα σε διαδικτυακούς τόπους με πολύ χαμηλό κόστος.
- Κινητά δίκτυα υπολογιστών. Κατά ανάλογο τρόπο με τα σταθερά δίκτυα υπολογιστών τα κινητά δίκτυα διευκολύνουν οικονομικές συναλλαγές, επιχειρηματικές πράξεις και επιστημονική συνεργασία από απόσταση.

## 2.5 5G

Τα δίκτυα της πέμπτης γενιάς έχουν μεγάλη σημασία και αναμένεται να επικρατήσουν στο μέλλον. Σε αυτό, συντελεί σαφέστατα και η φύση τους. Οι πολίτες και χρήστες των σύγχρονων ψηφιακών συσκευών έχουν αυξημένες απαιτήσεις από τα σύγχρονα δίκτυα. Γενικότερα, η δημιουργία των θεμελίων για τα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνιών, συντελείται σε αυτή τη δεκαετία. Η ευρωπαϊκή βιομηχανία τηλεπικοινωνιών είναι ιστορικά στην πρώτη γραμμή του παγκόσμιου ανταγωνισμού, δεδομένου ότι βρίσκεται στις πρώτες ημέρες της τεχνολογίας **GSM** και εξακολουθεί να αποτελεί περίπου το 40% της παγκόσμιας αγοράς, δηλαδή, €200 δισ. ευρώ το έτος 2012 από την άποψη της παροχής υποδομών δικτύου. (Anastasia Kollia, 2014)

Η πρόκληση για τη γενιά είναι να εξασφαλίσει:

- την ηγεσία της Ευρώπης σε συγκεκριμένες περιοχές, όπου η Ευρώπη είναι ισχυρή ή όπου υπάρχουν τέτοιες δυνατότητες,
- τη δημιουργία νέων αγορών, όπως έξυπνες πόλεις, συστήματα **e-health**, συστήματα ευφυών μεταφορών, εκπαίδευσης ή ψυχαγωγίας και μέσων ενημέρωσης.

Η **5G** γενιά θα προσφέρει αρχιτεκτονικές λύσεις, τεχνολογίες και πρότυπα, που τετραπλασιάζουν τη χωρητικότητα των ασύρματων δικτύων, τα οποία εξυπηρετούν πάνω από 7 δισεκατομμύρια συσκευές, υπό την προϋπόθεση να δημιουργηθεί ένα ασφαλές, αξιόπιστο δίκτυο με ελάχιστη αναμονή. Επιπρόσθετα, όσον αφορά στην τεχνολογία **5G** αναμένεται να αλλάξει τον τρόπο ύπαρξης των σύγχρονων δικτύων. Σε αντιδιαστολή, με τα δίκτυα ραδιοεπικοινωνιών, τα οποία αποτελούνται από «κυψέλες», οι οποίες βρίσκονται σε σταθμούς βάσης εικάζεται, ότι τα **5G** δίκτυα θα βρίσκονται σε μία σειρά διαφορετικών ζωνών συχνότητας, που θα μεταφέρουν πληροφορίες με διαφορετικές ταχύτητες και θα έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης. Σε αντίθεση, μέχρι σήμερα ένα τηλέφωνο συνδέεται με το δίκτυο μέσω μίας ανοδικής και μίας καθοδικής ζεύξης, με τον τοπικό σταθμό βάσης.

Εν συνεχεία, ενισχύεται η άποψη πως θα προκύψουν νέες κλάσεις συσκευών, οι οποίες θα επικοινωνούν με άλλες συσκευές. Τέτοια παραδείγματα είναι οι αισθητήρες, οι οποίοι αναμένεται να στέλνουν δεδομένα σε κάποιον εξυπηρετητή (**server**), με τη διαφορά ότι αυτό θα πραγματοποιείται με «συσκευο-κεντρικό τρόπο» και όχι με «κυψελο-κεντρικό», που γίνεται σήμερα. Αυτό θα συμβεί, εφόσον, οι νέες συσκευές θα είναι ικανές να «αποφαινούνται» τότε και πως είναι αποτελεσματικότερο να αποσταλούν τα δεδομένα στον εξυπηρετητή.

Ακόμα, μία επαναστατική τεχνολογία θα είναι η δυνατότητα σε πλήθος συσκευών να επικοινωνούν μεταξύ τους, χωρίς να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούν το δίκτυο. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να έχει δεκάδες

χιλιάδες συσκευές μετάδοσης δεδομένων θερμοκρασίας. Η μετάδοσή τους καθίσταται ευκολότερη αν τα δεδομένα αποσταλούν, χωρίς να παρεμβάλλεται ο σταθμός βάσης, κάτι το οποίο θα συμβεί με χρήση της νέας τεχνολογίας.

Επιπρόσθετα, θα υπάρξουν αλλαγές στη μετάδοση της πληροφορίας. Η μετάδοση μικροκυμάτων, που χρησιμοποιείται σήμερα θα συμπληρωθεί από τη μετάδοση κυμάτων χιλιοστού. Τα μικροκύματα εκτείνονται σε φάσμα 600 MHz, το οποίο έχει απελευθερωθεί μετά την επικράτηση της ψηφιακής τηλεόρασης, η οποία στην Ελλάδα υπάρχει μέσω της DIGEA, όχι όμως σε μεγάλο βαθμό, αλλά σε μικρό ποσοστό, που μετά βίας έφτασε στα 80 MHz και όπως, είναι ευρέως γνωστό έχει αρκετά υψηλό κόστος. Έτσι, φυσικό επόμενο αυτού, είναι η αναζήτηση λύσεων για τα μεγαλύτερα μήκη κύματος και για τις υψηλότερες συχνότητες μετάδοσης, οι οποίες κυμαίνονται στις τάξεις από τα 3 έως και 300 GHz. Κάτι τέτοιο, εμφανίζει εξίσου διάφορα προβλήματα, εφόσον τα σήματα αυτά είναι δυνατό να δεχτούν μεγάλες παρεμβολές από τα κτίρια, την κακοκαιρία, αλλά και την ανθρώπινη δραστηριότητα μεταξύ πομπού και δέκτη. Τέτοια προβλήματα, αναμένεται να επιλυθούν με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών, οι οποίες στρέφονται σε πραγματικό χρόνο την ώρα, που μπλοκάρονται τα σήματα.

Επόμενο και σημαντικότερο επίτευγμα θα αποτελέσει η τεχνολογία **Multiple In Multiple Out (MIMO)**). Πρακτικά, κάτι τέτοιο σημαίνει πως οι σταθμοί βάσης θα εξοπλιστούν με πολλαπλές κεραιές, που θα μεταδίδουν πολλά σήματα ταυτόχρονα, ενώ τέτοια κεραία θα μπορεί να έχει και η συσκευή. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα, με την οποία ένα δίκτυο μπορεί να διαχειριστεί τις συχνότητές του. Σημαντικό ρόλο, στη διαμόρφωση των δικτύων του μέλλοντος θα παίζουν και οι ολοένα εξυπνότερες συσκευές. Επομένως, αντί τα σήματα να δρομολογούνται από τους σταθμούς βάσης, θα είναι εφικτό να δρομολογούνται και από τις ίδιες τις συσκευές.

«Ο κόσμος μας βρίσκεται πια σε **fast forward**», στο πλαίσιο μίας «μόνιμης τεχνολογικής εξέλιξης», όπως τόνισε στις εξαγγελίες του ο τότε Βρετανός πρωθυπουργός Ντέιβιντ Κάμερον από το βήμα της εμπορικής έκθεσης **CeBit**, στο Ανόβερο της Γερμανίας. Εκεί επικυρώθηκε και η σχετική συμφωνία μεταξύ Λονδίνου και Βερολίνου, για την ακρίβεια μεταξύ των πανεπιστημίων της Δρέσδης, του Σάρεϊ και του λονδρέζικου **King's College**, η οποία ως στόχο της έχει να μην μείνουν πίσω τεχνολογικά οι δύο χώρες-μέλη της Ε.Ε. του ομίλου **G8**. «Είμαστε ενώπιον μίας νέας βιομηχανικής επανάστασης, της οποίας θέλω να ηγηθούν η Βρετανία και η Γερμανία», ανέφερε ο Κάμερον, υπερτονίζοντας όλα τα πλεονεκτήματα του **5G**.

Η παράθεση των λόγων του τότε βρετανού πρωθυπουργού καταδεικνύει ακριβώς την ανάγκη εγκατάλειψης των παλιότερων μέσων κινητών τηλεπικοινωνιών και της ανάπτυξης της **5G** τεχνολογίας. Οι χρήστες των κινητών και άλλων σχετικών συσκευών, που έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο έχουν αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να αυξηθούν ακόμα περισσότερο μέσα στα επόμενα. Κάτι τέτοιο δημιουργεί την ανάγκη για την ανάπτυξη νέων δικτύων με μεγαλύτερο εύρος και χωρητικότητα, αλλά και με γρηγορότερες ταχύτητες αποστολής και λήψης δεδομένων. Επικοινωνία μεταξύ συσκευών, αλλά ακόμα και οχημάτων με έξυπνο τρόπο είναι πλέον γεγονός και γίνεται αντιληπτό ότι η ανάγκη για άμεση απόκριση των δικτύων είναι αυξημένη.

Ακόμα, η εξοικείωση των χρηστών με τις νέες τεχνολογίες έχει οδηγήσει στην αύξηση των απαιτήσεών τους, κάτι το οποίο σημαίνει ότι επιδιώκουν πρόσβαση

σε πλήθος νέων υπηρεσιών, με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος. Επιπρόσθετα, μία βασική επιδίωξη των χρηστών, στις μέρες μας, είναι και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, που θα οδηγήσει σε ανάπτυξη νέων τεχνολογιών από τους τεχνικούς όσον αφορά τα νέα δίκτυα και τα νέα κινητά τηλέφωνα. Συχνά, οι χρήστες πραγματοποιούν παράπονα για τα νέα μοντέλα κινητής τηλεφωνίας, αφού η έντονη χρήση διαδικτύου δεν ευνοεί τη μεγάλης διάρκειας αντοχή της μπαταρίας των συσκευών χωρίς τοποθέτηση στην πρίζα.

Επιπλέον, έχουν αρχίσει να εμφανίζονται οι πρώτες υλοποιήσεις 5G. Η προσπάθεια, που ξεκινά η Ευρωπαϊκή Επιτροπή επιδιώκεται να στεφθεί με επιτυχία για να επανακτηθεί το χαμένο έδαφος στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, που χάθηκε, αφού δεν αναπτύχθηκαν εγκαίρως από τους Ευρωπαίους οι προηγούμενες τεχνολογίες. Η Κομισιόν κατανοώντας, ότι η Ευρώπη έμεινε πίσω στο 4G με τους Αμερικανούς και τους Ασιάτες να έχουν πάρει πλέον ξεκάθαρο τεχνολογικό προβάδισμα, κυρίως σε επίπεδο υλοποιήσεων και ταχυτήτων σύνδεσης, θέλει να κάνει άλμα απευθείας στο 5G. Και το πλάνο περιλαμβάνει την επιτάχυνση της διαδικασίας διαμόρφωσης των προτύπων. Σαφέστατα, ο στόχος δεν είναι καθόλου εύκολος. Από την άλλη πλευρά, ο τρόπος με τον οποίο αρχίζουν να χρησιμοποιούν οι πολίτες, οι κρατικοί φορείς και οι επιχειρήσεις, τα ασύρματα δίκτυα και τις ψηφιακές τεχνολογίες δημιουργεί νέα μοντέλα χρήσης και ανάγκες, που πολύ δύσκολα θα είναι εφικτό να καλυφθούν από τα 4G δίκτυα ή ακόμη και από τα δίκτυα οπτικών ινών, που υλοποιούνται σε διάφορα σημεία του πλανήτη.

Ένα κλασικό παράδειγμα είναι η όλο και αυξανόμενη απαίτηση για υψηλές ταχύτητες σύνδεσης λόγω της χρήσης του video υψηλής ευκρίνειας. Τα 100 Mbps, που θα προσφέρει σε 1-2 χρόνια το 4G δεν θα είναι αρκετά, ούτε καν τα 200 Mbps των δικτύων οπτικών ινών. Το 1 Gbps είναι το ελάχιστο όριο, που θα απαιτείται και δεν είναι τυχαίο ότι σε εταιρικά περιβάλλοντα γίνεται λόγος για συνδέσεις 10 Gbps. Πρόκειται για ταχύτητα 200 φορές υψηλότερη από τα 50 Mbps, που προσφέρεται αυτή τη στιγμή από το VDSL. Οι υπερβολικά υψηλές ταχύτητες, όμως, δεν είναι το μόνο ζητούμενο. Η απαίτηση των καταναλωτών να απολαμβάνουν κορυφαία εμπειρία ακόμη και όταν βρίσκονται σε έναν χώρο, όπως ένα ποδοσφαιρικό γήπεδο όπου λειτουργούν ταυτόχρονα δεκάδες χιλιάδες έξυπνα τηλέφωνα και άλλες «έξυπνες» συσκευές, απαιτεί νέες αρχιτεκτονικές δικτύων προκειμένου να ικανοποιηθεί. Αν προσθέσουμε σε αυτό και το γεγονός ότι σταδιακά θα είναι δικτυωμένο οτιδήποτε μπορεί να φανταστεί κανείς (από πλυντήρια και πόρτες μέχρι αυτοκίνητα και φανάρια) είναι προφανές ότι οι ανάγκες είναι τεράστιες. Όλοι οι αυτοί οι λόγοι, ενισχύουν την ανάγκη για την εξέλιξη, την ανάπτυξη και τη λειτουργία των τεχνολογιών 5G. (Anastasia Kollia, 2014 )

Οι πιο βασικές απαιτήσεις των 5G δικτύων συνοψίζονται παρακάτω:

- Υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και μεταγωγής αυτών.
- Χαμηλή καθυστέρηση και χαμηλοί χρόνοι μεταφοράς πακέτων δεδομένων.
- Χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργικό κόστος.
- Εξασφάλιση γρήγορων χρόνων απόκρισης υπηρεσιών.
- Ποικιλία περιπτώσεων χρήσης, όπως ο απομακρυσμένος έλεγχος και η υπολογιστική νέφος.

- Βελτιστοποίηση της κινητικότητας μεταξύ των κυψελών.
- Διάκριση μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών επιπέδων.
- Εξασφάλιση των τεχνολογιών πρόσβασης και εκσυγχρονισμός των υλικών πόρων.
- Υποστήριξη επικοινωνίας από τα πάντα στα πάντα.
- Υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση του φυσικού μέσου με διατήρηση χαμηλού κόστους για την παροχή των υπηρεσιών αυτών.
- Προγραμματιζόμενο δίκτυο

### 2.5.1 Δομή

Οι 5G αρχιτεκτονικές αναμένεται να είναι πολύ διαφορετικές και εξελιγμένες σε σχέση με τις σημερινές υπάρχουσες λύσεις. Πρόκειται να προσφέρουν πολλές νέες ευκαιρίες και δυνατότητες και να συνεισφέρουν σημαντικά στην καινοτομία. Ένα μεγάλο πλήθος χρηστών υπολογίζεται ότι θα μπορούν να εξυπηρετούνται δια μέσω αυτών των αρχιτεκτονικών. Επίσης, δεν θα υποστηρίζονται μόνο οι τηλεπικοινωνίες, αλλά και πολλοί άλλοι τομείς της ανθρώπινης και οικονομικής δραστηριότητας. Προς αυτήν την κατεύθυνση αναμένεται να συμβάλει τα μέγιστα και η τεχνολογία Internet Of Things (IoT).

Τα δίκτυα θα απαιτούν μία πολύπλοκη ενσωμάτωση της μαζικής υπολογιστικής και αποθηκευτικής υποδομής. Στη νέα 5G αρχιτεκτονική οι πάροχοι τηλεπικοινωνιών θα χρειαστούν πλάνο για τις ανάγκες της τεχνολογίας και τις πολύ σημαντικές εφαρμογές, που θα προκύψουν.

Η 5G αρχιτεκτονική θα βρίσκεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στο νέφος. Οι φορείς βρίσκονται ήδη στη μέση της *virtualization* των δικτύων και των υπηρεσιών τους, με τη μορφή υπηρεσιών *cloud* και *SDN / NFV* - που ανοίγουν το δρόμο για περαιτέρω εξέλιξη του *backhaul*. Ουσιαστικά, η αρχιτεκτονική 5G θα ενσωματώσει έναν ψηφιακό μετασχηματισμό δικτύων, λειτουργικών συστημάτων και υπηρεσιών.

Ένα βασικό στοιχείο, που υποστηρίζεται από το συνδυασμό *SDN / NFV* σημαίνει ότι η αρχιτεκτονική 5G θα διαθέτει αυτόνομα δίκτυα πρόσβασης, μεταφορών και πυρήνα - επιτρέποντας διαφοροποιημένες υπηρεσίες 5G και βασικές τεχνολογίες, όπως λειτουργίες δικτύου σε επίπεδο κόμβου και λειτουργιών. Επίσης, ενώ τα σημερινά δίκτυα τείνουν να ενσωματώνουν τόσο το επίπεδο χρήστη όσο και ελέγχου, η αρχιτεκτονική 5G θα διαχωρίζει αυτά τα επίπεδα, βελτιώνοντας έτσι την ευελιξία, διευκολύνοντας τον κεντρικό έλεγχο.

Στο σχήμα 2.1 παρατίθενται οι τεχνολογίες, που θεωρούνται θεμέλιοι λίθοι της τεχνολογίας 5G.

### 2.5.2 Ιστορική Αναδρομή

Σύμφωνα με τους ερευνητές, οι 5G συνδέσεις θα μπορούν να είναι περίπου τρεις φορές πιο γρήγορες σε σχέση με τις συνδέσεις στα 4G δίκτυα, το οποίο θα έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούν να συνδεθούν περισσότερες συσκευές στο δίκτυο. Έτσι,

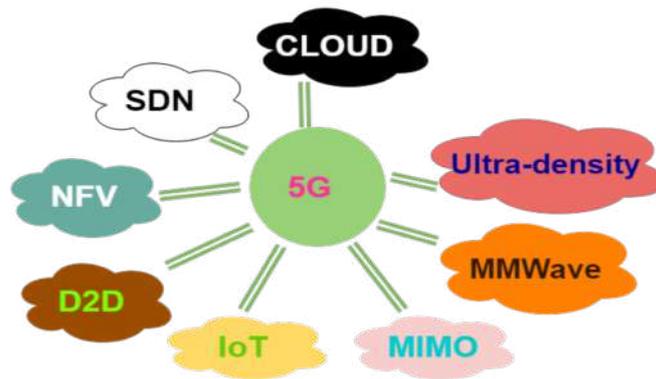


FIGURE 2.1: Οι βασικότερες 5G τεχνολογίες.

το 5G δίκτυο θα προσφέρει γρήγορη και ομαλή μετάδοση δεδομένων στους χρήστες του.

Τον Απρίλιο του 2008, η NASA συνεργάστηκε με την **Machine-to-Machine Intelligence (M2Mi)** εταιρία, για να αναπτύξουν την 5G τεχνολογία. Επίσης, το 2008 η Νότια Κορέα ανέπτυξε ένα πρόγραμμα για τα 5G κινητά συστήματα επικοινωνίας.

Τέσσερα χρόνια αργότερα, τον Αύγουστο του 2012, το πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης ίδρυσε το **NYU WIRELESS**, ένα ερευνητικό κέντρο σχεδιασμένο να διεξάγει λεπτομερείς εργασίες για το ασύρματο 5G δίκτυο. Στις 8 Οκτωβρίου 2012, το πανεπιστήμιο **Surrey** του Ηνωμένου Βασιλείου εξασφάλισε 35 εκατομμύρια λίρες για ένα νέο 5G ερευνητικό κέντρο, το οποίο χρηματοδοτείται από το Βρετανικό Ταμείο Επενδύσεων στις Βρετανικές Επιχειρήσεις και από κοινοπραξία βασικών διεθνών φορέων κινητών επικοινωνιών και παρόχων υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των **Huawei, Samsung, Telefonica Europe, Fujitsu Laboratories Europe, Rohde & Schwarz** και **Aircom International**.

Αυτό το νέο ερευνητικό κέντρο θα προσφέρει εγκαταστάσεις δοκιμών σε φορείς κινητής τηλεφωνίας, που επιθυμούν να αναπτύξουν ένα κινητό πρότυπο, που χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια και λιγότερο ραδιοφάσμα, ενώ παράγει ταχύτητες υψηλότερες από το σημερινό 4G με τις προσδοκίες ότι η νέα τεχνολογία θα είναι έτοιμη μέσα σε μια δεκαετία.

Το project "**Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society**" (**METIS**) δημιουργήθηκε το Νοέμβριο του 2012 και είχε ως στόχο τη μελέτη του 5G. Την ίδια χρονιά, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή συγχρηματοδότησε ένα νέο έργο, που στόχευε να εστιάσει την προσοχή της στην «τεχνολογία μικρών κυψελών», η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τις τεχνολογίες 5G.

Τον Φεβρουάριο του 2013, μία εταιρία ολοκλήρωσε δύο μελέτες με στόχο την καλύτερη κατανόηση των μελλοντικών τεχνικών πτυχών των κινητών επικοινωνιών προς τον ορισμό της κινητής τηλεφωνίας νέας γενιάς. Στη συνέχεια, τον Μάιο του 2013, η **Samsung** δήλωσε ότι έχει αναπτύξει ένα σύστημα "5G", το οποίο κατά τη δοκιμή, έστειλε δεδομένα με ταχύτητες μεταφοράς στα 1.056 Gbit/s σε απόσταση μέχρι 2 χιλιόμετρα. Η Ινδία και το Ισραήλ, τον Ιούλιο του 2013, συμφώνησαν να εργαστούν από κοινού για την ανάπτυξη τεχνολογιών τηλεπικοινωνιών πέμπτης γενιάς.

Την 1η Οκτωβρίου 2013, η **NTT** (**Nippon Telegraph and Telephone**), η ίδια

εταιρεία που εγκαινίασε το πρώτο παγκόσμιο δίκτυο 5G στην Ιαπωνία, κερδίζει το βραβείο Υπουργού Εσωτερικών και Επικοινωνιών. Στις 6 Νοεμβρίου 2013, η Huawei ανακοίνωσε ότι σχεδιάζει να επενδύσει τουλάχιστον 600 εκατομμύρια δολάρια για δίκτυα 5G επόμενης γενιάς ικανά να επιταχύνουν ταχύτητες 100 φορές ταχύτερα από τα σύγχρονα δίκτυα LTE.

Τον Σεπτέμβριο του 2014, δημοσιεύθηκε το βιβλίο "Millimeter Wave Wireless Communications" από την Prentice Hall, το οποίο παρέχει μια επισκόπηση βασικών εννοιών από επικοινωνίες, κυκλώματα, κεραίες, διάδοση και παγκόσμια πρότυπα και γράφτηκε από τέσσερις κορυφαίους επαγγελματίες σε ασύρματες επικοινωνίες, τους Theodore Rappaport, Robert Heath, Robert Daniels και James Murdock.

Στις 23 Απριλίου 2014, το ερευνητικό κέντρο της Σχολής Μηχανικών Τάντων του Πανεπιστημίου της Νέας Υόρκης πραγματοποίησε την πρώτη διάσκεψη κορυφής για το 5G. Η εκδήλωση έφερε σε επαφή τους ηγέτες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα της ασύρματης και κινητής βιομηχανίας στον ακαδημαϊκό χώρο, τις επιχειρήσεις και την κυβέρνηση για να εξερευνήσουν το μέλλον της ασύρματης τεχνολογίας 5G, με ιδιαίτερη έμφαση στις κεραίες, τη διάδοση και τη μοντελοποίηση καναλιών. Στις 8 Μαΐου 2014, η NTT DoCoMo ξεκινά τη δοκιμή κινητών δικτύων 5G με τις εταιρίες Alcatel Lucent, Ericsson, Fujitsu, NEC, Nokia και Samsung.

Τον Ιούνιο του 2014, το ερευνητικό πρόγραμμα της CROWD επιλέχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για να συμμετάσχει στην ομάδα των "πρόωρων 5G πρόδρομων έργων". Τα έργα αυτά συνέβαλαν στην πρώιμη επίδειξη δυνητικών τεχνολογιών για τη μελλοντική υποδομή "5G", η οποία είναι πανταχού παρούσα και υπερβολικά υψηλού εύρους ζώνης. Το CROWD συμπεριλήφθηκε στην λίστα των εκδηλώσεων στην European Conference on Networks and Communications (EuCNC) που διοργανώθηκε στην Ιταλία. Τον Οκτώβριο του 2014, ξεκίνησε το ερευνητικό έργο TIGRE5-CM (Ολοκληρωμένες τεχνολογίες για τη διαχείριση και λειτουργία δικτύων 5G) με στόχο το σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής για τα κινητά δίκτυα μελλοντικής γενιάς με βάση το πρότυπο SDN (Software Defined Networking), με συντονιστή του έργου το IMDEA Networks Institute.

Τον Νοέμβριο του 2014, ανακοινώθηκε ότι η Megafon και η Huawei θα αναπτύξουν ένα δίκτυο 5G στη Ρωσία, έτσι ώστε το δοκιμαστικό δίκτυο να είναι διαθέσιμο μέχρι το τέλος του 2017. Τέλος, στις 19 Νοεμβρίου 2014, οι Huawei και SingTel ανακοίνωσαν την υπογραφή συμφωνίας για την έναρξη κοινού προγράμματος καινοτομίας 5G.

Την 1η Ιουλίου 2015, ξεκίνησε το project METIS-II, που είχε ως στόχο τον σχεδιασμό του 5G δικτύου πρόσβασης. Στις 8 Σεπτεμβρίου 2015, η Verizon ανακοίνωσε ένα χάρτη πορείας για να ξεκινήσει τη δοκιμή της 5G τεχνολογίας στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2016. Στην 1η Οκτωβρίου 2015, η γαλλική επιχείρηση Orange ανακοίνωσε ότι πρόκειται να αναπτύξει τεχνολογίες 5G για να ξεκινήσει την πρώτη δοκιμή τον Ιανουάριο του 2016 στο Belfort, πόλη της ανατολικής Γαλλίας. (Paraskevi Fotakopoulou, 2019)

Στις 22 Ιανουαρίου 2016, η Σουηδική εταιρεία κινητής τηλεφωνίας Ericsson δήλωσε ότι συνεργάστηκε με την TeliaSonera για την ανάπτυξη υπηρεσιών 5G με βάση το δίκτυο της TeliaSonera και την τεχνολογία 5G της Ericsson. Η σύμπραξη στοχεύει στην παροχή υπηρεσιών 5G στους πελάτες της TeliaSonera στη Στοκχόλμη της Σουηδίας και το Ταλίν της Εσθονίας το 2018. Στις 22 Φεβρουαρίου 2016, η NTT DoCoMo και η Ericsson πέτυχαν στην πρώτη παγκόσμια δοκιμή να επιτύχουν

μία σύνδεση 20Gbit/s με δύο ταυτόχρονα συνδεδεμένες κινητές συσκευές σε 5G. Επίσης στις 22 Ιανουαρίου 2016, η Samsung και η Verizon συνεργάστηκαν για να ξεκινήσουν μια δοκιμή για το 5G.

Στις 29 Ιανουαρίου 2016, η Google αποκάλυψε ότι αναπτύσσουν ένα δίκτυο 5G, που ονομάζεται SkyBender. Σχεδίαζαν να διανέμουν αυτή τη σύνδεση μέσω ηλιακών κινητήρων. Στα μέσα Μαρτίου 2016, η Βρετανική κυβέρνηση επιβεβαίωσε τα σχέδια της για να καταστήσει το Ηνωμένο Βασίλειο παγκόσμιο ηγέτη στο 5G. Στις 2 Ιουνίου 2016, κυκλοφόρησε το πρώτο ολοκληρωμένο βιβλίο για το 5G. Το βιβλίο "Τεχνολογία κινητών και ασύρματων επικοινωνιών 5G", εκδίδεται από το Cambridge University Press, από τον Afif Osseiran (Ericsson), τον Jose F. Monserrat (UPV) και τον Patrick Marsch (Nokia Bell Labs) και καλύπτει τα πάντα από τις πιο πιθανές περιπτώσεις χρήσης καθώς και ένα ευρύ φάσμα επιλογών τεχνολογίας σε πιθανές αρχιτεκτονικές συστημάτων 5G.

Στις 7 Ιουλίου 2016, ο Ευρωπαϊός Επίτροπος για την Ψηφιακή Οικονομία και την Κοινωνία, ο Günther Oettinger, έλαβε μια δημόσια διακήρυξη για την έγκαιρη ανάπτυξη της 5G τεχνολογίας στην Ευρώπη, που καθορίζει τις βιομηχανικές συστάσεις για τον τρόπο με τον οποίο η Ευρώπη μπορεί να υποστηρίξει και να προωθήσει την καινοτομία και την ανάπτυξη 5G και να θέσει χρονοδιαγράμματα για τις δοκιμές του 5G από τις εταιρίες Deutsche Telekom, Ericsson, Hutchison Whampoa Europe, Inmarsat, Nokia, Orange, Proximus, KPN, SES, Tele2, Telecom Italia, Telefónica, Telekom Austria, Telenor, Telia Company και Vodafone. Στις 14 Ιουλίου 2016, η Federal Communications Commission (FCC) ψήφισε ομόφωνα την πρόταση για την απελευθέρωση τεράστιων ποσοτήτων νέου εύρους ζώνης στο υπόλειμμα φάσματος υψηλών συχνοτήτων για την επόμενη 5G γενιά ασύρματων επικοινωνιών. Στις 17 Οκτωβρίου 2016, η Qualcomm ανακοίνωσε το πρώτο modem 5G, το Snapdragon X50, ως το πρώτο εμπορικό chipset κινητής τηλεφωνίας 5G.

Τον Ιανουάριο του 2017, η Reliance Jio και η Samsung συνεργάστηκαν για την αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου 4G LTE-A σε 5G στην Ινδία. Τον Φεβρουάριο του 2017, η εταιρεία τηλεπικοινωνιών BSNL συνεργάστηκε με τη Nokia για τη δημιουργία δικτύων 5G. Τον Μάρτιο του 2017, η Airtel της Ινδίας ανακοίνωσε μια συνεργασία με τη Nokia για τη δημιουργία δικτύων κινητής τηλεφωνίας και διαδικτύου 5G στη χώρα. Στις 21 Μαρτίου 2017, η LMT της Λετονίας εγκατέστησε τον πρώτο κινητό σταθμό 5G στη Λετονία στο νέο Κέντρο Φυσικών Επιστημών του Πανεπιστημίου της Λετονίας. Στις 29 Ιουνίου 2017, η Satellite and Terrestrial Network for 5G (SaT5G) κοινοπραξία ανακοίνωσε την έναρξη ενός 30μηνου έργου για την απρόσκοπτη και οικονομικά βιώσιμη ενσωμάτωση δορυφόρων σε δίκτυα 5G, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα και την αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών 5G, και το άνοιγμα νέων αγορών στη διανομή μέσων ενημέρωσης, στις μεταφορές και στις υποεξυπηρετούμενες περιοχές. Η κοινοπραξία χρηματοδοτούταν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο του προγράμματος Horizon 2020 και αποτελούταν από 16 μέλη, μεταξύ των οποίων τα Airbus Defense και Space, Avanti Communications, BT, Broadpeak, Gilat Satellite Networks, OneAccess, Thales Alenia Space, TNO, University of Surrey, Zodiac Inflight Innovation και SES, των οποίων οι δορυφόροι ήταν σε θέση να παρέχουν την απαιτούμενη χωρητικότητα.

Τον Ιούνιο του 2017, η Σρι Λάνκα Telecom μετατρέπεται στην πρώτη Telco, που δοκιμάσε με επιτυχία την Pre-5G LTE Advanced Pro τεχνολογία στην Νότια Ασία. Τον Ιούλιο του 2017, η Telecom Italia Mobile υπέγραψε συμφωνία με την

κυβέρνηση του Αγίου Μαρίνου για αναβάθμιση του 4G δικτύου του σε 5G. Θα ήταν το πρώτο πανευρωπαϊκό δίκτυο 5G στον κόσμο. Στις 18 Ιουλίου 2017, οι 28 υπουργοί τηλεπικοινωνιών της ΕΕ και της Νορβηγίας υπέγραψαν δήλωση προθέσεων στο Ταλίν της Εσθονίας, επιδιώκοντας να καθιερώσουν μια κοινή βάση για τα μελλοντικά πρότυπα 5G και να επιβεβαιώσουν την προθυμία των κρατών μελών να τοποθετήσουν την Ευρώπη ως ηγετική αγορά για την 5G τεχνολογία.

Στις 22 Αυγούστου 2017, η πρωτοποριακή δοκιμή δυνατοτήτων τεχνολογίας 5G διεξήχθη από τη Dialog Axiata με συνεργάτες την Ericsson και την Huawei στο Dialog Iconic στο Colombo. Στις 29 Σεπτεμβρίου 2017, στην ψηφιακή διάσκεψη της ΕΕ στο Ταλίν της Εσθονίας, μια συνεργασία της Ericsson, της Intel και της Telia Eesti ανακοίνωσε ότι είχαν υλοποιήσει το πρώτο ζωντανό δημόσιο δίκτυο 5G στην Ευρώπη στο λιμάνι του Ταλίν για να συνδεθούν με τα κρουαζιερόπλοια στο λιμάνι. Στις 17 Οκτωβρίου 2017, η Qualcomm ανακοίνωσε την πρώτη κινητή 5G σύνδεση με ταχύτητα σύνδεσης 1 Gbit/s. Τέλος, στις 29 Νοεμβρίου 2017, η Verizon Communications Inc. ανακοίνωσε ότι θα αναπτύξει ασύρματες οικιακές ευρυζωνικές 5G υπηρεσίες σε πέντε πόλεις των ΗΠΑ, ξεκινώντας από το δεύτερο εξάμηνο του 2018. (Paraskevi Fotakopoulou, 2019)

### 2.5.3 Έργα σχετικά με το 5G

Η νέα τεχνολογία 5G είναι πολύ σημαντική για την παγκόσμια υπολογιστική, αφού μία σειρά έργων έχει ανακοινωθεί για την έρευνα και την ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς. Τα σημαντικότερα έργα είναι τα ακόλουθα: (Anastasia Kollia, 2014)

Το 2008 δημιουργήθηκε το πρόγραμμα «5G συστήματα κινητών επικοινωνιών με βάση δέσμης πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση» σε συνεργασία με την ομάδα E & A της Νότιας Κορέας. Στην Ευρώπη, το 2008 ο Neelie Kroes, επίτροπος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, διέταξε την δημιουργία κονδυλίου € 50.000.000 για την έρευνα της σύγχρονης τεχνολογίας, με σκοπό να παραδοθούν κινητά δίκτυα τεχνολογίας 5G το 2020.

Ειδικότερα, η Metis project 2020 δημιουργήθηκε από μία εταιρεία κατασκευής αυτοκινήτων και πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιών και στοχεύει να επιτευχθεί παγκόσμια συναίνεση, σχετικά με το μέλλον στο παγκόσμιο σύστημα κινητών και ασύρματων επικοινωνιών. Στη METIS, ο βασικός στόχος είναι να παραχθεί ένα ενιαίο σύστημα, που υποστηρίζει ακόμα και χίλιες φορές υψηλότερη φασματική απόδοση κινητών επικοινωνιών σε σύγκριση με τις τρέχουσες υλοποιήσεις LTE, ενώ αντικειμενικός του στόχος παραμένει η εξασφάλιση της έγκαιρης παγκόσμιας συναίνεσης σχετικά με αυτά τα συστήματα.

Με άλλα λόγια, αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη συναίνεση μεταξύ όλων των ενδιαφερόμενων μερών, αρκετά πριν από τις παγκόσμιες δραστηριότητες τυποποίησης του προτύπου. Τελικά, την 1η Νοεμβρίου 2012, το σχέδιο της ΕΕ «κινητών και ασύρματων επικοινωνιών για την κοινωνία πληροφορίας είκοσι - είκοσι» (METIS) ξεκίνησε τη δράση του προς τη δημιουργία της 5G.

Στις 8 Οκτωβρίου 2012, το Πανεπιστήμιο του Ηνωμένου Βασιλείου του Surrey εξασφάλισε 35 εκατομμύρια λίρες, για το νέο ερευνητικό κέντρο 5G, η κοινή χρηματοδότηση πραγματοποιήθηκε μεταξύ του ταμείου της βρετανικής κυβέρνησης

Επενδύσεων (UKRPIF) και μιας κοινοπραξίας των βασικών διεθνών φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας και παρόχων - συμπεριλαμβανομένης της υποδομής Huawei, Samsung, Telefonica Europe, Fujitsu Laboratories Europe, Rohde & Schwarz και Aircom Διεθνή.

Έτσι, θα προσφερθούν εγκαταστάσεις δοκιμών σε φορείς εκμετάλλευσης κινητών, οι οποίοι θα είναι πρόθυμοι να αναπτύξουν πρότυπο κινητών επικοινωνιών, που θα χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια και μικρότερο ραδιοφάσμα, ενώ παράλληλα θα παρέχει ταχύτητα μεγαλύτερη από τις σημερινές ταχύτητες 4G, ενώ αναμένεται να ολοκληρωθεί το έργο μέσα στην επόμενη δεκαετία.

Επιπλέον, το 2013 ξεκίνησε ένα άλλο σημαντικό έργο, που ονομάζεται 5GrEEen και το οποίο συνδέεται άρρηκτα με αυτό της Metis, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση το νέο δίκτυο, το οποίο θα σχεδιαστεί να είναι πράσινο. Το τελευταίο επιδιώκει να αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές, έτσι ώστε η σύγχρονη τεχνολογία να στηρίζεται στις αρχές της ενεργειακής απόδοσης, της βιωσιμότητας και της οικονομίας.

Ακόμα, το Φεβρουάριο του 2013, η ITU - R Ομάδα 5D (5D WP) ξεκίνησε μελέτη σε δύο αντικείμενα σπουδών :

- Μελέτη για IMT όραμα από το 2020 και εξής και
- Μελέτη σχετικά με τις μελλοντικές τάσεις της τεχνολογίας για επίγεια συστήματα IMT.
- Και οι δύο τομείς μελέτης στοχεύουν, στο να παρέχουν μια καλύτερη κατανόηση των μελλοντικών τεχνικών πτυχών των κινητών επικοινωνιών σχετικά τον ορισμό της επόμενης γενιάς κινητών.
- Επίσης, στις 12 Μαΐου 2013, η Samsung Electronics δήλωσε ότι έχει αναπτύξει το πρώτο 5G σύστημα στον κόσμο. Η βασική τεχνολογία έχει μέγιστη ταχύτητα δεκάδων Gbps.

Κατά τη δοκιμή, η μεταφορά ταχυτήτων για το 5G δίκτυο στέλνει δεδομένα σε 1.056 Gbps σε μια απόσταση μέχρι 2 χιλιόμετρα με τη χρήση ενός 8X8 MIMO συστήματος.

- Επιπρόσθετα, τον Ιούλιο του 2013, η Ινδία και το Ισραήλ συμφώνησαν να εργαστούν από κοινού για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G).
- Στις 6 Νοεμβρίου 2013, η Huawei ανακοίνωσε τα σχέδιά της να επενδύσει τουλάχιστον 600 εκατομμύρια δολάρια για την επόμενη γενιά δικτύων 5G ικανή να αναπτύξει ταχύτητα 100 φορές πιο γρήγορη από ό,τι τα σύγχρονα δίκτυα LTE.

Ένα από τα σημαντικότερα, που αξίζει να συζητηθούν περαιτέρω, αφού κατέχει πρωταρχικό ρόλο στην έρευνα για την πέμπτη γενιά είναι το PPP (Public-Private Partnership). Η αρχή της συζήτησης για τα νέα δίκτυα επικοινωνιών, με προσανατολισμό στο PPP έγινε τον Ιούλιο του 2012. Τότε, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή κάλεσε την ευρωπαϊκή βιομηχανία σε μια συζήτηση με θέμα τον προσανατολισμό της νέας προσπάθειας προκειμένου να προσδιοριστεί η πιο πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση της νέας πρωτοβουλίας.

Η Εβδομάδα Ανταγωνιστικότητας διοργανώθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το Σεπτέμβριο του 2012, το γεγονός αυτό υπήρξε, επίσης, ένα σημαντικό ορόσημο για τη συζήτηση των ερευνητικών προτεραιοτήτων για την Ευρώπη στο πλαίσιο της H2020. Η πραγματική ανάπτυξη της επίσημης πρότασης, όμως, ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2013. Η πρόκληση, που τέθηκε για τη μελέτη και τη δημιουργία της γενιάς 5G, ήταν η αφετηρία για μια ομάδα των εταιρειών του κλάδου και των σημαντικότερων κέντρων της ευρωπαϊκής E & A για την ανάπτυξη μιας πρότασης για την 5G υποδομή, τονίζοντας σαφώς, ότι το πρόγραμμα καλύπτει πολλά περισσότερα θέματα από μια νέα γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιών.

Η πρόταση για τις 5G υποδομές, που εκπονήθηκε από τον όμιλο κατά το πρώτο εξάμηνο του 2013 και υποβλήθηκε προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή τον Ιούνιο του 2013, ακολούθησε με μια βελτιωμένη έκδοση, το Σεπτέμβριο του 2013. Τα βασικά τμήματα, τα οποία διακρίνονται στο συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι τα εξής:

- Συνολικά μακροπρόθεσμο όραμα των στρατηγικών και των ειδικών στόχων του PPP (τμήμα 1),
- Η έρευνα και η καινοτομία της στρατηγικής, ιδίως στο πεδίο εφαρμογής της E & A και της καινοτομίας προκλήσεων (τμήμα 2),
- Αναμενόμενες επιπτώσεις (τμήμα 3),
- Η διακυβέρνηση του προγράμματος (τμήμα 4).

Το τεχνικό μέρος της πρότασης, η οποία αντιστοιχεί σε ένα πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας υψηλού επιπέδου, δημοσιεύθηκε στο διαδίκτυο. Σε αυτή, συνοψίστηκαν τα σημαντικότερα έργα στην ιστοσελίδα, στις 10 Μαΐου 2013, και διεξήχθη η συνέλευση του «μελλοντικού ίντερνετ» το 2013 στο Δουβλίνο. Αυτή η διαβούλευση ολοκληρώθηκε στις 27 Μαΐου 2013. Η επεξεργασία των σχολίων έχει οργανωθεί από τον πρόεδρο της ομάδας εμπειρογνομόνων του διαδικτύου. Το πρόγραμμα αναμένεται να προσφέρει λύσεις, αρχιτεκτονικές, τεχνολογίες και πρότυπα για την πανταχού παρούσα 5G υποδομή επικοινωνιών της επόμενης δεκαετίας.

Οι ακόλουθες βασικές προκλήσεις υψηλού επιπέδου ορίστηκαν πως θα παρέχονταν από το πρότυπο και περιλαμβάνουν:

- Ικανότητα παροχής 1000 φορές μεγαλύτερης ασύρματης περιοχής και πιο ποικίλες δυνατότητες των υπηρεσιών, σε σύγκριση με το 2010.
- Εξοικονόμηση έως και 90% της ενέργειας, ανά παρεχόμενη υπηρεσία. Η κύρια έμφαση πρέπει να δοθεί στα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, όπου κυριαρχεί η κατανάλωση ενέργειας, η οποία προέρχεται από το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης.
- Η μείωση του μέσου όρου του χρονικού κύκλου της υπηρεσίας μεταβάλλεται από 90 ώρες σε 90 λεπτά.
- Δημιουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου **Internet** για την παροχή κάθε είδους υπηρεσιών.
- Διευκόλυνση πολύ πυκνών αναπτύξεων ασύρματων ζεύξεων επικοινωνίας, για τη σύνδεση πάνω από 7 τρισεκατομμυρίων ασύρματων συσκευών, που είναι δυνατό να εξυπηρετήσουν πάνω από 7 δισεκατομμύρια ανθρώπους.

- Ενεργοποίηση προηγμένου ελέγχου για την προστασία της ιδιωτικής ζωής.

Η εν λόγω μελέτη είναι συμπληρωματική και αφορά το μέλλον του διαδικτύου, το οποίο προχωρά σε μία πλατφόρμα εφαρμογών και υπηρεσιών και ενισχύει τις ήδη υψηλές απαιτήσεις για τη βελτίωση της υποδομής. Η ανάγκη για την προώθηση των δικτύων θα πρέπει να αντιμετωπιστεί, π.χ. εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη εμπειρία χρήστη, κάτι το οποίο θα πραγματοποιηθεί κυρίως από την ευρωπαϊκή ηγεσία. (Paraskevi Fotakopoulou, 2019)

Με βάση τα δεδομένα από την πρόταση του ομίλου και τις πολύτιμες εισροές από την ανοιχτή διαβούλευση, που διεξάχθηκε, η πρώτη έκδοση της πρότασης, υποβλήθηκε στον αντιπρόεδρο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Neelie Kroes στις 20 Ιουνίου του 2013. Η τελική έκδοση, που υποβλήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2013, λήφθηκε με βάση την ανατροφοδότηση, που αποφασίστηκε από την επίσημη διαδικασία αναθεώρησης. Η πρόταση, που προσφέρεται για τη δημιουργία μίας ένωσης του κλάδου, χρησιμοποιώντας τα εκλεγμένα μέλη του νέου δικτύου έργων και ένας μικρός αριθμός των εταιρειών, που θα κινηθεί προς την κατεύθυνση αυτή. Ο Σύνδεσμος Υποδομών 5G καταχωρήθηκε με διάταγμα του βασιλιά του Βελγίου στις 15 Δεκεμβρίου 2013.

Προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία για την εγγραφή πέντε ιδρυτικά μέλη, δηλαδή η Alcatel - Lucent, η Ericsson, η NSN, η Orange και η SES, καθοδήγησαν αυτή τη διαδικασία, προκειμένου να εκπληρωθούν οι ελάχιστες νομικές απαιτήσεις, σχετικά με τις ενώσεις στο Βέλγιο. Λίγο μετά τη δημιουργία των εντύπων για την ένταξη της στην εν λόγω ένωση, εκλέχθηκαν μέλη για το διοικητικό συμβούλιο της διεύθυνσης. Το άρθρο 25 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, που αφορά στον κανονισμό του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου, για τη θέσπιση προγράμματος με ορίζοντα το 2020, περιγράφει τους όρους και τις προϋποθέσεις για τις πράξεις αυτές, ενώ η προσέγγιση χρησιμοποιείται και από το 5G PPP.

Στις 17 Δεκεμβρίου 2013, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπέγραψε τη σύμβαση ρύθμισης για το PPP με τους εκπροσώπους της ένωσης υποδομών για το 5G, η οποία περιγράφει την αμοιβαία δέσμευση των δύο μερών για την εταιρική σχέση όσον αφορά τις φιλοδοξίες υψηλού επιπέδου, τους βασικούς δείκτες απόδοσης και τον προβλεπόμενο και προσυπολογιζόμενο κονδύλιο για την οικονομική περίοδο 2014 έως 2020.

Το 2015, η Huawei και η Ericsson δοκιμάζουν τεχνολογίες σχετιζόμενες με τις 5G σε αγροτικές περιοχές της βόρειας Ολλανδίας. Τον Ιούλιο του 2015, ξεκίνησαν τα ευρωπαϊκά έργα METIS-II και 5GNORMA. Το έργο METIS-II βασίστηκε στο επιτυχημένο πρόγραμμα METIS και ανέπτυξε το γενικό σχεδιασμό 5G δικτύου ραδιοεπικοινωνίας και προσέφερε τις τεχνικές δυνατότητες που απαιτούνται για την αποτελεσματική ολοκλήρωση και χρήση των διαφόρων 5G τεχνολογιών και εξαρτημάτων, που αναπτύσσονται επί του παρόντος. Η METIS-II έδωσε επίσης το πλαίσιο συνεργασίας 5G στο 5G-PPP για μια κοινή αξιολόγηση των εννοιών του 5G δικτύου ραδιοεπικοινωνιών και προετοίμασε συντονισμένη δράση προς τους ρυθμιστικούς φορείς και τους οργανισμούς τυποποίησης. Από την άλλη πλευρά, ο βασικός στόχος της 5G NORMA ήταν να αναπτύξει μια πρωτοποριακή, προσαρμοστική και μελλοντική αρχιτεκτονική 5G κινητού δικτύου. Αυτή η αρχιτεκτονική επέτρεπε τη δημιουργία πρωτοφανών επιπέδων προσαρμοστικότητας στο δίκτυο, εξασφαλίζοντας αυστηρές απαιτήσεις απόδοσης, ασφάλειας, κόστους και ενέργειας που πρέπει

να πληρούνται. Με την 5G NORMA, κορυφαίες εταιρείες στο κινητό οικοσύστημα στόχευαν την ηγετική θέση στην Ευρώπη στη 5G τεχνολογία.

Επιπλέον, τον Ιούλιο του 2015 ξεκίνησε το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα mmMAGIC. Το πρόγραμμα mmMAGIC ανέπτυξε νέες ιδέες για την τεχνολογία κινητής ασύρματης πρόσβασης (RAT-Radio Access Technology) για την ανάπτυξη της ζώνης mmWave. Αυτό αποτέλεσε βασικό στοιχείο του οικοσυστήματος 5G multi-RAT και χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την παγκόσμια προτυποποίηση. Το έργο επέτρεψε εξαιρετικά γρήγορες κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες για χρήστες κινητών τηλεφώνων, υποστηρίζοντας 3D streaming, εμβληματικές εφαρμογές και υπηρεσίες cloud υψηλής απόκρισης. Η φιλοδοξία του έργου αυτού ήταν να προετοιμάσει το έδαφος για ένα ευρωπαϊκό ξεκίνημα σε 5G πρότυπα και να ενισχύσει την ευρωπαϊκή ανταγωνιστικότητα. Η mmMAGIC συντονίστηκε από τη Samsung. Η Ericsson ενήργησε ως τεχνικός διευθυντής, ενώ η Intel, η Fraunhofer HHI, η Nokia, η Huawei και η Samsung οδήγησαν η καθεμία τις τεχνικές εργασίες του έργου.

Επίσης τον Ιούλιο του 2015, η IMDEA Networks ξεκίνησε το έργο Xhaul, που είχε σαν στόχο την ανάπτυξη μιας προσαρμοστικής, αξιόπιστης, οικονομικά αποδοτικής λύσης μεταφοράς 5G δικτύου. Το έργο Xhaul απλοποίησε σε μεγάλο βαθμό τις λειτουργίες του δικτύου παρά την αυξανόμενη τεχνολογική ποικιλία. Ακόμα, τον ίδιο μήνα, ξεκίνησε το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα 5G FlexGware. Ο στόχος του Flex5Gware ήταν να προσφέρει πλατφόρμες υλικού υψηλής ευελιξίας (Hardware-HW) μαζί με πλατφόρμες HW-agnostic λογισμικού (Software-SW), λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη χωρητικότητα, το μειωμένη χρήση ενέργειας, καθώς και την δυνατότητα κλιμάκωσης και ομαλής μετάβασης από 4G κινητά ασύρματα συστήματα σε 5G. Αυτό επέτρεψε στις 5G HW/SW πλατφόρμες να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις, που επιβάλλει η εκθετική αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας (1000 φορές αύξηση) μαζί με τη μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Το 2016, το πρώτο δοκιμαστικό 5G δίκτυο κατασκευάστηκε στο Oulu της Φινλανδίας. Πρόκειται για μια εγκατάσταση έρευνας, ανάπτυξης και δοκιμών σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον 5G δικτύου και βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου του Oulu. Πλήρες λειτουργικό, αποτέλεσε μια δυναμική και ετερογενή πλατφόρμα για την ανάπτυξη και δοκιμή νέων εφαρμογών, υπηρεσιών, αλγορίθμων, τεχνολογιών και συστημάτων. Τον Σεπτέμβριο του 2016, το Υπουργείο Βιομηχανίας και Πληροφορικής της Κίνας ανακοίνωσε ότι ολοκληρώθηκαν με ικανοποιητικά αποτελέσματα οι κυβερνητικές δοκιμές των 5G βασικών ασύρματων τεχνολογιών για μελλοντικά 5G δίκτυα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε 100 πόλεις και περιλάμβαναν επτά εταιρείες: Datang Telecom, Ericsson, Huawei, Intel, Nokia Shanghai Bell, Samsung και ZTE. Το επόμενο βήμα για την ανάπτυξη της 5G τεχνολογίας μέσω δοκιμών βρίσκεται σε εξέλιξη, με προγραμματισμένη εμπορική ανάπτυξη το 2022 ή το 2023.

Τον Απρίλιο του 2017, η Huawei ανακοίνωσε ότι από κοινού με την Telenor διεξήγαγαν επιτυχείς 5G δοκιμές με ταχύτητες έως και 70 Gbps σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον στη Νορβηγία. Τον Ιούνιο του 2017, η SLT (Sri Lanka Telecom), μαζί με την Huawei Technologies, πραγματοποίησαν με επιτυχία την πρώτη ολοκληρωμένη δοκιμή της τεχνολογίας Pre-5G LTE Advanced Pro της Νότιας Ασίας, θέτοντας τις βάσεις για την επόμενη γενιά ευρυζωνικών τεχνολογιών. Το έργο Xhaul απλοποίησε σε μεγάλο βαθμό τις λειτουργίες του δικτύου παρά την

αυξανόμενη τεχνολογική ποικιλομορφία. Ακόμα, τον ίδιο μήνα, ξεκίνησε το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα **5G FlexGware**. Ο στόχος του **Flex5Gware** ήταν να προσφέρει πλατφόρμες υλικού υψηλής ευελιξίας (**Hardware-HW**) μαζί με πλατφόρμες **HW-agnostic** λογισμικού (**Software-SW**), λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη χωρητικότητα, τη μειωμένη χρήση ενέργειας, καθώς και την δυνατότητα κλιμάκωσης και ομαλής μετάβασης από **4G** κινητά ασύρματα συστήματα σε **5G**. Αυτό επέτρεψε στις **5G HW/SW** πλατφόρμες να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις, που επιβάλλει η εκθετική αύξηση της κίνησης δεδομένων κινητής τηλεφωνίας (**1000** φορές αύξηση) μαζί με τη μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Το **2016**, το πρώτο δοκιμαστικό **5G** δίκτυο κατασκευάστηκε στο **Oulu** της Φινλανδίας. Πρόκειται για μια εγκατάσταση έρευνας, ανάπτυξης και δοκιμών σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον **5G** δικτύου και βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου του **Oulu**. Πλήρες λειτουργικό, αποτέλεσε μια δυναμική και ετερογενή πλατφόρμα για την ανάπτυξη και δοκιμή νέων εφαρμογών, υπηρεσιών, αλγορίθμων, τεχνολογιών και συστημάτων. Τον Σεπτέμβριο του **2016**, το Υπουργείο Βιομηχανίας και Πληροφορικής της Κίνας ανακοίνωσε ότι ολοκληρώθηκαν με ικανοποιητικά αποτελέσματα οι κυβερνητικές δοκιμές των **5G** βασικών ασύρματων τεχνολογιών για μελλοντικά **5G** δίκτυα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε **100** πόλεις και περιλάμβαναν επτά εταιρείες: **Datang Telecom, Ericsson, Huawei, Intel, Nokia Shanghai Bell, Samsung** και **ZTE**. Το επόμενο βήμα για την ανάπτυξη της **5G** τεχνολογίας μέσω δοκιμών βρίσκεται σε εξέλιξη, με προγραμματισμένη εμπορική ανάπτυξη το **2022** ή το **2023**.

Τον Απρίλιο του **2017**, η **Huawei** ανακοίνωσε ότι από κοινού με την **Telenor** διεξήγαγαν επιτυχείς **5G** δοκιμές με ταχύτητες έως και **70 Gbps** σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον στη Νορβηγία. Τον Ιούνιο του **2017**, η **SLT (Sri Lanka Telecom)**, μαζί με την **Huawei Technologies**, πραγματοποίησαν με επιτυχία την πρώτη ολοκληρωμένη δοκιμή της τεχνολογίας **Pre-5G LTE Advanced Pro** της Νότιας Ασίας, θέτοντας τις βάσεις για την επόμενη γενιά ευρυζωνικών τεχνολογιών. Χρησιμοποίησαν μια τεχνολογία, που ονομάζεται **Advanced Carrier Aggregation Technology**, όπου πολλαπλοί μεταφορείς **LTE** μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση δεδομένων. Επιπλέον, τον Ιούλιο του **2017**, η **Samsung** και η **Arqiva** πραγματοποίησαν την πρώτη δοκιμή της **5G** τεχνολογίας σταθερής ασύρματης πρόσβασης στο κεντρικό Λονδίνο. Παρά την απόσταση σύνδεσης αρκετών εκατοντάδων μέτρων, το σύστημα είχε δημιουργήσει μια σταθερή αμφίδρομη σύνδεση **mmWave** με ταχύτητες **downlink** περίπου **1Gb** ανά δευτερόλεπτο.

Το **2018**, η Ινδία ανακοίνωσε ότι πρόκειται να επενδύσει τον προϋπολογισμό της σε **5G** δοκιμές. Η χρηματοδότηση θα ωθούσε τη χώρα να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στη ανάπτυξη της **5G** τεχνολογίας, αφού στοχεύει να είναι ηγέτης της **5G** τεχνολογίας στην Ασία. Η **Orange** δοκίμασε το **5G** σύστημα στη Λίλλη και στο **Douai** στη Γαλλία στα μέσα του **2018**. (Paraskevi Fotakopoulou, 2019)

### 2.5.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

#### Πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία αυτή πέραν της υπεροχής της έναντι των προηγούμενων γενεών κινητών δικτύων, παρέχει στους χρήστες και πληθώρα άλλων βασικών πλεονεκτημάτων τα πιο σημαντικά από τα οποία καταγράφονται παρακάτω (Anastasia Kollia, 2014):

- **Υποστήριξη μεγαλύτερου όγκου δεδομένων:** Πολλές φορές μεγαλύτερος όγκος δεδομένων ανά περιοχή, καθώς οι διαχειριστές των δικτύων θα κληθούν να εξυπηρετούν πολύ περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα. Στα δίκτυα 5G θα κυκλοφορεί πολύ μεγαλύτερος όγκος δεδομένων, συγκριτικά με τα σημερινά (2,6GB κίνηση σήμερα από βίντεο, σύμφωνα με το τρέχον **Mobility Report** της Ericsson). Η E.E. έχει θέσει την απαίτηση για 10 έως και 100 φορές μεγαλύτερη κίνηση στις ραδιοσυχνότητες.
- **Υποστήριξη περισσότερων συσκευών:** 10 έως και 100 φορές μεγαλύτερος αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών, όπως για παράδειγμα οικιακές συσκευές αυτοκίνητα, ψυγεία, οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, ακόμα και το σύστημα ύδρευσης, εξοπλισμένα με αισθητήρες, που καταγράφουν την τρέχουσα κατάσταση της λειτουργίας τους.
- **Μεγαλύτερη αυτονομία συσκευών:** Προδιαγραφές έχουν τεθεί και για την αυτονομία των δικτυωμένων συσκευών: 10 φορές μεγαλύτερη αυτονομία κρίνεται απαραίτητη για μια ενεργειακά λιτοδίαιτη επικοινωνία από συσκευή σε συσκευή (δηλαδή, νέες συσκευές με πολύ μεγαλύτερη αυτονομία, και δυνατότητα επικοινωνίας με μικρή κατανάλωση ενέργειας, σε αντίθεση με τις τρέχουσες τεχνολογίες σήμερα, που στραγγίζουν την μπαταρία για να επικοινωνήσουν).
- **Μικρότερες καθυστερήσεις:** Οι εφαρμογές, που έρχονται εκτιμάται ότι, θα απαιτούν πολύ μικρότερη καθυστέρηση (**latency**), δηλαδή ο χρόνος αναμονής για απόκριση στη σύνδεση πρέπει να μειωθεί πέντε φορές, σύμφωνα με την επιτροπή, για να τρέχουν απρόσκοπτα εφαρμογές, όπως τα παιχνίδια ή η αναπαραγωγή βίντεο σε πραγματικό χρόνο.

#### Μειονεκτήματα

Η Πέμπτη γενιά Δικτύων Κινητής Επικοινωνίας (5G) αναμένεται να πρωταγωνιστήσει το επόμενο διάστημα σε ό,τι αναφορά στην εισαγωγή τεχνολογιών και καινοτομιών στα δίκτυα, καθώς οι εξέχουσες απαιτήσεις αυτής της γενιάς αναμένεται να σχηματίζουν σημαντικές ανάγκες των τηλεπικοινωνιών και να αποτελέσουν το βασικό έναυσμα για καινοτομία στον τομέα. Βασικότερα ζητήματα, τα οποία έχουν ανακύψει και σχετίζονται με το 5G είναι τα ακόλουθα:

- **Αύξηση κινητών δεδομένων:** Τα κινητά δεδομένα αυξάνονται κάθε χρόνο ως και 50 %. (Agyapong et al., 2014)
- **Παρεμβολές:** Οι παρεμβολές μπορεί να προέρχονται από γειτονικές κυψέλες αν πρόκειται για κυψελωτά δίκτυα. Επίσης, υπάρχουν παρεμβολές λόγω

χώρου, για παράδειγμα λόγω γεωμετρίας, κτηρίων, ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών και σημάτων. Ακόμα, υπάρχει θόρυβος, που δε σχετίζεται άμεσα με το μεταδιδόμενο σήμα, αλλά με άλλα σήματα.

- **Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας:** Συχνά, παρατηρείται μεγάλη δυσαρέσκεια σε ορισμένους χρήστες, οι οποίοι θεωρούν ότι στις κινητές συσκευές τους π.χ. κινητά, ταμπλέτες ή laptops κλπ. η διαθέσιμη ενέργεια καταναλώνεται ταχύτατα. (Agyapong et al., 2014)
- **Υποχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης:** Αυτός είναι και ο βασικός σκοπός, που γίνονται προσπάθειες σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο με στόχο την αναδιανομή του εύρους ζώνης με βέλτιστο τρόπο.
- **Handovers:** πρέπει να γίνονται αποδοτικά ούτως ώστε είτε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο του ping pong, το οποίο δημιουργεί πρόβλημα στο ότι καταναλώνει μεγάλη ενέργεια στη συσκευή και δεσμεύει πόρους σε 2 γειτονικούς σταθμούς βάσης.
- **Ποιότητα σημάτων:** Ενδέχεται να είναι χαμηλότερη από την προσδοκώμενη και να δημιουργούνται προβλήματα στις κλήσεις και στη διακίνηση των δεδομένων.
- **Μειωμένη χωρητικότητα δικτύου:** Τα δίκτυα σήμερα περιλαμβάνουν μεγάλους όγκους δεδομένων.
- **Ασφάλεια και ιδιωτικότητα χρηστών:** Επίσης, ίσως τα λογισμικά να μην είναι ενημερωμένα. Ακόμα, διάφορα ζητήματα αυθεντικοποίησης και πιστοποίησης χρηστών.

### 2.5.5 Υπηρεσίες

Το ολοένα και ευρύτερο φάσμα χρήσης των κινητών επικοινωνιών, που έχει διεισδύσει σε μεγάλο μέρος της σύγχρονης καθημερινότητας, καθιστά πλέον τους χρήστες πολύ πιο απαιτητικούς, όσον αφορά στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες και στις ταχύτητες, που αυτές προσφέρουν για μεταφορά υψηλού όγκου δεδομένων, αλλά και κάλυψη σε ευρύτερο φάσμα του δικτύου. Σε αυτό, βέβαια, έχει συντελέσει και ο ολοένα αυξανόμενος ρυθμός εμφάνισης νέων χρήσιμων συσκευών, που έχουν ως στόχο να κυριαρχεί η ψηφιοποίηση της πληροφορίας και έχει δημιουργήσει έκρηξη στην αγορά νέων συσκευών. Οι πιο απαραίτητες υπηρεσίες, λοιπόν, που αναμένεται να παραχθούν και να ικανοποιήσουν τους καταναλωτές της νέας τεχνολογικής πραγματικότητας θα είναι (Anastasia Kollia, 2014):

- Καθυστέρηση μικρότερη από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου, έως και λίγα δευτερόλεπτα. Όλοι οι χρήστες συνδεδεμένοι σε κινητό από μερικές εκατοντάδες έως αρκετά εκατομμύρια άτομα.
- Κύκλοι λειτουργίας από ελάχιστα χιλιοστά του δευτερολέπτου έως και ολόκληρες ημέρες.
- Σηματοδότηση φορτίων από λιγότερο από 1% έως σχεδόν 100%.

- Μοναδική εμπειρία με ταχύτητα τουλάχιστον **1 Gbps** ή ακόμα μεγαλύτερες τιμές, που θα συντελούν στην αύξηση της διακίνησης των δεδομένων, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η υποστήριξη υπερύψηλης ποιότητας βίντεο και σε σημαντικές εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας.
- Τα **10 Gbps** ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων για την υποστήριξη κινητής **cloud** υπηρεσίας, που από πολλούς θεωρείται το μέλλον της κινητής επικοινωνίας.
- Η μηδενική καθυστέρηση και οι χρόνοι απόκρισης λιγότερο από ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου σε λανθάνουσα κατάσταση.
- Η υποστήριξη σε πραγματικό χρόνο κινητού ελέγχου και σε εφαρμογές επικοινωνίας μεταξύ οχημάτων.
- Μηδενική δευτερεύουσα μεταγωγή, με μέγιστο χρόνο ενεργοποίησης στα δέκα χιλιοστά του δευτερολέπτου, μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, για την εξασφάλιση σταθερής και απρόσκοπτης παροχής υπηρεσιών.
- Τεράστια χωρητικότητα, αφού τα υπάρχοντα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, ήδη υποστηρίζουν 5 δισεκατομμύρια χρήστες, και αυτό θα πρέπει να επεκταθεί για να υποστηρίξει, επίσης, αρκετά δισεκατομμύρια εφαρμογές και εκατοντάδες δισεκατομμύρια μηχανές.
- Ελάττωση κατανάλωσης της ενέργειας, δηλαδή η ενέργεια ανά **bit** χρήσης θα πρέπει να μειωθεί κατά ένα παράγοντα για να βελτιωθεί η συνδεδεμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας της συσκευής, όπου αποτελεί και το βασικότερο μειονέκτημα των περισσότερων έξυπνων συσκευών και κινητών τηλεφώνων.
- Το **5G** θα παρέχει τη θεμελιώδη υποδομή για τη δημιουργία έξυπνων πόλεων, η οποία θα ωθήσει την απόδοση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και τις απαιτήσεις τους στα άκρα.
- Χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, ωστόσο, θα είναι επίσης απαραίτητες για τον κινητό βιομηχανικό αυτοματισμό, των οχημάτων και τη συνδεσιμότητα μεταξύ τους, καθώς και για άλλες εφαρμογές **IoT**.
- Εφαρμογές, όπως, έξυπνοι αισθητήρες, που βασίζονται σε κείμενο μηνυμάτων είναι παραδείγματα, εφαρμογών με εξαιρετικά υψηλό όγκο δεδομένων, οι οποίοι επιπλέον, δεν θα είναι ευαίσθητοι σε καθυστέρηση.

### 2.5.6 Σύγκριση 4G-5G

Όσον αφορά στην τεχνολογία **5G** αναμένεται να αλλάξει τον τρόπο ύπαρξης των σύγχρονων δικτύων. Συνοπτικά, η νέα τεχνολογία θα είναι περισσότερο πράσινη, μεγαλύτερου εύρους ζώνης, θα επιτρέπει τη σύνδεση πολύ μεγαλύτερου αριθμού συσκευών κινητής επικοινωνίας, θα έχει χαμηλό κόστος κλπ. Οι περισσότερες εταιρείες κινητών τηλεπικοινωνιών και κινητών δικτύων κινούνται στην κατεύθυνση της μελέτης και της χρηματοδότησης των μελετών για την αντίστοιχη

τεχνολογία, έτσι ώστε να εντάξουν στο πρόγραμμά τους, στο δίκτυο τους και στις νέες συσκευές τους την πλεονεκτική αυτή τεχνολογία.

Οι πολίτες από τη μεριά τους, αναμένεται να καλοδεχτούν τη νέα τεχνολογία, αφού η εξέλιξη των συσκευών και η αύξησή τους ανά άτομο, συμβάλει στο να δημιουργούνται από τους πολίτες μεγάλες απαιτήσεις για την ανάπτυξη ενός πολύ ισχυρότερου και ταχύτερου δικτύου για την ολοένα και αυξανόμενη ένταξη σε αυτό συσκευών.

Το χρονικό διάστημα της εμφάνισης του 5G δεν είναι προκαθορισμένο, εφόσον, λέγεται εν γένει, ότι θα εμφανιστεί το 2020, παρόλα αυτά, όμως, επειδή υπάρχει οικονομική κρίση και είναι λογικό ότι ένα τέτοιο έργο είναι πολυδάπανο, και ενδέχεται να καθυστερήσει, ακόμα περισσότερο. Από την άλλη μεριά, το κόστος είναι υπέρογκο, αφού πρέπει να αναπτυχθεί το δίκτυο σε όλον τον κόσμο. Εν συνεχεία, οι νέες συσκευές, που θα ενσωματώσουν την τεχνολογία αυτή, είναι πολύ πιθανό να έχουν, επίσης, αυξημένο κόστος και να είναι δύσκολη η αγορά τους από τους χρήστες. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι στα επόμενα χρόνια θα απασχολήσει η τεχνολογία 5G τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών, τους πολίτες, τις εταιρείες ανάπτυξης και θα ευνοήσει νέες υπηρεσίες, οι οποίες θα πραγματοποιηθούν με βάση την ταχύτητα της νέας αυτής τεχνολογικής έκρηξης. (Anastasia Kollia, 2014)

Οι σημαντικότερες διαφορές, που παρουσιάζει σχετικά με το 4G παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ταχύτητα:** Θα είναι ταχύτερο και θα έχει μεγαλύτερο εύρος από το ασύρματο 4G. Με το 5G θα είναι δυνατό να είναι γρηγορότερη η ροή βίντεο, να υπάρχουν λιγότερες νεκρές ζώνες και να ακούγονται οι διάλογοι με πιο καθαρό ήχο. Η πλήρης ταχύτητα και τα πλεονεκτήματα του 5G απαιτούν δρομολογητή οικιακού δικτύου, που υποστηρίζει το 5G.
- **Συχνότητα:** Το 5G θα λειτουργεί στη ζώνη των 5 GHz. Η ζώνη της συχνότητας των 2,4 GHz παρουσιάζει ολοένα μεγαλύτερη πολυκοσμία, καθώς, χρησιμοποιείται από πληθώρα συσκευών σε κάθε σπίτι ή γραφείο.
- **Μείωση παρεμβολών:** Το 5G θα έχει λιγότερες παρεμβολές. Οι κλήσεις δεν θα ανταγωνίζονται άλλους επαναθέτες σήματος. Η ζώνη των 5 GHz έχει σημαντικά περισσότερο χώρο για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χρήση υψηλότερης ποιότητας, που ουσιαστικά εξαλείφει τις κακές συνδέσεις. Το 5G αφαιρεί τα νεκρά σημεία, έτσι ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιείται το τηλέφωνο σε περιοχές του δικτύου, όπου δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως τώρα.
- **Βελτιωμένη ροή βίντεο:** Η ροή βίντεο απαιτεί πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Γι' αυτό, η παρακολούθηση βίντεο στα σημερινά ασύρματα δίκτυα μπορεί να δημιουργεί προβλήματα. Τα παγώματα της εικόνας σημειώνονται, επειδή το ασύρματο δίκτυο μπορεί να μην είναι δυνατό να μεταδώσει με ακρίβεια. Το 5G μειώνει τις προβληματικές εικόνες κατά την αποθήκευση βίντεο στην προσωρινή μνήμη **buffer**.
- **Μετάδοση αρχείων:** Το 5G θα επιταχύνει σημαντικά τον χρόνο, που απαιτείται για τη μεταφορά αρχείων και το συγχρονισμό δεδομένων. Η δημιουργία αντιγράφου ασφαλείας κινητών συσκευών είναι επίσης ταχύτερη.

Από ημερολόγια, κείμενα, φωτογραφίες και βίντεο έως εφαρμογές και επαφές, η δημιουργία αντιγράφου ασφαλείας δεδομένων θα είναι πλέον θέμα δευτερολέπτων.

- **Αυξημένο κόστος υποδομής:** Παρά το γεγονός ότι η νέα τεχνολογία αναμένεται να είναι έως και **1000** φορές γρηγορότερη από τον προκάτοχό της, δηλαδή την τέταρτη γενιά και πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις προγενέστερες γενιές, όπως 1, 2 και 3 το κόστος της υποδομής για την ανάπτυξη και χρήση της τεχνολογίας αυτής αναμένεται να κυμανθεί περίπου στα 1.5 δισεκατομμύρια δολάρια για τη χώρα της Νότιας Κορέας. Άρα, συμπεραίνεται ότι και για τις υπόλοιπες χώρες του κόσμου ανάλογα με το μέγεθός τους και την πληθυσμιακή κάλυψη, που επιδιώκουν να πετύχουν, τα κόστη θα κυμαίνονται σε τέτοιου είδους μεγάλα ποσά, που είναι δύσκολο να βρεθούν και να δαπανηθούν στην περίοδο αυτή, που η οικονομική κρίση μαστίζει μεγάλο μέρος του αναπτυσσόμενου κόσμου.

Μία ανάλυση Δύναμεων, Αδυναμιών, Ευκαιριών και Απειλών **Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT)** είναι μία τεχνική, η οποία βοηθά αναδεικνύοντας πως διάφοροι παράγοντες, οι οποίοι προκύπτουν από εξωτερικές ή εσωτερικές επιρροές μπορεί να είναι είτε βοηθητικοί είτε επώδυνοι με σκοπό να καταφέρνουν να επιτύχουν ένα στόχο ή να προωθήσουν ένα προϊόν. Οι δυνάμεις και οι ευκαιρίες είναι και οι δύο πολύ βοηθητικές και προκύπτουν από εσωτερικές και εξωτερικές ευκαιρίες αντίστοιχα. Οι αδυναμίες και οι απειλές είναι και οι δύο επιβλαβείς και προέρχονται από εσωτερικούς και εξωτερικούς κινδύνους.

	helpful	harmful
internal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Καλύτερη χρήση του εύρους ζώνης (<b>mmWave, Ultra-density, CR</b>)</li> <li>2. Έλεγχος δικτύου και διαχείριση (<b>CR, SDN</b>)</li> <li>3. Αύξηση χώρου (<b>NFV, Cloud</b>)</li> <li>4. Μείωση κόστους (<b>NFV</b>)</li> <li>5. Βελτίωση των κινητών επικοινωνιών (όλες)</li> <li>6. Εξυπηρετούν περισσότερους χρήστες (<b>MIMO, Ultra-density, SDN</b>)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Παρεμβολή (<b>mmWave, Ultra-density, MIMO</b>)</li> <li>2. Ανάγκη προτυποποίησης (<b>NFV, SDN, MIMO, CR, IoT</b>)</li> <li>3. Επιθέσεις δικτύων (<b>SDN, IoT, D2D</b>)</li> <li>4. Ανάγκη για προώθηση έτσι ώστε οι χρήστες να τα υιοθετούν (<b>D2D, IoT, Ultra-dense</b>)</li> </ol>
external	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Γλοποίηση <b>5G</b></li> <li>2. Περισσότεροι χρήστες υπονοούν περισσότερες ανάγκες</li> <li>3. Αύξηση των ροών δεδομένων</li> <li>4. Χρήση κοινωνικών δικτύων</li> <li>5. Καινοτομία</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Αύξηση εξόδων (<b>Ultra-dense, MIMO</b>)</li> <li>2. Δημιουργία ανασφάλεια στους χρήστες (<b>D2D, IoT</b>)</li> <li>3. Δυσκολία για ευρεία εξάπλωση (<b>SDN, NFV, D2D</b>)</li> </ol>

Στο Πίνακα 2.1 περιλαμβάνεται η αξιολόγηση των κύριων 5G παραγόντων.

TABLE 2.1: Αξιολόγηση των κύριων παραγόντων 5G.

Λύση	SDN	CR	Cloud	Dense	MIMO	D2D	IoT	NFV	mmWave
Κόστος	-	-	-	-	+	-	-	-	+
Επέκταση	X	X	X	X			X	X	X
Απόδοση	X	X	X	X	X			X	X
Κάλυψη	X	X				X		X	
Χωρητικότητα	X	X	X	X	X	X		X	X
Ετερογένεια	X	X	X	X		X	X	X	X
Διάγνωση	Στατιστικά	SBSs				X			
Εμφάνιση	2011	1999	1996	2007	1970	2008	2008	2012	2017
Τιθέτηση	Λίγη	Μέλλον	Λίγη	Λίγη	Μεγάλη	Λίγη	Λίγη	Λίγη	Μεγάλη
Πρότυπο	OpenFlow	IEEE	Πολλά	3GPP	IEEE	IEEE	Κανένα	Πολλά	IEEE
TRL	8	7	9	9	9	9	9	8	8
Χρόνος	X	X	X					X	
Διαχείριση	X	X						X	
Παρεμβολή				X	X	X		X	X
Κατανάλωση	X	X	X		X		X	X	X

Πιο αναλυτικά:

- **Κόστος:** Οι πιο πολλές τεχνολογίες μειώνουν τα κόστη. Επίσης, το OPEX αυξάνεται σε διάφορες τεχνολογίες.
- **Επεκτασιμότητα:** Οι περισσότερες τεχνολογίες περιλαμβάνουν επεκτάσιμα χαρακτηριστικά, εφόσον είναι πολύ εύκολο να προστίθενται περισσότερα δικτυακά συστατικά, που λειτουργούν με το υπόλοιπο δίκτυο.
- **Απόδοση:** Οι περισσότερες από τις τεχνολογίες είναι αποδοτικές και βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου.
- **Υψηλή κάλυψη:** Οι πιο πολλές τεχνολογίες καλύπτουν το δίκτυο προσφέροντας περισσότερη χωρητικότητα και περισσότερο εύρος ζώνης.
- **Ετερογένεια:** Περισσότερες τεχνολογίες συνεργάζονται άψογα με άλλες τεχνολογίες και δικτυακές λύσεις.
- **Εύρος ζώνης:** Κάποια από τα προτεινόμενα μοντέλα χρειάζονται περισσότερο εύρος ζώνης, ενώ άλλα είναι ικανά να διαχειρίζονται καλύτερα ή/και να επαναχρησιμοποιούν καλύτερα το εύρος ζώνης και τις άλλες πηγές.
- **Γνωσιακές δυνατότητες:** Περισσότερες τεχνολογίες εμφανίζονται να έχουν γνωσιακές δυνατότητες, δηλαδή μαθαίνουν τη δικτυακή συμπεριφορά και εκμεταλλεύονται όλα αυτά τα δεδομένα, που προσφέρουν περισσότερες πηγές στα μέρη, που χρειάζονται να εισάγονται στο δίκτυο.
- **Εμφάνιση:** Οι τεχνολογίες, οι οποίες εμφανίζονται ευρέως σε εργασίες και αργότερα τα έτη κατά τα οποία, οι τεχνολογίες υλοποιούνται.
- **Υιοθέτηση:** Ο βαθμός της υιοθέτησης της κάθε τεχνολογίας στις μέρες μας.
- **Πρότυπα:** Τα πρότυπα περιγράφουν τις τεχνολογίες. Για κάποιες τεχνολογίες υπάρχουν πρότυπα, τα οποία εξηγούν τις βασικές λειτουργίες των λύσεων.
- **Technology Readiness Level (TRL):** πόσο έτοιμη είναι η τεχνολογία να λειτουργήσει άμεσα.
- **Μείωση του χρόνου:** Μερικές λύσεις μειώνουν το χρόνο, που χρειάζεται για την αγορά.
- **Τεχνολογία διαχείρισης δικτύων:** Οι 5G τεχνολογίες, που χρειάζονται για τη διαχείριση των δικτύων.
- **Παρεμβολή:** Υπάρχουν πολλές παρεμβολές για κάποιες τεχνολογίες, οι οποίες οδηγούν στην υποβάθμιση του σήματος.
- **Ενεργειακή κατανάλωση:** Η ενεργειακή κατανάλωση αυξάνεται για πολλές τεχνολογίες και συνεπώς, επιφέρει λειτουργικά έξοδα.

## 2.6 6G

Αλλά οι τηλεπικοινωνίες δε σταματάνε εδώ και στο σήμερα. Υπάρχει ήδη μέριμνα και έχει ήδη ξεκινήσει ερευνητική προσπάθεια για τα επόμενα δίκτυα της επόμενης γενιάς, που λογικά θα εμφανιστούν στη ζωή μας το 2030. Σύμφωνα με το (*Discover how 6G will change our lives n.d.*) υπάρχει εξέλιξη σε ό,τι αναφορά στο μέλλον των κινητών δικτύων επικοινωνίας και κυρίως σε σχέση με:

- Ασύρματη συνδεσιμότητα:
  - Η πρόκληση είναι να αναπτυχθούν νέες λύσεις ασύρματης συνδεσιμότητας και αρχές σχεδιασμού RAN, όπου οι αντιλήψεις μεταξύ πυκνότητας δικτύου, χωρητικότητας, χρόνου και άλλων ανταγωνιστικών μετρήσεων, όπως η ενεργειακή απόδοση και το κόστος υλοποίησης, σχετίζονται ως συνάρτηση της συχνότητας, του εύρους ζώνης και του κινούμενου χρήστη.
  - Ο στόχος της έρευνας 6Genesis είναι να αναπτυχθούν καινοτόμες λύσεις ασύρματης συνδεσιμότητας και τεχνολογίες RAN για δίκτυα 5G /6G, που επιτρέπουν εξαιρετικά αξιόπιστη μετάδοση και ασφαλή παροχή υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων τεχνολογιών φυσικού επιπέδου και νέων δυναμικών και εικονικών τεχνολογιών δικτύωσης. Ακόμα, εξετάζεται πώς η αυξανόμενη συχνότητα φορέα και το εύρος ζώνης του συστήματος μαζί με την αυξανόμενη ετερογένεια των απαιτούμενων υπηρεσιών θα επηρεάσουν το συνολικό σχεδιασμό του δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Η χωρητικότητα του δικτύου θα ενισχυθεί με την εισαγωγή του ραδιοφάσματος σε ζώνες mmWave και THz για τις οποίες θα αναπτυχθούν νέες λύσεις ασύρματης συνδεσιμότητας, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης RAN.
  - Οι πρακτικές λύσεις σχεδιασμού θα περιλαμβάνουν προηγμένες τεχνολογίες φυσικού επιπέδου, όπου αναπτύσσονται νέες κυματομορφές 5G / 6G, διεπαφές, αλγόριθμοι πομποδέκτη και μοντέλα καναλιών. Παραδείγματα αυτών περιλαμβάνουν τους μηχανισμούς συντονισμού και μείωσης παρεμβολών με διαφορετικούς τύπους τεχνολογιών πομποδέκτη πολλαπλών εισόδων, πολλαπλών εξόδων (MIMO) πολλαπλών κεραιών καθώς και επικοινωνία με ενσωματωμένη τοποθέτηση για την επίλυση της έλλειψης ακριβούς εσωτερικής τοποθέτησης.
  - Επίσης, θα αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες δυναμικής δικτύωσης, όπου η χρήση δικτύων SDN & NFV και θα χρησιμοποιηθούν για την παροχή μιας ευέλικτης και δυναμικής πλατφόρμας δικτύωσης για την υποστήριξη πολλαπλών εικονικών δικτύων κατόπιν ζήτησης πάνω από κοινόχρηστη φυσική υποδομή. Οι αναπτυγμένες τεχνολογίες φυσικού επιπέδου και δικτύωσης θα αναπτυχθούν με την εξέταση των απαιτήσεων ασφαλείας και θα σχεδιαστούν σχετικοί μηχανισμοί.
- Τεχνολογίες Συσκευών και Κυκλωμάτων:
  - Η πρόκληση είναι να βρεθεί μια νέα ισορροπία μεταξύ της έννοιας της επικοινωνίας, της επεξεργασίας ψηφιακού σήματος και των

τεχνολογιών ραδιοσυχνοτήτων για την υποστήριξη εφαρμογών, που απαιτούν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων. Οι κατανεμημένες λειτουργίες σε ένα ευρύ φάσμα ζωνών συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών THz, απαιτούν νέες αρχιτεκτονικές πομποδέκτη ραδιοσυχνοτήτων και ολοκληρωμένα κυκλώματα **Integrated Circuits (IC)** καθώς και ανάπτυξη νέων υλικών, εξαρτημάτων και διαδικασιών κατασκευής.

- Ο στόχος στην έρευνα **6Genesis** είναι να ενσωματωθούν τα συστήματα **5G / 6G** στην πραγματικότητα αναπτύσσοντας νέες εφαρμογές πομποδεκτών **RF** και σχεδίαση **IC**, καθώς και νέους τύπους ηλεκτρονικών λύσεων συσκευασίας **THz** κλίμακας, που επιτρέπουν συστήματα **5G / 6G**, που λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτικών ζωνών. Αυτά περιλαμβάνουν ρυθμιζόμενα νανοϋλικά και δομές **3D**, που επιτρέπουν χαρακτηριστικά για συγκεκριμένες εφαρμογές με εξαιρετικά χαμηλή διαπερατότητα και ρυθμιζόμενα δομικά χαρακτηριστικά.
  - Οι λύσεις σχεδιασμού θα διερευνήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ αρχιτεκτονικών πομποδέκτη, πρωτοκόλλων, λανθάνοντος χρόνου και εύρους ζώνης, που απαιτεί προσεγγίσεις, που επιδιώκουν αξιόπιστες επικοινωνίες μέσω εξαιρετικά παράλληλων σχεδίων από την ασύρματη διαδρομή προς το υλικό **Hardware (HW)** και το λογισμικό **Software (SW)**.
  - Θα αναπτυχθούν επίσης τεχνολογίες ανίχνευσης για τη συλλογή περισσότερων πληροφοριών από καθημερινές καταστάσεις και περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένης της τρισδιάστατης απεικόνισης του περιβάλλοντος και της μηχανικής όρασης για αυτοματοποιημένη ανίχνευση και λήψη αποφάσεων με βάση πληροφορίες, που έχουν ληφθεί από βίντεο.
- Κατανεμημένα Υπολογιστικά:
    - Η πραγματική πρόκληση, που αντιμετωπίζει η παράδοση του **Augmented Reality (AR) / Virtual Reality (VR)** μέσω ασύρματου δικτύου είναι ο τρόπος αποτελεσματικής διανομής των απαιτούμενων αναλύσεων υπολογισμών και δεδομένων σε όλα τα στοιχεία και τις τοποθεσίες του δικτύου, ενώ πληρούν τις ετερογενείς απαιτήσεις εξυπηρέτησης / λανθάνουσας διάρκειας και τους περιορισμούς **backhaul / fronthaul**.
    - Ο στόχος στην έρευνα **6Genesis** είναι να αναπτυχθούν νέες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης **Artificial Intelligence (AI)** βελτιωμένες συμφωνίες συνεργασίας δυναμικά συνδεδεμένων κόμβων, που μπορούν να δώσουν ευκαιριακά τους υπολογιστικούς τους πόρους. Θα αναπτυχθούν μηχανισμοί για τη βελτιστοποίηση της διάσπασης των λειτουργιών επεξεργασίας σημάτων μεταξύ των **cloud, edge servers** και των ραδιοφωνικών κεφαλών στην περίπτωση αρχιτεκτονικών τύπου **cloud RAN**.
    - Οι πρακτικές λύσεις σχεδιασμού θα εξετάσουν την ανθρώπινη ψυχολογία και φυσιολογία για εφαρμογές **AR / VR** για την ανάπτυξη αλγορίθμων, που θεωρούν τις ανθρώπινες αντιλήψεις. Θα είναι ευεργετικά

σε περιβάλλοντα, όπου τα δεδομένα αλλάζουν δυναμικά και οι απαιτήσεις λανθάνουσας κατάστασης για την ανταλλαγή δεδομένων είναι πολύ αυστηρές.

- Θα αναπτυχθούν επίσης νέοι μηχανισμοί κατανομημένης εκμάθησης, που θα επιτρέπουν στους αλγόριθμους να τρέχουν σε BS, τερματικά χρηστών και άλλες συσκευές με περιορισμένα δεδομένα, παρέχοντας παράλληλα ισχυρή ευρωστία σε αστοχίες συσκευών και συνδέσμων. Οι πρακτικές λύσεις σχεδιασμού περιλαμβάνουν προσαρμοστικά και κατανομημένα πρωτόκολλα, όπως κατανομημένες επικοινωνίες, δρομολόγηση, εξισορρόπηση φορτίου και προσωρινή αποθήκευση δεδομένων.

### 2.6.1 Υπηρεσίες και Εφαρμογές

Οι πιο σημαντικές υπηρεσίες και εφαρμογές είναι:

- Ο στόχος του **6Genesis** είναι η παροχή μιας ολοκληρωμένης αντιμετώπισης των απαιτήσεων στην ανάπτυξη δικτύων **5G / 6G** χρησιμοποιώντας περιβάλλοντα δοκιμών εμπορικής ποιότητας για συν-δημιουργία εφαρμογών για τη βιομηχανία και την κοινωνία. Η λύση είναι η ταχεία δοκιμή χρησιμοποιώντας πειραματικά δίκτυα δοκιμών **5G / 6G** για να φέρει τα ευρήματα της έρευνας σε πραγματικές δοκιμές σε συνεργασία με τις επιχειρήσεις και την κοινωνία γενικότερα. Αυτό θα καλύψει τη ραδιο-μετάδοση και τους πομποδέκτες, την τεχνολογία και τα υλικά νέων τεχνολογιών, τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, την αποθήκευση και την κατανομημένη πληροφορική σε ασύρματα δίκτυα και την προσθήκη νέων αισθητήρων και εργαλείων απεικόνισης.
- Η ανάπτυξη του Δικτύου Δοκιμών **5G** συνεχίζεται σε μια τέτοια κατεύθυνση, ώστε οι ερευνητές από διάφορους κλάδους να μπορούν να συνδέουν ελλειπείς αισθητήρες ή συσκευές στο δίκτυο για να συλλέξουν τα δεδομένα, που χρειάζονται για τις ανάγκες τους και να έχουν πρόσβαση στην πλατφόρμα επεξεργασίας δεδομένων στο σύννεφο. Ως εκ τούτου, το δίκτυο δοκιμών λειτουργεί ως γενική πλατφόρμα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων για ολόκληρη την ερευνητική κοινότητα του **6Genesis**.
- Η έρευνά υιοθετεί μια διεπιστημονική προσέγγιση, όπου η τεχνική και δοκιμαστική έρευνα δικτύων συνδυάζεται με τεχνοοικονομικά και επιχειρηματικά ζητήματα, καθώς και κανονισμούς και πρότυπα. Η πυκνότητα του δικτύου, η κατανομή του φάσματος, η αύξηση πόρων και η διαφοροποίηση της φύσης των δεδομένων θα απαιτήσουν καινοτόμους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων και μοντέλα ιδιοκτησίας των οποίων η ανάπτυξη απαιτεί προσέγγιση. Βασικά θέματα, που πρέπει να αναλυθούν περιλαμβάνουν θέματα ιδιοκτησίας και επενδύσεων σχετικά με την υποδομή δικτύου, ραδιοφάσμα τα δεδομένα. Οι μελλοντικές λύσεις αναμένεται να απαιτήσουν αλλαγές στη νομοθεσία για τις τηλεπικοινωνίες, στις δομές της αγοράς των κινητών επικοινωνιών και στις τεχνολογίες δικτύων, που χρειάζονται υποστήριξη της έρευνας.
- Τα διαφορετικά μοντέλα ιδιοκτησίας δικτύου και παροχής υπηρεσιών επηρεάζουν το σχεδιασμό των συστημάτων ραδιοεπικοινωνίας, που απαιτούνται για

να διασφαλιστεί η επιτυχία για την οργανική ή ολιστική ανάπτυξη μελλοντικών ψηφιακών υπηρεσιών. Η διεπιστημονική ρύθμισή, η επιχειρηματική και τεχνολογική έρευνα αναπτύσσει νέα επαναστατικά μοντέλα λειτουργίας δικτύου, δηλαδή νέα επιχειρηματικά μοντέλα που βασίζονται σε μικροεπιχειρησιακούς χρήστες, βασιζόμενα στην τοπική διαθεσιμότητα φάσματος μικροδομένων.



## Chapter 3

# Τεχνολογίες στην Πέμπτη γενιά

Καθίσταται σαφές ότι οι υψηλές απαιτήσεις, που θέτει η 5G είναι δύσκολο αν όχι ακατόρθωτο να απαντηθούν από τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Αυτό συμβαίνει, διότι υπάρχουν νέες υπηρεσίες και νέα πρότυπα, που πρέπει να ικανοποιούνται, ακόμα παρατηρείται ετησίως πολύ σημαντική αύξηση στην παραγωγή και κατανάλωση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας.

Μία ιδέα λοιπόν είναι να σημειωθούν νέες ιδέες και νέες προσεγγίσεις, οι οποίες να έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται επιτυχώς στις ανάγκες αυτές. Τέτοιες τεχνολογίες είναι μερικές από αυτές, που περιλαμβάνονται στην ανάλυση (Akyildiz, Nie, et al., 2016) και μελετώνται εκτενώς στα κεφάλαια αυτής της εργασίας.

Από την άλλη μεριά όμως, μία άλλη σημαντική ιδέα, θα μπορούσε να είναι η εξέλιξη των παραδοσιακών μοντέλων με χρήση νέων τεχνολογιών με βασικό σκοπό τη βελτίωση των τεχνολογιών διατηρώντας τις υπάρχουσες υποδομές και τη δυνατότητα επέκτασης των δικτύων και παροχής αυτών των αιτημάτων της 5G. Τέτοια παραδείγματα, όπως η διαφοροποίηση της χρήσης του εύρους ζώνης με τεχνικές **Virtualization**, που οδηγούν συνάμα σε μείωση του κόστους μελετώνται πολύ συχνά σε εργασίες.

Ακολούθως, παρατίθενται τα σημαντικότερα θεωρητικά στοιχεία για τις βασικότερες τεχνολογίες, που θεωρούνται θεμέλιοι λίθοι σε ό,τι αναφορά στη δομή της γενιάς 5G και αναμένεται να πρωταγωνιστήσουν ως τεχνολογίες τα επόμενα χρόνια. Με βάση την έρευνα του παρόντος κεφαλαίου έχουν προκύψει δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και έγκριτα συνέδρια: (Christos Bouras, Praskevi Fotakopoulou, and Anastasia Kollia, 2019)

### 3.1 Μικροκυψέλες

Η χρήση των Femtocells κατέχει ιδιαίτερη σημασία και τα ίδια τα Femtocells είναι τεχνολογικά επιτεύγματα ειδικού ενδιαφέροντος. Η χρήση των Femtocells είναι μέρος μίας γενικότερης τάσης, που επικρατεί στα κινητά δίκτυα σε σχέση, με τη μείωση του μεγέθους των κυψελών. Εστιάζουν στην ιδέα ότι μειώνοντας το μέγεθος της βασικής κυψέλης, μπορεί να αναλαμβάνεται από κάθε κυψέλη εξυπηρέτηση κάποιου τμήματος του εύρους ζώνης. Ενόσω, υπάρχουν μειονεκτήματα σε αυτές τις προσεγγίσεις, είναι σημαντικά τα πλεονεκτήματά τους για μικρούς χώρους, όπως τα σπίτια ή τα μικρά γραφεία, όπου πλέον θα συνδέονται ολοένα και περισσότερες συσκευές. Σε λίγα χρόνια θα υπάρχουν έξυπνες συσκευές, που θα είναι δυνατό, κάθε χρήστης να τις ελέγχει εκ του μακρόθεν, ακόμα και όταν λείπει από το σπίτι του δια μέσου του έξυπνου τηλεφώνου του. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015)

Ένας από τους παράγοντες κλειδιά υπέρ των **Femtocells** είναι ότι είναι σχεδιασμένα να αγοράζονται και να εγκαθίστανται από τον καταναλωτή, που δεν έχει τεχνική γνώση. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη επαρκούς ευφυίας από τα **Femtocell**, ώστε να ενημερώνονται και να ρυθμίζονται στο περιβάλλον πριν την εγκατάσταση, να προσαρμόζονται σε οτιδήποτε αλλαγές συμβαίνουν στο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον με την καθημερινή χρήση, να προσαρμόζονται σε κάθε ελαττωματική κατάσταση, που ενδέχεται να συμβεί κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε λειτουργίας και να αποτρέπουν σφάλματα με μικρή ή ελάχιστη προσπάθεια. Ένα **Femtocell** πρέπει να μπορεί να αυτορυθμίζεται να αυτοβελτιστοποιείται και να αναγνωρίζει και να διορθώνει τα σφάλματα, ώστε να είναι εύκολη η εγκατάστασή του. Αυτά είναι άλλωστε, τα σημαντικότερα, από τα θέματα, που έχουν ήδη προβλεφθεί, εφόσον, περιλαμβάνονται εντός της αρχιτεκτονικής τους αρκετοί αλγόριθμοι αυτό-οργάνωσης. Τα δίκτυα αυτό-οργάνωσης αποτελούν σήμερα το βασικό θέμα έρευνας και προτυποποίησης στο **3GPP (3rd Generation Partnership Project)**. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015)

Η ίδια τεχνολογία και αρχιτεκτονική είναι ευρέως διαδεδομένη και σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Τυπικά, μία **Microcell** έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και υψηλότερη ισχύ, ώστε να δώσει μεγαλύτερο εύρος κάλυψης. Ορισμένες επιχειρήσεις, που πουλούν **Microcells**, έχουν καταλήξει σε λύσεις, σύμφωνα με τις οποίες, τα **Small Cells** συνεργάζονται ανά ομάδες, με κεντρικό στόχο να παρέχουν στους χρήστες υπηρεσίες αδιάκοπα. Για μεγάλες επιχειρήσεις, είναι πιθανό να απαιτείται ένας ελεγκτής **Microcell**, ούτως ώστε να παρέχονται επιπρόσθετες τοπικές υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένου της απευθείας σύνδεσης στο εταιρικό δίκτυο ή το διαδίκτυο και αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τμημάτων στο δίκτυο.

Είναι σημαντικό να περιγραφούν οι σημαντικότερες πλευρές της τεχνολογίας, που κρύβεται πίσω από τα **Femtocells**. Αναλυτικά, οφείλει να στοιχειοθετείται η βασική αρχιτεκτονική του **Femtocell**, ποιές οι βασικές απαιτήσεις, που υπάρχουν για την εγκατάστασή του, τη συντήρησή του κλπ, ποιά τα δομικά στοιχεία του συστήματος, πώς εγκαθίστανται, τι χώρους καλύπτουν, πόση χωρητικότητα αναμένεται να έχουν κλπ. ποιά ήταν τα ιστορικά δρώμενα και οι εξελίξεις, που σχετίζονται άμεσα και συνετέλεσαν στη δημιουργία και εξάπλωση των **Femtocells**.

Ακόμα, είναι σημαντικό να τονιστούν τα σημαντικότερα μειονεκτήματα και προκλήσεις, που συνδέονται με αυτά ώστε να βρεθούν λύσεις και απαντήσεις στο άμεσο μέλλον. Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας να σημειωθούν τα πλεονεκτήματα, που διέπουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία, ώστε να ωθήσει τους χρήστες και τους παρόχους να εντάξουν στα συστήματά τους τη συγκεκριμένη πρόταση. Από την άλλη μεριά, η αντιδιαστολή θετικών και αρνητικών μπορεί να καταδεικνύει ποιά υπερισχύουν ποιών, με αποτέλεσμα να μπορεί κανείς να υποστηρίξει τα μεν εναντίον των δε, σε περίπτωση αντιπαράθεσης για την χρησιμότητα ή τη βιωσιμότητα της συγκεκριμένης πρότασης.

Τέλος, είναι λογικό να σχηματιστεί το μοντέλο μελέτης, που πραγματοποιήθηκε για ένα δίκτυο με **Femtocells**, με σκοπό να κατανοηθεί για ποιούς λόγους προκύπτουν ορισμένα κόστη, ποιά στοιχεία λήφθηκαν υπόψη κατά το σχεδιασμό του δικτύου και την ανάπτυξη της οικονομικής πρότασης.

### 3.1.1 Δομή

Ένα Femtocell είναι ένας μικρός 3G σταθμός βάσης, που σχεδιάστηκε για να εφαρμόζεται μέσα σε οικίες ή μικρές επιχειρήσεις. Η μεγάλη χωρητικότητα και η υψηλή κάλυψη είναι διαθέσιμες χρησιμοποιώντας τη λογική της μικρής κυψέλης εντός ενός κτηρίου και επιτυγχάνει μία καλύτερη εμπειρία χρήσης, συγκριτικά με αυτή, που επιτυγχάνεται συμβατικά με τη χρήση Macrocells. Οι βελτιωμένοι ρυθμοί δεδομένων συμβάλλουν στην ανάπτυξη νέων πολυμεσικών υπηρεσιών, που παράγουν νέα εισοδήματα για τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, που μπορούν να προσφέρουν περισσότερες παροχές, πλέον, στους πελάτες τους. Τα Femtocells είναι σχεδιασμένα να εγκαθίστανται από τον χρήστη χωρίς ιδιαίτερες τεχνικές γνώσεις.

Σύμφωνα με το 3GPP δομημένο πρότυπο για το Femtocell, η αρχιτεκτονική Femtocell περιγράφεται από τρία θεμελιώδη στοιχεία:

- το Home Node B (HNB) επικοινωνεί με την πύλη του Home Node B (HNB-GateWay-HNB-GW) πάνω από τη σύνδεση του καταναλωτή δια μέσου της επιφάνειας Iu-b.
- Το HNB-GW εξυπηρετεί το σκοπό ενός RNC (Radio Network Controller), που παρουσιάζεται από μόνο του στο δίκτυο πυρήνα του παρόχου ως συγκεντρωτής των συνδέσεων HNB.
- Κάθε HNB εξυπηρετεί μία κυψέλη και υπάρχει μία σχέση 1-N μεταξύ των HNB-GW πυλών και HNB κόμβων. Ένα σύστημα 3G UMTS κινητής επικοινωνίας είναι ευρέως διαδεδομένο, ακόμα και στις μέρες μας, αφού οικονομικοί και τεχνολογικοί παράγοντες δεν έχουν ακόμα, επιτρέψει την αντικατάσταση όλων των υπαρχόντων δικτύων με 4G. Τα Femtocells είναι σημαντικός τύπος κυψέλης σημείου πρόσβασης (Access Point Cell). Τα Femtocells παρέχουν συνδεσιμότητα μεταξύ των τοπικών κινητών συσκευών και ενός δικτυακού δρομολογητή. Όμως, αυτό είναι μόνο ένα τμήμα του γενικότερου συστήματος, που απαιτείται για την κυψέλη. Κάποια από τα βασικά απαραίτητα τμήματα της είναι τα ακόλουθα:
- Το ίδιο το Femtocell.
- Ένας διαδικτυακός δρομολογητής, που δρομολογεί τα δεδομένα να περνάνε από και προς το Femtocell, δια μέσου του δικτύου.
- Μία σύνδεση στο διαδίκτυο.
- Μία πύλη στο δίκτυο πυρήνα του τηλεπικοινωνιακού παρόχου.

Τα βασικά σημεία κλειδιά ενός συστήματος είναι τα Femtocells, που εγκαθίσταται εντός των κτηριακών εγκαταστάσεων του χρήστη, καθώς και η πύλη σύνδεσης στο δίκτυο, που παρέχει συνδεσιμότητα μέσω του διαδικτύου, στο δίκτυο τηλεπικοινωνίας. Τα Femtocells εμφανίζονται στο πρότυπο 3G ασύρματων επικοινωνιών, ως ένα εναλλακτικό δίκτυο συσκευών από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο και μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αν επιτρέπεται, από σχεδόν οποιοδήποτε 3G τηλέφωνο ακόμα, κι αν πρόκειται για διεθνή περιαγωγή χρηστών-επισκεπτών από άλλες χώρες.

Ο διακόπτης φορέα κινητής τηλεφωνίας (**Mobile Switching Center-MSC**) και ο διακόπτης δεδομένων (**Serving GPRS Support node-SGSN**), επίσης, είναι δυνατό να επικοινωνούν δια μέσου της πύλης των **Femtocells** με τον ίδιο τρόπο, όπως άλλες κλήσεις κινητών. Συνεπώς, όλες οι υπηρεσίες, ακόμα και οι αριθμοί τηλεφώνων, η εκτροπή κλήσεων, ο τηλεφωνητής κλπ. είναι δυνατό να λειτουργήσουν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και εμφανίζονται, όπως και παλαιότερα, στον τελικό χρήστη. Η σύνδεση μεταξύ του **Femtocell** και της πύλης του, που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο κρυπτογράφησης **IPsec (Internet Protocol Security)**, το οποίο συμβάλει στο να αποφευχθεί η υποκλοπή και επίσης, ευνοεί στο να επιβεβαιώνεται ότι το ίδιο το **Femtocell** είναι ένα έγκυρο σημείο πρόσβασης.

Εντός του **Femtocell**, υπάρχει πλήρης λειτουργία του σταθμού βάσης κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετες λειτουργίες, όπως η επεξεργασία βάση **RNC**, που παραδοσιακά βρίσκεται στο κέντρο διακόπτη του κινητού. Κάποιες κυψέλες, επίσης, περιέχουν το δίκτυο πυρήνα, έτσι ώστε οι σύνοδοι δεδομένων να είναι δυνατό να διαχειρίζονται τοπικά, χωρίς να είναι απαραίτητο να μεταβάνει κανείς στα κέντρα διακοπής των παρόχων. Οι συναρτήσεις κλειδιά ενσωματώνονται σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα, όπως για παράδειγμα το **BCM61670** από την **Broadcom** ή το **TCI6630** από την **Texas Instruments**. Αυτοί καθώς, επίσης και άλλοι κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων περιγράφουν λεπτομερώς τα διάφορα τμήματα στα σχέδιά τους.

Οι επιπλέον δυνατότητες του **Femtocell** απαιτούν να εγκαθίσταται και να ρυθμίζεται από μόνο του. Αυτό απαιτεί σημαντικό επιπλέον λογισμικό, το οποίο σαρώνει το περιβάλλον, με σκοπό να αποφανθεί για διαθέσιμες συχνότητες, για το επίπεδο ενέργειας και αν υπάρχουν αναρριχώμενοι κώδικες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται. Αυτή η συνεχής διαδικασία προσαρμόζεται για την αλλαγή των συνθηκών εκπομπής, όπως για παράδειγμα, αν τα παράθυρα ανοίγουν σε ένα δωμάτιο, που περιέχει ένα **Femtocell**. Εντός ενός δικτύου παρόχου, οι πύλες των **Femtocell** περιλαμβάνουν μεγάλα πλήθη συνδέσεων **Femtocells** (από 100.000 έως 300.000), τα οποία αποτελούν το πρώτο υψηλής χωρητικότητας **IP** τείχος προστασίας (**IP firewalls**).

Τα **Femtocells** αποτελούν ένα βασικό στοιχείο του μοντέλου επιχειρήσεων για εξέλιξη του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Ενώ λειτουργεί καλά με την πολυπλεξία τύπου **CDMA**, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και με την **LTE** τεχνολογία. Παρόλο, που η **LTE** χρησιμοποιεί γενικά **OFDM** πολυπλεξία για το σήμα, και συνεπώς, απαιτείται περαιτέρω έρευνα, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρήση ή να διατυπωθούν λύσεις να συνδυαστούν οι τεχνολογικές προτάσεις ώστε να βελτιστοποιείται η χρήση, τελικά.

Ένα **Femtocell** είναι η μικρότερη μονάδα ως τώρα, που μπορεί να συναντήσει κανείς σε ένα κυψελωτό δίκτυο. Σχεδιάστηκε για να τοποθετείται σε κάθε σπίτι και επιτρέπει σε άλλες κινητές συσκευές να επικοινωνούν μέσα από ευρυζωνικές συνδέσεις μέσω καλωδίου ή διαφόρων τύπων **DSL**. Τα **Femtocells** λειτουργούν με το ίδιο αδειοδοτούμενο φάσμα, όπως οι **Microcells** και οι **Macrocells**, όμως, είναι δυνατό να καλύψουν μόνο κάποιες δεκάδες μέτρα και να καλύψουν μία μικρή περιοχή εντός της οικίας. Αυτή η νέα πρόταση επιτρέπει να επωφελείται ο πάροχος και από το οικιακό δίκτυο, κάτι που παλαιότερα δεν εξασφάλιζε σημαντικά οφέλη. Τα **Femtocells** καλύπτουν δεκάδες μέτρα, σίγουρα κάτω από εκατοντάδες. Συνήθως θεωρείται ότι είναι ικανά να καλύψουν επαρκώς μέχρι περίπου 100m.

### 3.1.2 Ιστορική Αναδρομή

Αρχικά, το ενδιαφέρον για τη δημιουργία και έρευνα πάνω στις κυψέλες τύπου Femto σημειώθηκε περίπου το 2002, όταν μία ομάδα μηχανικών της διάσημης εταιρείας Motorola, ερευνούσε νέες πιθανές εφαρμογές και μεθόδους, που ήταν δυνατό να εφαρμοστούν στις κινητές επικοινωνίες. Παράλληλα με τη δημιουργία ενός σχεδιαγράμματος κινητής τηλεόρασης, αποφάσισαν να εντάξουν στο σχεδιασμό τους και ένα πολύ μικρό σταθμό βάσης τύπου UMTS.

Το 2004 περίπου, η παραπάνω ιδέα άρχισε να κερδίζει έδαφος και να ερευνάται και από άλλες εταιρείες. Πιο συγκεκριμένα, την εποχή εκείνη ενεργό ρόλο στη συγκεκριμένη προσπάθεια αποκτούν δύο εταιρείες από το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ubiquisys και η 3WayNetworks, οι οποίες δημιουργήθηκαν με στόχο να μελετήσουν την περιοχή των κυψελών αυτών. Η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας ήρθε το 2007, όταν ιδρύθηκε το Femto Forum το μήνα Ιούλιο, με βασικό σκοπό την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας. Συνάμα, με το ρόλο της προώθησης της τεχνολογίας, διαδραμάτισε και ενεργό ρόλο, ως προς την ταχεία διασφάλιση για την έγκαιρη κυκλοφορία επιβεβαιωμένων και υψηλών προτύπων για την τεχνολογία.

Το 2009 επετεύχθη μία τριμερής συνεργασία στον τομέα από το Femto Forum, το 3GPP και το Forum ευρυζωνικότητας ανακοινώνοντας ένα πρότυπο Femtocell, που δημοσιεύεται από το 3GPP. Το πρότυπο περιλαμβάνει τέσσερις κύριες περιοχές, δηλαδή την αρχιτεκτονική του δικτύου, τις παρεμβολές, τη διαχείριση και πρόβλεψη του Femtocell και την ασφάλεια. Το πρότυπο ήταν τμήμα του 3GPP έκδοσης 8 και ανοίγει το δρόμο της λειτουργικότητας του εξοπλισμού και ακολούθως, θέτει τις γραμμές για την ανάπτυξη της οικονομικής κλίμακας τους.

Σύμφωνα με την έρευνα αγοράς για την εταιρεία Informa και το Femto Forum, το Δεκέμβριο του 2010, 18 επιχειρήσεις ξεκίνησαν την εμπορική χρήση Femtocell υπηρεσιών, με ένα σύνολο 30 επιχειρήσεων να δεσμεύεται με βασικό στόχο την περαιτέρω ανάπτυξη.

Μέσα στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι πιο σημαντικές προσπάθειες μέχρι το Δεκέμβριο του 2010, ήταν από την Sprint Nextel, τη Verizon Wireless και την AT & T Wireless. Η Sprint ξεκίνησε το τρίτο τρίμηνο του 2007 ως μια περιορισμένη εγκατάσταση (Denver και Indianapolis) από ένα σπίτι, με βάση τα Femtocell, που χτίστηκε από τη Samsung Electronics και ονομάζεται Sprint Airave. Αυτό λειτουργεί με οποιαδήποτε συσκευή Sprint. Από τις 17 Αυγούστου 2008, η Airave επεκτάθηκε εκτός αυτού σε εθνική βάση. Άλλοι φορείς, στις Ηνωμένες Πολιτείες, επίσης, ακολούθησαν το παράδειγμά της. Τον Ιανουάριο του 2009, η Verizon επέκτεινε το ασύρματο δίκτυο της, με βάση το ίδιο σχέδιο με το σύστημα Sprint της Samsung.

Στα τέλη Μαρτίου του 2010, η AT & T ανακοίνωσε εθνική ή και διεθνή ακόμα, ανάπτυξη των 3G Small cell της, η οποία ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2010. Ο εξοπλισμός, που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε από τη Cisco Systems και την Ip.access, και ήταν το πρώτο 3G femtocell στις ΗΠΑ, που υποστηρίζει τόσο φωνή όσο και δεδομένα HSPA. Τόσο η Sprint και η Verizon αναβαθμίστηκαν σε 3G CDMA femtocells, κατά τη διάρκεια του 2010, με ικανότητα για περισσότερες ταυτόχρονες κλήσεις και πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων.

Στο τέλος του 2011, οι αποστολές Femtocell είχαν φτάσει περίπου τα 2 εκατομμύρια μονάδες, τα οποία εν γένει αναπτύσσονταν σε ετήσια βάση, και η αγορά αναμένεται να αναπτυχθεί ταχέως με την ύπαρξη διακριτών ειδών Femtocell για τους

καταναλωτές, τις επιχειρήσεις, και για τους παρόχους. Οι πωλήσεις Femtocell εκτιμάται ότι ανήλθαν σε σχεδόν 2 εκατομμύρια, στο τέλος του 2010. Η εταιρεία ερευνών Berg Insight εκτιμά ότι οι μεταφορές αυξήθηκαν σε 12 εκατομμύρια μονάδες σε όλο τον κόσμο για το 2014.

Στην Ασία, αρκετοί πάροχοι υπηρεσιών έχουν εφαρμόσει τα Femtocell σε διάφορα δίκτυα. Στην Ιαπωνία, η SoftBank ξεκίνησε την εδραίωση της υπηρεσίας του 3G Femtocell, τον Ιανουάριο του 2009, με τις συσκευές, που παρέχονται από τη Ubiquisys. Κατά το ίδιο έτος, ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη Femtocells, ώστε να δύναται να αποδώσει υπηρεσίες εξωτερικά σε αγροτικές περιοχές, όπου η υπάρχουσα κάλυψη είναι περιορισμένη. Τον Μάιο του 2010, η SoftBank Mobile ξεκίνησε την πρώτη ελεύθερη Femtocell προσφορά, παρέχοντας ανοιχτή πρόσβαση Femtocells, δωρεάν σε οικιακούς και εταιρικούς πελάτες της. Στη Σιγκαπούρη, η StarHub επεκτάθηκε στην πρώτη διεθνή εμπορική 3G Femtocell προσπάθεια, αυξάνοντας τις παρεχόμενες υπηρεσίες της, με συσκευές της Huawei Technologies, αν και δεν είχε επιτυχία το εγχείρημα, αφού οι πωλήσεις ήταν χαμηλές. Το 2009, η Κίνα με την Unicom, ανακοίνωσε το δικό της δίκτυο Femtocell. Η NTT DoCoMo, στην Ιαπωνία ξεκίνησε τη δική της υπηρεσία Femtocell, στις 10 Νοεμβρίου 2009.

Τον Ιούλιο του 2009, η Vodafone κυκλοφόρησε το πρώτο δίκτυο Femtocell στην Ευρώπη. Η πρόσβαση στην πύλη της Vodafone, παρέχεται από την Alcatel-Lucent. Αυτή η προσπάθεια μετονομάστηκε ως SureSignal τον Ιανουάριο του 2010, μετά την οποία, η Vodafone ξεκίνησε την παροχή υπηρεσιών στην Ισπανία, την Ελλάδα, τη Νέα Ζηλανδία, την Ιταλία, την Ιρλανδία, την Ουγγαρία και τις Κάτω Χώρες. Τέλος, άλλες επιχειρήσεις στην Ευρώπη έχουν ακολουθήσει παρόμοια την πορεία εφεξής.

### 3.1.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Οι μικρό-κυψέλες είναι μία τεχνολογία, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο από τους παρόχους, όσο και από τους πολίτες. Παρόλο, που περιλαμβάνουν σημαντικά πλεονεκτήματα και είναι συσκευές χαμηλού κόστους, εντούτοις, εμφανίζουν και σημαντικά προβλήματα και μειονεκτήματα.

#### Πλεονεκτήματα

Τα Femtocells περιλαμβάνουν σημαντικά πλεονεκτήματα, που ωθούν στην ευρεία υιοθέτησή τους τόσο από τους παρόχους, όσο και από τους απλούς χρήστες. Μερικά, από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της υλοποίησης αυτής, συνοψίζονται πιο κάτω:

- Η αυξημένη χωρητικότητα, που παρέχεται και η οποία παραμένει σταθερή, ενόσω κανείς βρίσκεται στο σπίτι ή το γραφείο.
- Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων.
- Καλύτερη εμπειρία χρήσης και παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών (QOS).
- Οικονομική λύση με καλύτερη εκμετάλλευση του υπάρχοντος ευρυζωνικού δικτύου.

- Ευκαιρία για νέες πηγές εισοδήματος λόγω εξοικονόμησης χρημάτων από τους χρήστες ή ακόμα και της παροχής σύνδεσης σε άλλους γειτονικούς χρήστες με κάποια χρηματική αποζημίωση.
- Μεγαλύτερη τοπικότητα υπηρεσιών, αφού το σύστημα μεταφέρεται από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο στην μικρή αυτή κυψέλη.
- Η ελάττωση και η αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας από το δίκτυο **Macrocell** στο επίπεδο **Femtocell**.
- Αξιοποίηση της χωρητικότητας εκεί, που είναι απαραίτητη κι όχι σε άλλα σημεία, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η μη αξιοποίηση του συνόλου του διαθέσιμου εύρους ζώνης.
- Η χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος δίνει μεγαλύτερη ζωή στην μπαταρία του κινητού, κάτι, που επιδιώκεται όλο και περισσότερο από τους χρήστες και τους κατασκευαστές τηλεφώνων.
- Ένα κινητό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί, όπως τα σταθερά τηλέφωνα και αντίστροφα. Είναι πιθανό στο μέλλον να στέλνει κανείς γραπτά μηνύματα και σε σταθερά τηλέφωνα.
- Ένα **Femtocell** περιορίζει το πλήθος των ατόμων-χρηστών, που συνδέονται, αφού μπορεί κανείς να δημιουργήσει ένα προαποφασισμένο **group**.
- Ευκαιρία για **LIPA (Local Ip Access)** και **SIPTO (Selected Ip Traffic Offload)**.
- Εκθετική αύξηση της κίνησης βίντεο. (Hamidouche, 2016)
- Κατανομημένη κρυφή μνήμη και διαχείριση φάσματος. (Hamidouche, 2016)
- Δυνατότητα να αποθηκεύεται σε μικρούς και τοπικούς σταθμούς δημοφιλές περιεχόμενο χρηστών, ώστε να είναι εύκολα προσβάσιμο. (Hamidouche, 2016)

#### Μειονεκτήματα

Τα πιο θεμελιώδη μειονεκτήματα, τα οποία αυτά εμφανίζουν και ενισχύουν την θέση, που προβάλλουν οι πολέμιοι τους, συνοψίζονται πιο κάτω:

- Τα **Femtocells** χρησιμοποιούν ευρυζωνικές συνδέσεις, που ενδέχεται να χρησιμοποιούνται και για άλλες εφαρμογές, όπως το **Video streaming**.
- Ενδέχεται να σημειώνονται προβλήματα, όταν διαφέρει ο πάροχος της υπηρεσίας από τον πάροχο του κινητού δικτύου, αφού δε διασφαλίζεται η ποιότητα υπηρεσίας (**QOS**).
- Σημειώνεται παρεμβολή μεταξύ διαφορετικών **Femtocells**, αλλά και μεταξύ **Femtocells** και **Macrocells**, ειδικά, αν υπάρχει εγκατεστημένη υποδομή στο δίκτυο.

Μέσα στα μειονεκτήματα, που αναφέρονται, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για την ευρεία χρήση και εγκατάσταση τους πρέπει να επιλυθεί πλήθος σημαντικών ζητημάτων σχεδιασμού και εγκατάστασης όπως:

- Αρχικά, πρέπει να επιλυθούν τα ζητήματα παρεμβολής. Υπάρχει μόνο περιορισμένο φάσμα, στο οποίο ένα κυψελωτό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει. Κάποιοι πάροχοι κινητών δικτύων 3G, για παράδειγμα, μπορεί να έχουν μόνο ένα κανάλι σε μερικά μέρη. Συνεπώς, είναι απαραίτητο ότι οι κυψέλες είναι ικανές να λειτουργούν εντός του φυσιολογικού φάσματος διαμοιραζόμενες σε πολλούς άλλους σταθμούς βάσης. Υπάρχει ένας αριθμός τρόπων, σύμφωνα με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί το να μειωθεί η παρεμβολή των συστημάτων, μέσω σχεδιασμού φάσματος αν είναι δυνατό.
- Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητη η επίλυση ζητημάτων σχετικών με το φάσμα, διότι, όταν είναι απαραίτητη μεγάλη ποσότητα δεδομένων, χρειάζεται διαφορετικός χειρισμός ως προς το φάσμα. Έτσι, οργανώνοντας κατάλληλα το διαθέσιμο φάσμα, ώστε να χρησιμοποιείται από μεγάλο πλήθος κυψελών χρειάζεται προσοχή, ειδικά όταν απαιτούνται κάποια μονά κανάλια με κύριους σταθμούς βάσης.
- Επιπλέον, είναι αναγκαίο να βρεθεί λύση για τα ζητήματα κυκλοφορίας των **Femtocells**, διότι λειτουργούν σε αδειοδοτούμενο φάσμα, άρα, χρειάζονται έγκριση κυκλοφορίας. Το φάσμα και η εκπομπή ποικίλουν από χώρα σε χώρα και άρα, οι διάφορες ρυθμίσεις ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά παγκοσμίως. Ενδέχεται να απαιτείται διεθνής συμφωνία και επικύρωση, διότι ιδιώτες πιθανόν μεταφέρουν τις κυψέλες σε διάφορες χώρες. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι παρέχουν μία λύση κόστους αρκετά αποδοτική, κατά την οποία, μπορούν να βελτιώσουν την κάλυψη και να κερδίσουν επιπλέον εισόδημα από την πρόβλεψη για παροχή επιπλέον υπηρεσιών. Τοιουτοτρόπως, γίνεται αντιληπτό ότι στο μέλλον αναμένεται να πρωταγωνιστήσουν στον τομέα αυτές οι τεχνολογίες.
- Εξίσου, είναι δυνατό να εγείρονται ζητήματα υγείας από τα **Femtocells**, διότι σημειώνονται κίνδυνοι για την υγεία και την ασφάλεια των πολιτών, λόγω της ραδιοεκπομπής. Εφόσον, ένα **Femtocell** είναι ένας κυψελωτός σταθμός βάσης είναι δυνατόν να εγείρονται ανησυχίες για τα επίπεδα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, που μεταδίδει. Όμως, τα επίπεδα ισχύος, που εκπέμπονται από τα **Femtocells** είναι μικρά, σχετικά σε κοντινά επίπεδα, με τα αντίστοιχα σημεία πρόσβασης των 802.11 πρωτοκόλλων, που υπάρχουν σε πολλά σπίτια. Ως αποτέλεσμα, δεν είναι επιβεβαιωμένη η αντίληψη, γενικά, ότι υφίσταται ανησυχία λόγω κινδύνων για τη δημόσια υγεία, εφόσον, είναι σχετικά όμοιες με τις μέχρι τώρα υιοθετούμενες λύσεις.

## 3.2 Distributed Antenna Systems (DAS)

Ένα καταναμημένο σύστημα κεραίας, **Distributed Antenna System** ή **DAS**, είναι ένα δίκτυο, που δομείται στο χώρο και χωρίζει κόμβους κεραίας, που είναι συνδεδεμένοι με μια κοινή πηγή μέσω ενός μέσου μεταφοράς, που παρέχει ασύρματη

υπηρεσία σε μια γεωγραφική περιοχή, δηλαδή ένα μεγάλο χώρο γεωγραφικά καθορισμένο ή μία κτηριακή εγκατάσταση, όπως, για παράδειγμα ένα μεγάλο κτήριο, γραφείο, νοσοκομείο, βιβλιοθήκη, στάδιο, γήπεδο, συνέδριο κλπ. Ένα καταναμεμένο σύστημα κεραίας μπορεί να αναπτυχθεί σε εσωτερικούς χώρους (**indoors-iDAS**) ή σε εξωτερικούς χώρους (**outdoors-oDAS**) και στις δύο, όμως, περιπτώσεις η βασική ιδέα είναι η ίδια.

Η ιδέα είναι να διαχωριστεί η μεταδιδόμενη ισχύς, μεταξύ των διαφόρων στοιχείων κεραίας, και με μορφή καταναμεμένη στο χώρο, να παρέχουν κάλυψη πάνω από την ίδια περιοχή ως μία ενιαία κεραία, αλλά με μειωμένη συνολική ισχύ και βελτιωμένη αξιοπιστία. Μία ενιαία κεραία, που ακτινοβολεί σε υψηλή ισχύ αντικαθίσταται από μία ομάδα κεραιών χαμηλής ισχύος για να καλύψει την ίδια περιοχή. Η ιδέα αυτή, περιγράφεται σε ένα έγγραφο από τον Saleh το 1987. Αυτές οι κεραιές έχουν πρόσφατα χρησιμοποιηθεί από διάφορους φορείς παροχής υπηρεσιών σε πολλές περιοχές γύρω από τις Ηνωμένες Πολιτείες. Το DAS, συχνά, χρησιμοποιείται σε σενάρια, όπου εναλλάσσονται τεχνολογίες και είναι ανέφικτο λόγω της μορφολογίας τους να οριοθετηθούν σε συγκεκριμένα όρια. Η ιδέα λειτουργεί, επειδή, λιγότερη ενέργεια σπαταλιέται, υπερνικούνται οι απώλειες διείσδυσης και σκίασης και επειδή, ένα κανάλι **Line-Of-Sight (LOS)** υπάρχει, οδηγώντας σε μειωμένα βάρη, συνεπώς, δεν ξεθωριάζει και αποφεύγεται η εξάπλωση της καθυστέρησης.

Ένα καταναμεμένο σύστημα κεραιών μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση παθητικών διαιρετών και τροφοδοτών, ή με ενισχυτές δραστικής επανάληψης, που μπορεί να συμπεριληφθούν για να ξεπεραστούν οι απώλειες τροφοδοσίας. Σε κάποια συστήματα, μπορεί να είναι επιθυμητό να εισαχθούν οι καθυστερήσεις μεταξύ των στοιχείων της κεραίας. Αυτό αυξάνει τεχνητά την επιβράδυνση του ρυθμού εξάπλωσης σε περιοχές των επικαλυπτόμενων καλύψεων, επιτρέποντας τη βελτίωση της ποιότητας μέσω της ποικιλομορφίας του χρόνου. (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

Για τους προαναφερθέντες λόγους είναι σημαντικό να περιγραφεί το DAS, με σκοπό να φανούν τα βασικά στοιχεία, που σχετίζονται με την τεχνολογία και την αρχιτεκτονική του, το ιστορικό πλαίσιο ανάπτυξής του, τα σημαντικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά του, καθώς και τα διάφορα είδη DAS, που υπάρχουν. Τέλος, είναι σημαντικό να περιγραφεί το μοντέλο, που σχετίζεται με το DAS.

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά του DAS δικτύου, με ποιά μέσα μετάδοσης είναι δυνατό να σχετίζονται, πού ακριβώς χρησιμοποιούνται σε ποιά τμήματα, σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο. Για ποιό λόγο αποτελούν εναλλακτική λύση σε σχέση με τα **Macrocells**. Επίσης, πώς αλληλοεπιδρούν με τα 802.11 πρωτόκολλα. Εν συνεχεία, συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του DAS δικτύου, δηλαδή το εύρος ζώνης του, η απόσταση, που καλύπτει καθώς και πόσες ταυτόχρονες συνδέσεις είναι δυνατό να υποστηρίξονται.

Εάν μια δεδομένη περιοχή καλύπτεται από πολλά καταναμεμένα στοιχεία κεραίας αντί για μία ενιαία κεραία, τότε η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς μειώνεται κατά περίπου ένα συντελεστή  $N1-n / 2$  και η ισχύς ανά κεραία μειώνεται κατά ένα συντελεστή  $Nn / 2$ , όπου μια απλή δύναμη μοντέλο απώλειας όδευσης με εκθέτη απώλειας όδευσης  $n$ . Ως εναλλακτική λύση, η συνολική καλυμμένη επιφάνεια θα μπορούσε να παραταθεί για ένα δεδομένο όριο της ενεργούς ακτινοβολούμενης ισχύος, η οποία μπορεί να είναι σημαντική για να εξασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα όρια ασφαλείας για την ακτινοβολία στο ανθρώπινο σώμα.

Χρησιμοποιώντας ένα καταναμεμένο σύστημα κεραίας για τη δημιουργία ενός

χώρου ασύρματης κάλυψης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσει την τεχνική αυτή για να διαδώσει εσωτερικά το WiFi για εμπορικές χρήσεις. Εκτιμάται ότι μόνο περίπου 5% των εμπορικών WiFi χρησιμοποιούν ένα καταναμημένο σύστημα κεραίας. Κάτι τέτοιο γίνεται για λόγους κόστους. Αφού όταν αναλυθεί πιο κάτω το κόστος θα κατανοηθεί ότι για περιορισμένους χώρους το κόστος του DAS είναι αυξημένο. Τα καταναμημένα συστήματα κεραίας μπορεί να τοποθετηθούν στο εσωτερικό των κτηρίων για την αύξηση ασύρματων σημάτων στο εσωτερικό τους.

Συχνά, τοποθετούνται μέσα σε μεγάλες δομές, όπως γήπεδα, σε μία εταιρική έδρα, σε εμπορικό κέντρο, σε κέντρο μίας πόλης, σε νοσοκομεία, σε πανεπιστήμια και σε άλλες περιοχές, που έχουν ανάγκη από μεγάλη κάλυψη δεδομένων μέσα στην ημέρα.

### 3.2.1 Δομή

Κάθε DAS σύστημα, όπως άλλα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από ένα πλήθος κυψελών, αποτελείται από ένα πλήθος κεραίων, που υπάρχουν στο δίκτυο και κατανέμουν το εύρος ζώνης, ούτως ώστε, να διαμοιράζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου και να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι διάφοροι χρήστες, που υπάρχουν σταθεροί ή κινούμενοι στη συγκεκριμένη περιοχή, που έχει καθοριστεί να εξυπηρετείται από αυτό, κάθε χρονική στιγμή.

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

Ένα δίκτυο DAS αποτελείται από 3 βασικά συστατικά: (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

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

Συχνά, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του DAS δικτύου και το περιβάλλον στο οποίο υλοποιείται, οι κόμβοι του ενδέχεται να περιέχουν επιπλέον εξοπλισμό στις κεραίες, όπως για παράδειγμα ενισχυτές, κεφαλές, μετατροπείς σήματος και παροχείς ισχύος, αλλά και ειδικό υποστηρικτικό εξοπλισμό για την εγκατάσταση, ή άλλον δευτερεύων εξοπλισμό, όπως συναγερμούς, αισθητήρες κλπ., που ενδέχεται να

διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, εντούτοις αυξάνουν το κόστος της υιοθέτησης του DAS.

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

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

Τα σύγχρονα DAS είναι, συνήθως, συστήματα, τα οποία υλοποιούνται με μέσα μετάδοσης τύπου οπτικών ραδιοσυχνοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι ο βασικός εξοπλισμός μετατρέπει σήματα **RF (RadioFrequency)**, που παράγονται από έναν τηλεπικοινωνιακό δέκτη σε οπτικά σήματα, που εκπέμπονται δια μέσου οπτικής ίνας στους DAS κόμβους, όπου τα οπτικά σήματα μετατρέπονται ξανά σε **RF**, με σκοπό να μεταδίδονται στην απομακρυσμένη κεραία. Άλλες λύσεις, που χρησιμοποιούνται από τα **LTE** ή από **WiMax**, χρησιμοποιούν έναν οπτικό οδηγό, που καταλήγει σε ένα **RF** σύστημα. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, η οπτική έξοδος οδηγεί το φως μέσα στην οπτική ίνα σε απομακρυσμένες περιοχές και τελικά, για πρώτη φορά το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε **RF**. Η μεταφορά του σήματος από τον ασύρματο πάροχο μπορεί να γίνει σε πολύ μακρινές αποστάσεις ανάλογα φυσικά και με τον εκάστοτε σχεδιασμό του συστήματος, χάρη στην οπτική ίνα.

Γενικά, πλήθος πολιτών επιδιώκει υπηρεσίες υψηλής χωρητικότητας, αφού έχουν στην κατοχή τους ψηφιακές συσκευές, όπως έξυπνα τηλέφωνα, υπολογιστές και ταμπλέτες. Τα DAS δίκτυα εφαρμόζονται ως ένα μέσο μεγάλου φόρτου δεδομένων, με αποτέλεσμα, να είναι απαραίτητο να εξαπλωθούν τα δεδομένα στο σύνολο της χωρητικότητας, ώστε να παρέχεται περισσότερο ανομοιόμορφη κάλυψη. Τα πιο πολλά DAS δίκτυα, δε γνωρίζουν την τεχνολογία, που θα συνυπάρξει μαζί τους στο συνολικό δίκτυο. Άρα, οι λύσεις επικοινωνίας με χρήση DAS είναι ιδιαίτερα ελκυστικές στον ασύρματο πάροχο, που διατηρεί την άδεια για το φάσμα εκπομπής **RF** ανάμεσα σε πολλές συχνοτικές ζώνες και χρησιμοποιεί πολλαπλές τεχνολογίες μετάδοσης, ακόμα και σε όσους παρόχους, δεν έχουν εντάξει ακόμα τα **4G** δίκτυα και επιδιώκουν να το πράξουν στα επόμενα έτη. Ένα DAS δίκτυο ενδέχεται να υλοποιείται και να ανήκει σε έναν συγκεκριμένο ασύρματο πάροχο, σε ένα τρίτο ουδέτερο DAS δίκτυο του παρόχου υπηρεσίας, ή σε ένα πελάτη επιχειρήσεων

ή σε έναν ιδιοκτήτη κτηριακών εγκαταστάσεων.

Όπως, σημειώνεται πιο πάνω, ένα δίκτυο DAS μπορεί να υλοποιείται και εντός και εκτός ενός κτηρίου. Εσωτερικά, η υλοποιούμενη τεχνολογία υπάρχει σε χώρους, όπου πλήθος ανθρώπων συνωστιζονται, όπως στάδια, γυμναστήρια, συνέδρια, βιβλιοθήκες και διάφορες άλλες μεγάλες εγκαταστάσεις. Τυπικά, αυτά τα μέρη δεν είναι δυνατό να εξυπηρετηθούν από Macrocells, που υπάρχουν εκτός του κτηρίου. Τα εξωτερικά DAS δίκτυα έχουν υλοποιηθεί σε συγκεκριμένες τοποθεσίες μέσα σε μία περιοχή, που ήδη έχει κάλυψη από Macrocells, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα. Κάποια άλλα δίκτυα DAS ενδέχεται να υποστηρίζουν ακόμα και το 802.11 πρότυπο, το οποίο χρησιμοποιείται συνδυαστικά, με σκοπό να ελαττωθεί η κίνηση από τα Macrocells συσσωρευμένης χωρητικότητας.

Ένας εξωτερικός DAS κόμβος μπορεί να υποστηρίξει ως και 16 συχνοτικές ζώνες σε μία απόσταση 0.80467 km και μπορεί να υποστηρίξει 300 ταυτόχρονες συνδέσεις. Οι DAS κόμβοι συνορεύουν στην υπάρχουσα υποδομή με τους στύλους χρησιμότητας και τα φανάρια. Ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων και τη χωρητικότητα του ασύρματου μέσου, που συνυπάρχει στο δίκτυο, είναι δυνατό η αρχιτεκτονική να υποστηρίξει την κάλυψη μεγάλης γεωγραφικά περιοχής και να διαχειρίζεται χιλιάδες ταυτόχρονες συνδέσεις χρηστών. Όπως, ένα εξωτερικό σύστημα, το εσωτερικό DAS μπορεί να υποστηρίξει ως και 16 συχνοτικές ζώνες. Παρόλου, που η κάλυψη ποικίλει το DAS μπορεί να καλύπτει από 464,52m έως 2322,58m. Για τεράστια κτήρια μπορούν να τοποθετηθούν περισσότεροι DAS κόμβοι ανά όροφο, αυξάνοντας, παράλληλα αισθητά το κόστος της υλοποίησης.

### 3.2.2 Ιστορική Αναδρομή

Το κατανεμημένο σύστημα κεραίας προτάθηκε το 1987 από τον Saleh. Πριν από την εφεύρεση του Saleh χρησιμοποιήθηκαν πομποί τούνελ και διαρροές τροφοδοτών για να παρέχουν ραδιοφωνική λήψη σε σήραγγες, ορυχεία, στις γραμμές του μετρό, και άλλους εσωτερικούς και υπόγειους χώρους. Η τεχνολογία πίσω από το DAS, συνεπώς, δεν είναι νέα, και οι πάροχοι την έχουν χρησιμοποιήσει για χρόνια. Αλλά τον τελευταίο καιρό, λόγω του αυξανόμενου πλήθους απαιτήσεων, στα κινητά δίκτυα δεδομένων από την πλευρά των συνδρομητών, τα δίκτυα έχουν μετατραπεί σε DAS ως μια αναγκαία ώθηση στις δυνατότητες εξυπηρέτησης αναγκών στο δίκτυο.

Ιστορικές ρυθμιστικές προκλήσεις προκύπτουν σε ομοσπονδιακό, πολιτειακό και δημοτικό επίπεδο. Ωστόσο, οι κανονισμοί εκδίδονται από το κράτος και σε ομοσπονδιακό επίπεδο. Οι Πανεπιστημιακές εργασίες αντιμετωπίζουν το παραπάνω ζήτημα. Άλλες πηγές της βιομηχανίας, όπως το DAS forum, αντιμετωπίζουν, επίσης, ρυθμιστικά θέματα σε συνέδρια τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι και ό,τι δήλωσε ο Dave Cutrer, ο διευθύνων σύμβουλος της NextG, πως «Μέχρι τα τελευταία δύο χρόνια, απευθυνόταν σε μια εξειδικευμένη αγορά» και ότι όσον αφορά στον εξωτερικό πάροχο του DAS: «Οι πάροχοι θα χρησιμοποιήσετε την τεχνολογία αυτή για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων.» Εφόσον, δηλαδή δομείται το νομικό και ρυθμιστικό πλαίσιο δίνεται η δυναμική ανάπτυξης και υιοθέτησής της τεχνολογίας από όσο το δυνατό μεγαλύτερο μέρος της δικτυακής κοινότητας.

Η αρχή για την ευρεία χρήση έγινε στο μετρό του Michigan. Η πρόσβαση εκεί ρυθμίζεται με βάση το σταθερό δίκτυο υποδομής με τρόπο, που υπόκειται σε κρατική ρύθμιση δια μέσου διοικητικής απόφασης. Εν συνεχεία, στο Ohio η

επιτροπή κοινής ωφέλειας έχει εκδώσει απόφαση για την οριθή χρησιμότητά του κατά τον Αύγουστο του 2014. Όλα τα πιο πάνω, όπως γίνεται αντιληπτό είναι μέρη, που απαιτούν υψηλή κάλυψη και καλείται κανείς να λύσει ζητήματα χωρητικότητας στο δίκτυο, εφόσον, υπάρχουν πολλοί διακινούμενοι σε έναν σιδηροδρομικό σταθμό κάθε πρωί και απόγευμα, ειδικά, όταν, δηλαδή, οι άνθρωποι εργάζονται και ξεκινούν να μετακινούνται ή γυρνάνε από τις εργασίες στην οικογενειακή εστία.

Σήμερα, οι πιο σημαντικοί παράγοντες, που υπάρχουν στον τομέα αριθμούνται οκτώ ή εννέα και δραστηριοποιούνται σημαντικά στην αγορά του **DAS**, περιλαμβανομένων των **ADC**, **NextG**, **Newpath Networks** και άλλες μεγαλύτερες επιχειρήσεις, όπως η **American Tower** και η **Crown Castle**. Όλες αυτές οι επιχειρήσεις προσπαθούν να καλύψουν τις ανάγκες των φορέων, που θέλουν να πάρουν το σήμα τους πιο κοντά στο σημείο, όπου πραγματικά είναι οι χρήστες και να αποδώσουν αδιάλειπτες υπηρεσίες.

Η **Connie Durcsak** δήλωσε ότι «Το **DAS** χρησιμοποιείται κυρίως ως “μια χειρουργική λύση” για τη βελτίωση της κάλυψης σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αλλά, η μηχανική του δικτύου για την ενίσχυση της κάλυψης του γίνεται εξίσου σημαντική. Η συγκεκριμένη ανάγκη έχει εξελιχθεί από την ανάγκη ανάπτυξης σε μια ανάγκη μηχανικής διαχείρισης», δήλωσε η **Durcsak**, η οποία είναι εκτελεστική διευθύντρια του Φόρουμ **DAS** μέσα στην **PCIA**, στον ασύρματο κλάδο των υποδομών της εμπορικής ομάδας της επιχείρησης. «Η αγορά του **DAS** είναι ακόμα εν τη γενέσει της, και δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία σχετικά με το πόσο μεγάλη είναι». Η **Durcsak**, είπε ακόμα, ότι στην **PCIA** δεν παρακολουθούνται ακριβή αριθμητικά στοιχεία, επειδή, είναι δύσκολο να παρακολουθούνται οι διαφορές μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών συστημάτων **DAS**. Ωστόσο, πρόσθεσε ότι η βιομηχανία πρόκειται «πιθανώς να εξελιχθεί ραγδαία.»

Τέλος, ο **Cutrer** στέλεχος του **NextG** είπε ότι η αγορά για το υπαίθριο **DAS** είναι πιθανώς, μια αγορά \$500 εκατομμυρίων. Ο **Tony Lefebvre**, από την άλλη, διευθυντής της **ADC**, για τη διαχείριση προϊόντων για προϊόντα **DAS** εξωτερικού χώρου, δήλωσε ότι η αγορά είναι κατά πάσα πιθανότητα μεταξύ \$400 εκατομμυρίων και \$450 εκατομμυρίων για τα **DAS** εξωτερικού χώρου.

Από τα παραπάνω παραδείγματα, που απηγούν τα λόγια σημαντικών ανθρώπων της αγοράς, καθίσταται σαφές ότι μία λύση, που προτάθηκε για πρώτη φορά το 1987 δεν είχε κερδίσει σημαντικό έδαφος, διότι οι δικτυακές ανάγκες ως τώρα, δεν ήταν τόσο αυξημένες, ώστε να σημειωθεί η απαραίτητη ώθηση και να ξεπεραστεί το νομικό κενό, που υπήρχε, αλλά και η υψηλή οικονομική τιμή του **DAS**. Από το παρελθόν έτος, παρατηρείται μία στροφή προς την τεχνολογία αυτή, ειδικά με την αναμονή για την έλευση της **5G** τεχνολογίας. Ακόμα, σημειώνονται σημαντικές προσπάθειες ένταξης της σε δίκτυα υψηλών απαιτήσεων σε εύρος και χωρητικότητα, όπως στα παραδείγματα του **Michigan** και του **Ohio**.

Συνοψίζοντας, παρατηρώντας τον απόηχο των δηλώσεων σημαντικών στελεχών σε εταιρείες γίνεται κατανοητό ότι στα επίπεδα της αμερικανικής οικονομίας θα δαπανηθούν μεγάλα ποσά για την αξιοποίηση της τεχνολογίας και την παράκαμψη προβλημάτων σχετικών με τα δίκτυα, που ήδη υπάρχουν. Ενώ, τέλος, από τις τελευταίες δηλώσεις κατανοείται ότι ενώ, το **DAS** θα είναι μία επικερδής αγορά, δεν έχουν καθοριστεί ακόμα, ούτε τα οικονομικά όρια, ούτε τα οικονομικά κέρδη. Αναμένεται, λοιπόν, το ιστορικό μελλοντικό πλαίσιο του **DAS** να είναι λαμπρό και να υιοθετηθεί από πολλούς παρόχους.

### 3.2.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία DAS είναι σημαντική και μπορεί να προσδώσει σημαντικά πλεονεκτήματα στις τηλεπικοινωνίες, τα οποία αν αξιοποιηθούν καταλλήλως είναι δυνατό να ικανοποιήσουν απαιτήσεις της πέμπτης γενιάς. Κάθε τεχνολογία περιλαμβάνει σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία είναι πιθανό να δημιουργούν δυσπιστία στην αγορά ή να δημιουργούν νέα προβλήματα συγκριτικά με αυτά που επιλύουν. Είναι κατά συνέπεια, υψίστης σημασίας να σημειωθούν τα πιο βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στον τομέα.

#### Πλεονεκτήματα

Τα DAS συστήματα είναι πολύ σημαντικά, διότι περιλαμβάνουν θεμελιώδη πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες λύσεις, οι οποίες καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά για τους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, καθώς και για τους χρήστες. Ένα DAS περιλαμβάνει πλεονεκτήματα, μερικά από τα πιο σημαντικά συνοψίζονται παρακάτω:

- Ορίζει υψηλότερη κάλυψη.
- Ένα DAS επιτρέπει στον πάροχο πρόσβαση στην κυψέλη σε όλες τις εφαρμογές.
- Το DAS εξαλείφει τα νεκρά σημεία κάλυψης στα κτίρια.
- Το DAS είναι Carrier Agnostic, δηλαδή δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζει κάποιον συγκεκριμένο πάροχο ή τεχνολογία, που λειτουργεί συνδυαστικά.
- Το DAS παρέχει ίδια κάλυψη χρησιμοποιώντας χαμηλότερη συνολική ισχύ.
- Αυξάνει το εσωτερικό σήμα σε όλους τους τομείς εντός της εμβέλειας του DAS (αποφεύγονται οι χαμένες κλήσεις).
- Προσφέρει υπεραστική συνδεσιμότητα υψηλής συχνότητας.
- Κυμαίνονται από 10.000  $ft^2$  έως εκατομμύρια  $ft^2$ .
- Είναι εύκολη η προσθήκη, επιπλέον, χωρητικότητας με τη σύνδεση με τον κεντρικό κόμβο.
- Εξαλείφει την ανάγκη για έναν πύργο και συμβατικές κεραίες.
- Μεμονωμένες κεραίες δεν χρειάζεται να είναι τόσο ψηλά όσο μια ενιαία κεραία για ισοδύναμη κάλυψη.

#### Μειονεκτήματα

Από την άλλη μεριά, η χρήση ενός DAS περιλαμβάνει μεγάλο πλήθος μειονεκτημάτων, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να χρησιμοποιούνται σε κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές. Μερικά από τα προβλήματα, που επιφέρει αναλύονται πιο κάτω:

- Το υψηλότερο κόστος, ως αποτέλεσμα των πρόσθετων υποδομών, που απαιτούνται για την υλοποίηση του. Τα δίκτυα απαιτούν υψηλά επενδυτικά κεφάλαια, λόγω του σχεδιασμού, της εγκατάστασης και της διατήρησης πολλαπλών κόμβων και εγκατάστασης καλωδίωσης οπτικής ίνας.
- Η πιθανά μεγαλύτερη οπτική επίδραση για μερικές εφαρμογές, ως αποτέλεσμα του μεγαλύτερου αριθμού των κεραιών, αν και είναι πιθανό να είναι πολύ χαμηλότερη σε ύψος.
- Ο σχεδιασμός των **DAS** είναι διαφορετικός σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα και χρειάζεται ιδιαίτερη διαχείριση.
- Οι μηχανικοί σχεδιασμού πρέπει να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένοι στα διάφορα είδη δικτύου και ιδιαίτερα στο **DAS**, καθώς, σε αντίθεση με τα συμβατικά κυψελωτά συστήματα η εγκατάστασή του απαιτεί γνώσεις δικτύων και επικοινωνιών.

Επίσης, όσον αφορά σε σχεδιαστικά, πρακτικά, νομικά, κοινωνικά, περιβαλλοντικά και θέματα υγείας εμφανίζονται σημαντικές προκλήσεις. Μερικά από τα οποία είναι τα παρακάτω:

- Ποιές είναι οι ανάγκες του δικτύου, καθώς και πώς αξιολογούνται αυτές;
- Πώς θα πραγματοποιηθεί ο συντονισμός των ενδιαφερόμενων μερών;
- Με ποιόν τρόπο θα οριστούν οι απαιτούμενες υποδομές;
- Την πιθανή ανάπτυξη του προϋπολογισμού για μία ασύρματη επικοινωνία.
- Τη χαρτογράφηση της μετάδοσης τύπου **RF**.
- Τις απαραίτητες προδιαγραφές, που πρέπει να καλύπτει ο εξοπλισμός.
- Την υλοποίηση νομοσχεδίου για τον ορισμό των υλικών.
- Αποφάσεις σχετικές με την καλωδίωση χαμηλής τάσης και εγκατάσταση μέσωσ μετάδοσης.
- Την εγκατάσταση συστήματος κεραιάς.
- Τη βελτιστοποίηση του συστήματος, την πραγματοποίηση δοκιμών και την ενδεχόμενη πιστοποίηση.
- Σημεία πρόσβασης κεραιάς **Wireless Wide Area Network (WWAN)**.
- Τη συμμόρφωση με κανόνες για τη δημόσια ασφάλεια και υγεία.
- Την αντιμετώπιση φαινομένων, όπως η συμφόρηση και ο συντονισμός στο δίκτυο. Υποθέτει κανείς, λοιπόν, ότι οι πλέον ενδιαφερόμενοι τομείς για ένα σύστημα με τα συγκεκριμένα θετικά χαρακτηριστικά, θα είναι κυρίως φορείς σχετικοί με τους πιο κάτω:
  - Φιλοξενία: Για παράδειγμα, σε αυτά εντάσσονται ξενοδοχεία, θέρετρα, ξενοδοχειακά συγκροτήματα, συνεδριακά κέντρα.

- Δημόσιοι χώροι: Όπως, πανεπιστήμια, γήπεδα, αερολιμένες, λιμένες κλπ.
- Κυβέρνηση & Εκπαίδευση: Δηλαδή, κυβερνητικά γραφεία, δημοτικά γραφεία και επιχειρήσεις, εφορίες, πανεπιστημιοπόλεις.
- Νοσοκομεία: τα οποία είναι μεσαία ή μεγαλύτερα νοσοκομεία, παρέχουν περισσότερα από 100 κρεβάτια και δυσκολεύονται να καλύψουν τις ανάγκες τους.
- Χώροι μικτής χρήσης: Εμπορικά κέντρα, οικίες, χώροι ψυχαγωγίας, και χώροι λιανικής πώλησης.

### 3.3 Software Defined Networking (SDN)

Εξέχουσας σημασίας είναι η μελέτη των κινητών δικτύων SDN. Αυτό γίνεται προφανές όχι μόνο από τις συζητήσεις, που επικρατούν στο συγκεκριμένο θέμα, αλλά και από τα συνέδρια, που διοργανώνονται και τις εργασίες, που υπάρχουν στον τομέα.

Παρατίθενται οι βασικές απαιτήσεις των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς και οι βασικές κατευθυντήριες οδοί, που ορίζουν οτιδήποτε αναφορά στο μέλλον των κινητών επικοινωνιών (T. Chen et al., 2015). Μία διαφορετική προσέγγιση σημειώνεται σε ότι αναφορά στην κρυπτογράφηση των δεδομένων με το Secure Socket Layer (SSL) ή Transport Layer Security (TLS). Τα κύρια προβλήματα, που επιλύονται συνοψίζονται στο (Anderson, Bosch, and Duminuco, 2016).

Ακόμα, υπάρχουν εργασίες, όπως οι (Yang et al., 2015), που περιλαμβάνουν βασικές αναλύσεις για τα πιο στοιχειώδη θέματα σχετικά με το SDN κινητής επικοινωνίας. Αναλύεται τι είναι το Mobile SDN (meSDN), δηλαδή η κινητή έκδοση του SDN (Lee et al., 2014). Περιλαμβάνονται διάφορες σημαντικές προκλήσεις, που εγείρονται λόγω του συνδυασμού των αδόμητων δικτύων με το SDN (Ku, Lu, and Gerla, 2014). Αναλύονται τα βασικά σημεία των κινητών δικτύων Internet Protocol (IP) και πως είναι δυνατό να συμβάλει το SDN στο να αποστέλλονται όλα τα πακέτα με βάση το μικρότερο μονοπάτι (Pupatwibul et al., 2013).

Αναλύονται οι απαιτήσεις των κινητών δικτύων 5ης γενιάς, καθώς και περιγράφονται τα βασικά σημεία των Radio Access Networks (RAN) και Evolved Packet Core (EPC) (Guizani, H.-H. Chen, and C. Wang, 2015). Στη μελέτη (Kabir, 2014) εισάγονται ζητήματα σχετικά με το ότι τα δίκτυα είναι προγραμματιζόμενα και περιλαμβάνουν πολύ μεγάλα επίπεδα αφαίρεσης. Οι πολιτικές σχετικά με την επεκτασιμότητα και την ευελιξία, τον απομακρυσμένο έλεγχο των κινητών σταθμών βάσης, οι πολιτικές προσβασιμότητας και ποιότητας υπηρεσίας αναλύονται διεξοδικά στο (L. E. Li, Mao, and Rexford, 2012). Μία αρχιτεκτονική SDN περιγράφεται στο (Bradai et al., 2015). Συνοψίζονται οι πιο σημαντικές λειτουργίες σχετικά με τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων, τη βελτιστοποίηση του δικτύου και καινοτόμες εφαρμογές.

Εγείρονται ζητήματα, που άπτονται της αλλαγής των SDN με σκοπό την κάλυψη ασύρματων αναγκών και διαχωρίζονται οι ελεγκτές δικτύου σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την πολιτική βελτιστοποίησης, που ακολουθούν (Ali-Ahmad et al., 2013). Οι πιο βασικές ενέργειες των μηχανικών σε ότι αναφορά στην αύξηση του

διαθέσιμου εύρους ζώνης, στην ανάπτυξη MIMO τεχνικών, καθώς και στη συλλογή στοιχείων από την κατάσταση του δικτύου αναλύονται στο (Riggio et al., 2014). Μηχανισμοί, που επιτυγχάνουν το διαμοιρασμό της δικτυακής υποδομής, την εικονική χρήση των βασικών εξυπηρετητών και πολιτικές δυναμικής διαχείρισης της ενέργειας εισάγονται στο (Bernardos et al., 2014). Το Blueprint εισάγει το NOX ελεγκτή με βασικό στόχο να πραγματοποιηθούν πειράματα και εξομοιώσεις για τη χρήση του SDN σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας. Επίσης, σημειώνονται πειράματα για την απώλεια πακέτων και τα handovers (Yap et al., 2010).

Οι βασικές απαιτήσεις και τα βασικά σενάρια σχετικά με το SDN σε ετερογενή δίκτυα αναλύονται στην (Mendonca, Obraczka, and Turletti, 2012). Τα small cells μαζί με σημαντικές προκλήσεις της πέμπτης γενιάς κινητής επικοινωνίας περιγράφονται και σχετίζονται με τη διαχείριση των παρεμβολών, την ασφάλεια, την υψηλή πολυπλοκότητα, λόγω του αυξημένου πλήθους handovers και στις δυσκολίες, που εμφανίζονται στην αντιμετώπιση αυτών των δυσκολιών (X. Duan and Xianbin Wang, 2015).

Επιπρόσθετα, κρίνεται υψίστης σημασίας η ανάλυση οικονομικών μοντέλων της τεχνολογίας με σκοπό να αναδειχτεί αν και κατά πόσο αυτές είναι βιώσιμες. Μετά την υιοθέτηση του παιχνιδιού Stackelberg ενός βασικού ζητήματος της θεωρίας παιγνίων υλοποιούνται διάφορες στρατηγικές για τη διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, καθώς και για τη διαχείριση του εύρους ζώνης και του υπολογισμού κόστους. Εγείρεται ακόμα η ιδέα της διάσπασης των στρατηγικών κόστους. Οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι κερδίζουν περισσότερα οφέλη όταν υιοθετούν SDN λύσεις (Eghbali and Wong, 2015). Επίσης, αναλύονται οι τιμές, που είναι δυνατό να εισαχθούν, καθώς και οι πιο σημαντικές συναλλαγές στο σύστημα (B. Wang et al., 2015). Στην εργασία (Artuso et al., 2016) αναλύονται τα ζητήματα, που σχετίζονται με τα Service Level Agreement (SLA) και πως οι ελεγκτές δικτύου στο SDN δημιουργούν διαφορετικές ροές δεδομένων, ούτως ώστε να τις διαχωρίζουν και να περιγράφονται οι αντίστοιχες παροχές στα υπογεγραμμένα SLAs.

Με στόχο την εκτίμηση του κόστους κεφαλαίου, λειτουργικού και του συνολικού κόστους, εισάγονται μοντέλα οικονομικά και αρχιτεκτονικά βασισμένα στο SDN και το NFV και τις αρχιτεκτονικές νέφους στη 5G (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Το κόστος κεφαλαίου είναι δυνατό να μειωθεί περισσότερο από 68%, το λειτουργικό κόστος μειώνεται περισσότερο από 63% και το συνολικό κόστος ελαττώνεται 69% σε σχέση με τα παραδοσιακά σενάρια.

### 3.3.1 Δομή

Η τεχνολογία Software Defined Networking (SDN) είναι μία σημαντική προσέγγιση, που επιτρέπει στους διαχειριστές του δικτύου να διαχειριστούν όλες τις πιθανές υπηρεσίες και λειτουργικότητες με κάποια επίπεδα αφαίρεσης και πολύ χαμηλά επίπεδα λειτουργικότητας. Η βασική ανάγκη για χρήση και δημιουργία SDN είναι ότι οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές είναι περιορισμένες και δεν παρέχουν τη δυναμική, επεκτάσιμη, υπολογιστική και αποθηκευτική δομή, που παρέχουν οι σύγχρονες μέθοδοι, όπως είναι τα κέντρα δεδομένων. Αυτό συμβαίνει με το διαχωρισμό μεταξύ του ελεγκτή (control plane) σε σχέση με το επίπεδο, που προωθεί την κίνηση στον επιλεγμένο προορισμό (data plane).

Οι ελεγκτές SDN βασίζονται στο πρωτόκολλο **OpenFlow** για απομακρυσμένη επικοινωνία με τα στοιχεία, που υπάρχουν στο επίπεδο δικτύου με βασικό στόχο να αποφασιστεί το μονοπάτι, που θα ακολουθηθεί από τα πακέτα του δικτύου μεταξύ των μεταγωγέων δικτύου. Οι μεταγωγείς δικτύου είναι απλοϊκές συσκευές, χωρίς ιδιαίτερη ευφυΐα και αποτελούν συσκευές στο 2ο δικτυακό επίπεδο. Τα SDN δίκτυα παρέχουν αρχιτεκτονικές δυναμικές, αποδοτικές από άποψη κόστους και εύκολα προσαρμοζόμενες. Επίσης, είναι προγραμματιζόμενες και οι λειτουργίες προώθησης τους είναι αυθαίρετες από εφαρμογές και υπηρεσίες δικτύου.

Το SDN μπορεί να επεκταθεί σε πολλά είδη δικτύων μεταξύ των οποίων τα ενσύρματα, ασύρματα, κινητά και αδόμητα δίκτυα. Στα κινητά δίκτυα, ενσωματώνονται διάφορες λειτουργίες σχετικές με την κίνηση, καθώς και τη διαχείριση των σταθμών βάσης. Σε αδόμητα δίκτυα, εκτός από την προφανή λειτουργικότητα του ασύρματου δικτύου, δεν είναι πολύ ενδιαφέρον ή σημαντικό να επεξεργάζεται κανείς πληροφορίες σχετικά με την κινητικότητα, αφού συνήθως δε σημειώνεται κίνηση και η θέση ενός αισθητήρα σε ένα αδόμητο δίκτυο είναι σχετικά σταθερή. Βασικό στοιχείο σε αυτή την περίπτωση είναι η συλλογή δεδομένων σε κάποια καταβόθρα, η οποία γίνεται με πολύ πιο εύκολο τρόπο, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς το ζήτημα ότι η προώθηση, ο έλεγχος και έπειτα, η διαχείριση της πληροφορίας είναι δυνατό να διαχειρίζονται από σύστημα λογισμικού με βάση το SDN.

Η βασική δομή, που περιλαμβάνει κάθε SDN δίκτυο χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελεί το επίπεδο υποδομής, το δεύτερο το επίπεδο ελέγχου και το τρίτο το επίπεδο εφαρμογών. Το επίπεδο υποδομής (**infrastructure layer**) περιλαμβάνει ουσιαστικά ό,τι υλικό υπάρχει στο δίκτυο. Αυτό συνήθως περιορίζεται σε κάποια απλά switches. Βασικός στόχος είναι η αποδέσμευση από το υλικό. Συνεπώς, αυτά τα switches είναι **whitebox**, δηλαδή δεν πραγματοποιούν κάποια εξειδικευμένη λειτουργία σε υλικό. Είναι περισσότερο βασισμένα σε λογισμικό. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι απαιτείται η χρήση NFVs, δηλαδή της εξομοίωσης δικτυακών λειτουργιών με βασικό στόχο να λυθεί το πρόβλημα, που προκύπτει και να εισαχθεί σε αυτά τα «κουτιά» λογική προγραμματισμού με απώτερο σκοπό να εκτελούν εξειδικευμένες λειτουργίες. Το επίπεδο υποδομής επικοινωνεί με βάση το **OpenFlow** πρωτόκολλο με το επίπεδο ελέγχου. Το **OpenFlow** πρωτόκολλο ή κάθε άλλο πιθανό πρωτόκολλο, που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ της υποδομής και του ελέγχου καλείται και **Southbound API**.

Το επίπεδο ελέγχου (**control layer**) είναι ουσιαστικά ο εγκέφαλος του δικτύου και παρέχει μία κεντροποιημένη οπτική στο εν λόγω δίκτυο. Είναι δυνατό να υπαγορεύει τι πρέπει να κάνουν ουσιαστικά οι συσκευές στο επίπεδο υποδομής, ελέγχει τη δρομολόγηση της κίνησης και την κίνηση του δικτύου. Ουσιαστικά, είναι το πιο σημαντικό κομμάτι, το οποίο υπάρχει σε κάθε δίκτυο και σε κάθε τύπο δικτύου. Είναι δυνατό να αναπτυχθούν πολιτικές σύμφωνα με τις οποίες δεδομένα, τα οποία προκύπτουν από τη λειτουργία του ελεγκτή να είναι δυνατό να αξιοποιηθούν καταλλήλως και να προκύψουν στοιχεία, τα οποία είναι σημαντικά, όπως στατιστική απεικόνιση και κατάλληλη αξιοποίηση των δικτυακών ροών σχετικά με ορισμένες παραμέτρους.

Το επίπεδο εφαρμογών (**application layer**) συνδέεται με το επίπεδο ελέγχου διαμέσου **Northbound APIs**. Σε αυτό το επίπεδο είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται λογική, που υπάρχει πάνω από αυτό το επίπεδο με βασικό σκοπό να λειτουργούν εφαρμογές σχετικές με επιχειρηματικούς σκοπούς. Είναι δυνατό να βοηθήσει τους

TABLE 3.1: Τα διάφορα επίπεδα του SDN και η λειτουργικότητά τους.

Επίπεδο	Λειτουργικότητα
Επίπεδο Εφαρμογών	Περιλαμβάνει κάθε πιθανή εφαρμογή, που παρέχεται.
Επίπεδο ελέγχου	Συστάδα ελεγκτών δικτύου, που πραγματοποιούν τον δικτυακό έλεγχο.
Τμήμα Δεδομένων	Περιλαμβάνει λειτουργικότητα, που αναφέρεται στα επίπεδα (4-7) του μοντέλου ISO/OSI.
Northbound Διεπαφή	Επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και εφαρμογών.
Southbound Διεπαφή	Επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του επιπέδου ελέγχου και δεδομένων.
Υλικό	Μεταγωγείς, τείχη προστασίας, πιθανώς εικονικά υλοποιημένα.

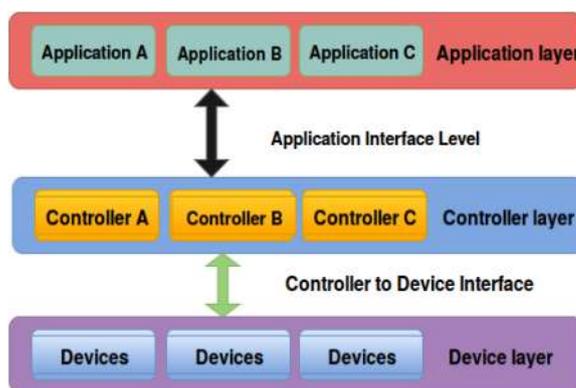


FIGURE 3.1: Ένα βασικό σχήμα μοντέλου SDN.

διαχειριστές δικτύου να παρακολουθήσουν την κίνηση, αλλά και να ενορχηστρώσουν παρεχόμενες υπηρεσίες.

### 3.3.2 Ιστορική Αναδρομή

Η απαρχή του SDN σημειώθηκε αμέσως μετά την έκδοση της Java, που είναι μία γλώσσα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, που εκδόθηκε από τη Sun το 1995. Το πρώτο SDN έργο σημειώθηκε από την AT&T και λεγόταν «GeoPlex». Το εν λόγω εισήγαγε την ιδέα ότι οι δικτυακές εφαρμογές (APIs) και ο δυναμικός χαρακτήρας της Java προσφέρονται για τη μετάβαση από τα συμβατικά δίκτυα σε αυτά, που ασχολούνται με τη διασύνδεση του επιπέδου του λειτουργικού συστήματος με το επίπεδο των εφαρμογών. Τελικά, το συγκεκριμένο πρότζεκτ οδήγησε σε μία πλατφόρμα, η οποία ήταν δυνατό να διαχειρίζεται το δίκτυο και διάφορες εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Δεν αποτελούσε λειτουργικό σύστημα και ούτε μπορούσε εύκολα να γίνει ανταγωνιστική πρόταση συγκριτικά με τα κλασικά λειτουργικά συστήματα. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη μίας διεπαφής χρήσης ενός ή περισσότερων λειτουργικών συστημάτων, που τρέχουν σε υπολογιστές, οι οποίοι απλά συνδέονται

στο διαδίκτυο. Κύρια λειτουργικότητά του αποτέλεσε ότι περιλάμβανε περιγραφή σε δικτυακό χάρτη για όλες τις δραστηριότητες, που σημειώνονταν στο διαδίκτυο.

Εν συνεχεία, το συγκεκριμένο πρότυπο δεν ικανοποιούσε την εταιρεία, η οποία σταδιακά στράφηκε στο **Operations Support System (OSS)**, το οποίο προσέδιδε νέες υπηρεσίες και παρείχε νέα λειτουργικότητα στους υπάρχοντες μεταγωγείς. Όμως, η υπάρχουσα δομή του «**GeoPlex**» δεν ήταν δυνατό να προσδίδει αυτές τις τροποποιήσεις. Συνεπώς, το ζήτημα των λειτουργικών συστημάτων αποτελούσε τροχοπέδη στα πρώιμα στάδια του **SDN**.

Το **WebSprocket** δημιουργήθηκε και χρηματοδοτήθηκε ως νεοφυής επιχείρηση το 1998 από τη **Sun Microsystems** και τη **Javasoft**. Η συγκεκριμένη προσπάθεια περιλάμβανε ένα νέο λειτουργικό σύστημα και ένα μοντέλο με μία δομή, που έτρεχε σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αυτής της προσέγγισης, καθώς και των διαφόρων εφαρμογών, που είναι δυνατό να γραφτούν με βάση τη **Java**, το **WebSprocket** κληρονομούσε κέλυφος, δίκτυο και κλάσεις συσκευής. Αργότερα, τροποποιήθηκε με έναν ειδικό μεταγλωττιστή δικτύου. Η πλατφόρμα επέτρεπε να δημιουργούνται διάφορα στιγμιότυπα από δικτυακές στοιβάδες, διεπαφές, πρωτόκολλα ως πολλαπλά νήματα.

Το 2000 άρχισαν να σημειώνονται σημαντικές προσπάθειες όσον αφορά στη δημιουργία του πρώτου εμπορικού μεταγωγέα βασισμένο σε λογισμικό. Άλλες σημαντικές καινοτομίες της περιόδου είναι η επέκταση σε περιορισμένες όμως εκδόσεις άλλων πρωτοκόλλων και υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα τα **Transmission Control Protocol (TCP)** και **User Datagram Protocol (UDP)**. Την ίδια εποχή αναγνωρίστηκε και η ανάγκη για προγραμματιζόμενα δίκτυα, ενώ αναγνωρίστηκε πως αυτά θα αποτελούν τη μεγάλη εξέλιξη στον τομέα του Διαδικτύου.

Το επόμενο, που κυκλοφόρησε το 2000 γνωστό ως «**Supranet**» αποτέλεσε ουσιαστικά προπομπό του γνωστού **Internet of Things (IoT)**. Ταυτόχρονα τον Οκτώβριο του 2000 το **Gartner Group** επέλεξε το «**WebSprocket**» ως την κορυφαία αναδυόμενη τεχνολογική πρόταση στον κόσμο.

Το 2001 η **Ericson** μαζί με το «**WebSprocket**» κατοχύρωσαν την άδεια να δημιουργήσουν τον πρώτο εμπορικό μεταγωγέα λογισμικού. Η μεγάλη εξέλιξη και γρήγορη δημιουργία της στοιβάδας ελέγχου κλήσεων κατέστησε το **Supranet** τη βασική τεχνολογία για την επικοινωνία και διανομή δικτυακών υπηρεσιών. Το πρώτο πείραμα **SDN** πραγματοποιήθηκε στο Οχάιο των Ηνωμένων Πολιτειών και αποτελούσε μία μελέτη περίπτωσης του **Internet 2** πρωτοκόλλου.

Υπήρξε μία σχετική κάμψη στον τομέα μέχρι το 2003, που ανακαλύφθηκε η εφαρμογή **Content Delivery Control Network (CDCN)** και κατοχυρώθηκε με ειδική πατέντα. Έπειτα, άρχισαν να ενσωματώνονται τέτοιου είδους τεχνικές σε διάφορα συστήματα με σκοπό τον έλεγχο διαφόρων δικτυακών στοιχείων, όπως για παράδειγμα εξυπηρετητές περιεχομένου, δρομολογητές, μεταγωγείς, πύλες με βασικό στόχο την προσπάθεια προστασίας από υποκλοπές και κλοπές περιεχομένου, ή από την ανεπιθύμητη παρεμβολή και εισροή στο σύστημα από χρήστες μη εξουσιοδοτημένους κυρίως από ομότιμους χρήστες. Μία άλλη εφαρμογή, που χρησιμοποιούταν ως το 2007 ήταν η μεταφορά περιεχομένου για υπηρεσίες με πληρωμή. Το **SDN**, όπως είναι σήμερα γνωστό άρχισε να εισάγεται το 2007.

Προσπάθειες σημειώθηκαν στο **Berkeley** και στο **Stanford**. Ο **Open Network Foundation (ONF)** είναι ένας οργανισμός, ο οποίος ιδρύθηκε το 2011 με βασικό στόχο να προωθήσει το **SDN** και να προτυποποιήσει το **OpenFlow** πρωτόκολλο.

### 3.3.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία SDN έχει πολλά πλεονεκτήματα, που μπορούν να συντελέσουν στο να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικά δίκτυα και να προκύψουν πολύ σημαντικές διαφοροποιήσεις στις υφιστάμενες τεχνολογίες, αλλά και να λυθούν πολλά προβλήματα, που αντιμετωπίζουν τα σύγχρονα δίκτυα.

Από την άλλη μεριά, επειδή ουδέν καλό αμιγές κακού εμφανίζει και σημαντικές αδυναμίες, που πρέπει να απαντηθούν αν πρόκειται να πραγματοποιηθεί εξάπλωση τους γενικότερα στον τομέα των δικτύων και επικοινωνιών.

#### Πλεονεκτήματα

Οι SDN αρχιτεκτονικές παρουσιάζουν ποικίλα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις υπάρχουσες παραδοσιακές αρχιτεκτονικές, αφού είναι:

- Προγραμματιζόμενες άμεσα: Το SDN επιτρέπει στους διαχειριστές δικτύου να διαχειριστούν ή ακόμα και να βελτιστοποιήσουν το δίκτυο πολύ γρήγορα μέσω δυναμικών και αυτόματων SDN προγραμμάτων, τα οποία μπορεί να γράψουν και είναι ανεξάρτητα από το υλικό.
- Ευέλικτες: Ο διαχωρισμός ανάμεσα στον έλεγχο και στην προώθηση των δεδομένων παρέχει τη δυνατότητα στους διαχειριστές δικτύου να διαχειρίζονται τη κίνηση δυναμικά, ώστε να είναι δυνατό να αλλάξει και να ανατεθεί στις ανάγκες, που δημιουργούνται.
- Δημιουργούν ένα κεντρικά διαχειρίσιμο δίκτυο: Η ευφυΐα του δικτύου βρίσκεται σε ελεγχτές SDN βασιζόμενους σε λογισμικό, οι οποίοι διατηρούν μία καθολική οπτική του δικτύου.
- Βασίζονται σε ανοιχτά λογισμικά και είναι ουδέτερα σε σχέση με αντίστοιχα εμπορικά προγράμματα: Όταν υλοποιηθούν μέσω ανοιχτών πρωτοτύπων είναι δυνατό να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός και η λειτουργία τους, διότι οι οδηγίες, ειδικά σε σχέση με τους παραδοσιακούς, εμπορικούς ελεγχτές.
- Χαμηλού κόστους: Η ελάττωση υλικού σηματοδοτεί τη μείωση κόστους κεφαλαίου. Άλλωστε τα SDN δίκτυα αποτελούνται από μεταγωγείς-κουτιά απλά, δηλαδή χωρίς μεγάλη πολυπλοκότητα μέσα τους και κατ' επέκταση ιδιαίτερα χαμηλού κόστους. Τα κόστη λειτουργίας μειώνονται αν δεν υπάρχει υλικό, τα κόστη για την καταναλισκόμενη ενέργεια και συντήρηση ελαττώνονται, αφού εμπίπτουν σε κόστη, που σχετίζονται μόνο με τη συντήρηση του λογισμικού.
- Επιτρέπουν την καινοτομία: Όπως γίνεται ευρέως αντιληπτό, οι ενημερώσεις του λογισμικού είναι δυνατό να γίνονται σταδιακά με σχετικά χαμηλό κόστος. Εφόσον, οι περισσότερες εφαρμογές και λειτουργικότητές τους είναι υλοποιημένες σε λογισμικό μία αλλαγή δεν αυξάνει το κόστος απαγορευτικά.
- Εύκολα επεκτάσιμες: Το ότι υπάρχουν πολλοί μεταγωγείς χαμηλού κόστους και μπορεί να προστεθούν περισσότεροι είναι ιδιαίτερα σημαντικό και σηματοδοτεί ότι απλά με τη διασύνδεση του στο επίπεδο του ελεγκτή είναι δυνατό να εξακολουθήσει να λειτουργεί ομαλά το δίκτυο.

### Μειονεκτήματα

Εκτός από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα, που σαφέστατα εμφανίζει το **SDN** υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος προκλήσεων και απαιτήσεων, που πρέπει να ξεπεραστούν με βασικό στόχο την ευρεία υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνολογικής πρότασης. Οι πιο σημαντικές συνοψίζονται παρακάτω:

- Απαιτείται προτυποποίηση των διεπαφών, που σχετίζονται με τον έλεγχο και τα δεδομένα. Είναι σημαντικό να αναπτυχθεί πρότυπο, που να περιγράφει πως πρέπει να δομούνται οι διεπαφές και να θέτει ακριβείς προδιαγραφές.
- Είναι απαραίτητο να υπάρχει προστασία σε ό,τι αναφορά τις εμπορικές εκδόσεις του **SDN**.
- Χρειάζονται μέτρα για να αποφεύγεται η μείωση της απόδοσης.
- Πρέπει να δημιουργηθούν πολιτικές ελέγχου των δεδομένων, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν καταλλήλως αν χρειάζεται σε συγκεκριμένο χώρο ή χρόνο κάποια τροποποίηση ή δυναμική διαχείριση του δικτύου.
- Χρειάζεται να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη συνδεσιμότητα και η ταχεία ανάκτηση σε περίπτωση σημαντικού προβλήματος.
- Είναι απαραίτητη η δημιουργία πολιτικών ασφαλείας σχετικά με τα κινητά δίκτυα.
- Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επιτυγχάνεται η υποστήριξη ετερογενών τεχνολογιών και συσκευών.
- Είναι υψίστης σημασίας αν ο ελεγκτής μπορεί να περιλαμβάνει μηνύματα, τα οποία να ειδοποιούν για υψηλή πτώση της απόδοσης, δηλαδή αν τα επίπεδα απώλειας πακέτων είναι ασυνήθιστα υψηλά.
- Επίσης, πρέπει να αναπτυχθούν τα πρότυπα διαχωρισμού των δικτυακών ροών δεδομένων.
- Να αναπτυχθούν εμπορικές υπηρεσίες για την εξασφάλιση κερδών από το **SDN**.
- Καλλιεργείται η αντίληψη για την εμπιστοσύνη στο λογισμικό, εφόσον θα μετατραπούν οι περισσότερες συσκευές υλικού σε εφαρμογές λογισμικού.
- Το υλικό πρέπει να αντικατασταθεί από αντίστοιχο πιο απλό υλικό το οποίο θα υπάρχει στα **SDN** δίκτυα.
- Χρειάζεται να προωθηθεί η είσοδος του **SDN** στην αγορά και να σημειώνονται λιγότεροι κίνδυνοι υλοποίησης.

## 3.4 Network Function Virtualization (NFV)

Όσον αφορά στην τεχνολογία NFV υπάρχουν αρκετές μελέτες, όπως η (Chappell, 2015), που αφορούν στον συμπληρωματικό ρόλο, που παρουσιάζουν οι τεχνολογίες SDN και NFV. Υπάρχουν δύο συγκεκριμένες προτάσεις, χρησιμοποιώντας ως SDN σύστημα το TOSCA και ως NFV το NETCONF. Η μελέτη (Pei et al., n.d.) παρουσιάζει τα πιο σημαντικά κίνητρα να χρησιμοποιεί κανείς NFV, αποδεικνύει την πιθανότητα συνύπαρξης των εικονικών και μη εικονικών δικτυακών δομών στο ίδιο κινητό δίκτυο. Εν συνεχεία, το European Telecommunications Standards Institute (ETSI) στην ιστοσελίδα του (Beming et al., 2007), περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές ιδέες, αναλύσεις, προσεγγίσεις, μελέτες περίπτωσης σχετικά με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Ο Open Network Foundation (ONF) επίσης, έχει μελετήσει εις βάθος το εν λόγω ζήτημα. Οι ασύρματες επικοινωνίες αναλύονται στο (Brief, 2013). Υπάρχουν περιληπτικά οι πιο κύριες κατευθύνσεις στον τομέα. Βασικά πλεονεκτήματα θεωρούνται ο κεντρικός έλεγχος και το υψηλό επίπεδο καινοτομίας.

### 3.4.1 Δομή

Η τεχνική του NFV είναι πολύ σημαντική για τα ασύρματα δίκτυα. Είναι δυνατό διάφορες δικτυακές λειτουργίες να πραγματοποιούνται σε υλικό γενικού σκοπού, όπως για παράδειγμα οι απλοί μεταγωγείς δικτύου, οι οποίοι μετά από την εισαγωγή NFV λειτουργούν ως δρομολογητές, δηλαδή ανωτέρου επιπέδου συσκευές. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ότι θα μπορούσαν να αντικατασταθούν τα τείχη προστασίας (firewalls) ή ακόμα και άλλες συσκευές με εικονικές. Οι συσκευές αυτές πλέον φιλοξενούνται σε εικονικές μηχανές (Virtual Machines VMs). Μία σημαντική εφαρμογή είναι η εφαρμογή του NFV σε λειτουργίες όπως η Network Address Translation (NAT) και Domain Name Services (DNS), που αποτελούν πρωτόκολλα αντιστοίχισης IP διευθύνσεων σε ονόματα διευθύνσεων στο διαδίκτυο.

Οι λειτουργικότητες αυτές προσφέρουν τη δυνατότητα να μην απαιτείται εξειδικευμένο υλικό για κάθε λειτουργία με σκοπό να δομηθεί μία αλυσίδα υπηρεσιών. Το λογισμικό μπορεί να ενσωματώνει τη λειτουργία ή τη χωρητικότητα του εξυπηρετητή. Κάτι τέτοιο σημαίνει την μείωση του κόστους κεφαλαίου, αλλά και του λειτουργικού κόστους. Ακόμα, μπορεί για παράδειγμα να αποδοθεί και εικονικό εύρος ζώνης σε κάποιο τμήμα του απαντώντας με έναν πιο ευέλικτο τρόπο στις ανάγκες, που εγείρονται μέσα στο δίκτυο. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι είναι μία τεχνολογία σχεδιασμένη να απομονώνει και να διανέμει δικτυακούς πόρους και δικτυακά συστατικά με σκοπό τη δημιουργία μία πλήρως εικονικής υποδομής.

Το NFV είναι διαφορετικό από το SDN, αλλά είναι συμπληρωματικό με αυτό. Είναι σημαντικό να συνδυάζονται και να προσδίδουν ουσιαστικά σε μία αρχιτεκτονική τα βασικά τους πλεονεκτήματα. Μία σημαντική δυνατότητα, που παρέχεται από το NFV είναι ότι είναι δυνατό να προκύψουν σημαντικά οικονομικά οφέλη για νέες υπηρεσίες, οι οποίες δημοσιεύονται σε λιγότερο χρόνο.

### 3.4.2 Ιστορική Αναδρομή

Η βασική ιδέα προέκυψε από παρόχους υπηρεσίας, οι οποίοι κατέβαλαν προσπάθεια να επιταχύνουν τη διαδικασία της υλοποίησης νέων υπηρεσιών με βασικό στόχο να

υποστηριχθεί το εισόδημα, καθώς και με αντικειμενικό στόχο την ανάπτυξη. Το υλικό εισάγει περιορισμούς.

Με βασικό στόχο την επιτάχυνση της καινοτομίας δημιουργήθηκε ο ETSI. Ο συγκεκριμένος οργανισμός κατέβαλε σημαντικές προσπάθειες στην προτυποποίηση και εξέλιξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Σκιαγραφήθηκαν οι απαιτήσεις για βασικές δικτυακές λειτουργικότητες, όπως για παράδειγμα είναι το NFV MANO. Επίσης, είναι σημαντικό, διότι λειτουργεί σε συνεργατικά προγράμματα, όπως το Open Platform for NFV (OPNFV).

Τον Οκτώβριο του 2012 μία συγκεκριμένη ομάδα πραγματοποίησε και εξέδωσε το NFV. Από τότε υπάρχουν περισσότερες καινοτομίες και πρόοδοι, όπως είναι για παράδειγμα η υλοποίηση, καθώς και διάφορες περιπτώσεις χρήσης, οι οποίες σχετίζονται για τους πωλητές και τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους.

### 3.4.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία αυτή είναι σημαντική για την εξέλιξη των σύγχρονων δικτύων, διότι προσδίδει πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία είναι δυνατό να συμβάλουν ενεργά στη βελτίωση παραδοσιακών μοντέλων. Από την άλλη μεριά όμως, υπάρχουν σημαντικά προβλήματα, τα οποία πρέπει να επιλυθούν. Παρακάτω παρατίθενται τα σημαντικότερα θετικά και οι βασικότερες προκλήσεις, που μπορεί να σημειωθούν στον τομέα.

#### Πλεονεκτήματα

Το NFV προσδίδει σημαντικά πλεονεκτήματα, εισάγει νέες τεχνικές αντιμετώπισης ζητημάτων περισσότερο λογισμικό-κεντρικές, μειώνει το μεγάλο κόστος το οποίο εισάγεται για την εξασφάλιση του συγκεκριμένου δικτυακού εξοπλισμού. Από την άλλη μεριά, είναι δυνατό να απλοποιηθούν διάφορες διαδικασίες, αφού το λογισμικό είναι πιο εύκολα «διαχειρίσιμο» σε θέματα βλαβών και η ανάκαμψη ενός συστήματος είναι πιο γρήγορη.

Συνοπτικά τα πιο βασικά οφέλη, που παρουσιάζει το NFV είναι:

- Μείωση του κόστους κεφαλαίου. Καθίσταται σαφές ότι μειώνονται οι επιχειρηματικοί κίνδυνοι, που μπορούν να προκύψουν από την επένδυση και τη συντήρηση σε υλικό.
- Μείωση του λειτουργικού κόστους. Βασικό είναι ότι αρχικά μειώνεται η ενέργεια λόγω του λιγότερου ρεύματος, που καταναλώνεται από τις συσκευές, αλλά και από την ψύξη, που απαιτείται για πληθώρα συσκευών σε έναν χώρο.
- Μείωση του χώρου. Ένα άλλο πρακτικό ζήτημα, αλλά εξίσου βασικό είναι η μείωση του χώρου της υποδομής. Συχνά, είναι σημαντικό το γεγονός ότι απαιτείται πολύς χώρος για την υποδομή, που σημαίνει εξοικονόμηση χώρου και εξοικονόμηση χρήματος.
- Γρηγορότερη κυκλοφορία στην αγορά. Είναι σημαντικό ότι εμφανίζονται γρηγορότερα νέες υπηρεσίες ή μετεξελιξίες των ήδη υπάρχουσών υπηρεσιών. Αυτό συμβαίνει ιδίως, διότι παρουσιάζονται διάφορες ευκαιρίες για επένδυση.

- **Ευελιξία.** Η ευελιξία γίνεται αμέσως κατανοητή λόγω του λογισμικού, αλλά και λόγω της ευκολίας μετακίνησης ή τοποθέτησης λειτουργικού τμήματος σε συγκεκριμένο σημείο.
- **Επεκτασιμότητα.** Η επεκτασιμότητα είναι ένα βασικό πλεονέκτημα, διότι μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερες λειτουργικότητες σε περισσότερα σημεία.

Για αυτές και για ακόμα περισσότερες σημαντικές συμβολές του **NFV** στη νέα τεχνολογική πραγματικότητα αναμένεται ότι θα ενσωματωθεί όχι μόνο δίνοντας τα σημαντικά πλεονεκτήματα στο **SDN**. Τέλος, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι είναι δυνατό να συνυπάρχουν οι εικονικές με μη εικονικές υπηρεσίες.

#### Μειονεκτήματα

Η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας, που σχετίζεται με το **NFV** απαιτεί να ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα, ώστε να επιλυθούν οι σημαντικότερες προκλήσεις, που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Η απάντηση και επίλυση των προβλημάτων αναμένεται να οδηγήσει στην υιοθέτηση και συνεργασία του **NFV** όχι μόνο με **SDN**, αλλά και με διάφορες άλλες σημαντικές τεχνολογίες.

Αρχικά, είναι σημαντικό να υπάρχει αένας έλεγχος και να λαμβάνονται υπόψη ορισμένες σημαντικές όψεις. Μόλις, για κάποιο λόγο φαίνεται ότι το δίκτυο συγχρωτίζεται σημαντικά, θα πρέπει να εισάγονται επιπρόσθετες πηγές, που να παρέχουν τη δυνατότητα να επιλύεται το εν λόγω πρόβλημα. Είναι υψίστης σημασίας να αναπτυχθούν τεχνικές αξιοποίησης της πληροφορίας, που προκύπτει λόγω των εικονικών δεδομένων και η εύρεση αποδοτικού τρόπου αξιοποίησης του μεγάλου όγκου δεδομένων. Όσον αφορά στη δημιουργία πολιτικών επέκτασης δικτύου απαιτείται να σημειωθούν και να πραγματοποιηθούν ενέργειες σχετικές με το ζήτημα αυτό.

Είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται μεγάλη αξιοπιστία των δικτύων. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί από τη μεγάλη πολυπλοκότητα των συσκευών και τεχνολογιών, που θα εμφανίζονται στο **5G**. Πρέπει να σημειωθούν εικονικά τερματικά, τα οποία όμως να εξασφαλίζεται ότι είναι εξίσου αξιόπιστα με τα αντίστοιχα συμβατικά. Είναι σημαντικό να εξασφαλιστούν όποια κενά ασφαλείας ειδικά, όσα προκύπτουν με γνώμονα τη χρήση του ίδιου φυσικού μέσου. Ένα θεμελιώδες ζήτημα προκύπτει με βάση την επεκτασιμότητα. Απαιτείται να είναι εύκολο να επεκταθούν οι συσκευές σε εικονικές, τα δίκτυα και οι υποδομές. Επίσης, είναι σημαντικό να επιταχυνθεί η υλοποίηση εφαρμογών βασιζόμενων σε λογισμικό χωρίς να παρουσιάζονται τα ίδια υψηλά κόστη, τα οποία προκύπτουν όταν χρησιμοποιείται υλικό.

Τελευταίο, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό είναι να μειωθεί το κόστος. Επίσης, πρέπει να ελαττωθούν τα σημαντικά λειτουργικά κόστη, υπάρχει μικρός κύκλος ζωής των εργαλείων και άρα απαιτούνται νέα, που ενδέχεται να επιβαρύνουν το κόστος της συνολικής υποδομής σε ταχτά χρονικά διαστήματα.

### 3.5 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Μία από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες στον τομέα, η οποία θα μπορούσε να αποτελέσει λύση κλειδί για τα **5G** δίκτυα είναι η **MIMO**. Η συγκεκριμένη

τεχνολογία είναι μία ασύρματη τεχνολογία. Σε αυτή περιλαμβάνονται πολλοί μεταδότες και λήπτες του σήματος, η οποία ήταν μέσα στη βασική της δομή. Αυτό το γεγονός προσφέρει την ικανότητα βελτίωσης του ρυθμού δεδομένων, που μεταδίδεται. Επίσης, είναι συμβατή με την τεχνολογία 802.11 και πραγματικά συμβάλει στη βελτίωσή της. Οι υπάρχουσες κεραιές βοηθούν να μεταδίδονται τα σήματα σε μικρότερες περιοχές. Η έκδοση του MIMO λέγεται Massive MIMO περιλαμβάνει μεγάλο πλήθος κεραιών.

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να συμβάλει ενεργά στο να απαντηθούν οι πιο σημαντικές απαιτήσεις των δικτύων 5G, επειδή προσφέρει τα πιο κάτω: (Larsson et al., 2014)

- αυξημένος ρυθμός δεδομένων,
- αυξημένη αξιοπιστία,
- βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση και
- μειωμένες παρεμβολές

### 3.5.1 Δομή

Η τεχνολογία αυτή είναι συνδεδεμένη με τις κεραιές. Με αυτό το τεχνολογικό σχέδιο, πολλές κεραιές ανήκουν και οι δύο στην πλευρά του αποστολέα και του παραλήπτη. Αυτή η τεχνική θέτει ως κύριο στόχο τη βελτίωση της κάλυψης, των ρυθμών δεδομένων και της μείωσης της καθυστέρησης σε ένα ασύρματο ή κινητό δίκτυο. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία της κεραιάς χρησιμοποιείται ευρέως στα ηλεκτρονικά κυκλώματα με σκοπό να μειωθούν τα λάθη και να αυξάνεται η ταχύτητα. Στις μέρες μας, η Massive MIMO είναι μία ευρέως γνωστή τεχνολογία, που χρησιμοποιείται στους σταθμούς βάσης, ξεκινώντας από την τέταρτη γενιά, αλλά σε πολύ διαφορετική οπτική. Οι κοινές μορφές του απλού Massive MIMO συμπεριλαμβάνουν 4, 8, 16 κεραιές σε κάθε πλευρά. Ακόμα, συνήθως αυτά τα πλήθη είναι δυνατό να διαφοροποιούνται σε κάθε πλευρά.

Ενώ η 5G πλησιάζει η Massive MIMO γίνεται συνήθης και απαιτείται για να καλυφθούν οι μεγάλες απαιτήσεις χρηστών στο μέλλον. Ειδικότερα, οι κεραιές στους σταθμούς βάσης μπορεί να στέλνουν το ίδιο σήμα σε περισσότερες συσκευές, ενώ θεωρείται ότι για τις γενιές 5G και εξής, θα υπάρχουν πολλές συσκευές, που θα χρησιμοποιούνται από ένα άτομο ταυτόχρονα, ιδίως αν αναλογιστεί κανείς την εξέλιξη του έξυπνου σπιτιού. Στην τεχνολογία Massive MIMO, πολλές κεραιές απαιτούνται με σκοπό να επιτευχθεί η κάλυψη όλων των συσκευών. Αυτές οι κεραιές θεωρείται ότι συμβάλλουν στην αύξηση του κόστους των σταθμών βάσης των δικτύων.

Στην Εικόνα 3.2 παρατίθεται μία πιθανή αρχιτεκτονική της τεχνολογίας MIMO. Οι συνολικοί αριθμοί κεραιών ανήκουν στο σχήμα και είναι  $N$  συνολικά. Όταν το πλήθος των κεραιών είναι 4, 8, 16 τότε η τεχνολογία είναι MIMO. Ενώ, όταν η τεχνολογία περιλαμβάνει μεγάλο πλήθος κεραιών στους λήπτες και στους δέκτες, όπως για παράδειγμα 128, 256 κλπ. τότε η τεχνολογία λέγεται Massive MIMO και θεωρείται ότι είναι μία από τις τεχνολογίες για την πέμπτη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας, καθώς υπόσχεται πολλά θεμελιώδη προτερήματα.

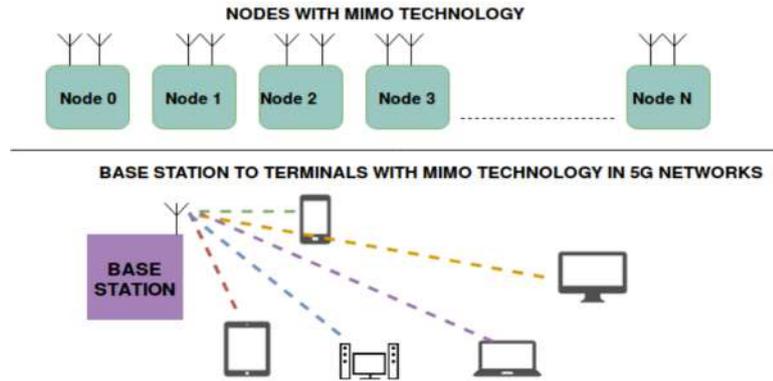


FIGURE 3.2: Η βασική ιδέα πίσω από το μοντέλο της MIMO αρχιτεκτονικής.

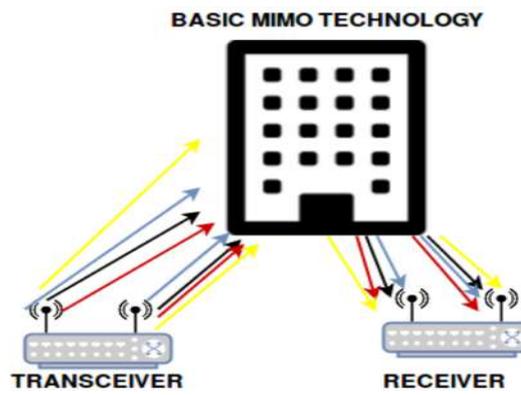


FIGURE 3.3: Η βασική ιδέα πίσω από το μοντέλο της MIMO αρχιτεκτονικής.

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το μοντέλο της βασικής αρχιτεκτονικής του μοντέλου για ένα κτήριο.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι MIMO συστημάτων.

- Τύποι πολλαπλών κεραιών:
  - **Single-Input Single-Output (SISO)**: τόσο ο αποστολέας όσο και ο λήπτης έχουν μία μόνο κεραία.
  - **Single-Input and Multiple-Output (SIMO)**: ο αποστολέας έχει μία μονή κεραία.
  - **Multiple-Input and Single-Output (MISO)**: ο λήπτης έχει μία κεραία.
- Τύποι πολλαπλών χρηστών:
  - **Multi-user MIMO (MU-MIMO)**: είναι ένα σύνολο τεχνολογιών πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων **Multi-user MIMO (MU-MIMO)** για ασύρματη επικοινωνία, όπου ένα σύνολο χρηστών ή ασύρματα τερματικά, το καθένα με μία ή περισσότερες κεραιές, επικοινωνούν μεταξύ τους.
  - **Cooperative MIMO (CO-MIMO)**: εξυπηρετούν πολλούς γειτονικούς σταθμούς βάσης για την ταυτόχρονη μετάδοση / λήψη δεδομένων προς

Ι από τους χρήστες. Ως αποτέλεσμα, οι γειτονικοί σταθμοί βάσης δεν προκαλούν παρεμβολές μεταξύ των κυψελών, όπως συμβαίνει στα συμβατικά συστήματα.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές λειτουργικότητες στα **MIMO** συστήματα.

- Προ-κωδικοποίηση: περιλαμβάνει τις λειτουργίες της επεξεργασίας, που συμβαίνουν στον μεταδότη.
- Χωρική πολυπλεξία: ένα σήμα υψηλής ταχύτητας χωρίζεται σε πολλαπλές ροές χαμηλότερου ρυθμού και κάθε ροή μεταδίδεται από μια διαφορετική κεραιά εκπομπής στο ίδιο συχνοτικό κανάλι.
- Πολυμορφική κωδικοποίηση: δεν υπάρχει γνώση του καναλιού στον πομπό. Στις μεθόδους αυτές, μεταδίδεται μία μόνο ροή (σε αντίθεση με τις πολλαπλές ροές στη χωρική πολυπλεξία), αλλά το σήμα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνικές, που ονομάζονται κωδικοποίηση διαστημάτων- χρόνου.

### 3.5.2 Ιστορική Αναδρομή

Η τεχνολογία **MIMO** εμφανίζεται στην έρευνα κυρίως από τη δεκαετία του 1970 ιδίως στα συστήματα πολλαπλών καναλιών ψηφιακής μετάδοσης και τις παρεμβολές μεταξύ ζευγών καλωδίων σε δέσμη καλωδίων. Αν και δεν αποτέλεσαν εμπορικές λύσεις, ορισμένες από τις μαθηματικές τεχνικές αντιμετώπισης των παρεμβολών αποδείχθηκαν χρήσιμες για την ανάπτυξη του **MIMO**. Στα μέσα της δεκαετίας του '80, διερευνήθηκαν τα συστήματα πολλαπλών χρηστών, που λειτουργούν πάνω σε "αμοιβαία διασυνδεδεμένα γραμμικά δίκτυα με πρόσθετες πηγές θορύβου", όπως πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου και ραδιοσυστήματα διπλής πόλωσης.

Οι μέθοδοι αναπτύχθηκαν για να βελτιώσουν την απόδοση των κυψελωιδών ραδιοφωνικών δικτύων και να επιτρέψουν τη βελτιωμένη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η πολλαπλή πρόσβαση χρησιμοποιεί κατευθυντικές ή έξυπνες κεραιές για επικοινωνία στην ίδια συχνότητα με χρήστες σε διαφορετικές θέσεις εντός της εμβέλειας του ίδιου σταθμού βάσης. Ένα σύστημα χωρικής πολυπλεξίας **Space-Division Multiple Access (SDMA)** προτάθηκε το 1991. Το αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, το οποίο εκδόθηκε το 1996 περιγράφει μια μέθοδο μετάδοσης σε υψηλές ταχύτητες δεδομένων με διαίρεση ενός σήματος υψηλής συχνότητας, που μεταδίδονται από διαχωρισμένους πομπούς και ανακτώνται από τη συστοιχία κεραιών λήψης με βάση τις διαφορές στις διευθύνσεις άφιξης/προορισμού.

Το 1996 προτάθηκε ότι η φυσική πολλαπλή διάδοση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταδώσει πολλαπλές ανεξάρτητες ροές πληροφοριών χρησιμοποιώντας συντοποθετημένες κεραιές και πολυδιάστατη επεξεργασία σήματος. Εντοπίστηκαν, επίσης, πρακτικές λύσεις για τη διαμόρφωση **MIMO-OFDM**, την κωδικοποίηση, το συγχρονισμό και τα κανάλια. Το 1996 επίσης προτάθηκε το ότι είναι δυνατό να πολλαπλασιαστεί η χωρητικότητα μιας ασύρματης ζεύξης χρησιμοποιώντας την τεχνική της "πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής".

Το πρώτο σύστημα **MIMO** δοκιμάστηκε από την νεο-συσταθείσα τότε εταιρεία **Clarity Wireless** το 1996, το οποίο αργότερα αγοράστηκε από τη **Cisco Systems**. Η **Iospan Wireless** στα τέλη του 1998 ανέπτυξε προϊόντα **MIMO-OFDM**, ενώ το 2003

εξαγοράστηκε από την Intel, τα οποία όμως προϊόντα δε διατέθηκαν ευρέως στην αγορά και δεν είχαν επιτυχία.

Η τεχνολογία MIMO έχει τυποποιηθεί για ασύρματα Local Area Network (LAN), δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3G και δίκτυα 4G και έχει πλέον ευρεία εμπορική χρήση. Το πρότυπο 802.11n θα βασίζεται σε MIMO-OFDM με επιλογές καναλιών 20 MHz και 40 MHz. Το τελικό πρότυπο 802.11n υποστηρίζει ταχύτητες έως και 600 Mbps (χρησιμοποιώντας τέσσερις ταυτόχρονες ροές δεδομένων) και δημοσιεύθηκε στα τέλη του 2009.

Οι Surendra Babu Mandava και Arogyaswami Paulraj ίδρυσαν την Beceem Communications το 2004 για να παράγουν chipsets MIMO-OFDM για WiMAX. Η εταιρεία εξαγοράστηκε από την Broadcom το 2010. Το WiMAX αναπτύχθηκε ως εναλλακτική λύση στα κυψελοειδή πρότυπα, βασίζεται στο πρότυπο 802.16e και χρησιμοποιεί το MIMO-OFDM για ταχύτητες μέχρι 138 Mbps. Το πιο προηγμένο πρότυπο 802.16m επιτρέπει ταχύτητες λήψης μέχρι 1 Gbps. Ένα δίκτυο WiMAX σε εθνικό επίπεδο κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ από την Clearwire, θυγατρική της Sprint-Nextel, που καλύπτει 130 εκατομμύρια σημεία παρουσίας έως τα μέσα του 2012. Η Sprint εν συνεχεία ανακοίνωσε σχέδια για την ανάπτυξη του LTE, που καλύπτει 31 πόλεις έως τα μέσα του 2013 και έκλεισε το δίκτυο WiMAX μέχρι τα τέλη του 2015.

Το πρώτο 4G πρότυπο προτάθηκε από την NTT DoCoMo το 2004. Το LTE-Advanced βασίζεται στο MIMO-OFDM και συνεχίζει να αναπτύσσεται. Το LTE καθορίζει ταχύτητες downlink έως 300 Mbps, ταχύτητες uplink έως 75 Mbps και παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας..

### 3.5.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία αυτή περιλαμβάνει πλήθος πλεονεκτημάτων, που την καθιστούν ελκυστική και θεωρείται ότι ευρεία υιοθέτησή της θα αποτελέσει σημαντικό παράγοντα, που θα συντελέσει σε εξέλιξη της τεχνολογίας και βελτίωση των κινητών δικτύων και των επικοινωνιών. Από την άλλη μεριά, περιλαμβάνει μειονεκτήματα, τα οποία αν δεν αντιμετωπιστούν θα αποτελούν τροχοπέδη για τους παρόχους αποτρέποντάς τους να επενδύσουν περισσότερο στην επικείμενη τεχνολογία, αλλά και για την επιστημονική κοινότητα, αφού θα αναζητά καλύτερες λύσεις.

#### Πλεονεκτήματα

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα, που εμφανίζονται παρουσιάζονται αναλυτικά σε πλήθος ερευνητικών εργασιών και περιλαμβάνουν: (Peres et al., n.d.), (Matthaiou, 2011)

- Μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων: εφόσον, υπάρχουν περισσότερες κεραιές και αυτές είναι δυνατό να στέλνουν παράλληλα τα σήματα σε περισσότερους χρήστες/συσκευές.
- Μεγαλύτερη φασματική απόδοση: στέλνονται σήματα εν παραλλήλω αυτό συμβάλει ενεργά σε καλύτερη χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος.
- Μεγαλύτερο πλήθος χρηστών: οι οποίοι εξυπηρετούνται από το πλήθος των κεραιών.

- Βελτιωμένη κάλυψη: το οποίο είναι φυσικό, εφόσον, συμβάλει στο να καλύπτονται οι χρήστες
- Βελτιωμένες παρεμβολές: μειώνονται οι παρεμβολές
- Καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, που επιτυγχάνεται από χαμηλούς ρυθμούς λάθους δυαδικών ψηφίων
- Επιτυγχάνεται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στην πλευρά του αποστολέα

### Μειονεκτήματα

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα, που εμφανίζονται παρουσιάζονται αναλυτικά σε πλήθος ερευνητικών εργασιών και περιλαμβάνουν: (Peres et al., n.d.), (Matthaiou, 2011)

- Μεγάλη πολυπλοκότητα υλικού: κάθε κεραία χρειάζεται μία μονάδα ραδιοσυχνότητας και επίσης, μία μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος
- Μεγάλη πολυπλοκότητα λογισμικού: οι περισσότεροι αλγόριθμοι επεξεργασίας σημάτων είναι πολύ δαπανηροί υπολογιστικά
- Μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση: μικρή ζωή μπαταρίας των κινητών συσκευών καθώς και θερμικά προβλήματα
- Κεραίες: προβλήματα, που υπάρχουν λόγω της κεραίας η τοποθέτηση των κεραίων στο χώρο, καθώς και η παρεμβολή, που θα εμφανιστεί στο ραδιοφάσμα από τα σήματα

## 3.6 Cognitive Radio

Οι πιο σημαντικοί τύποι Cognitive Radio καθορίζονται ανάλογα με διάφορες παραμέτρους λήψης και αποστολής. Πιο συγκεκριμένα:

- Πλήρως Cognitive Radio ή Mitola Radio στο οποίο ελέγχεται κάθε παράμετρος ασύρματου δικτύου.
- Spectrum Sensing Cognitive Radio λέγεται το δίκτυο, που μόνο οι παράμετροι οι σχετικές με το φάσμα είναι δυνατό να ελεγχθούν. Σε αυτά τα πλαίσια υπάρχουν κι άλλες δυνατότητες, όπως:
  - Licensed Band Cognitive Radio: περιλαμβάνει τη δυνατότητα χρήσης συχνοτικών ζωνών, που ανήκουν σε αδειοδοτούμενους χρήστες.
  - Unlicensed Band Cognitive Radio: περιλαμβάνει τη δυνατότητα χρήσης μη αδειοδοτούμενων συχνοτικών ζωνών.
  - Spectrum Mobility: κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα αλλαγής της συχνότητας λειτουργίας του.
  - Spectrum Sharing: επιτρέπεται ο διαμοιρασμός των ζωνών, που ανήκουν σε αδειοδοτούμενους χρήστες με χαμηλότερη ένταση, ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες.

- **Sensing Based Spectrum Sharing:** η μετάδοση ή όχι από δευτερεύοντες χρήστες εξαρτάται από το αν αυτοί εντοπίζουν σήματα εκπομπής από πρωτεύοντες χρήστες.
- **Data-based Based Spectrum sharing:** είναι η τεχνική σύμφωνα με την οποία οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε μία βάση δεδομένων, που υποδεικνύει αν έχουν ή όχι τη δυνατότητα να συνδεθούν.

Τα **Cognitive Radio** δίκτυα επιτελούν πολλές λειτουργίες, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι οι ακόλουθες (Preet, Kaur, and Sahib, 2014):

- Ο έλεγχος της ενεργειακής κατανάλωσης: συνήθως χρησιμοποιείται με βασικό στόχο την αύξηση της δυνατότητας σύνδεσης των δευτερευόντων χρηστών και τη μείωση των παρεμβολών.
- **Spectrum Sensing:** αποφαινεται για το μη χρησιμοποιημένο φάσμα στο δίκτυο, κάτι το οποίο ωθεί στη βέλτιστη χρήση του ραδιο-φάσματος χωρίς παρεμβολές. Οι σημαντικότερες τεχνικές, που υπάρχουν για να υποστηρίξουν αυτή τη λειτουργικότητα είναι:
  - **Matched filter detection:** αποτελεί μέθοδο επεξεργασίας σήματος, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση ενός φίλτρου αντιστοίχισης σε σχέση με ένα γνωστό σήμα ή με ένα άγνωστο σήμα για την ανίχνευση της παρουσίας του προτύπου στο άγνωστο σήμα.
  - **Energy detection:** βασίζεται στην ανίχνευση σήματος δια μέσου της ενέργειας, που αυτό εκπέμπει.
  - **Cyclostationary:** βασίζεται στο ότι οι περισσότεροι τηλεπικοινωνιακοί αλγόριθμοι, που χρησιμοποιούνται σήμερα **Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)**, **OFDM** κλπ. παρουσιάζουν κυκλοστατική συμπεριφορά.
- **Wideband Spectrum Sensing:** αναφέρεται στην ίδια τεχνική με παραπάνω, μόνο που λαμβάνει χώρα σε πολύ μεγαλύτερα τμήματα του φάσματος καλύπτοντας εύρη συχνοτήτων πολλών **MHz** ή ακόμα και **GHz**. Στην περίπτωση αυτή συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται:
  - **Cooperative detection:** βασίζεται σε πληροφορίες, που αντλούνται από πολλούς χρήστες και έχουν ως στόχο να ανιχνεύσουν τους πρωτεύοντες χρήστες.
  - **Interference-Based Detection:** η ανίχνευση βασίζεται στις παρεμβολές, που παρατηρούνται.
- **Null Space:** πολλές κεραίες συμβάλουν στην ανίχνευση και εξεύρεση κενών σημείων, που δεν εκπέμπουν πρωτεύοντες χρήστες και εκεί επιτρέπεται η εκπομπή από δευτερεύοντες.
- Διαχείριση φάσματος: επιτρέπει να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των χρηστών του δικτύου χωρίς να υπάρχουν παρεμβολές. Βασικότερες υπό-λειτουργίες στην περίπτωση αυτή αποτελούν:
  - Ανάλυση φάσματος
  - Απόφαση για την κατανομή του φάσματος

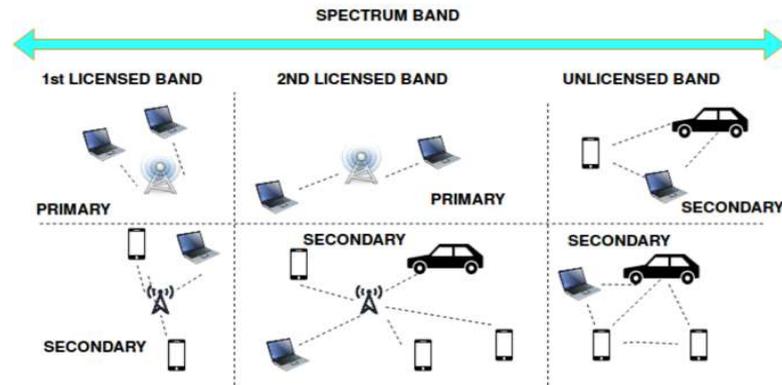


FIGURE 3.4: Η βασική ιδέα του μοντέλου της τεχνολογίας Cognitive Radio.

### 3.6.1 Δομή

Στην Εικόνα 3.4 παρατίθεται η βασική δομή για ένα δίκτυο Cognitive Radio. Στο δίκτυο αυτό υπάρχουν κάποιοι χρήστες, που έχουν προτεραιότητα σε σχέση με άλλους και αυτοί είναι εκείνοι, που κατέχουν πρόσβαση στο αδειοδοτημένο φάσμα. Οι SU οφείλουν να πραγματοποιούν ελέγχους σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης του δικτύου και να ελέγχουν αν το αδειοδοτούμενο φάσμα χρησιμοποιείται ή όχι. Σε κάθε στιγμή, οι χρήστες αυτοί οφείλουν να χρησιμοποιούν το μη αδειοδοτούμενο φάσμα ή αν είναι ελεύθερο το αδειοδοτούμενο φάσμα. Σε κάθε περίπτωση, όμως πρέπει να εξασφαλίσουν ότι δεν υπάρχουν PUs, που να επιθυμούν τη χρήση του συστήματος.

Αναλυτικότερα, το συνολικό δίκτυο Cognitive Radio αποτελείται από διάφορα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα. Ένα πρωτεύον δίκτυο περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους PUs και πρωτεύοντες BS. Οι χρήστες αυτοί επικοινωνούν μεταξύ τους δια μέσου του αντίστοιχου σταθμού βάσης και δεν επιτρέπεται επικοινωνία μεταξύ τους. Γίνεται σαφές κατά συνέπεια, ότι δεν κατέχουν γνώσεις για το δίκτυο.

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν και τα δευτερεύοντα δίκτυα. Αυτά, περιλαμβάνουν έναν ή περισσότερους SUs. Σε αντίθεση με τα πρωτεύοντα μπορούν να περιέχουν BS, μπορεί και όχι. Αν δεν υπάρχει σταθμός βάσης τότε μπορεί να επικοινωνούν μεταξύ τους οι SUs. Αυτό συμβαίνει σε αδόμητα δίκτυα. Όταν ο BS υπάρχει, τότε η επικοινωνία για τους χρήστες του ίδιου τομέα γίνεται δια μέσου αυτού. Σε αντίθεση με το πρωτεύον δίκτυο, στο δευτερεύον δίκτυο όλες οι συσκευές κατέχουν ιδιότητες "γνώσης" του δικτύου με βασικό σκοπό να μην παρεμβάλλονται, όταν αποστέλουν σήματα πρωτεύοντα στοιχεία. (Mehta, 2009)

Η κατανόηση για το αν εκπέμπει κάποια πρωτεύουσα συσκευή πραγματοποιείται με μία τεχνική, που καλείται Spectrum Sensing, η οποία γίνεται με διάφορους τρόπους, όπως:

- ανίχνευση ενέργειας,
- ανίχνευση κυκλοστατικών χαρακτηριστικών,
- φίλτρα,
- κεντρική συνεργατική ανίχνευση και

- κατανεμημένη συνεργατική ανίχνευση.

#### Γνωσιακός Κύκλος

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

1. **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.
2. **Προσανατολισμός:** Σε αυτή τη φάση συνδέονται η παρατήρηση με τα ερεθίσματα. Όταν υπάρχει το απόλυτο αίτιασμα της τρέχουσας παρατήρησης με παρελθοντικές εμπειρίες, τότε αναγνωρίζεται το ερέθισμα. Στη φάση του προσανατολισμού προκαλείται μια άμεση εκκίνηση ενέργειας ως μία αντανακλαστική συμπεριφορά.
3. **Σχεδιασμός:** με τη 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, που ισχύουν.
4. **Απόφαση:** γίνεται η επιλογή μεταξύ των υποψήφιων σχεδίων τα οποία είναι διαθέσιμα. Η επιλογή της τρέχουσας απόφασης γίνεται έχοντας ως βάση την **Quality of Information (QoI)**.
5. **Δράση:** υπάρχουν κάποιες επιλεγμένες διαδικασίες, οι οποίες χρησιμοποιούν ενεργοποιητές, έτσι ώστε να μπορέσουν να εισχωρήσουν στο εξωτερικό περιβάλλον ή στο εσωτερικό των **CR** δικτύων.
6. **Μάθηση:** 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:

1. η παρακολούθηση του φάσματος,
2. ο μερισμός του φάσματος
3. 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. (Mitola, 2000)

### 3.6.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα για την τεχνολογία **Cognitive Radio** προτάθηκε αρχικά από τον **Joseph Mitola III** σε ένα σεμινάριο στο Βασιλικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Στοκχόλμη το 1998 και δημοσιεύθηκε σε ένα άρθρο του **Mitola** και του **Gerald Q. Maguire** το 1999 (**Mitola and Maguire, 1999**). Αποτελούσε μία νέα προσέγγιση στην ασύρματη επικοινωνία. Η τεχνολογία αποτελείται από έναν πλήρως αναδιαμορφώσιμο ασύρματο πομποδέκτη, που προσαρμόζει αυτόματα τις παραμέτρους επικοινωνίας του, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του δικτύου και των χρηστών.

Παραδοσιακές ρυθμιστικές δομές κατασκευάστηκαν για ένα αναλογικό μοντέλο και δε βελτιστοποιήθηκαν για το **Cognitive Radio**. Οι ρυθμιστικοί φορείς στον κόσμο (συμπεριλαμβανομένης της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών στις Ηνωμένες Πολιτείες και **Ofcom** στο Ηνωμένο Βασίλειο), καθώς και διάφορες ανεξάρτητες αρχές μέτρησης διαπίστωσαν ότι το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε αναποτελεσματικά μετά τη χρήση **Cognitive Radio**. Οι ζώνες κυψελοειδών δικτύων είναι υπερφορτωμένες στα περισσότερα μέρη του κόσμου, αλλά δε χρησιμοποιούνται επαρκώς άλλες ζώνες συχνοτήτων (όπως οι στρατιωτικές, ραδιοερασιτεχνικές και συχνότητες τηλε-ειδοποίησης). Ανεξάρτητες μελέτες, που πραγματοποιήθηκαν σε ορισμένες χώρες επιβεβαίωσαν αυτή την παρατήρηση και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του ραδιοφάσματος εξαρτάται από τον χρόνο και τον τόπο. Επιπλέον, η κατανομή σταθερού φάσματος εμπόδιζε τη χρήση σπάνια χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων (εκείνων, δηλαδή που εκχωρούνται σε συγκεκριμένες υπηρεσίες), ακόμη και όταν οι χρήστες, που δεν έχουν άδεια χρήσης δεν προκαλούσαν αισθητές παρεμβολές στη βασική υπηρεσία. Οι ρυθμιστικοί φορείς στον κόσμο εξετάσαν το ενδεχόμενο να επιτρέψουν στους χρήστες, που δεν έχουν άδεια χρήσης σε αδειοδοτημένες ζώνες, πρόσβαση με την προϋπόθεση ότι δεν προκαλούσαν παρεμβολές σε χρήστες με άδεια χρήσης. Αυτές οι πρωτοβουλίες επικεντρώνονταν κυρίως στην έρευνα για τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα.

Το πρώτο πρότυπο ονομάστηκε **IEEE 802.22**, αναπτύχθηκε από την πρότυπη επιτροπή **IEEE 802 LAN / MAN (LMSC)** και δημοσιεύτηκε το 2011. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιεί γεωλογική κατανομή και **spectrum sensing**. Η γεωγραφική τοποθέτηση συνδυάζεται με μια βάση δεδομένων με αδειοδοτημένους πομπούς στην περιοχή για τον εντοπισμό διαθέσιμων καναλιών για χρήση. Κατά το **spectrum sensing** πραγματοποιείται παρατήρηση του φάσματος και προσδιορίζονται τα κατειλημμένα κανάλια. Το **IEEE 802.22** σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιεί τις αχρησιμοποίητες συχνότητες ή θραύσματα του χρόνου σε μια τοποθεσία. Αυτός ο χώρος αποτελείται από αχρησιμοποίητα κανάλια στις γεωγραφικές περιοχές. Ωστόσο, το **Cognitive Radio** δεν μπορεί να καταλαμβάνει τον ίδιο αχρησιμοποίητο χώρο συνεχώς. Καθώς αλλάζει η διαθεσιμότητα του φάσματος, το δίκτυο προσαρμόζεται για να αποτρέψει την παρεμβολή σε εκπομπές από αδειοδοτούμενους χρήστες.

### 3.6.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Ακόμα και οι αποδοτικότερες τεχνολογίες παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπίζονται. Ακόμα, για να αποφασιστεί αν θα χρησιμοποιηθούν ή όχι αποτελεί υψίστης σημασίας να ζυγίζονται τα θετικά και τα αρνητικά της και να σταθμίζεται ποια από αυτά υπερτερούν. Η τεχνολογία **Cognitive Radio**

έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω ([rfwireless-world.com](http://rfwireless-world.com) n.d.):

#### Πλεονεκτήματα

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας είναι:

- Καλύτερη χρήση του φάσματος, κάτι το οποίο αποτελεί και βασικό στόχο της τεχνολογίας. Στην πραγματικότητα αυτός είναι ο βασικότερος λόγος για τον οποίο η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται και είναι πολλά υποσχόμενη για τα δίκτυα επόμενης γενιάς.
- Αυξημένη δικτυακή και φασματική απόδοση. Η καλύτερη διαχείριση των πόρων οδηγεί σε δίκτυα πιο αποδοτικά ιδίως σχετικά με το εύρος ζώνης. Είναι γνωστό ότι μεγάλο μέρος των συχνοτικών ζωνών δε χρησιμοποιείται κάτι το οποίο δεν είναι ορθό και η αξιοποίησή τους θα διευκολύνει σημαντικά στη δημιουργία αποδοτικότερων δικτύων.
- Μείωση του κόστους. Το εύρος ζώνης αποτελεί στοιχείο υψηλού κόστους για έναν πάροχο. Κατά συνέπεια, η ελάττωση της υποχρησιμοποίησης του εύρους ζώνης έχει σημαντικά οικονομικά οφέλη.
- Χρήση πολύπολοων δικτυακών τοπολογιών, το οποίο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, αφού σήμερα οι περισσότερες δικτυακές τοπολογίες αποτελούνται από συνδυασμούς διαφόρων τύπων δικτύων, γενιών κινητής τηλεπικοινωνίας και μεγάλη ετερογένεια.
- Απλή δικτυακή δομή, η οποία αποτελεί σημαντική βελτίωση, καθώς τα δίκτυα με χαμηλότερη πολυπλοκότητα και σημαντικά λιγότερο υλικό έχουν μειωμένα κόστη κεφαλαίου και μειωμένο λειτουργικό κόστος. Τέλος, είναι περισσότερο πράσινα, αφού συντελούν σημαντικά σε χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση.
- Εύκολη διαχείριση, ρύθμιση και αναβάθμιση, που είναι σημαντικές και διατηρεί σε χαμηλό επίπεδο το κόστος για προσωπικό κλπ.

#### Μειονεκτήματα

Τα πιο θεμελιώδη προβλήματα της τεχνολογίας είναι:

- Μη απόλυτος αυτοματισμός, καθώς χρειάζεται επέμβαση χρήστη για να πραγματοποιηθούν ενδεχόμενες αλλαγές.
- Απαιτούνται πολυφασματικές κεραίες.
- Μεγαλύτεροι κίνδυνοι ασφαλείας. Επειδή υπάρχουν περισσότερα ευάλωτα μέρη, μπορεί το δίκτυο να πέσει θύμα είτε **Eavesdropping** είτε άλλων επιθέσεων. Ακόμα, μπορεί οι επιτιθέμενοι να μονοπωλήσουν το σύνολο των πόρων του δικτύου.
- Επηρεάζονται αρνητικά οι μηχανισμοί **QoS**.
- Ακόμα οι διάφορες παρατηρήσεις είναι θεμιτό μετατραπούν σε πράξεις, κάτι το οποίο αποτελεί σημαντική πρόκληση για το δίκτυο.

### 3.7 Millimeter Wave (mmWave) communications

Παρόλο που η συγκεκριμένη τεχνολογία εμφανίζει μεγάλες απώλειες μετάδοσης λόγω των ζωνών υψηλής συχνότητας, εντούτοις, διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα (Qiao, He, and Shen, 2016), επίσης προτείνεται μία μέθοδος για κατανομή της μνήμης, η οποία είναι πολύ αποδοτική και είναι σε θέση να διατηρήσει τη ροή του βίντεο σε υψηλή ποιότητα, ενώ ο χρήστης και ο σταθμός βάσης έχουν μία πολύ μικρή χρονική διάρκεια κατά την οποία ανταλλάσσουν δεδομένα.

Παρόλο που η συγκεκριμένη τεχνολογία συγκεντρώνει σημαντικά πλεονεκτήματα, διότι μειώνει σημαντικά το κόστος των τηλεπικοινωνιών και επιβεβαιώνει ότι θα χρησιμοποιούνται περισσότερο φάσμα, το οποίο δε χρησιμοποιούταν παλιότερα, εμφανίζει προβλήματα καθώς απαιτείται μία δομή περισσότερων κεραιών και αυτό ενδέχεται να προκαλεί σημαντικές παρεμβολές στο σύστημα. (Pi and Khan, 2011)

Η τεχνολογία θα κατέχει πρωταγωνιστικό ρόλο στην επόμενη γενιά κινητών τηλεπικοινωνιών. Από την άλλη εγείρει πολλά ερωτήματα και μεγάλη ανησυχία, που σχετίζεται με τη λειτουργία σε τόσο υψηλές συχνότητες και σχετίζονται άμεσα με το σήμα, τη μετάδοση, παρεμβολές, τη βροχή κλπ. Ακόμα, ο συνδυασμός της με άλλες τεχνολογίες αποτελεί σίγουρα σημείο συζήτησης και ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. (Wei et al., 2014)

Οι ζώνες 28 και 38 τίθενται ως πιθανές για χρήση σε αυτή τη φάση. Αν και υπάρχουν πολλές άλλες ζώνες, που χρησιμοποιούνται για την τεχνολογία αυτή. Όταν το φάσμα θα αδειοδοτηθεί συνολικά, οι χρήστες που δεν έχουν άδεια θα πρέπει να βγουν από το φάσμα με αποτέλεσμα αυτό να δημιουργήσει επιπρόσθετη καθυστέρηση και να αυξήσει τα κόστη. (Rappaport et al., 2013)

Παρά το ότι υπάρχουν τεχνικές όπως η αντικατάσταση τμημάτων με ψηφιακούς μηχανισμούς κλπ., εντούτοις, εγείρονται πολλές ανησυχίες ιδίως για το συνδυασμό της με της κυψελικές δομές. (Han et al., 2015)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η συχνοτική ζώνη E-band. Αποτελεί μία ζώνη, που λειτουργεί στα 71-76 GHz και 81-86 GHz. Σήμερα, υπάρχουν εμπορικά προϊόντα, που έχουν αναπτυχθεί για αυτή τη ζώνη. Έχουν όμως, κάποια βασικά μειονεκτήματα όπως, υψηλό θόρυβο, ευαισθησία σε καιρικές μεταβολές. Για τα προβλήματα αυτά υπάρχει σήμερα μία πολύ μεγάλη προσπάθεια επίλυσής τους και πιστεύεται ότι όταν θα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αυτά θα έχουν λυθεί και θα είναι έτοιμα για χρήση προσδίδοντας τα πιο βασικά οφέλη τους όπως: κέρδη από τις κεραιές, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, υψηλής απόστασης μετάδοση, χαμηλό κόστος και σύντομη χρονικά αδειοδότηση, μειωμένο κόστος. (Peng Wang et al., 2015)

Πολλά σημαντικά μειονεκτήματα υπάρχουν σχετικά με την τεχνολογία αυτή και σημειώνονται (Niu et al., 2015) από την άλλη όμως, η τεχνολογία συντελεί στο να χρησιμοποιηθεί το αδιάθετο φάσμα (Maccartney et al., 2015).

Η σημερινή χωρητικότητα των κυψελικών δικτύων είναι 20 φορές μικρότερη από τη χωρητικότητα που θα σημειωθεί στο μέλλον και διαφαίνεται σε μελλοντικά σενάρια. Η αποδοτικότερη ακτίνα κυψέλης κλίνει στα 220μ. Το μήκος κύματος είναι τόσο μικρό σε αυτή την περιοχή, που θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν οι κεραιές με διαφορετικούς τρόπους. (Sulyman et al., 2014)

### 3.7.1 Δομή

Οι επικοινωνίες αυτές περιλαμβάνουν τη συχνοτική περιοχή από 30-300 GHz και αποτελούν μία από τις προτεινόμενες λύσεις για τα δίκτυα επόμενης γενιάς με αποτέλεσμα να οδηγήσει σε καλύτερη χρήση του φάσματος και αποφυγή της υποχρησιμοποίησης.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

- mmWave κανάλι (Wei et al., 2014)
- 28 και 38 GHz θα είναι οι χρήσιμες συχνοτικές ζώνες (Rappaport et al., 2013)
- Αποδοτική ακτίνα κυψέλης είναι 220μ. (Sulyman et al., 2014)

### 3.7.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα για τη χρήση αυτής της συχνοτικής ζώνης προήλθε λόγω της αύξησης των χρηστών στις μέρες μας. Μάλιστα, σήμερα περισσότερο από ποτέ οι χρήστες κάνουν χρήση και διαμοιρασμό βίντεο και μάλιστα υψηλής ευκρίνειας μέσω των κινητών συσκευών τους και ιδίως στα κοινωνικά δίκτυα. Κάτι τέτοιο, αναμένεται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα να δημιουργήσει ένα συνωστισμό και να μειώσει σημαντικά τη διαθέσιμη χωρητικότητα για άλλες πιο απλές χρήσεις. Ως αποτέλεσμα, έχει σημειωθεί πολύ ενεργά στην 5G γενιά η χρήση αυτών των υψηλών συχνοτήτων για τη μετάδοση βίντεο. Έτσι, θεωρείται ότι όχι μόνο θα δοθεί λύση στην υποχρησιμοποίηση του φάσματος, αλλά ακόμα θα δοθεί και περισσότερος χώρος να υπάρχουν περισσότερα βίντεο.

### 3.7.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Η τεχνολογία εμφανίζει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, που θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς με σκοπό να υποστηριχθεί η τεχνολογία. Από την άλλη δημιουργεί ερωτήματα σε τεχνικά θέματα και σε θέματα παρεμβολών.

#### Πλεονεκτήματα

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τα οποία εμφανίζονται είναι τα ακόλουθα:

- **Αποδοτικότεροι αλγόριθμοι:** Η κατανομή της μνήμης γίνεται με πιο αποδοτικό τρόπο, οδηγεί σε πιο αποτελεσματική διατήρηση των ροών βίντεο, βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα της επικοινωνίας ακόμα και όταν οι σταθμοί βάσης και τα κινητά έρχονται σε επαφή για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. (Qiao, He, and Shen, 2016)
- **Καινοτομία στην αδειοδότηση mmWave:** ενώ παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα, ένα από αυτά είναι ότι η αδειοδότηση γίνεται αρκετά εύκολα με μερικές δεκάδες δολάρια κάθε χρόνο (Pi and Khan, 2011), (Maccartney et al., 2015)
- **Ρυθμοί δεδομένων της τάξης των gigabit per second:** Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος, που θεωρείται θεμέλιος λίθος για την τεχνολογία 5G. (Wei et al., 2014)

- Ψηφιακό **Beamforming**: Χρησιμοποιείται ψηφιακή τεχνολογία πάνω από την αναλογική με σκοπό να βελτιωθεί σημαντικά η ποιότητα των συγκεκριμένων αντικειμένων (Han et al., 2015)
- **30-300 GHz**: θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά (Peng Wang et al., 2015)
- **E-band**: περιλαμβάνει τις ζώνες 71-76 GHz και 81-86 GHz. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς περιλαμβάνει εμπορικά προϊόντα. Έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα, όπως οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης, η μετάδοση σε μεγάλη απόσταση, το χαμηλό κόστος και η πολιτική γρήγορης αδειοδότησης, είναι επίσης, λύση οικονομικά βιώσιμη. (Peng Wang et al., 2015)
- Καινοτομία: Το μήκος κύματος είναι τόσο μικρό, που χρειάζεται μεγάλη έρευνα και καινοτομία στον τομέα της ανάπτυξης και της λειτουργίας των κεραιών. (Sulyman et al., 2014)

#### Μειονεκτήματα

Πολλά μειονεκτήματα σημειώνονται σε σχέση με την τεχνολογία, τα πιο σημαντικά από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Απώλειες μετάδοσης: Οι επικοινωνίες εμφανίζουν σοβαρές απώλειες μετάδοσης, διότι ανήκουν σε υψηλές συχνοτικές ζώνες. (Qiao, He, and Shen, 2016)
- **Beamforming**: Χρειάζεται ειδικό σχέδιο beamforming για το σταθμό βάσης (Pi and Khan, 2011)
- Ανησυχίες σχετικά με τη μετάδοση: Εξασθένιση σήματος, παρεμβολές από την ατμόσφαιρα, κλιματολογικές συνθήκες κλπ. (Wei et al., 2014)
- Αύξηση κόστους: Οι μη αδειοδοτημένοι χρήστες θα πρέπει να μεταφερθούν σε κενές περιοχές.
- Καθυστερήσεις
- Αύξηση εξοπλισμού: θα χρειάζεται για τη διαδικασία των hand-offs από εσωτερικό σε εξωτερικό χώρο. (Rappaport et al., 2013)
- Δυσκολία στην εκτίμηση ακρίβειας (Han et al., 2015)
- **E-band** δυσκολίες: Αυξημένος θόρυβος φάσης, περιορισμένο κέρδος πλάτους, κλπ. (Peng Wang et al., 2015)
- **Beam training**: απαιτείται για να αποστέλλουν σωστά τα δεδομένα τους και ο λήπτης και ο αποστολέας
- Αντανακλάσεις: δημιουργούν επιπρόσθετες ενεργειακές απώλειες και μειώνουν την ενεργειακή απόδοση του συστήματος (Niu et al., 2015)

## Chapter 4

# Οικονομικοί Όροι

### 4.1 Οικονομικοί Όροι και Ορισμοί

Για την ευρεία υιοθέτηση των τεχνολογιών από τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και από χρήστες, δεν αρκεί μόνο η παρουσίαση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων, μειονεκτημάτων, προβλημάτων και προκλήσεων της κάθε τεχνολογίας, αλλά είναι αναγκαία η παρουσίαση ενός οικονομικού μοντέλου και η ανάπτυξη μαθηματικών τύπων περιγραφής για την ανάλυση κόστους, σύμφωνα, με την οποία θα υπολογιστεί το κόστος, το οποίο περιλαμβάνει κάθε τεχνολογία για την υλοποίηση και υιοθέτησή της, στην ευρωπαϊκή αγορά.

Η ανάλυση κόστους, γενικότερα, είναι μία τεχνική οικονομικής εκτίμησης, που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των αναμενόμενων οφελών από προτεινόμενες επενδύσεις, με τα σχετικά μεγέθη κόστους, ώστε να επικουρούνται οι χρήστες ή και οι πάροχοι στον προσδιορισμό της εναλλακτικής λύσης, που παρέχει τελικά, το μέγιστο καθαρό όφελος. Το μέγιστο καθαρό κόστος δίνεται, αν από τα οφέλη αφαιρεθεί το κόστος, δηλαδή Μέγιστο Καθαρό Κέρδος = Όφελος-Κόστος. Όσο περισσότερο τα οφέλη υπερβαίνουν το κόστος, τόσο περισσότερο θα ωφεληθούν οι τελικοί χρήστες από τη δραστηριότητα ή την υλοποίηση του έργου και θα κινητοποιηθούν οι πάροχοι να χρησιμοποιήσουν τα πιο πάνω αρχιτεκτονικά πρότυπα.

Η παρουσίαση του κόστους είναι εκείνη, που δίνει επιπλέον κίνητρα σε όλες τις πλευρές για να αποφασίσουν υπέρ κάποιας τεχνολογίας. Μπορεί τα συγκριτικά πλεονεκτήματα να είναι σημαντικά, όμως, στον πραγματικό κόσμο των επιχειρήσεων κάθε επένδυση ζυγίζεται, ούτως ώστε επιβεβαιωμένα να αποδίδει τα μέγιστα στον επενδυτή. Πολλές διαφορετικές τεchnο-οικονομικές αναλύσεις των δικτύων 5G έχουν πραγματοποιηθεί, όπως: (Chiaraviglio et al., 2017). Ακόμα και αναλύσεις στις οποίες συγκρίνονται ασύρματες και σταθερές λύσεις, όπως για παράδειγμα: (Kolydakis and Tomkos, 2014), που συνάγεται η μεγάλη εφικτότητα και ευελιξία της οπτικής ίνας και πόσο σημαντικό είναι να χρησιμοποιηθεί και στην υποδομή ασύρματων δικτύων. Το κόστος βέβαια σχετίζεται άμεσα με το πλήθος των χρηστών, με την αύξηση της καινοτομίας και τις παραμέτρους του δικτύου. (Smail and Weijia, 2017)

Ακόμα, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι, όπως είναι γνωστοί ως σήμερα θα διαφοροποιηθούν σημαντικά. Αρχικά, θα έχουν έναν ρόλο περισσότερο ως πάροχοι αποθηκευτικών χώρων. Αυτό θα συμβαίνει, διότι το δίκτυο θα γίνει περισσότερο πληροφοριο-κεντρικό. Οι τελικές τιμές θα διαμορφώνονται από μία ιστοσελίδα και θα καταβάλλονται από τους χρήστες του διαδικτύου. Βασικός στόχος παραμένει να μειώνονται σημαντικά τα κόστη της λειτουργίας και της μεταφοράς. (Trossen and Kostopoulos, 2012)

Το ίδιο αναμένεται να συμβαίνει και σε ένα αντίστοιχο δορυφορικό δίκτυο. Παρόλα αυτά κρίνεται ζωτικής σημασίας να ενσωματωθούν τα νέα δεδομένα με τις σημερινές αρχιτεκτονικές για να στεφθεί με επιτυχία το εγχείρημα. Στη δορυφορική δικτύωση θα περιλαμβάνεται πλήθος εφαρμογών και σεναρίων, όπως για παράδειγμα: επαγγελματικά και εικονικά δίκτυα σε απομακρυσμένες περιοχές, ευρυζωνική σύνδεση, εκτεταμένη κάλυψη, M2M επικοινωνίες και εξειδικευμένες υπηρεσίες επικοινωνίας. (Siris, Ververidis, and Polyzos, 2013)

Από τη μία μεριά, το αυξημένο κόστος αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για την εγκατάσταση μίας τεχνολογίας σε σχέση με μία άλλη ή άλλες. Ακόμα, όμως, είναι πιθανό να μην υπάρχει εφάμιλλη τεχνολογική πρόταση, που να καλύπτει συγκεκριμένα σχετικά πλεονεκτήματα και άρα, να υιοθετείται κάποια λύση, ακόμα και αν φαίνεται ασύμφορη οικονομικά. Επιπρόσθετα, μία οικονομικά ασύμφορη πρόταση ενδέχεται να παρέχει τη δυνατότητα της οικονομικής απόσβεσης, πολύ γρήγορα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες, πιο φτηνές οικονομικά. Μία τέτοια ιδέα είναι η χρήση της κρυφής μνήμης. Η κρυφή μνήμη αναμένεται να επιτύχει να αυξήσει σημαντικά το φάσμα της μετάδοσης, το οποίο συνήθως είναι πολύ ακριβό. (Xiaofei Wang et al., 2014) Ακόμα, τεχνολογίες όπως οι SDN και NFV μπορούν να συμβάλουν ενεργά στον καλύτερο έλεγχο, τη διατήρηση της υψηλής απόδοσης και στην αλλαγή τοποθεσίας για τους εξυπηρετητές. (Aissioui et al., 2015)

## 4.2 Είδη Κόστους

Πιο συγκεκριμένα, με σκοπό να υπάρχει κοινή αναφορά, για όλες τις τεχνολογίες ακολουθείται η ίδια συλλογιστική πορεία. Το κόστος κατανέμεται σε δύο βασικούς άξονες στο κεφάλαιο, που δαπανάται κατά την επένδυση των τεχνολογιών, δηλαδή, την κεφαλαιακή δαπάνη ή **Capital Expenditure (CAPEX)** και τη λειτουργική δαπάνη κάθε τεχνολογίας ή **Operational Expenditure (OPEX)**. Το κόστος **CAPEX** περιλαμβάνει τον προϋπολογισμό ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου, που επενδύεται για να αποκτηθεί και να υλοποιηθεί νέος εξοπλισμός, θέση, κλπ. Σε αντίθεση, το **OPEX** συνδέεται με το επαναλαμβανόμενο κόστος λειτουργίας και με τις δραστηριότητες λειτουργίας, όπως η κατανάλωση ρεύματος, τα κόστη συντήρησης και ούτω καθεξής. Γενικότερα, η φύση των δύο αυτών ειδών κόστους, ακόμα και ο κύκλος ζωής τους είναι θεμελιωδώς διαφορετικά, όπως γίνεται αντιληπτό, αν αναλογιστεί κανείς τι ποσότητες αναπαριστούν.

Με βασικό στόχο να ξεπεραστούν οι ασυμβατότητες, που προφανώς εμφανίζονται λόγω των διαφορών μεταξύ του κύκλου ζωής των δύο κατηγοριών κόστους, ακολουθείται ο τρόπος προσέγγισης κι άλλων παρόμοιων μελετών. Σύμφωνα με την ισχύουσα μεθοδολογία, η εκτίμηση του κόστους για το **CAPEX** και για το **OPEX** πραγματοποιείται σε ετήσια βάση. Στο **OPEX** κόστος είναι εύκολος αυτός ο υπολογισμός να πραγματοποιηθεί για κάθε χρονιά, αφού αφορά στα χρήματα, που δαπανώνται ετησίως για τη συντήρηση, διαχείριση και λειτουργία της συνολικής υποδομής. Από την άλλη μεριά, το **CAPEX** είναι ένα κόστος, που πρέπει να βασιστεί σε υπόθεση, εφόσον, αποτελεί το δαπανώμενο κεφάλαιο και σχετίζεται έντονα με φαινόμενα τραπεζικής, που έχουν να κάνουν με δάνεια, άλλες παρόμοιες συνθήκες και ενδεχομένως, κυμαινόμενο επιτόκιο. Συνεπώς, ειδικά, το **CAPEX** είναι η εκτίμηση ετήσιου κόστους, που επιτυγχάνεται υπό μορφή δανείων και άρα είναι πολύπλοκο να υπολογιστεί.

Στη συνέχεια, το αντίστοιχο ετήσιο κόστος είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμού των ετήσιων πληρωμών δόσης, του κόστους κεφαλαίου και λειτουργικού κόστους, που αντιστοιχεί στην εξόφληση του δανείου αυτού. Σύμφωνα, με την οικονομική θεωρία, υπάρχουν αντίστοιχοι τύποι, για την πρόβλεψη για το επιτόκιο, για την παρούσα τιμή, για τη μελλοντική τιμή, για το απλό επιτόκιο, το κυμαινόμενο επιτόκιο, για το ποσοστό έκπτωσης κλπ.

Σε γενικές γραμμές, υποτίθεται ότι για ένα δάνειο, υπάρχει ένα μεγάλο, κύριο ποσό  $P$ , που επιστρέφεται σε ετήσια βάση. Στη συνέχεια, το αντίστοιχο ποσό εξισώνεται σε ετήσια δόση πληρωμής, εκπροσωπούμενη από τον παράγοντα  $A$ . Αυτό το ποσό της επαναλαμβανόμενης πληρωμής μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$A = P \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4.1)$$

όπου το  $r$  αναπαριστά το περιοδικό επιτόκιο, που τίθεται για την αποπληρωμή του δανείου και το  $n$  αναπαριστά τον αριθμό των πληρωμών, όπως για παράδειγμα το μέγεθος του σχεδίου επενδύσεων σε έτη. Στην εν λόγω ανάλυση δοκιμάζονται διάφορες τιμές για να αναδειχθεί ποιο σενάριο είναι καλύτερο και ποια διάρκεια επενδύσεων έχει μικρότερο αντίκτυπο.

Ο παραπάνω τύπος είναι αξιοποιήσιμος, σε κάθε περίπτωση, τόσο για το CAPEX, όσο και για το OPEX κόστος, αφού υπάρχουν πολλά κόσθη αντικειμένων και υπηρεσιών, τα οποία πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τη σχέση 4.1, εφόσον, σχετίζονται με το δάνειο, που δίνεται και περιλαμβάνουν ένα επιτόκιο, το οποίο είναι δύσκολο να το υπολογίσει κανείς, σχετικά με τα υπόλοιπα κόσθη. Παρακάτω αναλύεται το κάθε κόστος ξεχωριστά για κάθε τεχνολογική πρόταση.

Το Total Cost of Ownership (TCO), τέλος, δεν είναι τίποτα άλλο από τη συνολική δαπάνη, που καλείται κανείς να μπορεί να εκπληρώνει, ώστε να μπορεί να εγκαθιστά, να επενδύει, να συντηρεί το σύστημα, που επιδιώκει να χρησιμοποιεί. Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό να αντικατοπτρίζει όλα τα κόσθη, που περιλαμβάνονται, τα απαραίτητα επιτόκια, αλλά και το επενδυτικό πλάνο για τα επόμενα χρόνια. Λόγω των διαφορετικών δαπανών, που υπάρχουν σε κάθε κατηγορία υλοποίησης το TCO διαφοροποιείται σημαντικά για κάθε τεχνολογία.

#### 4.2.1 Δαπάνες Κεφαλαίου ή Capital Expenditure (CAPEX)

Οι δαπάνες κεφαλαίου είναι οι δαπάνες, που στην πραγματικότητα, αλλάζουν το μέλλον της επιχείρησης. Πραγματοποιούνται, όταν μία επιχείρηση αγοράζει πάγια στοιχεία του εξοπλισμού ή για την αγορά κάποιου περιουσιακού στοιχείου με διάρκεια ζωής, που εκτείνεται πέρα από το τρέχον φορολογικό έτος. Οι επενδύσεις κεφαλαίου χρησιμοποιούνται από οποιαδήποτε εταιρεία για να αποκτήσουν ή να αναβαθμίσουν τα υλικά περιουσιακά στοιχεία της, όπως είναι ο εξοπλισμός, ή η ιδιοκτησία, ή για να αποκτηθούν βιομηχανικά κτίρια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, περιλαμβάνει το κόστος για την αγορά του απαραίτητου δικτυακού εξοπλισμού, όπως είναι οι κεραίες, οι τροφοδότες, καλωδίωση, εξυπηρετητές, αναμεταδότες κλπ.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το κόστος του κεφαλαίου επιβαρύνει, όπως γίνεται αντιληπτό μόνο τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο κι όχι τους χρήστες. Το CAPEX επικεντρώνεται στον προϋπολογισμό ενός δικτυακού και τηλεπικοινωνιακού δικτύου, που επενδύεται για να αποκτηθεί και να υλοποιηθεί νέος εξοπλισμός, θέση,

κλπ., όπως προαναφέρθηκε, αλλά κι ένα επιπλέον κόστος. Το κόστος, το οποίο απαιτείται επιπλέον εξασφαλίζει χρήματα, τα οποία επενδύονται, ώστε να αναβαθμίζονται οι υπάρχουσες υποδομές.

#### 4.2.2 Λειτουργικές Δαπάνες ή **Operational Expenditure (OPEX)**

Οι λειτουργικές δαπάνες ή **OPEX** συντελούν ένα συνεχές κόστος, που καταβάλλεται για τη λειτουργία ενός προϊόντος, μίας επιχείρησης ή στη συγκεκριμένη περίπτωση, για να λειτουργήσει το εκάστοτε σύστημα. Για μεγάλα συστήματα, όπως οι επιχειρήσεις, το **OPEX** μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει το κόστος των εργαζομένων, δηλαδή μισθούς ή ημερομίσθια και τα έξοδα των εγκαταστάσεων, όπως ενοίκια και την καταβολή των λογαριασμών για τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας.

Τα κόστη, που συμπεριλαμβάνονται στο **OPEX**, στην περίπτωση μίας τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών, σχετίζονται με το κόστος λειτουργίας του, όπως:

- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της καλωδίωσης από άκρη σε άκρη στο δίκτυο.
- Το χρηματικό ποσό, που πληρώνεται για τη θέση, για το εύρος ζώνης, που διατίθεται κλπ.
- Την υποστήριξη του συνολικού συστήματος.
- Την επίλυση προβλημάτων.
- Τα κόστη μίσθωσης σε περίπτωση, που πραγματοποιείται κάτι τέτοιο.

#### 4.2.3 Συνολικό Κόστος ή **Total Cost of Ownership (TCO)**

Γενικά, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας είναι μια οικονομική εκτίμηση, που προορίζεται να βοηθήσει τους αγοραστές και τους ιδιοκτήτες να καθορίσουν το άμεσο και έμμεσο κόστος ενός προϊόντος ή συστήματος. Είναι μια λογιστική αντίληψη της διαχείρισης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήρη λογιστική ανάπτυξη κόστους ή ακόμα, και οικολογικής οικονομίας, όπου σε εκείνη την περίπτωση, περιλαμβάνεται το κοινωνικό κόστος.

### 4.3 Θεωρία παιγνίων ή **Game Theory**

Η θεωρία παιγνίων αποτελεί μία μέθοδο μαθηματικών μοντελοποιήσεων κατά την οποία υπάρχει ανταγωνισμός ή και συνεργασία μεταξύ διαφόρων μελών/παιχτών, που διαθέτουν δυνατότητα απόφασης. Στην τεχνική αυτή, οι απώλειες εσόδων/πλεονεκτημάτων από μία ή περισσότερες πλευρές σημαίνει κέρδη για το αντίπαλο δέος.

### 4.3.1 Stackelberg game

Αποτελεί μία περίπτωση της θεωρίας παιγνίων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, υπάρχουν δύο αντίπαλες πλευρές ένας οδηγός (Leader) και ένας ακόλουθος (Follower). Είναι στρατηγικό παιχνίδι οικονομικών. Ο οδηγός του παιχνιδιού γνωρίζει ότι ο ακόλουθος παρακολουθεί τις κινήσεις του. Ακόμα, και οι δύο παρακολουθούν ο ένας τις κινήσεις του άλλου με σκοπό να επωφεληθούν όσο το δυνατόν περισσότερο μπορούν. Πιο συγκεκριμένα, και οι δύο πλευρές αποφασίζουν για τα επόμενά τους βήματα κρίνοντας από τις κινήσεις της άλλης πλευράς.

### 4.3.2 Subgame perfect equilibrium ή Subgame Perfect Nash equilibrium

Στη θεωρία παιγνίων μία βελτίωση της δεδομένης τιμής ισορροπίας είναι η ισορροπία Nash, που χρησιμοποιείται σε δυναμικά παίγνια. Σε ένα προφίλ στρατηγικής επιτυγχάνεται τέλεια ισορροπία, αν επιτυγχάνεται η ισορροπία Nash για κάθε υποπαίγνιο του αρχικού παιγνίου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν οι παίχτες έπαιζαν μικρότερα παίγνια, που αποτελούσαν μόνο ένα μέρος του συνολικού παιγνίου, η συμπεριφορά τους θα υπάκουε στην ισορροπία Nash. Μία κοινή μέθοδος για τον προσδιορισμό της τέλει ισορροπίας στην περίπτωση ενός πεπερασμένου παιχνιδιού είναι η αντίστροφη επαγωγή.

## 4.4 Επιλογή Παραμέτρων

Η μαθηματική αναπαράσταση για τα ανωτέρω κόστη αποτελεί συνήθη πρακτική για τεχνο-οικονομικές αναλύσεις. Η παραπάνω ανάλυση είναι δυνατό να χρησιμοποιείται από οποιονδήποτε επιστήμονα ή πάροχο τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών επιδιώκει να εντάξει αυτές τις νέες τεχνολογίες στη δική του επιχείρηση. Οι τύποι μπορεί να οδηγήσουν στον υπολογισμό του κόστους, αν σε αυτούς εφαρμοστούν οι τιμές, που προσδοκά η αγορά, για τα αντίστοιχα κόστη. Συνεπώς, μπορεί να βοηθήσει ακόμα και μελλοντικές αναλύσεις επιστημόνων, οι οποίοι θα ασχοληθούν με τον τομέα των ασύρματων δικτύων.

Εκτός από αυτό το γεγονός, είναι σημαντικό ότι είναι εκτιμήσεις διαχρονικές, εφόσον, με το πέρασμα των ετών, δεν θα αλλάξουν οι τύποι, αλλά οι τιμές των παραμέτρων, αφού αναλόγως θα μειώνονται οι τιμές των προϊόντων, όσο θα προσδεύει η τεχνολογία, ή θα αυξάνονται βάση κάποιων άλλων οικονομικών παραγόντων, όπως για παράδειγμα, με την αύξηση του πληθωρισμού κλπ. Σε κάθε περίπτωση, με εφαρμογή των τιμών κόστους για τα τρέχοντα έτη, θα καταλήγει κανείς σε σημαντικά οικονομικά συμπεράσματα.

Εν συνεχεία, είναι εκτίμηση διακρατική και κατά κάποιον τρόπο διεθνής, διότι απλά και μόνο με τις παραμέτρους, που έχουν τεθεί δεν ακολουθείται κάποια συγκεκριμένη λογική ως προς κάποια συγκεκριμένη χώρα. Έτσι, η πιο πάνω πρόταση θα μπορούσε με την ίδια επιτυχία να εφαρμοστεί σε μία ευρωπαϊκή, σε μία αμερικανική ή σε μία ασιατική αγορά. Εφόσον, κάθε φορά εφαρμόζονται οι τιμές, που ισχύουν για κάθε χώρα ή γενικά τοποθεσία, τότε θα προκύπτουν τα αντίστοιχα κόστη, για την συγκεκριμένη περιοχή.

Για μία τεχνοοικονομική ανάλυση, όμως, δεν αρκεί μόνο η μαθηματική απεικόνιση των μεθόδων κόστους, αλλά είναι απαραίτητη η ανάλυση ποσοτικά, ούτως ώστε να προκύψουν θεμελιώδη συμπεράσματα, για τις τεχνολογίες και για τα επί μέρους κόστη, που αυτές εμπεριέχουν. Είναι, δηλαδή, απαραίτητη η ανάλυση πειραμάτων, έτσι ώστε να σημειωθούν οι βασικές οικονομικές ιδιότητες κάθε μίας από τις τεχνολογίες, που παρουσιάζονται και να δοθούν κίνητρα για την αξιοποίηση κάθε μίας. Από την άλλη, είναι σημαντικό, διότι η πειραματική διαδικασία, μπορεί να δώσει βασικά συμπεράσματα για την οικονομική πρόοδο κάθε τεχνολογίας.

Προς αυτή την κατεύθυνση είναι σημαντικό να επιλεγούν οι τιμές κόστους για τις μεταβλητές και για τις παραμέτρους, που υπάρχουν στην ανωτέρω μελέτη. Αυτή η διαδικασία είναι θεμελιώδης και απαιτεί έρευνα. Συνεπώς, η επιλογή των παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας. Οι τιμές και τα κόστη σχετίζονται άμεσα με τη χρονική περίοδο του πειράματος, αλλά και με την αγορά στην οποία γίνεται το πείραμα. Για παράδειγμα, σε μία αγορά με φτηνά εργατικά χέρια το κόστος εγκατάστασης θα ήταν χαμηλότερο, από ότι σε μία αγορά με υψηλότερα ημερομίσθια.

#### 4.4.1 Μελέτη Εφικτότητας (ME)

Η ME είναι μία τεχνική, η οποία έχει ως στόχο τη δοκιμή διαφόρων τιμών σε κάποιες μεταβλητές με σκοπό να αναδειχθεί πώς οι παράγοντες, που αναπαρίστανται από τις μεταβλητές αυτές επιδρούν στο συνολικό κόστος και στο μοντέλο. Υπάρχουν ME μίας ή περισσότερων παραμέτρων.

Η ME μίας παραμέτρου είναι μία τεχνική, που αναδεικνύει πως κυμαίνονται τα κόστη μίας τεχνολογίας όταν μία συγκεκριμένη παράμετρος κόστους κινείται σε ένα συγκεκριμένο πεδίο τιμών. Βασικός σκοπός είναι η ανάδειξη των παραμέτρων, που απαιτείται να ελαττωθούν για να γίνει το μοντέλο ανταγωνιστικό και για να διατηρούνται τα επί μέρους κόστη σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να εγγυάται την ευρεία υιοθέτηση της δεδομένης τεχνολογικής προσέγγισης.

Η ME δύο παραμέτρων αποτελεί μία τεχνική, που δείχνει πώς ένα συγκεκριμένο ζεύγος παραμέτρων, τα οποία παρουσιάζουν διακυμάνσεις μέσα σε ένα συγκεκριμένο πεδίο τιμών, επηρεάζουν το μοντέλο. Βασικός σκοπός αποτελεί η εύρεση εκείνων των δαπανών, που πρέπει να μειωθούν, με σκοπό το μοντέλο να είναι αποδοτικό από άποψη κόστους και να υιοθετηθεί ευρέως. Συνήθως, οι δύο συνδυαζόμενες μεταβλητές επιλέγεται, ώστε να είναι δυνατό να συσχετίζονται για παράδειγμα αποτελούν κόστη μίας συγκεκριμένης δικτυακής παραμέτρου, όπως π.χ. σταθμού βάσης, του εύρους ζώνης κλπ.

## Chapter 5

# Σχετική Έρευνα

### 5.1 Κινητά Δίκτυα 4ης & 5ης Γενιάς

Οι πιθανές απαιτήσεις ενός κινητού δικτύου της πέμπτης γενιάς κινητής επικοινωνίας, καθώς και διάφορα πιθανά σενάρια λειτουργίας αναλύονται στο (Orange et al., 2015). Εισάγονται σημαντικές τεχνικές, που επιτρέπουν γρηγορότερες επικοινωνίες. Παρουσιάζεται ένας πιθανός σχεδιασμός δικτύου, υπάρχουν διάφορες προτάσεις για εναλλακτικές τεχνολογίες, διάφορες τεχνικές και συγκεκριμένες προτάσεις τεχνολογίας για την επόμενη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας.

Ενδεικτικά, η μελέτη (Beming et al., 2007) αναλύει μία λογική τεχνικών και παρουσιάζει μία συνολική αρχιτεκτονική για δίκτυα τέταρτης γενιάς. Επίσης, υπάρχουν αναλύσεις σχετικά με το RAN και την εισαγωγή των συστατικών του δικτύου, την ποιότητα υπηρεσίας. Αναλύονται και διαχωρίζονται τα βασικά συστατικά στοιχεία μίας αρχιτεκτονικής τέταρτης γενιάς Sesia, Toufik, and Baker, 2011. Η LTE αποτελεί έναυσμα για την ανάπτυξη της Πέμπτης γενιάς.

Η μελέτη (Correia et al., 2010) είναι πολύ σημαντική, διότι παρουσιάζει βασικούς τρόπους, σύμφωνα με τους οποίους είναι δυνατό να σημειωθεί χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε ένα δίκτυο. Μερικοί από τους πιο σημαντικούς τρόπους είναι η βέλτιστη διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου και η μη συνεχής μετάδοση από τους σταθμούς βάσης για να αποτραπεί η κατανάλωση ενέργειας από το υλικό του σταθμού.

Οι μελέτες (Expert Working Group, 2014b) και (Expert Working Group, 2014a) συνοψίζουν τις σημαντικότερες απαιτήσεις και βασικότερες προκλήσεις, που πρέπει να καλυφτούν πριν την έλευση και την ευρεία διάδοση της πέμπτης γενιάς κινητής τηλεπικοινωνίας. Σχετίζονται άμεσα με τις παρουσιαζόμενες τεχνολογίες, αφού αποτελούν σημαντικές προτάσεις, σχετικά με τις νέες γενιές κινητών δικτύων για καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης.

Η έρευνα (Ahmed et al., 2014) αναδεικνύει το συνολικό κόστος για την απόκτηση ενός δικτύου συγκριτικά με την ενεργειακή απόδοση. Για να είναι περισσότερο αποδοτική η μελέτη συγκρίνονται διάφοροι τύποι καλωδίωσης, όπως η οπτική ίνα και οι παραδοσιακές μέθοδοι καλωδίωσης. Τελικά, καταλήγεται ότι στην περίπτωση ετερογενών δικτύων επιτυγχάνεται μείωση στην κατανάλωση και συνεπώς, στο κόστος της ενέργειας, ενώ με γνώμονα τα επόμενα έτη, αναμένεται η κατανάλωση της ενέργειας και το κόστος αυτής να είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες και να απαιτείται μείωση τους.

## 5.2 Μικροκυψέλες

Στα (Liu et al., 2012) και (Liu, 2013) περιλαμβάνονται οι πιο σημαντικές αναλύσεις σχετικά με τη σύγκριση των Femtocells και των DAS. Στις μελέτες αυτές, καταστρώνονται κεφαλαιουχικά, λειτουργικά κόστη, το συνολικό κόστος και συγκρίνονται για τις δύο τεχνολογίες, καταλήγοντας ότι τα Femtocells είναι μία οικονομική, αρκετά ενδιαφέρουσα και χρήσιμη λύση για τα δίκτυα στο μέλλον.

Η μελέτη (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois, 2014) περιλαμβάνει τον υπολογισμό κόστους για το Femtocell και για την υλοποίηση του Macrocell ούτως ώστε, να ενθαρρύνονται οι χρήστες να εισαγάγουν τη συγκεκριμένη τεχνολογική πρόταση στο συνολικό τους δίκτυο, αφού παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα, σε σχέση με άλλες παραπλήσιες λύσεις για εσωτερικούς χώρους.

Στη μελέτη (Claussen, Ho, and Samuel, 2007) αναλύεται το κόστος, το οποίο περιλαμβάνεται, όταν σε ένα δίκτυο υιοθετείται ο προκάτοχος του Femtocell, το Picocell. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σημαντικό, αφού συχνά, είναι δυσδιάκριτες οι περιπτώσεις των Picocells και των Femtocells και έτσι, ο υπολογισμός του κόστους τους ομοιάζει σημαντικά.

Η μελέτη (Ultra High Capacity Networks White Paper, 2014) πραγματεύεται ζητήματα σχετικά με το κόστος, την κυκλοφορία των δεδομένων στο δίκτυο, την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, τα ετερογενή δίκτυα, την ασφάλεια των δικτύων, τη μειωμένη κατανάλωση μπαταρίας συσκευών και σταθμών βάσης, την υψηλή πυκνότητα κυψελών και τη βελτίωση της χωρητικότητας.

Η ανάλυση (Fratu et al., 2014) εστιάζει σε περισσότερο τεχνικά ζητήματα, που αφορούν στα ετερογενή δίκτυα. Εξετάζονται, κυρίως, θέματα σχετικά με την παρεμβολή, την ενέργεια και το διαθέσιμο φάσμα. Μετά από πλήθος πειραμάτων καταλήγεται ότι η συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών σε ένα δίκτυο συμβάλει τα μέγιστα στην αύξηση της απόδοσης, αφού συντελεί στη βελτίωση των παραπάνω παραγόντων.

Η μελέτη (Nikolikj and Janevski, 2014) εξετάζει τις πιο σημαντικές εναλλακτικές προσπάθειες, που μπορούν να σημειωθούν για δίκτυα LTE-A και 802.11, όπως τα Macrocells και τα Femtocells. Από την άλλη μεριά, επικεντρώνεται στην υπερβολική χρήση του δικτύου, δηλαδή πάνω από τα 80GB ανά χρήστη μηνιαίως και καταλήγει ότι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα Femtocell κινούνται σε πλεονεκτικές θέσεις έναντι εναλλακτικών τεχνολογικών προτάσεων.

Στη συγκεκριμένη μελέτη (Ahmed et al., 2014) παρουσιάζεται μία σύγκριση μεταξύ Macrocells και Femtocells. Τελικά, καταλήγει ότι τα Femtocells συνιστούν μία αποδοτικότερη λύση αν δεν απαιτείται η κατασκευή νέου σταθμού βάσης Macrocells. Στην αντίθετη περίπτωση, τα Macrocells παραμένουν μία σημαντική λύση και παρουσιάζουν πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα Femtocells.

Επίσης, στην (Shetty, Parekh, and Walrand, 2009) παρουσιάζεται ένα σύστημα ετερογενούς δικτύου, που συνδέει τις τεχνολογίες Femtocell και Macrocell. Επίσης, συμπεραίνεται ότι είναι πιο αποδοτικό ένα τέτοιο σύστημα και αυτό βασίζεται στην ιδέα της βέλτιστης διαχείρισης της δικτυακής συμφόρησης, που περνάει από το Macrocell στο Small Cell δίκτυο.

Στο βιβλίο (L. Duan and J. Huang, 2012) αναδεικνύεται πώς μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα η θεωρία παιγνίων και πιο συγκεκριμένα, το γνωστό “Stackelberg

game” αναθέτοντας ως παίχτες τη χρήση Femtocells και Macrocells, ούτως ώστε να υπολογιστεί το κόστος για κάθε περίπτωση. Καταλήγει ότι όταν το κόστος αυξηθεί σημαντικά, περισσότεροι χρήστες είναι δυνατό να εξυπηρετούνται και κατά συνέπεια, μειώνεται σημαντικά το όφελος για τον πάροχο.

Κάτι παραπλήσιο με το ανωτέρω συμβαίνει και στην περίπτωση της μελέτης (Jiang et al., 2014), μολονότι στη συγκεκριμένη ανάλυση αξιοποιείται το Nash ισοζύγιο για τον υπολογισμό του κόστους σε ένα δίκτυο.

Η ανάλυση (Yusof et al., 2013) κινείται σε πιο τεχνικά ζητήματα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για τη διαχείριση των handovers σε ένα ασύρματο δίκτυο και καταλήγεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος εμφανίζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με την ισχύουσα μέθοδο.

Στη μελέτη (Tehrani and Uysal, 2012) αναλύονται βάση οικονομικής θεωρίας και θεωρίας παιγνίων, οι πιο σημαντικές οικονομικές προβλέψεις για τις τιμές του διαθέσιμου εύρους ανά χρήστη και πώς καθίσταται δυνατή η αύξηση του κέρδους, συγκριτικά με τη σταθερή πρόβλεψη της τιμής.

Η ενδιαφέρουσα μελέτη (Frias and Pérez, 2012), που ασχολείται με τα ζητήματα του close και open subscriber group, καταλήγει στο σημαντικό συμπέρασμα, ότι το close subscriber group υπερέχει πολύ σε σχέση με τον ανταγωνιστή του και εξοικονομεί σημαντικά κέρδη, αφού αναδιανέμει το εύρος ζώνης και δεν απαιτείται η ενοικίαση περισσότερου φάσματος. Από την άλλη μεριά, είναι σημαντικό πως σε κάθε περίπτωση, σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο, υπάρχουν συγκριτικά πλεονεκτήματα και εξοικονομούνται χρήματα.

Στην εν λόγω ανάλυση (Mekikis et al., 2014) βρίσκεται το ελάχιστο κόστος για ένα ετερογενές δίκτυο, με στόχο να ενθαρρυνθούν και να στραφούν σε αυτά, οι πάροχοι. Αυτό είναι δυνατό να συμβεί με στοχαστικά γεωμετρικά εργαλεία, τα οποία υπολογίζουν το πιο χαμηλό κόστος, δοθείσης μίας σταθερής πιθανότητας κάλυψης σε ότι αναφορά στο δίκτυο.

Η τεχνοοικονομική ανάλυση (Yunas, Valkama, and Niemelä, 2015) σχετίζεται άμεσα με τη σύγκριση του κόστους για τις περιπτώσεις των Microcells, Macrocells και Small Cells και μελετά την απόδοσή τους σε σχέση με παράγοντες, όπως η κάλυψη, η χωρητικότητα, η ενεργειακή απόδοση και το κόστος. Καταλήγει ότι οι Ultra-dense υλοποιήσεις κατέχουν περισσότερα πλεονεκτήματα και συνεπώς, είναι σημαντικό για τη 5G να πραγματοποιήσει στροφή προς την κατεύθυνση αυτή.

### 5.3 Distributed Antenna Systems (DAS)

Η DAS τεχνολογία περιλαμβάνει ένα σύνολο κεραιών στη βασική δομή της. Η DAS είναι μία τεχνολογία 40 ετών. Η ανάγκη για κάλυψη της χωρητικότητας για τα 5G δίκτυα έχει σηματοδοτήσει μία σειρά ερευνών και μελετών στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (ΗΠΑ) ιδίως από το 2013 και έπειτα. Η τεχνολογία είναι μία λύση, που μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της πρόσβασης δικτύου και την κάλυψη συσκευών συνδεδεμένων για τις τεχνολογίες IoT και D2D.

Μία τεχνο-οικονομική ανάλυση της τεχνολογίας DAS στα κινητά δίκτυα 5G περιγράφεται στη μελέτη C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015. Αυτή η έρευνα

παρουσιάζει ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο, ακόμα περιλαμβάνει ένα μαθηματικό μοντέλο, που περιγράφει τη συνεισφορά όλων των ειδών κόστους στο συνολικό κόστος. Οι παράμετροι επιλέγονται από την ελληνική αγορά για το έτος 2015. Επεκτάσεις αυτών των εργασιών προτείνονται στα: (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016) και (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), όπου χρησιμοποιείται ΜΕ με σκοπό να προβλεφθούν οι τιμές όλων των παραγόντων και των συστατικών του δικτύου μαζί με τη βιωσιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου στα επόμενα χρόνια, ιδίως το 2020, όπου αναμένεται και η έλευση της 5G.

Το δυναμικό DAS προσφέρει ανώτερη απόδοση ειδικά σχετικά με την χωρητικότητα, του ρυθμού σήματος-προς-θόρυβο, τη χωρητικότητα του δικτύου και την απόδοση κόστους (Yunas, Valkama, and Niemelä, 2015). Μία σύγκριση του κόστους του DAS στη Δυτική Ευρώπη και την Κίνα παρατίθεται στη μελέτη (Liu et al., 2012).

## 5.4 Software Defined Networking (SDN)

Εξέχουσας σημασίας είναι η μελέτη των κινητών δικτύων SDN. Παρατίθενται οι βασικές απαιτήσεις των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς και οι βασικές κατευθυντήριες οδοί, που ορίζουν οτιδήποτε αναφορά στο μέλλον των κινητών επικοινωνιών (T. Chen et al., 2015). Ακόμα, υπάρχουν εργασίες, όπως οι (Yang et al., 2015), που περιλαμβάνουν βασικές αναλύσεις για τα πιο στοιχειώδη θέματα σχετικά με το SDN κινητής επικοινωνίας.

Αναλύεται τι είναι το Mobile SDN (meSDN), δηλαδή η κινητή έκδοση του SDN (Lee et al., 2014). Περιλαμβάνονται διάφορες σημαντικές προκλήσεις, που εγείρονται λόγω του συνδυασμού των αδόμητων δικτύων με το SDN (Ku, Lu, and Gerla, 2014). Αναλύονται τα βασικά σημεία των κινητών δικτύων Internet Protocol (IP) και πως είναι δυνατό το SDN να συμβάλει στο να αποστέλλονται όλα τα πακέτα με βάση το μικρότερο μονοπάτι (Pupatwibul et al., 2013).

Στη μελέτη (Kabir, 2014) εισάγονται ζητήματα σχετικά με το ότι τα δίκτυα είναι προγραμματιζόμενα σε αυτή την τεχνολογία και περιλαμβάνουν πολύ μεγάλα επίπεδα αφαίρεσης. Οι πολιτικές σχετικά με την επεκτασιμότητα και την ευελιξία, τον απομακρυσμένο έλεγχο των κινητών σταθμών βάσης, οι πολιτικές προσβασιμότητας και ποιότητας υπηρεσίας αναλύονται διεξοδικά στο (L. E. Li, Mao, and Rexford, 2012).

Μία αρχιτεκτονική SDN περιγράφεται στο (Bradai et al., 2015). Συνοψίζονται οι πιο σημαντικές λειτουργίες σχετικά με τα επίπεδα ελέγχου και δεδομένων, τη βελτιστοποίηση του δικτύου και σχετικά με καινοτόμες εφαρμογές. Εγείρονται ζητήματα, που άπτονται της αλλαγής των SDN με σκοπό την κάλυψη ασύρματων αναγκών και διαχωρίζονται οι ελεγχτές δικτύου σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την πολιτική βελτιστοποίησης, που ακολουθούν (Ali-Ahmad et al., 2013).

## 5.5 Network Function Virtualization (NFV)

Όσον αφορά στην τεχνολογία NFV υπάρχουν αρκετές μελέτες, όπως η (Chappell, 2015), που αφορούν στον συμπληρωματικό ρόλο και τη συνεργατικότητα, που

παρουσιάζουν οι τεχνολογίες SDN και NFV. Υπάρχουν δύο συγκεκριμένες προτάσεις, χρησιμοποιώντας ως SDN σύστημα το TOSCA και ως NFV το NETCONF.

Η μελέτη (Pei et al., n.d.) παρουσιάζει τα πιο σημαντικά κίνητρα για να χρησιμοποιήσει κανείς NFV, αποδεικνύει την πιθανότητα συνύπαρξης των εικονικών και μη εικονικών δικτυακών δομών στο ίδιο κινητό δίκτυο.

Εν συνεχεία, το ETSI στην ιστοσελίδα του (Beming et al., 2007), περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές ιδέες, αναλύσεις, προσεγγίσεις, μελέτες περίπτωσης σχετικά με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Ο Open Network Foundation (ONF) επίσης, έχει μελετήσει εις βάθος το εν λόγω ζήτημα.

Οι ασύρματες επικοινωνίες αναλύονται στο (Brief, 2013). Υπάρχουν περιληπτικά οι πιο κύριες κατευθύνσεις στον τομέα. Βασικά πλεονεκτήματα είναι ο κεντρικός έλεγχος και το υψηλό επίπεδο καινοτομίας.

## 5.6 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Ο βελτιωμένος σχεδιασμός των σταθμών βάσης παρατίθεται στη μελέτη (Senel, Björnson, and Larsson, 2017), όπου επισημαίνεται ότι η τεχνολογία Massive MIMO αντιμετωπίζει διάφορα δυσεπίλυτα προβλήματα και βασικός στόχος αποτελεί κυρίως το να βρεθεί η ισορροπία μεταξύ του κατάλληλου εύρους ζώνης, αλλά και του αριθμού κβαντισμού σε δυαδικά ψηφία και του αριθμού των κεραιών, που χρειάζονται με σκοπό να μεγεθύνεται το άθροισμα των επιτευχθέντων ρυθμών δεδομένων και παράλληλα οι παρεμβολές και τα κόστη διατηρούνται σε φυσιολογικά επίπεδα.

Η τεχνολογία MIMO έχει μελετηθεί εις βάθος (Verde et al., 2012), αλλά και σε σχέση με την απόδοση της τεχνολογίας υπάρχει πολύ διαθέσιμο υλικό (Lim, Chae, and Caire, 2015) και (Muharrar and Evans, 2017).

Σχετικά με τις αναλύσεις κόστους, η κύρια υπάρχουσα μελέτη (Katsigiannis, Basaure, and Matinmikko, 2014) αναλύει το κόστος για το MIMO και πως αυτό διαμορφώνεται με την τεχνολογία Licensed Shared Access (LSA) στη Φινλανδία (Katsigiannis, Basaure, and Matinmikko, 2014).

## 5.7 Cognitive Radio

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα, που ανακύπτουν σχετικά με τα κινητά δίκτυα αποτελεί η χρήση του ραδιο-φάσματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχουν πάντοτε διαθέσιμοι πόροι και να είναι δυνατό να καλύπτονται οι επικοινωνιακές ανάγκες των χρηστών των κινητών δικτύων επικοινωνίας. Η χρήση της τεχνολογίας Cognitive Radio αποτελεί ένα σημαντικό κίνητρο (Fomin and Medeisis, 2015), καθώς θεωρείται ότι θα απαντήσει σε αυτό το ζήτημα και θα ωθήσει σημαντικά σε τεχνικές, που θα χειρίζονται σωστότερα τα ζητήματα του φάσματος, κατανέμοντας πιο αποδοτικά τις διαθέσιμες συχνοτικές περιοχές (Liang et al., 2011).

Ακόμα αποτελεί μία τεχνολογία, που είναι δυνατό να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με ετερογενή δίκτυα αποτελούμενα από macrocells, femtocells κλπ. (Xie et al., 2012). Σε αυτή την περίπτωση, ανακύπτει ένα ακόμα επιπρόσθετο όφελος, το οποίο σχετίζεται άμεσα με το ότι οι σταθμοί βάσης, που διαθέτουν τέτοια λειτουργικότητα μπορούν να αγοράσουν και να εξασφαλίσουν φάσμα σε χαμηλότερες τιμές.

Είναι σημαντικό να ελέγχονται η τωρινή τιμή και αξία των υπηρεσιών και η περίοδος, που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί απόσβεση μετά τη νέα επένδυση σε ένα δίκτυο. Άλλωστε, η χρέωση για το διαμοιρασμό του φάσματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την κυβέρνηση ή και παρόχους. Η χρήση αυτών των ζωνών χωρίς φόρο συντελεί στο να προκύπτει η αποζημίωση για αυτά ως η οικονομική αξία του φάσματος και της χρήσης αυτού και ενισχύει την πιο αποδοτική χρήση του φάσματος τόσο για εμπορική όσο και για δημόσια χρήση. (Iswardiani et al., 2016)

Η τεχνολογία αυτή επιβεβαιωμένα συμβάλει στη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου (Numan et al., 2016). Η εισαγωγή της τεχνολογίας εξετάζεται και διαφαίνεται πώς η τεχνολογία αυτή προσδίδει σημαντικότερα πλεονεκτήματα και σε ό,τι αναφορά στη βιομηχανία (Barrie et al., 2011). Τα κέρδη, τα οποία προκύπτουν στις επιχειρήσεις με τη χρήση της τεχνολογίας και ιδίως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου είναι πολλαπλά (Medeisis and Delaere, 2011).

Σήμερα, η συνολική συχνοτική περιοχή υποχρησιμοποιείται. Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχουν αδειοδοτούμενες περιοχές, που δεν καλύπτουν το σύνολο των διαθέσιμων συχνοτικών ζωνών. Έτσι, υπάρχουν πρωτεύοντες χρήστες **Primary Users (PU)**, οι οποίοι είναι αδειοδοτημένοι και μπορούν να χρησιμοποιούν τις πιο πάνω περιοχές. Εντούτοις, η υποχρησιμοποίηση αυτή δεν είναι ωφέλιμη και για να επιλυθεί αυτό απαιτείται η ένταξη τεχνικών δυναμικής διανομής των πόρων. Μία τέτοια διαχείριση καλείται **Dynamic Spectrum Access Technique (DSA)** και επιτρέπει την ύπαρξη δευτερευόντων χρηστών **Secondary Users (SU)**, στους οποίους δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιούν το αχρησιμοποίητο φάσμα. (Mehta, 2009)

## 5.8 Millimeter Wave (mmWave) communications

Συνοψίζονται οι σημαντικότερες συναφείς εργασίες στον τομέα, σχετικά με την τεχνολογία mmWave και 5G. Τα 5G δίκτυα είναι επικείμενα και είναι εγγύτερα παρά ποτέ. Οι σημερινές τεχνολογίες δεν καλύπτουν επαρκώς τις μελλοντικές απαιτήσεις και απαιτήσεις του δικτύου. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλές καινοτόμες τεχνολογίες, ενημερωμένες συμβατικές έννοιες και παραδοσιακές προσεγγίσεις. Τα δίκτυα, που καθορίζονται από το λογισμικό (SDN), η Network Function Virtualization (NFV), το Internet Of Things (IoT), το MillimeterWave (mmWave), η Cognitive Radio (CR), οι Ultra-dense υλοποιήσεις είναι τα βασικά κλειδιά για τα 5G και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή συνδυαστικά και καλύπτουν τις μελλοντικές δικτυακές απαιτήσεις Akyildiz, Nie, et al., 2016.

Στη μελέτη (Qiao, He, and Shen, 2016) αναλύονται οι μέθοδοι, που απαιτούνται για την κατανομή μνήμης. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ροές βίντεο μεταδίδονται κανονικά, ανεξάρτητα από το χρόνο, που χρειάζεται το δίκτυο.

Η τεχνολογία mmWave αντιμετωπίζει μεγάλο αριθμό περιβαλλοντικών και καιρικών θεμάτων, που επιδεινώνουν τα προβλήματα επικοινωνίας, όπως βροχή, αέρα, σωματίδια, χιόνι κ.λπ. (Pi and Khan, 2011). Ένα άλλο θέμα, που φαίνεται να έχει το mmWave είναι ότι η κατάρτιση δέσμης σήματος πρέπει να συμβαίνει κατά τρόπο τέτοιο ώστε οι δέσμες να κατευθύνουν τα σήματα μαζί (Han et al., 2015).

Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία mmWave είναι σε θέση να προσφέρει μια μεγάλη ταχύτητα δικτύωσης και ως εκ τούτου, υπερβαίνει τα ποσοστά δεδομένων, που υπερβαίνουν τα Gbps ανά δευτερόλεπτο (Wei et al., 2014). Επιπλέον, ένα άλλο

πλεονέκτημα του mmWave είναι το **Digital Beamforming**, η οποία ενισχύει τη συνολική απόδοση του συστήματος (Rappaport et al., 2013).

Επιπλέον, πολλά θεμελιώδη ερωτήματα παραμένουν ανοιχτά και αναπάντητα. Ποιους τρόπους θα βρεθούν, ώστε οι σημερινές κεραιές να επαναχρησιμοποιηθούν (Niu et al., 2015), (Sulyman et al., 2014), πώς ανακατανέμεται το εύρος ζώνης και επίσης πώς θα διατεθούν οι μη εξουσιοδοτημένες ζώνες για την τεχνολογία mmWave (Maccartney et al., 2015).

Επιπλέον, υπάρχει μια πρόταση για ένα υβριδικό προ-κωδικοποιητή και ο συνδυασμός προτείνεται στο (M. Li et al., 2019). Υποστηρίζεται επίσης ότι με τη χρήση της λύσης των συγγραφέων (Attiah et al., 2019) το mmWave θα μπορούσε να προσφέρει QoE με χαμηλό κόστος.



## Chapter 6

### Ultra-dense/Small cells

Η χρήση των **Small cells** έχει ιδιαίτερη σημασία για τα κινητά δίκτυα επόμενης γενιάς και τα ίδια τα **Small cells** είναι τεχνολογικά επιτεύγματα ειδικού ενδιαφέροντος. Η χρήση των **Small cells** είναι μέρος μίας γενικότερης τάσης, που επικρατεί στα κινητά δίκτυα σε σχέση, με τη μείωση του μεγέθους των κυψελών. Εστιάζουν στην ιδέα ότι μειώνοντας το μέγεθος της βασικής κυψέλης, μπορεί να αναλαμβάνεται από κάθε κυψέλη εξυπηρέτηση κάποιου τμήματος του εύρους ζώνης. Ενόσω, υπάρχουν μειονεκτήματα σε αυτές τις προσεγγίσεις, είναι σημαντικά τα πλεονεκτήματά τους για μικρούς χώρους, όπως τα σπίτια ή τα μικρά γραφεία, στα οποία πλέον θα συνδέονται ολοένα και περισσότερες συσκευές. Ήδη έχουν εμφανιστεί έξυπνες συσκευές, που είναι δυνατό ο χρήστης να τις ελέγχει εκ του μακρόθεν, ακόμα και όταν λείπει από το οίκημα δια μέσου του έξυπνου τηλεφώνου του.

Ένας από τους παράγοντες κλειδιά υπέρ των **Small cells** είναι ότι είναι σχεδιασμένα να αγοράζονται και να εγκαθίστανται από τον καταναλωτή, που δεν έχει τεχνική γνώση. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη επαρκούς ευφυίας από τα **Small cells**, ώστε να ενημερώνονται και να ρυθμίζονται στο περιβάλλον πριν την εγκατάσταση, να προσαρμόζονται σε οτιδήποτε αλλαγές συμβαίνουν στο περιβάλλον με την καθημερινή χρήση και να προσαρμόζονται σε κάθε ελαττωματική κατάσταση, που ενδέχεται να συμβεί κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε λειτουργίας με το να αποτρέπουν σφάλματα. Ένα **small cell** πρέπει να μπορεί να αυτορυθμίζεται να αυτό-βελτιστοποιείται και να αναγνωρίζει και να διορθώνει τα σφάλματα, ώστε να είναι εύκολη η εγκατάστασή του. Αυτά είναι άλλωστε, τα σημαντικότερα, από τα θέματα, που έχουν ήδη προβλεφθεί, εφόσον, περιλαμβάνονται εντός της αρχιτεκτονικής τους αρκετοί αλγόριθμοι αυτό-οργάνωσης. Τα δίκτυα αυτό-οργάνωσης αποτελούν σήμερα το βασικό θέμα έρευνας και προτυποποίησης στο **3GPP (3rd Generation Partnership Project)**.

Η ίδια τεχνολογία και αρχιτεκτονική είναι ευρέως διαδεδομένη και σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Τυπικά, μία **Microcell** έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα και υψηλότερη ισχύ, ώστε να δώσει μεγαλύτερο εύρος κάλυψης. Ορισμένες επιχειρήσεις, που πουλούν **Microcells**, έχουν καταλήξει σε λύσεις, σύμφωνα με τις οποίες, τα **Small cells** συνεργάζονται ανά ομάδες, με κεντρικό στόχο να παρέχουν στους χρήστες αδιάκοπες υπηρεσίες. Για μεγάλες επιχειρήσεις, είναι πιθανό να απαιτείται ένας ελεγκτής **Microcell**, ούτως ώστε να παρέχονται επιπρόσθετες τοπικές υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένου απευθείας σύνδεση στο εταιρικό δίκτυο ή το δι-αδίκτυο και αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τμημάτων στο δίκτυο. Οι τεχνο-οικονομικές αναλύσεις πολλών παραμέτρων, που περιλαμβάνουν και μελέτες εφικτότητας, προσδίδουν στατιστικό χαρακτήρα στις αναλύσεις υλοποίησης και των

υπηρεσιών, όταν μία κατάσταση αναπαρίσταται ως ένα προκαθορισμένο πεδίο τιμών. (Chrysikos et al., 2016)

Δημοσιεύσεις, που έχουν προκύψει σε σχέση με τα θέματα του παρόντος κεφαλαίου είναι: (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Anastasia Kollia, et al., 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016)

## 6.1 Αρχιτεκτονική

Ένα Femtocell είναι ένας μικρός 3G σταθμός βάσης, που σχεδιάστηκε για να εφαρμόζεται μέσα σε οικίες ή μικρές επιχειρήσεις. Η μεγάλη χωρητικότητα και η υψηλή κάλυψη είναι διαθέσιμες χρησιμοποιώντας τη λογική της μικρής κυψέλης εντός ενός κτηρίου και επιτυγχάνει μία καλύτερη εμπειρία χρήσης, συγκριτικά με αυτή, που επιτυγχάνεται συμβατικά με τη χρήση Macrocells. Οι βελτιωμένοι ρυθμοί δεδομένων συμβάλλουν στην ανάπτυξη νέων πολυμεσιικών υπηρεσιών, που παράγουν νέα εισοδήματα για τους παρόχους, που μπορούν να προσφέρουν περισσότερες παροχές, δυνατότητες και υπηρεσίες πλέον, στους πελάτες τους. Τα Femtocells είναι σχεδιασμένα να εγκαθίστανται από τον χρήστη χωρίς τεχνικές γνώσεις.

Σύμφωνα με το 3GPP δομημένο πρότυπο για το Femtocell, η αρχιτεκτονική Femtocell περιγράφεται από τρία θεμελιώδη στοιχεία:

- το Home Node B (HNB) επικοινωνεί με την πύλη του Home Node B (HNB-GateWay-HNB-GW) πάνω από τη σύνδεση του καταναλωτή δια μέσου της επιφάνειας lu-b.
- Το HNB-GW εξυπηρετεί το σκοπό ενός Radio Network Controller (RNC), που παρουσιάζεται από μόνο του στο δίκτυο πυρήνα του παρόχου ως συγκεντρωτής των συνδέσεων HNB.
- Κάθε HNB εξυπηρετεί μία κυψέλη και υπάρχει μία σχέση 1-N μεταξύ των HNB-GW πυλών και HNB κόμβων.

Ένα σύστημα 3G UMTS κινητής επικοινωνίας είναι ευρέως διαδεδομένο, ακόμα και στις μέρες μας, αφού οικονομικοί και τεχνολογικοί παράγοντες δεν έχουν ακόμα, επιτρέψει την αντικατάσταση όλων των υπάρχοντων δικτύων με 4G. Τα Femtocells είναι σημαντικός τύπος κυψέλης σημείου πρόσβασης (Access Point Cell). Τα Femtocells παρέχουν συνδεσιμότητα μεταξύ των τοπικών κινητών συσκευών και ενός δικτυακού δρομολογητή. Όμως, αυτό είναι μόνο ένα τμήμα του γενικότερου συστήματος, που απαιτείται για την κυψέλη. Κάποια από τα βασικά απαραίτητα τμήματα της είναι τα ακόλουθα:

- Το ίδιο το Femtocell.
- Ένας διαδικτυακός δρομολογητής, που δρομολογεί τα δεδομένα να διέρχονται από και προς το Femtocell, δια μέσου του δικτύου.
- Μία σύνδεση στο διαδίκτυο.
- Μία πύλη στο δίκτυο πυρήνα του τηλεπικοινωνιακού παρόχου.

Τα βασικά σημεία κλειδιά ενός συστήματος είναι τα **Femtocells**, που εγκαθίσταται εντός των κτηριακών εγκαταστάσεων του χρήστη, καθώς και η πύλη σύνδεσης στο δίκτυο, που παρέχει συνδεσιμότητα μέσω του διαδικτύου, στο δίκτυο τηλεπικοινωνιών. Τα **Femtocells** εμφανίζονται στο πρότυπο **3G** ασύρματων επικοινωνιών, ως ένα εναλλακτικό δίκτυο συσκευών από τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο και μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αν επιτρέπεται, από σχεδόν οποιοδήποτε **3G** τηλέφωνο ακόμα, κι αν πρόκειται για διεθνή περιαγωγή χρηστών-επισκεπτών από άλλες χώρες.

Ο διακόπτης φορέα κινητής τηλεφωνίας (**Mobile Switching Center-MSC**) και ο διακόπτης δεδομένων (**Serving GPRS Support node-SGSN**), επίσης, είναι δυνατό να επικοινωνούν δια μέσου της πύλης των **Femtocells** με τον ίδιο τρόπο, όπως άλλες κλήσεις κινητών. Συνεπώς, όλες οι υπηρεσίες, ακόμα και οι αριθμοί τηλεφώνων, η εκτροπή κλήσεων, ο τηλεφωνητής κλπ. είναι δυνατό να λειτουργήσουν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και εμφανίζονται, όπως και παλαιότερα, στον τελικό χρήστη. Η σύνδεση μεταξύ του **Femtocell** και της πύλης του, που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο κρυπτογράφησης **Internet Protocol Security (IPsec)**, το οποίο συμβάλει στο να αποφευχθεί η υποκλοπή και επίσης, ευνοεί στο να επιβεβαιώνεται ότι το ίδιο το **Femtocell** είναι ένα έγκυρο σημείο πρόσβασης.

Εντός του **Femtocell**, υπάρχει πλήρης λειτουργία ενός σταθμού βάσης κινητής τηλεφωνίας. Επίσης, συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετες λειτουργίες, όπως η επεξεργασία βάση **RNC**, που παραδοσιακά βρίσκεται στο κέντρο μεταγωγέα του κινητού δικτύου. Κάποιες κυψέλες, επίσης, περιέχουν το δίκτυο πυρήνα, έτσι ώστε οι σύνοδοι δεδομένων να είναι δυνατό να διαχειρίζονται τοπικά, χωρίς να είναι απαραίτητο να μεταβαίνει κανείς στα κέντρα διακοπής των παρόχων. Οι συναρτήσεις κλειδιά ενσωματώνονται σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα, όπως για παράδειγμα το **BCM61670** από την **Broadcom** ή το **TCI6630** από την **Texas Instruments**. Αυτοί καθώς, επίσης και άλλοι κατασκευαστές ολοκληρωμένων κυκλωμάτων περιγράφουν λεπτομερώς τα διάφορα τμήματα των συσκευών στα σχέδιά τους.

Οι επιπλέον δυνατότητες του **Femtocell** επιτρέπουν να εγκαθίσταται και να ρυθμίζεται από μόνο του. Αυτό απαιτεί σημαντικό επιπλέον λογισμικό, το οποίο σαρώνει το περιβάλλον, με σκοπό να αποφανθεί για διαθέσιμες συχνότητες, για το επίπεδο ενέργειας και αν υπάρχουν κώδικες, οι οποίοι να χρησιμοποιούνται. Αυτή η συνεχής διαδικασία διαρκώς προσαρμόζεται για την αλλαγή των συνθηκών εκπομπής, όπως για παράδειγμα, αν τα παράθυρα ανοίγουν σε ένα δωμάτιο, που περιέχει ένα **Femtocell**. Εντός ενός δικτύου παρόχου, οι πύλες των **Femtocell** περιλαμβάνουν μεγάλα πλήθη συνδέσεων **Femtocells** (από 100.000 έως 300.000), τα οποία αποτελούν το πρώτο υψηλής χωρητικότητας **IP** τείχος προστασίας (**IP firewalls**).

Τα **Femtocells** αποτελούν ένα βασικό στοιχείο του μοντέλου επιχειρήσεων για εξέλιξη του τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Αν και λειτουργεί καλά με την πολυπλεξία τύπου **CDMA**, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και με την **LTE** τεχνολογία. Η **LTE** χρησιμοποιεί γενικά **OFDM** πολυπλεξία για το σήμα απαιτείται περαιτέρω έρευνα, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι επιτυγχάνεται η βέλτιστη χρήση ή να διατυπωθούν λύσεις να συνδυαστούν οι τεχνολογικές προτάσεις, ώστε να βελτιστοποιείται η χρήση του δικτύου συνολικά.

Ένα **Femtocell** είναι η μικρότερη μονάδα ως τώρα, που μπορεί να συναντήσει κανείς σε ένα κυψελωτό δίκτυο. Σχεδιάστηκε για να τοποθετείται σε κάθε σπίτι και



FIGURE 6.1: Η εγγύτητα των κυψελών στις Ultra-dense υλοποιήσεις. Η απόσταση από κυψέλη σε κυψέλη είναι 10m και η ακτίνα της κυψέλης είναι επίσης 10m.

επιτρέπει σε άλλες κινητές συσκευές να επικοινωνούν μέσα από ευρυζωνικές συνδέσεις μέσω καλωδίου ή διαφόρων τύπων DSL. Τα Femtocells λειτουργούν με το ίδιο αδειοδοτούμενο φάσμα, όπως οι Microcells και οι Macrocells, όμως, είναι δυνατό να καλύψουν μόνο κάποιες δεκάδες μέτρα και να καλύψουν μία μικρή περιοχή εντός της οικίας. Αυτή η νέα πρόταση επιτρέπει να επωφελείται ο πάροχος και από το οικιακό δίκτυο, κάτι που παλαιότερα δεν εξασφάλιζε σημαντικά οφέλη. Τα Femtocells καλύπτουν δεκάδες μέτρα, σίγουρα κάτω από εκατοντάδες. Συνήθως, θεωρείται ότι είναι ικανά να καλύψουν επαρκώς μέχρι περίπου 100m. Τα σχήματα 6.1 και 6.2 δείχνουν τη βασική δομή της αρχιτεκτονικής για την Ultra-dense τεχνολογία. Υπάρχουν πολλές μικρές κυψέλες εντός της μεγαλύτερης κυψέλης, που έχουν ως βασικό στόχο την καλύτερη κάλυψη του δικτύου.

## 6.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Είναι σημαντικό να περιγραφεί το μαθηματικό μοντέλο, που διέπει τις σχέσεις του κόστους για την Ultra-dense υλοποίηση. Το κόστος αυτό διαχωρίζεται σε δύο επί μέρους παράγοντες: το κόστος κεφαλαίου και το λειτουργικό κόστος. Αναλυτικά, για κάθε κόστος παρατίθεται η ανάλυσή του παρακάτω:

### 6.2.1 Κόστος κεφαλαίου

Στην περίπτωση, της υπέρπυκνης αρχιτεκτονικής Ultra-dense, το κόστος CAPEX αφορά στο κεφάλαιο, που δαπανάται για την απόκτηση και την εγκατάσταση του συστήματος και οικονομικά δεν είναι απαραίτητο να επιβαρύνει τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο, εφόσον, όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση του Femtocell, είναι δυνατό και κάποιος ιδιώτης να θέλει να τοποθετήσει Femtocell στο δίκτυό του. Αυτό είναι πιθανό, διότι το Femtocell είναι σχετικά οικονομική λύση, και μπορεί

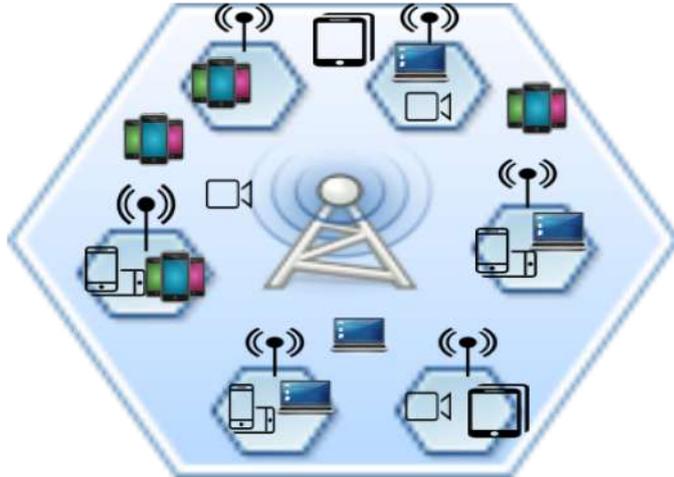


FIGURE 6.2: Η εγγύτητα των κυψελών στις Ultra-dense υλοποιήσεις. Η απόσταση από κυψέλη σε κυψέλη είναι 10m και η ακτίνα της κυψέλης είναι επίσης 10m.

κάνεις εύκολα να το τοποθετήσει μόνος του και συμβάλει σημαντικά στη συνολική βελτίωση του δικτύου του, αφού είναι δυνατή η αδιάκοπη εξυπηρέτηση περισσότερων συσκευών με την ίδια βασική υποδομή. Συνεπώς, το κόστος κεφαλαίου ενδέχεται να επιβαρύνει τον οικιακό προϋπολογισμό.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο εξοπλισμός, όπως προαναφέρθηκε, έχει να κάνει μόνο με το σταθμό βάσης και περιλαμβάνει και τον εξοπλισμό για τη δρομολόγηση των δεδομένων από και προς το δίκτυο κορμού. Κάθε άλλος εξοπλισμός και κάθε κόστος, που ενδεχομένως, περιλαμβάνεται δεν είναι πολύ σημαντικό ή πολύ απαραίτητο και για αυτόν τον λόγο, συνήθως, δε λαμβάνεται υπόψη. Επίσης, υποτίθεται, πως ήδη υπάρχει ο εξοπλισμός, που απαιτείται για την ευρυζωνική σύνδεση και για την καλωδίωση, συνεπώς, δεν περιλαμβάνεται τέτοια ανάλυση κόστους στο εν λόγω κοστολόγιο. Άλλωστε, σήμερα, στη μεγάλη πλειονότητα των ελληνικών σπιτιών διατίθεται σύνδεση στο διαδίκτυο.

Ο σταθμός βάσης αποτελείται από περισσότερους κόμβους (eNB) και το κόστος, που απαιτείται για την απόκτησή του, αναπαρίσταται από το κόστος  $C_{HeNB}$ , ενώ το κόστος για τη διεπαφή, που απαιτείται για την επικοινωνία του Femtocell με το σύστημα, δηλαδή το (Interface cost) είναι το  $C_{i/f}$ , τότε το συνολικό ετήσιο κόστος της Ultra-dense υλοποίησης, θα πρέπει να περιλαμβάνει  $N$  κόμβους  $H_{eNB}$ , οι οποίοι αποτελούν το συνολικό σύστημα σταθμού βάσης και αξιοποιώντας τη σχέση 4.1, το κόστος κεφαλαίου για την Ultra-dense αρχιτεκτονική και κατ' επέκταση για τα Femtocells, δίνεται από την πιο κάτω εξίσωση:

$$c_{dense}^{cx} = N(C_{HeNB} + C_{i/f}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (6.1)$$

όπου  $c_{dense}^{cx}$  είναι το ετήσιο κόστος κεφαλαίου CAPEX και  $N$  το πλήθος των κόμβων eNBs, που συνιστούν την Ultra-dense υλοποίηση,  $n$  είναι το πλάνο επενδύσεων σε έτη και  $r$  είναι το περιοδικό επιτόκιο.

### 6.2.2 Λειτουργικό κόστος

Υπάρχει μία μόνο κατηγορία κόστους, που περιλαμβάνεται στην **OPEX** δαπάνη και σχετίζεται με το τέλος συντήρησης, που απαιτείται, με σκοπό την ορθή και εύρυθμη λειτουργία του εξοπλισμού δρομολόγησης του συστήματος. Αυτό έχει θεωρηθεί ως ένα κόστος γραμμικά ανάλογο με το **CAPEX**, δηλαδή με τη δαπάνη κεφαλαίου και πολλαπλασιάζεται με μία γραμμικά σχετιζόμενη παράμετρο  $f$ . Συνεπώς, το συνολικό κόστος λειτουργίας, για ένα **Ultra-dense** σύστημα και στη συγκεκριμένη περίπτωση, για ένα **Femtocell**, προκύπτει αξιοποιώντας τη σχέση 4.1 και αντικαθιστώντας τη σχέση 6.1 για το κόστος κεφαλαίου θα δίνεται από τη σχέση:

$$c_{dense}^{ox} = f_{st}N(C_{HeNB} + C_{i/f}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (6.2)$$

όπου  $c_{dense}^{ox}$  αποτελεί το λειτουργικό κόστος για την **Ultra-dense** υλοποίηση, ενώ οι λοιπές μεταβλητές επεξηγήθηκαν προηγουμένως.

### 6.2.3 Συνολικό κόστος

Όσον αφορά, στο συνολικό κόστος για την κατοχή ενός **Ultra-dense** συστήματος, πρέπει να λάβει κανείς υπόψιν του, το κεφάλαιο, που δαπανήθηκε αρχικά, για να αποκτηθεί η τεχνολογία, αλλά και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού. Κατά συνέπεια, το κόστος, για την ιδιοκτησία του συστήματος, είναι το άθροισμα των επί μέρους δύο τύπων κόστους, δηλαδή του **CAPEX** και του **OPEX**. Άρα, το συνολικό κόστος κατοχής της **Ultra-density**, αξιοποιώντας την εξίσωση 4.1 και αντικαθιστώντας, έπειτα, τις 6.1 και 6.2, δίνεται από τη σχέση:

$$c_{dense}^{TCO} = (1 + f_m) \frac{i}{1 - (1 + i)^n} N C_{i/f} \quad (6.3)$$

## 6.3 Παράμετροι

Οι βασικότερες παράμετροι σχετικά με το μοντέλο **Ultra-dense** παρατίθενται στον Πίνακα 6.1 (Markendahl and Makitalo, 2010), (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois, 2014). Ταυτόχρονα με τις τιμές για κάθε ένα από τα συστατικά στοιχεία των μοντέλων, παρατίθεται και η αντίστοιχη εργασία από την οποία έχουν αντληθεί οι τιμές αυτές.

## 6.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Αρχικά, υπολογίζεται το κόστος κεφαλαίου για την **DAS** με ή χωρίς τη δημιουργία σταθμού βάσης και το κόστος κεφαλαίου για τα **Femtocells** μεταβάλλοντας το πλήθος κεραιών στο σύστημα. Κάθε φορά μεταβάλλεται το συνολικό πλήθος κεραιών για το σύστημα, με τη χρήση τιμών 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 κεραιών, και προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.3.

Παρατηρείται ότι τα **DAS** είτε έχουν από πριν υλοποιημένο σταθμό βάσης-**new Base Station (NB)** είτε όχι και απαιτούν τη δημιουργία αυτού, σύμφωνα με την υλοποίησή τους, εμφανίζουν χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου, το οποίο είναι και

TABLE 6.1: Μεταβλητές συστήματος και παράμετροι για το σύστημα υπερ-πυκνών αρχιτεκτονικών.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
$C_{eNB}$	Κεφάλαιο, που δαπανάται για τον eNB κόμβο	1000 €
$C_{EPC}$	Κεφάλαιο, που δαπανάται για το πακέτο EPC στο δίκτυο κορμού για έναν κόμβο eNB	110 €*
$N$	Πλήθος σταθμών βάσης	1
$i$	Ετήσιο επιτόκιο	6%
$n$	Διάρκεια πλάνου επενδύσεων	10 χρόνια
$r$	Περιοδικό επιτόκιο	6%

\*: Συμπεριλαμβάνεται στο ανωτέρω κόστος.

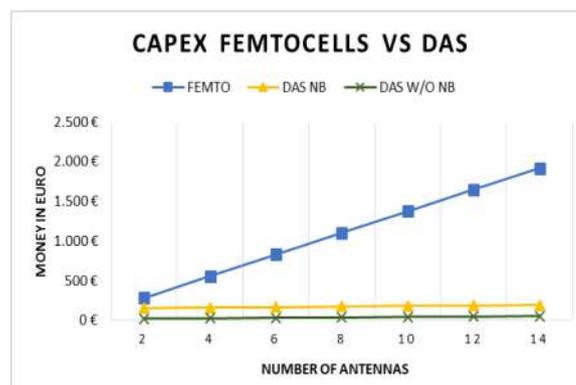


FIGURE 6.3: Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

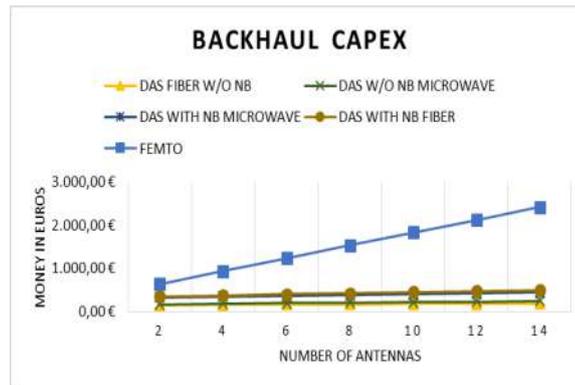


FIGURE 6.4: Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB με βάση διαφορετικές τεχνολογίες υλοποίησης οπτική ίνα ή μικροκύματα συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

σταθερό παρά την αύξηση του πλήθους κεραιών. Αυτό κυμαίνεται σε μερικές εκατοντάδες €. Όταν απαιτείται η κατασκευή NB το κόστος είναι λίγο μεγαλύτερο. Από την άλλη μεριά, τα Femtocells αυξάνουν το κόστος κεφαλαίου τους γραμμικά σχεδόν με την αύξηση των κεραιών. Κινούνται δε σε ένα εύρος τιμών από μερικές εκατοντάδες έως 2.000€. Κάτι τέτοιο δεν ήταν αναμενόμενο, διότι από τις σχέσεις κόστους, φαινόταν να έχει λιγότερους παράγοντες κόστους, αλλά και θεωρητικά, διαθέτει λιγότερα εξαρτήματα. Συνεπώς, η αύξηση των κεραιών πυροδότησε την αύξηση στο κόστος κεφαλαίου για το Femtocell.

Επίσης, για το ίδιο σύστημα, αυτή τη φορά, είναι δυνατό να υλοποιηθεί με διαφορετική τεχνολογία καλωδίωσης, δηλαδή οπτική ίνα, που είναι ακριβότερη από την παραδοσιακή υποδομή. Κάθε φορά το συνολικό πλήθος κεραιών για το σύστημα μεταβάλλεται, με τη χρήση τιμών 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 κεραιών, και προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.4.

Προκύπτει ότι τα κόστη για το DAS σε κάθε περίπτωση, δηλαδή είτε κατασκευάζοντας NB με οπτική ίνα ή μικροκύματα ή μη κατασκευάζοντας NB με οπτική ίνα ή μικροκύματα, τα κόστη κεφαλαίου πάλι διατηρούνται σταθερά με την αύξηση του πλήθους κεραιών και δεν ξεπερνούν τις μερικές εκατοντάδες €. Τα κόστη με την εφαρμογή οπτικής ίνας δεν είναι περισσότερο ακριβά. Αντίθετα, περισσότερο ρόλο φαίνεται να παίζει η κατασκευή ή όχι του NB. Από την άλλη μεριά, τα κόστη των Femtocells αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του πλήθους των κεραιών και κινούνται σε ένα εύρος από μερικές εκατοντάδες μέχρι σχεδόν τα 3.000 €. Κάτι τέτοιο δεν ήταν αναμενόμενο, διότι από τις σχέσεις κόστους, φαινόταν να έχει λιγότερους παράγοντες κόστους, αλλά και θεωρητικά, περιλαμβάνει λιγότερα εξαρτήματα. Συνεπώς, η αύξηση των κεραιών πυροδότησε ξανά την αύξηση στο κόστος κεφαλαίου για το Femtocell.

Επιπλέον, με την προϋπόθεση ότι απαιτείται εξυπηρέτηση από τις τεχνολογίες για ένα αρκετά μεγάλο κτίσμα, επιδιώκεται η μεταβολή, κάθε φορά του συνολικού πλήθους κεραιών για το σύστημα, με τη χρήση τιμών 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 κεραιών, και τελικά, προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.5.

Παρατηρείται ότι τα DAS είτε έχουν από πριν υλοποιημένο NB είτε όχι απαιτούν, σύμφωνα με την υλοποίησή τους, χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου, το

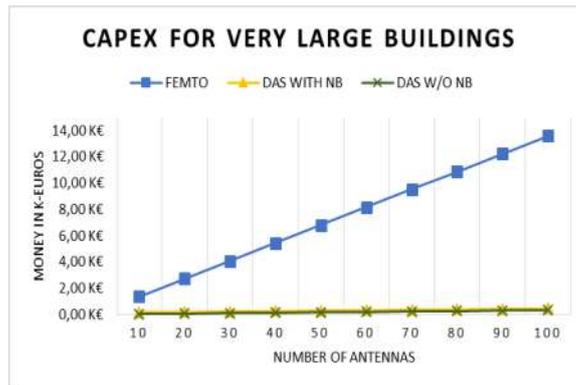


FIGURE 6.5: Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB, για πολύ μεγάλα κτήρια, συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

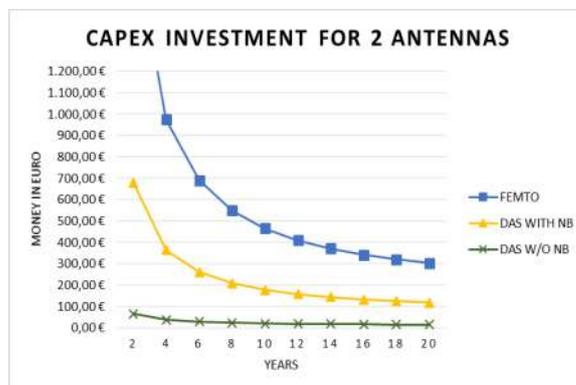


FIGURE 6.6: Δαπάνες κεφαλαίου για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσει των ετών επένδυσης.

οποίο είναι και σταθερό παρά την αύξηση του πλήθους κεραιών. Αυτό κυμαίνεται σε μερικές εκατοντάδες €. Από την άλλη μεριά, τα Femtocells αυξάνουν το κόστος κεφαλαίου τους γραμμικά σχεδόν με την αύξηση των κεραιών. Κινούνται σε ένα εύρος τιμών από 1.000 € έως 14.000 €. Κάτι τέτοιο δεν ήταν αναμενόμενο, διότι από τις σχέσεις κόστους, φαινόταν να έχει λιγότερους παράγοντες κόστους, αλλά και θεωρητικά, περιλαμβάνει λιγότερα εξαρτήματα. Συνεπώς, η αύξηση των κεραιών πυροδότησε την αύξηση στο κόστος κεφαλαίου για το Femtocell.

Ακόμα, είναι σημαντικό να εξεταστεί το πλαίσιο των ετών επένδυσης. Για παράδειγμα, ποια είναι, δηλαδή, η συμπεριφορά του συστήματος αν το σχέδιο επένδυσης, έχει υπολογιστεί για λιγότερα ή περισσότερα χρόνια. Με τη μεταβολή, κάθε φορά του συνολικού πλήθους των ετών επένδυσης για το σύστημα, με τη χρήση τιμών για τα έτη σε 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 έτη, ενώ αυτή τη φορά το πλήθος των κεραιών δε μεταβάλλεται, αλλά διατηρείται σταθερό σε 2 κεραιές, προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.6.

Παρατηρείται ότι τα DAS, όταν έχουν από πριν υλοποιημένο NB το κόστος κεφαλαίου, που περιλαμβάνουν είναι σχεδόν σταθερό κάτω από 100 €. Αν χρειάζεται η δημιουργία NB, τότε το κόστος κεφαλαίου ελαττώνεται παραβολικά με το πέρασμα των ετών. Στη μέγιστη περίπτωση, περιλαμβάνει ένα κόστος περίπου 700 €, ενώ

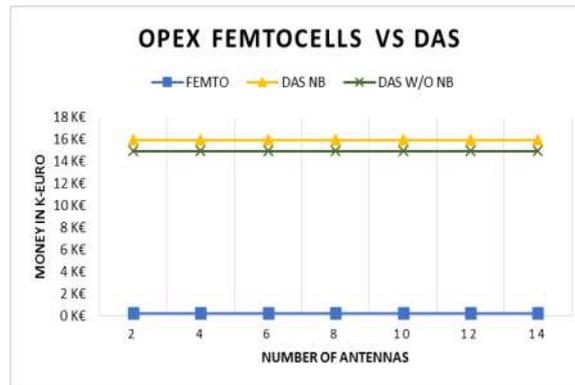


FIGURE 6.7: Δαπάνες λειτουργίας για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

μετά από 20 χρόνια καταλήγει στα 100 €. Όσον αφορά στο κόστος κεφαλαίου για τα Femtocells μειώνουν, επίσης, παραβολικά το κόστος κεφαλαίου τους με το πέρασμα των ετών, εμφανίζοντας μέγιστη τιμή στα 2 έτη τα 1200 € περίπου και εμφανίζοντας ελάχιστο περίπου στα 300 € μετά από 20 χρόνια επένδυσης. Κάτι τέτοιο θεωρείται λογικό, εφόσον αυξάνουν τα έτη μίας επένδυσης, δηλαδή όσο το πλάνο επενδύσεων είναι μακροπρόθεσμο, τόσο ελαττώνεται και το κόστος κεφαλαίου, αφού σε αυτή την περίπτωση, στο κεφάλαιο, δηλαδή παίζει σπουδαίο ρόλο το επιτόκιο και ο δανεισμός, δηλαδή η σχέση 4.1.

Αρχικά, για το DAS υπάρχουν δύο περιπτώσεις, όπως και για το CAPEX αν απαιτείται να κατασκευαστεί ή όχι NB. Στο συγκεκριμένο σχήμα, μεταβάλλεται, κάθε φορά το συνολικό πλήθος κεραιών για το σύστημα, με τη χρήση τιμών 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 κεραιών, και προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.7.

Παρατηρείται ότι τα DAS είτε έχουν από πριν υλοποιημένο NB είτε όχι και απαιτείται να υλοποιηθεί, έχουν υψηλό κόστος λειτουργίας, πάνω από 14.000 € για το DAS χωρίς NB και στα 16.000 € για το DAS, που απαιτεί NB. Από την άλλη μεριά, όμως, το Femtocell έχει πολύ χαμηλά κόστη λειτουργίας, μερικών εκατοντάδων €, τα οποία είναι επίσης σταθερά. Αυτό είναι λογικό θεωρητικά, εφόσον, υπάρχουν πολύ περισσότερα συστήματα να συντηρηθούν, να λειτουργήσουν και να τροφοδοτηθούν με ρεύμα στην περίπτωση των DAS. Αφού εκτός του BS περιλαμβάνουν και το DS, κάτι που αποτυπώθηκε και στις εξισώσεις, εφόσον, είχαν περισσότερα μέρη για τις λειτουργικές δαπάνες. Συνεπώς, η θεωρητική προσέγγιση σε αυτή τη δαπάνη επιβεβαιώνεται και πρακτικά.

Επιπλέον, ένα εξίσου σημαντικό συμπέρασμα, το οποίο προκύπτει είναι ότι το λειτουργικό κόστος για όλες τις τεχνολογίες παραμένει ανεπηρέαστο και σταθερό, ακόμα και με την αύξηση των κεραιών, άρα δεν έχει νόημα να εξεταστεί περαιτέρω, με περισσότερες, δηλαδή, γραφικές απεικονίσεις η συμπεριφορά του.

Αρχικά, μεταβάλλεται, κάθε φορά το συνολικό πλήθος κεραιών για το σύστημα, με τη χρήση τιμών 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 κεραιών, και προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.8.

Παρατηρείται ότι τα DAS είτε έχουν από πριν υλοποιημένο NB είτε όχι και απαιτείται να δημιουργηθεί, σύμφωνα με την υλοποίησή τους, έχουν υψηλό συνολικό κόστος, το οποίο είναι και σταθερό παρά την αύξηση του πλήθους κεραιών.

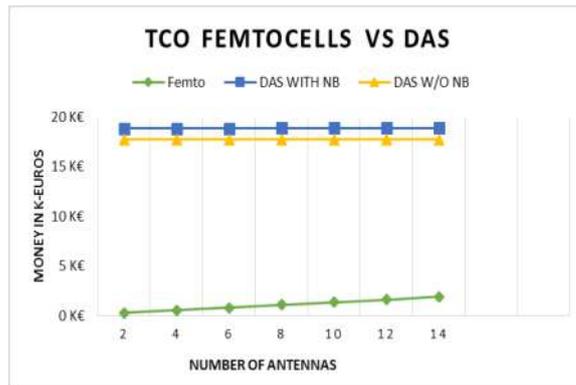


FIGURE 6.8: Συνολικό κόστος κατοχής για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

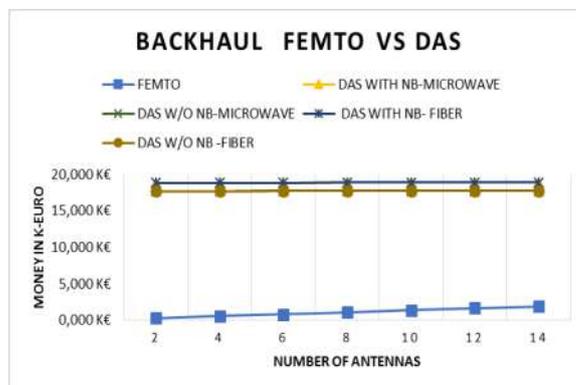


FIGURE 6.9: Συνολικές δαπάνες κατοχής, για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB, με βάση διαφορετικές τεχνολογίες υλοποίησης οπτική ίνα ή μικροκύματα συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

Αυτό κυμαίνεται από 17.000 € σε 19.000 € για το DAS χωρίς και με υλοποίηση NB, αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά, τα Femtocells αυξάνουν το κόστος τους γραμμικά σχεδόν με την αύξηση των κεραιών, παρόλα αυτά το συνολικό κόστος τους, δεν ξεπερνά τις μερικές εκατοντάδες €. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, διότι από τις σχέσεις συνολικού κόστους, φαινόταν να έχει λιγότερους παράγοντες κόστους, αλλά και θεωρητικά, περιλαμβάνει λιγότερα εξαρτήματα. Σε αυτή την περίπτωση, η θεωρία επιβεβαιώθηκε και πρακτικά.

Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση, θεωρείται σημαντικό να εξεταστεί το σύστημα για τις διαφορετικές προσεγγίσεις καλωδίωσης, δηλαδή την οπτική ίνα ή την παραδοσιακή προσέγγιση. Μεταβάλλεται, λοιπόν, το πλήθος των κεραιών με τη χρήση τιμών 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 κεραιών, και προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.9.

Προκύπτει ότι για το DAS σε κάθε περίπτωση, δηλαδή είτε κατασκευάζοντας NB με οπτική ίνα ή μικροκύματα ή μην κατασκευάζοντας NB με οπτική ίνα ή μικροκύματα, τα συνολικά κόστη πάλι διατηρούνται σταθερά με την αύξηση του πλήθους κεραιών και κυμαίνονται από 17.000 € έως 19.000 €. Από την άλλη μεριά, τα κόστη των Femtocell αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του πλήθους

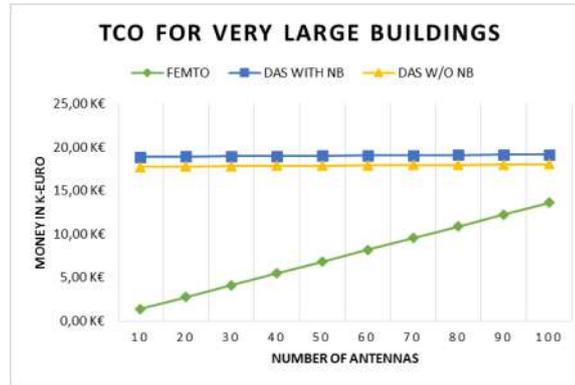


FIGURE 6.10: Συνολικές δαπάνες κατοχής για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB, και με την κατασκευή NB, για πολύ μεγάλα κτήρια, συναρτήσει του πλήθους κεραιών.

των κεραιών και κινούνται σε ένα εύρος από μερικές εκατοντάδες μέχρι σχεδόν τα 3.000 €. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, διότι από τις σχέσεις κόστους, φαινόταν να έχει λιγότερους παράγοντες κόστους, αλλά και θεωρητικά, περιλαμβάνει λιγότερα εξαρτήματα.

Επίσης, είναι σημαντικό να υποθέσει κανείς, ότι ενδέχεται να επιδιώκεται, η εξυπηρέτηση, με τις τεχνολογίες, ενός πολύ μεγάλου κτηρίου, πολλών τ.μ. με τη μεταβολή, κάθε φορά του συνολικού πλήθους κεραιών για το σύστημα, με τη χρήση τιμών 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 κεραιών, προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.10.

Παρατηρείται ότι τα DAS είτε έχουν από πριν υλοποιημένο NB είτε όχι και απαιτείται, σύμφωνα με την υλοποίησή τους, έχουν υψηλό συνολικό κόστος, το οποίο είναι και σταθερό παρά την αύξηση του πλήθους κεραιών στα 17.000-19.000 €. Από την άλλη μεριά, τα Femtocells αυξάνουν το κόστος κεφαλαίου τους γραμμικά σχεδόν με την αύξηση των κεραιών. Κινούνται σε ένα εύρος τιμών από 1.000 € έως 14.000 €. Κάτι τέτοιο δεν ήταν αναμενόμενο, διότι από τις σχέσεις κόστους, φαινόταν να έχει λιγότερους παράγοντες κόστους, αλλά και θεωρητικά, περιλαμβάνει λιγότερα εξαρτήματα. Συνεπώς, η αύξηση των κεραιών πυροδότησε την αύξηση στο κόστος κεφαλαίου για το Femtocell. Ακόμα, είναι σημαντικό για το συνολικό κόστος να μελετηθεί το πλήθος των ετών επένδυσης. Μεταβάλλοντας, κάθε φορά το συνολικό πλήθος των ετών επένδυσης για το σύστημα, με τη χρήση τιμών για 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 έτη, και αυτή τη φορά το πλήθος των κεραιών διατηρείται σταθερό σε 2 κεραιές, προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 6.11.

Παρατηρείται ότι τα DAS, όταν έχουν από πριν υλοποιημένο NB το συνολικό κόστος τους είναι λίγο χαμηλότερο στα 17.000 €, ενώ αν δεν έχουν NB και πρέπει να υλοποιηθεί, περιλαμβάνουν συνολικό κόστος, που αγγίζει τα 19.000 €. Όσον αφορά στο συνολικό κόστος για τα Femtocells είναι περίπου σταθερό και παραμένει σε μερικές εκατοντάδες €. Στην περίπτωση των DAS με κατασκευή NB και των Femtocells παρατηρείται ότι στην πρώτη μεταβολή, δηλαδή για 2 χρόνια επένδυσης το συνολικό κόστος περιλαμβάνει μία μικρή διακύμανση, η οποία ελαττώνεται καθώς αυξάνουν τα έτη επένδυσης. Άρα, συνάγεται ότι όσο περισσότερα είναι τα έτη

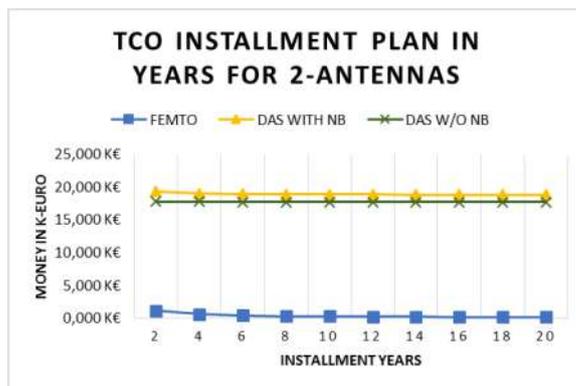


FIGURE 6.11: Συνολικές δαπάνες κατοχής για τις διάφορες τεχνολογίες, Femtocell, DAS χωρίς την κατασκευή NB και με την κατασκευή NB συναρτήσει των ετών επένδυσης.

επένδυσης, τόσο οικονομικότερο είναι και για το συνολικό κόστος.

Παρουσιάζεται ότι το κόστος CAPEX, το οποίο ποικίλει σε συνάρτηση με τον αριθμό των κεραιών για τους πιο πάνω βασικούς τύπους ανάπτυξης. Το κόστος των επενδύσεων για την ανάπτυξη του DAS είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο κόστος για τα Femtocells. Επίσης, στην περίπτωση που απαιτείται ανάπτυξη NB, σε ένα DAS, το κόστος αυξάνεται, κάπως, σε σχέση με το DAS, που δεν απαιτεί τέτοια ανάπτυξη. Παρόλα αυτά, είναι σταθερά τα κόστη κεφαλαίου για το DAS, σε κάθε περίπτωση, όσο κι αν αυξηθεί το πλήθος κεραιών. Όσον αφορά στο κόστος για το Femtocell, αυτό αυξάνει ανάλογα με την αύξηση του πλήθους κεραιών. Το ίδιο ισχύει και στις περιπτώσεις για τις οποίες οι τεχνολογίες καλωδίου είναι ακριβότερες, δηλαδή χρησιμοποιείται η οπτική ίνα. Δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στο DAS, ενώ ξανά το κόστος Femtocell αυξάνει γραμμικά ανάλογα με την αύξηση του πλήθους κεραιών.

Όσον αφορά, σε ένα μεγάλο κτήριο, με πολλές κεραιές από 10-100 το DAS διατηρεί πολύ χαμηλό και σταθερό το κόστος του κεφαλαίου για μεγάλο αριθμό κεραιών, ενώ το κόστος για το Femtocell διατηρείται σε πολύ υψηλά επίπεδα και μάλιστα αυξάνεται γραμμικά ανάλογα με την αύξηση του πλήθους κεραιών στο κτήριο. Τέλος, το κόστος κεφαλαίου ελαττώνεται για κάθε περίπτωση με το πέρασμα των ετών, ενώ παρουσιάζει μέγιστο για τα 2 χρόνια στο Femtocell και ελάχιστο για το DAS χωρίς NB. Το DAS με NB κινείται σε ενδιάμεσα επίπεδα.

Το κόστος λειτουργίας σε κάθε περίπτωση διατηρείται σταθερό σε ετήσια βάση με την αύξηση του πλήθους κεραιών. Παρόλα αυτά, για το Femtocell είναι πολύ χαμηλό, από την άλλη μεριά για τις δύο DAS περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα υψηλό. Συνεπώς, συμπεραίνει κανείς ότι για να ενισχυθεί η παρουσία της DAS τεχνολογίας πρέπει να βρεθούν εναλλακτικές μέθοδοι να ελαττωθεί το κόστος λειτουργίας για την εν λόγω υλοποίηση.

Εν συνεχεία, όσον αφορά το συνολικό κόστος για την ιδιοκτησία των τεχνολογιών παρατηρείται ότι όσον αφορά τις περιπτώσεις για το DAS είναι υψηλό το συνολικό κόστος και το συνολικό κόστος για το Femtocell είναι χαμηλό με την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Από την άλλη μεριά, όμως, το κόστος των Femtocells δεν είναι σταθερό αλλά γραμμικά ανάλογο του πλήθους κεραιών, ενώ το κόστος του DAS είναι σταθερό. Όσον αφορά, στις διαφορετικές υλοποιήσεις της

καλωδίωσης, παρατηρείται πώς το συνολικό κόστος για το DAS είναι σταθερό σε όλες τις περιπτώσεις και παραμένει στα ίδια επίπεδα, σχεδόν με υψηλότερο κόστος να εμφανίζεται για το DAS με NB και οπτική ίνα. Από την άλλη μεριά, το Femtocell μπορεί να έχει μικρό κόστος, αλλά αυτό αυξάνεται γραμμικά ανάλογα με το πλήθος των κεραιών.

Εν συνεχεία, το κόστος για πολύ μεγάλα κτήρια με μεγάλο πλήθος κεραιών από 10 έως 100 για το DAS μένει σταθερό σε υψηλά επίπεδα, ενώ για το Femtocell, αυξάνεται γραμμικά ανάλογα με την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Σχετικά με το σχέδιο επενδύσεων το συνολικό κόστος είναι σχεδόν σταθερό σε κάθε περίπτωση, με εξαίρεση τα δύο και τέσσερα έτη, που παρουσιάζεται ότι είναι λίγο πιο αυξημένο το κόστος για τόσο μικρά χρονικά διαστήματα.

Και στην περίπτωση αυτή, το DAS παρουσιάζει υψηλότερα κόστη, ενώ για το Femtocell τα αντίστοιχα κόστη είναι πολύ χαμηλότερα. Συνολικά, λοιπόν, από τις παραπάνω παρατηρήσεις είναι δυνατό να καταλήξει κανείς σε πολύ σημαντικά συμπεράσματα, που αναμένεται να ενισχύσουν τη θέση της μίας ή της άλλης τεχνολογίας και να ωθήσουν τους ενδιαφερόμενους να στραφούν στη μία ή στην άλλη λύση ανάλογα με το δίκτυο, που διαθέτουν, ανάλογα με τις ανάγκες, που θέλουν να καλύψουν και ανάλογα με το προϋπολογισμό, που διαθέτουν για το δίκτυό τους.

Αρχικά, παρατηρείται ότι το αν ένα δίκτυο DAS πρέπει να δημιουργηθεί σε μέρος, που ήδη υπήρχαν κόμβοι ή δεν υπήρχαν δεν παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, διότι να μην αυξάνει το κόστος η δημιουργία ενός NB, από την άλλη μεριά, όμως, αυτό δεν συμβαίνει σε απαγορευτικό βαθμό. Συνεπώς, το να υπάρχει ήδη κάτι τέτοιο, απλά θα ελαττώσει λίγο το κόστος, οπότε δεν αποτελεί έναν αποτρεπτικό παράγοντα να μην υπάρχει εκ των προτέρων εκεί NB και να υιοθετηθεί ένα DAS δίκτυο.

Εν συνεχεία, το υλικό καλωδίωσης, για το σταθμό του δικτύου, δεν επιδρά σημαντικά στο κόστος. Παρατηρείται μία μικρή αύξηση στην περίπτωση, την οπτικής ίνας, όμως είναι υποφερτή συγκριτικά με τη συνολική επένδυση. Από την άλλη μεριά, στις μέρες μας, παρατηρείται έντονα μία τάση και μία στροφή στο να αντικατασταθούν και τα επί μέρους τοπικά δίκτυα με οπτική ίνα έναντι των παραδοσιακών υπαρχουσών μεθόδων. Κάτι τέτοιο προσφέρει άμεσα μία ώθηση στο δίκτυο και συμβάλλει στον εκσυγχρονισμό κάθε κτηρίου και της υποδομής του, αλλά και στην αύξηση της αξίας του κτηρίου.

Επίσης, επιβεβαιώνεται το θεωρητικό πλαίσιο, ότι, δηλαδή, το DAS φαίνεται να μπορεί να εξυπηρετήσει και εξωτερικούς και πολύ μεγάλους χώρους, όπως γήπεδα, βιβλιοθήκες, δρόμους, πλατείες, εμπορικά κέντρα, νοσοκομεία, στάδια κλπ. Εφόσον, το DAS απαιτεί υψηλό λειτουργικό κόστος και ειδικευμένο προσωπικό για να το συντηρεί, χρειάζεται υψηλά κεφάλαια για αυτές τις δραστηριότητες, που μόνο κερδοφόρα μέρη μπορούν να αντέξουν και όχι κάποιος ιδιώτης ή μία μικρή επιχείρηση. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό, ότι μεγάλοι οργανισμοί και κρατικές υπηρεσίες είναι πιθανότερο να στραφούν στο DAS, αφού εξυπηρετεί τις ανάγκες τους και συνάμα είναι δυνατή η κάλυψη των δαπανών, που περιλαμβάνει.

Σε αντίθεση, το Femtocell είναι κατάλληλο μόνο για μικρές κτηριακές εγκαταστάσεις, όπως οικίες και μικροί σταθμοί εργασίας, συνεπώς, φαίνεται να ενδιαφέρει πολύ μικρές επιχειρήσεις, αυτές, που απασχολούν, δηλαδή λιγότερα από 9-10 άτομα, αλλά και οικίες για καλύτερη κάλυψη του σπιτιού και των διαφόρων

συσκευών, που υπάρχουν σε κάθε σπίτι, ειδικά, αν υπάρξουν και έξυπνες οικιακές συσκευές μελλοντικά. Άλλωστε, το Femtocell είναι μία οικονομική λύση και απαιτεί λίγα χρήματα και πολύ λίγες γνώσεις για εργασίες σχετικές με τη συντήρηση, αλλά και για τη συνολικότερη λειτουργία του. Επίσης, για μικρούς χώρους το κεφάλαιο επένδυσης διατηρείται σε βιώσιμα επίπεδα προσδίδοντας παράλληλα αποδοτικές υπηρεσίες.

Επιπρόσθετα, επιβεβαιώνεται ότι σε κάθε περίπτωση, είναι περισσότερο συμφέρουσα λύση ένα οποιοδήποτε επενδυτικό πλάνο να είναι μακροπρόθεσμο και μακρόπνοο και όχι βραχυπρόθεσμο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η επένδυση, πρέπει να ξεπερνά τα 6 χρόνια, αφού τότε σταθεροποιούνται τα αντίστοιχα κόστη, ενώ για λιγότερα έτη, τα κόστη παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις και συνεπώς, ενδέχεται να μην είναι προς το συμφέρον κάποιου να στραφεί σε μία πρόταση, η οποία θα εγκαταλειφθεί μέσα στα επόμενα 2 με 4 έτη.

Όσον αφορά στο λειτουργικό κόστος, παρατηρείται ότι εφόσον είναι σταθερό και αρκετά υψηλό σε κάθε περίπτωση, πρέπει να αναπτυχθούν μέθοδοι και τρόποι να ελαττωθεί το είδος αυτό του κόστους σε ετήσια βάση. Κάποιος από τους τρόπους αυτούς, θα ήταν να ενσωματωθεί κάποια εναλλακτική πηγή ενέργειας, όπως ηλιοσυλλέκτης για την εξυπηρέτηση του δικτύου, που θα μείωνε σημαντικά το κόστος για την παροχή ισχύος. Αλλά και με την περαιτέρω περιστολή των δαπανών με άλλες πιθανές μεθόδους, όπως για παράδειγμα, η εισαγωγή κατάλληλου αλγορίθμου, που να θέτει εκτός λειτουργίας το μη χρησιμοποιούμενο τμήμα του δικτύου και να το ενεργοποιεί όταν εντοπίζεται αντίστοιχος φόρτος στο δίκτυο. Το συγκεκριμένο είδος κόστους επηρεάζει πολύ περισσότερο το DAS σύστημα, εν αντιθέσει το Femtocell επηρεάζεται άμεσα από το κεφάλαιο, που απαιτεί για την υλοποίησή του.



## Chapter 7

# Distributed Antenna Systems (DAS)

Δημοσιεύσεις, που έχουν προκύψει σε σχέση με τα θέματα του παρόντος κεφαλαίου είναι: (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Anastasia Kollia, et al., 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016)

### 7.1 Αρχιτεκτονική

Κάθε DAS σύστημα, όπως άλλα ασύρματα δίκτυα αποτελούνται από ένα πλήθος κυψελών, αποτελείται από ένα πλήθος κεραιών, που υπάρχουν στο δίκτυο και κατανέμουν το εύρος ζώνης, ούτως ώστε, να διαμοιράζεται σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου και να εξυπηρετούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι διάφοροι χρήστες, που υπάρχουν σταθεροί ή διακινούμενοι στη συγκεκριμένη περιοχή, που έχει καθοριστεί να εξυπηρετείται από αυτό, κάθε χρονική στιγμή. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a)

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

Ένα δίκτυο DAS αποτελείται από 3 βασικά συστατικά: (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

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

Συχνά, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του DAS δικτύου και το περιβάλλον στο οποίο υλοποιείται, οι κόμβοι του ενδέχεται να περιέχουν επιπλέον εξοπλισμό στις κεραίες, όπως για παράδειγμα ενισχυτές, κεφαλές, μετατροπείς σήματος και πάροχοι ισχύος, αλλά και ειδικό υποστηρικτικό εξοπλισμό για την εγκατάσταση, ή άλλων δευτερεύων εξοπλισμό, όπως συναγερμούς, αισθητήρες κλπ., που ενδέχεται να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, εντούτοις αυξάνουν το κόστος της υιοθέτησης του DAS. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

Το δίκτυο DAS μπορεί να υλοποιηθεί εντός ή εκτός μεγάλων κτηρίων και μερικώς εσωκλειστων δομών. Ένα δίκτυο DAS ποικίλει από 2 έως 100 κόμβους DAS. Κάθε κόμβος DAS εκπέμπει σήματα σε χαμηλότερη ισχύ από ότι οι μεγαλύτερες κεραίες, σε επίπεδα παρόμοια με αυτά, που παρέχονται από τις **Macro-cells**. Οι εξωτερικοί DAS κόμβοι είναι συνδεδεμένοι σε στύλους από επιχειρήσεις δημόσιας ωφέλειας, σε φωτεινούς σηματοδότες, ή παρόμοιες δομές σε σχετικά χαμηλά ύψη, συγκριτικά με τις μεγαλύτερες κεραίες, ώστε να παρέχεται μικρή χωρητικότητα σε κάθε DAS κόμβο. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a)

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

Τα σύγχρονα DAS είναι, συνήθως, συστήματα, τα οποία υλοποιούνται με μέσα μετάδοσης τύπου **RF-optical-RF**. Αυτό σημαίνει ότι ο βασικός εξοπλισμός μετατρέπει σήματα **RF**, που παράγονται από έναν τηλεπικοινωνιακό δέκτη σε οπτικά σήματα, που εκπέμπονται δια μέσου οπτικής ίνας στους DAS κόμβους, όπου τα οπτικά σήματα μετατρέπονται ξανά σε **RF**, με σκοπό να μεταδίδονται στην απομακρυσμένη κεραία. Άλλες λύσεις, που χρησιμοποιούνται από τα **LTE** ή από **WiMax**, χρησιμοποιούν έναν οπτικό οδηγό, που καταλήγει σε ένα **RF** σύστημα. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, η οπτική έξοδος οδηγεί το φως μέσα στην οπτική ίνα σε απομακρυσμένες περιοχές και τελικά, για πρώτη φορά το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε **RF**. Η μεταφορά του σήματος από τον ασύρματο πάροχο μπορεί να γίνει σε πολύ μακρινές αποστάσεις ανάλογα φυσικά και με τον εκάστοτε σχεδιασμό του συστήματος, χάρη στην οπτική ίνα.

Γενικά, πλήθος πολιτών επιδιώκει υπηρεσίες υψηλής χωρητικότητας, αφού έχουν στην κατοχή τους ψηφιακές συσκευές, όπως έξυπνα τηλέφωνα, υπολογιστές και ταμπλέτες. Τα DAS δίκτυα εφαρμόζονται ως ένα μέσο μεγάλου φόρτου δεδομένων, με αποτέλεσμα, να είναι απαραίτητο να εξαπλωθούν τα δεδομένα στο

σύνολο της χωρητικότητας, ώστε να παρέχεται περισσότερο ανομοιόμορφη κάλυψη. Τα πιο πολλά DAS δίκτυα, δε γνωρίζουν την τεχνολογία, που θα συνυπάρξει μαζί τους στο συνολικό δίκτυο. Άρα, οι λύσεις επικοινωνίας με χρήση DAS είναι ιδιαίτερα ελκυστικές στον ασύρματο πάροχο, που διατηρεί την άδεια για το φάσμα εκπομπής RF ανάμεσα σε πολλές συχνοτικές ζώνες και χρησιμοποιεί πολλαπλές τεχνολογίες μετάδοσης, ακόμα και σε όσους παρόχους, δεν έχουν εντάξει ακόμα τα 4G δίκτυα και επιδιώκουν να το πράξουν στα επόμενα έτη. Ένα DAS δίκτυο ενδέχεται να υλοποιείται και να ανήκει σε έναν συγκεκριμένο ασύρματο πάροχο, σε ένα τρίτο ουδέτερο DAS δίκτυο του παρόχου υπηρεσίας, ή σε ένα πελάτη επιχειρήσεων ή σε έναν ιδιοκτήτη κτηριακών εγκαταστάσεων.

Όπως, σημειώνεται πιο πάνω, ένα δίκτυο DAS μπορεί να υλοποιείται και εντός και εκτός ενός κτηρίου. Εσωτερικά, η υλοποιούμενη τεχνολογία υπάρχει σε χώρους, όπου πλήθος ανθρώπων συνωστίζονται, όπως στάδια, γυμναστήρια, συνέδρια, βιβλιοθήκες και διάφορες άλλες μεγάλες εγκαταστάσεις. Τυπικά, αυτά τα μέρη δεν είναι δυνατό να εξυπηρετηθούν από Macrocells, που υπάρχουν εκτός του κτηρίου. Τα εξωτερικά DAS δίκτυα έχουν υλοποιηθεί σε συγκεκριμένες τοποθεσίες μέσα σε μία περιοχή, που ήδη έχει κάλυψη από Macrocells, ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα στο δίκτυο. Κάποια άλλα δίκτυα DAS ενδέχεται να υποστηρίζουν ακόμα και το 802.11 πρότυπο, το οποίο χρησιμοποιείται συνδυαστικά, με σκοπό να ελαττωθεί η κίνηση από τα Macrocells και να μετριάζεται η συσσωρευμένη χωρητικότητα.

Ένας εξωτερικός DAS κόμβος μπορεί να υποστηρίξει ως και 16 συχνοτικές ζώνες σε μία απόσταση 0.80467 km και μπορεί να υποστηρίξει 300 ταυτόχρονες συνδέσεις. Οι DAS κόμβοι ενσωματώνονται στην υπάρχουσα υποδομή, όπως οι στύλοι χρησιμότητας και τα φανάρια. Ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων και τη χωρητικότητα του ασύρματου μέσου, που συνυπάρχει στο δίκτυο, είναι δυνατό η αρχιτεκτονική να υποστηρίξει την κάλυψη μεγάλης γεωγραφικά περιοχής και να διαχειρίζεται χιλιάδες ταυτόχρονες συνδέσεις χρηστών. Όπως, ένα εξωτερικό σύστημα, το εσωτερικό DAS μπορεί να υποστηρίξει ως και 16 συχνοτικές ζώνες. Παρόλου, που η κάλυψη ποικίλει το DAS μπορεί να καλύπτει από 464,52m έως 2322,58m. Για τεράστια κτήρια μπορούν να τοποθετηθούν περισσότεροι DAS κόμβοι ανά όροφο, αυξάνοντας, παράλληλα αισθητά το κόστος της υλοποίησης. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

## 7.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Το κόστος για το DAS σύστημα, πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά, διότι διαφέρει αισθητά από τα επιμέρους κόστη, που περιλαμβάνει η Ultra-Dense υλοποίηση και γενικότερα, η Small Cell τεχνολογία. Κάτι τέτοιο, συμβαίνει λόγω της αισθητής διαφοράς, που υφίσταται ανάμεσα στις αρχιτεκτονικές τους, αφού καθεμία από τις δύο λύσεις περιλαμβάνει κόστη, που σχετίζονται με τα επί μέρους τμήματά της. Κάτι τέτοιο, συνεπάγεται ότι διαφορετικά κυκλώματα, δίκτυα, διαφορετική καλωδίωση, διαφορετικοί σταθμοί βάσης, συνεπάγονται αντίστοιχα και πολύ διαφορετικές λογικές υπολογισμού του κόστους και χρήζουν εναλλακτικής ανάλυσης.

Από την άλλη μεριά, το DAS περιλαμβάνει ένα επιπλέον κόστος υλοποίησης, που απαιτείται για την αρχιτεκτονική του DAS. Αυτό προκύπτει, διότι απαιτούνται πολλαπλές μικρές κεραίες σε ένα DAS σύστημα και ειδικά, για τα DAS εσωτερικού χώρου. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, απαιτούνται τροφοδότες, μετασχηματιστές, ενισχυτές σήματος κλπ. για τη σύνδεση μεταξύ των κεραιών, αλλά και για την καλύτερη διανομή του σήματος. Είναι δυνατό, ακόμα, να χρειάζεται υποστηρικτικός εξοπλισμός για την εγκαθίδρυση ενός τέτοιου συστήματος στο εσωτερικό ενός οποιουδήποτε κτηρίου, που δε στοχεύει στην ενίσχυση του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, αλλά σε καθαρά πρακτικό κομμάτι, όπως για παράδειγμα τη στήριξη στον τοίχο, το φωτισμό, την ασφάλεια του εξοπλισμού κλπ. Άρα, είναι απαραίτητος ο εξοπλισμός για την υποστήριξη και τοποθέτησή τους στο κτήριο, για την εγκατάστασή τους, για την προσαρμογή τους στο υπάρχον δίκτυο του κτηρίου, αλλά και στο γενικότερο πλαίσιο της κτηριακής εγκατάστασης.

Επιπλέον, για την τροφοδότησή του συστήματος με ρεύμα είναι απαραίτητη ειδική πρόβλεψη κόστους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε τέτοιο σύστημα βασίζεται σε επί μέρους τμήματα, κυκλώματα, κεραίες και εξοπλισμό, τα οποία απαιτούν την παροχή ρεύματος για τη λειτουργία τους. Κανένα από τα πιο πάνω συστήματα, δεν μπορεί να λειτουργήσει, χωρίς την απαιτούμενη ενέργεια. Το συγκεκριμένο κόστος, θα μπορούσε να αυξηθεί ακόμα περισσότερο, αν κάποιος προέβλεπε και το γεγονός ότι ενδεχομένως σε έναν πολύ σημαντικό οργανισμό, όπως μία πολυεθνική ή τραπεζική επιχείρηση, μία επενδυτική, κλπ., αφού θα επιδιωκόταν, επιπλέον, να εξασφαλιστεί ότι σε κάθε περίπτωση, το συνολικό δίκτυο θα λειτουργεί, κάτι, που θα γινόταν με την ένταξη γεννήτριας για την τροφοδότηση του δικτύου, στην περίπτωση, που διακοπτόταν η παροχή ενέργειας, είτε λόγω βλάβης είτε από τον πάροχο.

Επιπρόσθετα, για την εγκατάσταση του σταθμού βάσης, του κατανεμημένου συστήματος και των κεραιών καταβάλλεται κάποιο ποσό στους υπαλλήλους, που πραγματοποιούν την εγκατάσταση και πρέπει να προβλεφθεί κι αυτό το κόστος και να ενταχθεί σε μία λογική κοστολόγησης του συνολικού συστήματος. Επίσης, μετά από μία εγκατάσταση, παρόλο που το DAS δουλεύει κατά κάποιον τρόπο, χωρίς να γνωρίζει το συνολικό λοιπό σύστημα, εντούτοις, απαιτείται πλήθος ενεργειών για το συντονισμό και την ένταξή του, στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία και υποδομή του συνολικού δικτύου.

Οι εργασίες κατασκευής, εγκατάστασης και συντονισμού του συστήματος DAS στο ευρύτερο δίκτυο, είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν σε ένα κόστος υλοποίησης, δηλαδή ένα μέρος δαπανών, που λαμβάνεται υπόψη και πληρώνει κανείς για την υλοποίηση του έργου, που επιδιώκει, και ονομάζεται δαπάνη υλοποίησης ή **IMPlimentation EXpenditure** ή (**IMPEX**).

Όπως, και στην περίπτωση των Femtocells, δηλαδή της Ultra-density, υπάρχει και εδώ η έννοια των δαπανών κεφαλαίου και των δαπανών λειτουργίας, οι οποίες, όμως, λόγω της διαφοράς μεταξύ των δύο αρχιτεκτονικών, περιλαμβάνουν και διαφορετικά ποσά, που πηγάζουν από τα διαφορετικά κυκλώματα και τμήματα, που περιλαμβάνουν, και θα καταγραφούν αναλυτικά παρακάτω. (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

Ακολούθως περιγράφονται λεπτομερώς τα κόστη κάθε κατηγορίας, που πρέπει

να συνυπολογιστούν με βασικό στόχο να περιγράφεται το συνολικό κόστος για την κατοχή ενός τέτοιου συστήματος σε ένα συνολικό δίκτυο. Για το DAS, όπως ειπώθηκε πιο πάνω, το συνολικό κόστος διαχωρίζεται σε τρεις βασικές κατηγορίες: στο CAPEX, OPEX και IMPEX, η ανάλυση για καθένα από τα οποία παρουσιάζεται παρακάτω αναλυτικά. Ενώ, για να κατέχει κανείς το σύστημα (κόστος TCO), πρέπει να είναι δυνατό να καταβάλει τις συνολικές δαπάνες και για τα τρία είδη κόστους.

### 7.2.1 Κόστος Κεφαλαίου

Οι δαπάνες κεφαλαίου ή CAPEX είναι οι δαπάνες, που στην πραγματικότητα, αλλάζουν το μέλλον της επιχείρησης. Πραγματοποιούνται, όταν μία επιχείρηση αγοράζει πάγια στοιχεία του εξοπλισμού ή για την αγορά κάποιου περιουσιακού στοιχείου με διάρκεια ζωής, που εκτείνεται πέρα από το τρέχον φορολογικό έτος. Οι επενδύσεις κεφαλαίου χρησιμοποιούνται από οποιαδήποτε εταιρεία για να αποκτήσουν ή να αναβαθμίσουν τα υλικά περιουσιακά στοιχεία, όπως είναι ο εξοπλισμός ή για να αποκτηθούν κτίρια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, περιλαμβάνεται το κόστος για την αγορά του απαραίτητου δικτυακού εξοπλισμού, όπως είναι οι κεραίες, οι τροφοδότες, οι λοιπές συσκευές κλπ.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το κόστος του κεφαλαίου επιβαρύνει, όπως γίνεται αντιληπτό μόνο τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο κι όχι τους χρήστες. Το CAPEX επικεντρώνεται στον προϋπολογισμό ενός δικτυακού και τηλεπικοινωνιακού δικτύου, που επενδύεται για να αποκτηθεί και να υλοποιηθεί νέος εξοπλισμός, θέση, κλπ., αλλά κι ένα επιπλέον κόστος. Το κόστος, το οποίο απαιτείται επιπλέον εξασφαλίζει χρήματα, τα οποία επενδύονται, ώστε να αναβαθμίζονται οι υπάρχουσες υποδομές. Στη βιβλιογραφία, για τις ασύρματες επικοινωνίες, που βασίζονται σε DAS συστήματα, έχει παρουσιαστεί αναλυτικά ότι περιλαμβάνονται τα κόστη, τα οποία σχετίζονται με τα ακόλουθα στοιχεία:

- Με το σταθμό βάσης (BS),
- Με το κατανεμημένο σύστημα (Distributed System-DS), όπως απομακρυσμένες κεραίες, με το διαχωριστή τροφοδοσίας, με το συνδυαστικό κύκλωμα ευρείας ζώνης, με το ομοαξονικό καλώδιο, με το σύνδεσμο καλωδίων κλπ.,
- Με το συνολικό εξοπλισμό, καθώς και με το κόστος εξοπλισμού,
- Με τον εξοπλισμό υποστήριξης, που περιλαμβάνει, τον εξοπλισμό υποστήριξης στον τοίχο, τα καλώδια τροφοδοσίας ρεύματος, τη μπαταρία, το σύστημα συναγερμού, κλπ.

Ως αποτέλεσμα, πριν τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κεφαλαίου (CAPEX) για το DAS, είναι σημαντικό να υπολογιστεί το κόστος για ένα μόνο κόμβο NB (eNB), ο οποίος είναι ο βασικός DAS κόμβος. Όπως, προαναφέρθηκε, είναι διαφορετικός αυτός ο κόμβος από τον Small Cell κόμβο και ομοιάζει περισσότερο με το βασικό Macrocell κόμβο.

Η αξιολόγηση του κόστους είναι άμεση, εφόσον, αποτελείται από το κόστος του εξοπλισμού για το δίκτυο και συνεπώς, μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση:  $C_{eNB} + C_{EPC}$ . Οι εμπλεκόμενες ποσότητες  $C_{eNB}$  και  $C_{EPC}$  παριστάνουν τα κόστη για τον κόμβο eNB και EPC (Evolved Packet Core) αντίστοιχα, που

αποτελούν τα στοιχειώδη τμήματα του LTE-A δικτύου κορμού για το συγκεκριμένο σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος  $C_{eNB}$  εκτός από τα κόστη, που σχετίζονται με τον eNB εξοπλισμό και την υλοποίηση του τμήματος αυτού, επίσης, περιλαμβάνει κάθε πιθανό επιπρόσθετο κόστος, όπως για παράδειγμα, για την απόκτηση και κατασκευή του συστήματος, καθώς και κάθε κόστος, που σχετίζεται με την καλωδίωση για το eNB. Η ποσότητα  $C_{EPC}$  περιλαμβάνει κάθε κόστος, το οποίο σχετίζεται με το δίκτυο κορμού, όπως τα κόστη του πακέτου δρομολογητών του κορμού, κλπ.

Με σκοπό να υπάρξει κοινή αναφορά, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η εκτίμηση για το DAS πρέπει να γίνεται ετησίως και να λαμβάνει υπόψη τις πληρωμές για τις επενδύσεις. Συνεπώς, μία συνολική επένδυση κεφαλαίου για  $N$  κόμβους, οι οποίοι υπάρχουν συνολικά στο σύστημα, θα εκφράζεται ως ακολούθως:  $N(C_{eNB} + C_{EPC})$ . Άρα, με βάση τον τύπο 4.1, η εκτίμηση για το κόστος κεφαλαίου σε ετήσια βάση δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$C_{BS}^{CX} = N(C_{eNB} + C_{EPC}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (7.1)$$

όπου  $C_{BS}^{CX}$  το συνολικό κόστος κεφαλαίου, που απαιτείται για το σταθμό βάσης του DAS σε ετήσια βάση,  $n$  είναι η διάρκεια του σχεδίου επένδυσης σε έτη και  $r$  το ετήσιο περιοδικό επιτόκιο.

Επίσης, είναι απαραίτητο να εισαχθεί ένα κόστος, το οποίο αναπαριστά τον εξοπλισμό, που απαιτείται για την υποστήριξη του DAS συστήματος. Συνεπώς, είναι πιθανό να εισαχθεί μία σταθερά  $C_{eq}$  και μία παράμετρος  $d$ , που είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το πλήθος των δομών του DAS και ενσωματώνονται στο σύστημα. Έτσι, η εκτίμηση για τον υπολογισμό του CAPEX σε ετήσια βάση για τις κεραίες, που περιλαμβάνει το DAS επιπλέον, λόγω της δομής του, που κατανέμονται σε όλο το κτήριο, καθώς και ο βασικός εξοπλισμός, που απαιτείται για την υποστήριξη αυτών είναι δυνατό να περιγραφεί, με χρήση της εξίσωσης 4.1, δίνοντας την πιο κάτω σχέση:

$$C_{DASEQ}^{CX} = C_{eq}d \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (7.2)$$

όπου  $C_{DASEQ}^{CX}$  είναι το συνολικό κόστος του κεφαλαίου, που απαιτείται ετησίως για τον εξοπλισμό κατανεμημένων κεραιών στο DAS,  $n$  η διάρκεια του σχεδίου επένδυσης και  $r$  το ετήσιο περιοδικό επιτόκιο.

Το συνολικό κόστος CAPEX είναι το άθροισμα των επιμέρους, δηλαδή του κόστους για το σταθμό βάσης, καθώς και το κόστος για τις κεραίες και τον υποστηρικτικό εξοπλισμό, αφού αυτά είναι τα στοιχεία, που πρέπει να έχει κανείς για να ξεκινήσει το σύστημά του και σχετίζονται με τον υπολογισμό του διαθέσιμου κεφαλαίου.

Οι δαπάνες υλοποίησης σχετίζονται το κόστος υλοποίησης και προσαρμογής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τέτοιου είδους κόστος, θα εμφανιζόταν, εάν άλλαζε η θέση της κεραίας. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι αναπαριστά το χρηματικό ποσό, που δαπανάται και σχετίζεται με την εγκατάσταση και το συντονισμό του συστήματος, ώστε να προσαρμοστεί στο νέο δεδομένο, που στο προαναφερθέν παράδειγμα είναι η νέα θέση, και σε αυτή τη λογική, θα μπορούσε να περιλαμβάνεται

νέα εγκατάσταση, νέος υποστηρικτικός εξοπλισμός, νέα ηλεκτρική εγκατάσταση κλπ. Σύμφωνα, με τη βιβλιογραφία, στη γενική περίπτωση, αυτό το είδος κόστους περιλαμβάνει τα ακόλουθα επιμέρους κόστη: (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

- Το κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού βάσης.
- Το κόστος εγκατάστασης του κατανεμημένου συστήματος και των κεραιών.
- Και κόστη, σχετικά με τον συντονισμό, τις εργασίες κατασκευής κλπ.

Το κόστος εγκατάστασης τόσο για το σταθμό όσο και για τις κεραιές έχει, ήδη, περιληφθεί με την συγκεκριμένη ανάλυση στο κόστος CAPEX, διότι η εξίσωση 4.1 περιλαμβάνει το μελλοντικό κόστος για κάθε στοιχείο από αυτά και κατά συνέπεια είναι πλεονασμός να υπολογιστεί εκ νέου και σε αυτή την περίπτωση.

Το κόστος, το οποίο, δεν έχει ακόμα εισαχθεί είναι αυτό για το συντονισμό, το οποίο πηγάζει από το γεγονός ότι είναι πιθανό, όταν εγκατασταθεί ο εξοπλισμός DAS στο σύστημα να πραγματοποιηθούν συγκεκριμένες θεμελιώδεις προσαρμογές με βασικό στόχο, να αλληλοεπιδρά με ορθό τρόπο με το ήδη υπάρχον σύστημα. Είναι σημαντικό να υπάρξει συντονισμός με το σύστημα για να γίνονται με ομαλό τρόπο διάφορες ενέργειες, όπως για παράδειγμα τα handovers. Έτσι, θα επιτευχθεί η ορθή λειτουργία του συνολικού δικτύου. Ακόμα, είναι σημαντικό να περιληφθούν κόστη εγκατάστασης, που μπορεί να εμφανιστούν, ειδικά αν απαιτηθεί προσωπικό για να πραγματοποιήσει όλες αυτές τις ρυθμίσεις, ή αν χρειαστεί επιπρόσθετος εξοπλισμός. Αυτό το κόστος αναπαρίσταται από την παράμετρο  $C_{inc}$  και ονομάζεται κόστος εγκατάστασης και συντονισμού (Installaton & Coordination).

Συνεπώς, το συνολικό κεφάλαιο, αξιοποιώντας τις εξισώσεις 4.1, 7.1, 7.2 δίνεται από το άθροισμα των επί μέρους συναρτήσεων κόστους και προκύπτει η εξίσωση:

$$C_{DAS}^{CX} = (C_{eqd} + N(C_{eNB} + C_{EPC})) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + C_{inc} \quad (7.3)$$

$C_{DAS}^{CX}$  είναι το ετήσιο κόστος κεφαλαίου.

### 7.2.2 Λειτουργικό Κόστος

Οι λειτουργικές δαπάνες ή OPEX είναι ένα συνεχές κόστος, που καταβάλλεται για τη λειτουργία ενός προϊόντος, μίας επιχείρησης, ή στη συγκεκριμένη περίπτωση, για να λειτουργήσει το DAS σύστημα. Για μεγάλα συστήματα, όπως οι επιχειρήσεις, το OPEX μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει το κόστος των εργαζομένων, δηλαδή μισθούς ή ημερομίσθια και τα έξοδα των εγκαταστάσεων, όπως ενοίκια και την καταβολή των λογαριασμών για τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας.

Τα κόστη, που συμπεριλαμβάνονται στο OPEX, στην περίπτωση του DAS, σχετίζονται με το κόστος λειτουργίας του, και όπως έχει καταγραφεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, σχετίζονται με τα πιο κάτω γεγονότα:

- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της καλωδίωσης από άκρο σε άκρο του δικτύου.
- Το χρηματικό ποσό, που πληρώνεται για τη θέση, για το εύρος ζώνης, που διατίθεται κλπ.

- Την υποστήριξη του συνολικού συστήματος.
- Την επίλυση προβλημάτων.
- Τα κόστη μίσθωσης σε περίπτωση, που πραγματοποιείται κάτι τέτοιο.

Στο κόστος αυτό συμπεριλαμβάνονται ακόμα τα κόστη για την κατανάλωση ενέργειας, ενοικίασης, θέσης κλπ. Όλα αυτά τα επί μέρους κόστη περιλαμβάνονται στο  $c_{run}$ . Ενώ οι ενέργειες για την καλωδίωση περιλαμβάνονται στη μεταβλητή  $c_{bh}$ . Το κόστος OPEX, κατά συνέπεια, για το σταθμό βάσης του DAS, δίνεται από την εξίσωση:

$$C_{BSDAS}^{OX} = N(c_{run} + c_{bh})$$

$C_{eq}$  αποτελεί το κόστος για το καταναλωμένο σύστημα και  $d$  αποτελεί το πλήθος των καταναλωμένων συστημάτων στο κτήριο. Το κόστος OPEX για το καταναλωμένο σύστημα:

$$C_{DSDAS}^{OX} = C_{eq}d \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Είναι εξίσου σημαντικό να εισαχθεί το κόστος της κατανάλωσης ενέργειας ετησίως, λόγω της ισχύος, που απαιτείται από τα κυκλώματα της κεραίας, τις ίδιες τις κεραίες και τις λοιπές πιθανές συσκευές. Το κόστος αυτό αναπαρίσταται από την μεταβλητή  $C_{pw}$  και σχετίζεται με την ισχύ, που καταναλώνεται και τα χρήματα, που πληρώνονται στον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη το κόστος, το οποίο σχετίζεται άμεσα με το εύρος ζώνης, που μπορεί να εξασφαλίσει, ο κάθε πάροχος και για το σκοπό αυτό καταλαμβάνεται ένα ετήσιο ποσό, σαν ενοίκιο χρήσης της συγκεκριμένης συχνοτικής περιοχής. Το εύρος ζώνης δίνεται από την παράμετρο  $BW$ , ενώ το κόστος δίνεται από μία σχετιζόμενη γραμμική σταθερά  $f_{BW}$ , η οποία σχετίζει το καταβαλλόμενο ποσό με το διαθέσιμο εύρος ζώνης, έτσι το συνολικό κόστος, λόγω της κατάληψης του εύρους ζώνης είναι  $f_{BW}$ .

Συνοψίζοντας, με χρήση της σχέσης 4.1, και λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προηγούμενες σχέσεις, το συνολικό κόστος OPEX ετησίως, προκύπτει ως εξής:

$$C_{DAS}^{OX} = N(c_{run} + c_{bh}) + f_{BW}BW + (f_{st} + C_{pw}C_{eq}d) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (7.4)$$

όπου  $C_{DAS}^{OX}$  είναι το λειτουργικό κόστος, που απορρέει από τη λειτουργία του DAS σταθμού βάσης και του καταναλωμένου συστήματος σε ετήσια βάση,  $n$  η διάρκεια του σχεδίου επένδυσης και  $r$  το ετήσιο περιοδικό επιτόκιο.

### 7.2.3 Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας

Γενικά, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO) είναι μια οικονομική εκτίμηση, που προορίζεται να βοηθήσει τους αγοραστές και τους ιδιοκτήτες να καθορίσουν το άμεσο και έμμεσο κόστος ενός προϊόντος ή συστήματος. Είναι μια λογιστική αντίληψη της διαχείρισης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήρη ανάπτυξη κόστους ή ακόμα, και οικολογικής οικονομίας, όπου σε εκείνη την περίπτωση, περιλαμβάνεται το κοινωνικό κόστος.

Όσον αφορά στην περίπτωση ανάπτυξης μίας τεχνολογίας, τότε ενδέχεται να απαιτείται να περιγραφούν παράγοντες, όπως, το υλικό και τα προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών, το υλικό και το λογισμικό του δικτύου, το υλικό και το λογισμικό του διακομιστή, το υλικό και το λογισμικό του σταθμού εργασίας, η εγκατάσταση και η ολοκλήρωση του υλικού και του λογισμικού, οι εγγυήσεις και οι άδειες, η αποφυγή διαφόρων κινδύνων, η υποδομή, τα έξοδα λειτουργίας, η κατάρτιση, ο έλεγχος, η αντικατάσταση κλπ.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, για να κατέχει ένας τηλεπικοινωνιακός πάροχος το σύστημα DAS πρέπει να επενδύσει κεφάλαια για την απόκτηση, δημιουργία, εγκατάσταση, για το εύρος ζώνης, επίσης, πρέπει να δαπανήσει ποσά για τη λειτουργία, συντήρηση και διαχείριση του συστήματος, για τη δαπανώμενη ενέργεια, αλλά και χρήματα για την εγκατάσταση και το συντονισμό του συστήματος. Από τα πιο πάνω, γίνεται αντιληπτό ότι το συνολικό κόστος για το DAS, περιλαμβάνει τα πιο πάνω κόστη, που σχετίζονται τόσο με το σταθμό βάσης, αλλά και με το κατανομημένο σύστημα κεραίας, κάτι το οποίο σημαίνει, πως το κόστος αυτό, θα ισούται με το άθροισμα των επιμέρους υπολογισμένων δαπανών. (Liu et al., 2012), (Liu, 2013)

Έτσι, το συνολικό κόστος για το DAS, με βάση την εξίσωση 4.1 και σύμφωνα με τις αναλύσεις για τα επιμέρους κόστη, που δίνονται από τις σχέσεις 7.3, 7.4 δίνεται από την εξίσωση:

$$TCO_{DAS} = (N(C_{eNB} + C_{EPC}) + C_{eq}d(1 + C_{pw}) + f_{st}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + C_{inc} + N(c_{run} + c_{bh}) + f_{BW}BW$$

όπου  $TCO_{DAS}$  είναι το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας για ένα σύστημα DAS.

### 7.3 Παράμετροι

Η μαθηματική αναπαράσταση για τα ανωτέρω κόστη είναι μία βασική διαδικασία. Η παραπάνω ανάλυση είναι δυνατό να χρησιμοποιείται από οποιονδήποτε επιστήμονα ή πάροχο τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών επιδιώκει να εντάξει αυτές τις νέες τεχνολογίες στη δική του επιχείρηση. Οι τύποι μπορεί να οδηγήσουν στον υπολογισμό του κόστους, αν σε αυτούς εφαρμοστούν οι τιμές, που προσδοκά η αγορά, για τα αντίστοιχα κόστη. Συνεπώς, μπορεί να βοηθήσει μελλοντικές αναλύσεις επιστημόνων, οι οποίοι θα ασχοληθούν με τον τομέα των ασύρματων δικτύων.

Εκτός από αυτό το γεγονός, είναι σημαντικό ότι είναι εκτιμήσεις διαχρονικές, εφόσον, με το πέρασμα των ετών, δεν θα αλλάξουν οι τύποι, αλλά οι τιμές των παραμέτρων, αφού αναλόγως θα μειώνονται οι τιμές των προϊόντων, όσο θα προχωρά η τεχνολογία, ή θα αυξάνονται βάση κάποιων άλλων οικονομικών παραγόντων, όπως για παράδειγμα, με την αύξηση του πληθωρισμού κλπ. Σε κάθε περίπτωση, με εφαρμογή των τιμών κόστους για τα τρέχοντα έτη, θα καταλήγει κανείς σε σημαντικά οικονομικά συμπεράσματα.

Εν συνεχεία, είναι εκτίμηση διακρατική και κατά κάποιον τρόπο διεθνής, διότι απλά και μόνο με τις παραμέτρους, που έχουν τεθεί δεν ακολουθείται κάποια συγκεκριμένη λογική ως προς κάποια συγκεκριμένη χώρα. Έτσι, η πιο πάνω πρόταση θα μπορούσε με την ίδια επιτυχία να εφαρμοστεί σε μία ευρωπαϊκή, σε μία

αμερικανική ή σε μία ασιατική αγορά. Εφόσον, κάθε φορά εφαρμόζονται οι τιμές, που ισχύουν για κάθε χώρα ή μέρος, τότε θα προκύπτουν τα αντίστοιχα κόστη, για την συγκεκριμένη περιοχή.

Για μία τεχνοοικονομική ανάλυση, όμως, δεν αρκεί μόνο η μαθηματική απεικόνιση των μεθόδων κόστους, αλλά είναι απαραίτητη η ανάλυση ποσοτικά, ούτως ώστε να προκύψουν θεμελιώδη συμπεράσματα, για τις τεχνολογίες και για τα επί μέρους κόστη, που αυτές εμπλέκουν. Είναι, δηλαδή, απαραίτητη η ανάλυση πειραμάτων, έτσι ώστε να σημειωθούν οι βασικές οικονομικές ιδιότητες κάθε μίας από τις τεχνολογίες, που παρουσιάζονται και να δοθούν κίνητρα για την αξιοποίησή τους. Από την άλλη, είναι σημαντικό, διότι η πειραματική διαδικασία, μπορεί να δώσει βασικά συμπεράσματα για την οικονομική πρόοδο κάθε τεχνολογίας.

Προς αυτή την κατεύθυνση είναι σημαντικό να επιλεγούν οι τιμές κόστους για τις μεταβλητές και για τις παραμέτρους, που υπάρχουν στην ανωτέρω μελέτη. Αυτή η διαδικασία είναι θεμελιώδης και απαιτεί έρευνα. Συνεπώς, η επιλογή των παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας. Οι τιμές και τα κόστη σχετίζονται άμεσα με τη χρονική περίοδο του πειράματος, αλλά και με την αγορά στην οποία γίνεται το πείραμα. Για παράδειγμα, σε μία αγορά με φτηνά εργατικά χέρια το κόστος εγκατάστασης θα είναι χαμηλότερο, από ότι σε μία αγορά με υψηλότερους μισθούς.

Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα 7.1 καταγράφονται όλες οι τιμές των μεταβλητών και παραμέτρων, οι οποίες είναι απαραίτητες για το DAS σύστημα (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois, 2014). Περιλαμβάνουν τις μεταβλητές για την αγορά, την εγκατάστασή του, τη λειτουργία του, το εύρος ζώνης, τα υλικά καλωδίωσης, το κόστος ενέργειας και το κόστος συντονισμού. Όσα κόστη, δηλαδή περιλαμβάνονται στις σχέσεις, που δόθηκαν. Αυτά σύμφωνα, με την παραπάνω ανάλυση επιτρέπουν να υπολογίσει κανείς τα επί μέρους CAPEX, OPEX, IMPEX, καθώς και συνολικά το TCO.

## 7.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Τα συστήματα DAS αποτελούν βασικούς πυλώνες για τα κινητά δίκτυα και ιδίως τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν σημαντικά κόστη ιδίως σε επίπεδο λειτουργίας από μέρα σε μέρα. Συνεπώς, είναι σημαντικό να σημειωθούν ποιοι είναι αυτοί οι παράγοντες κόστους, που έχουν την πιο σημαντική επιρροή στο μοντέλο. Για να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο απαιτείται να πραγματοποιηθεί ΜΕ δοκιμάζοντας τιμές από διάφορες μεταβλητές και κατά συνέπεια, μπορεί να γίνει εμφανές ποιος παράγοντας πρέπει να μειωθεί, ώστε το DAS να αποτελέσει μία πιθανή λύση για τα μελλοντικά κινητά δίκτυα.

Με σκοπό να συμβεί αυτό, επιλέχθηκαν οι βασικές παράμετροι του μοντέλου βάση της βιβλιογραφίας. Μέσα σε ένα διάστημα τιμών  $\pm 50\%$  της τιμής της βιβλιογραφίας επιλέχθηκαν τυχαίες τιμές, με βάση τις οποίες, πραγματοποιήθηκαν νέες μελέτες εφικτότητας, παρόμοιες με αυτές, που είχαν συντελεστεί σε παλαιότερες ερευνητικές δράσεις.

Όσον αφορά στο εύρος ζώνης (Σχήμα 7.1), το κόστος κεφαλαίου δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα κόστη για το εύρος ζώνης. Ακόμα, το κόστος λειτουργίας αυξάνει ανάλογα με την αύξηση του κόστους για το εύρος ζώνης. Κατά συνέπεια, το συνολικό κόστος αυξάνει επίσης ανάλογα με την αύξηση του κόστους για το εύρος ζώνης. Κάτι τέτοιο, είναι φυσικό, διότι όταν υπάρχει εύρος ζώνης,

TABLE 7.1: Παράμετροι και μεταβλητές συστήματος για το DAS

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο Τιμών
$i$	Ετήσιο επιτόκιο	6%	[2,20]
$n$	Διάρκεια του πλάνου επενδύσεων σε έτη	10 yrs	[2,20]
$r$	Περιοδικό επιτόκιο	6%	[2,20]
$N$	Πλήθος DAS σταθμών βάσης	1	1
$r$	Περιοδικό επιτόκιο	6%	[2, 20]%
$C_{eq}$	Κόστος εξοπλισμού DAS	11900 €	[2380, 7140] €
$d$	Αριθμός κατανεμημένων συστημάτων	2 κεραιές/όροφο	[2, 200]
$f_{st}$	Συντελεστής θέσης συστήματος	0.8	0.8 €
$c_{st}$	Κόστος θέσης συστήματος	3100[€	620, 1860] €
$C_{run}$	Κόστος λειτουργίας	892.50€	[178.5, 535.5]€
$C_{bh}$	Κόστος οπτικής ίνας	4800 €	[2400, 7200] €
$BW$	Κόστος για τη διασύνδεση σχετικά με το εύρος ζώνης	10 Gbps	[5, 15] Gbps
$f_{BW}$	Εύρος ζώνης σε €/Gbps	1170 €	[234, 702]
$C_{pw}$	Κόστος κατανάλωσης ενέργειας		157.68 €[31.54, 94.61]
$C_{inc}$	Κόστος υλοποίησης	2800 €	[560, 1680]

αυτό διατίθεται καταβάλλοντας χρηματικά ποσά σε κάποια αρχή για την ενοικίασή του. Αυτό συμβαίνει κάθε χρόνο και συμβάλει ενεργά στα λειτουργικά κόστη.

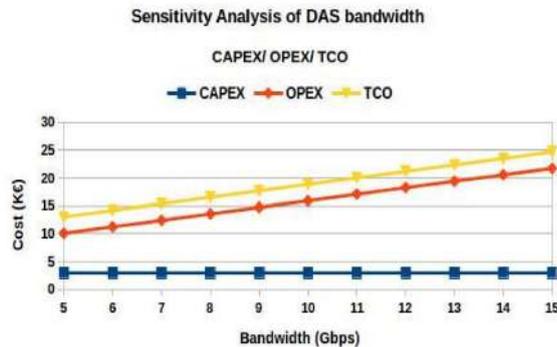


FIGURE 7.1: Μελέτη εφικτότητας κλασικού μοντέλου DAS σχετικά με το εύρος ζώνης.

Οι σταθμοί βάσης (Σχήμα 7.2) επηρεάζουν άμεσα το κόστος κεφαλαίου. Αυτό συμβαίνει επειδή τα κόστη για τους σταθμούς βάσης καταβάλλονται από την αρχή για το σύστημα. Από την άλλη μεριά, τα κόστη αυτά δεν επιδρούν σημαντικά στο κόστος λειτουργίας.

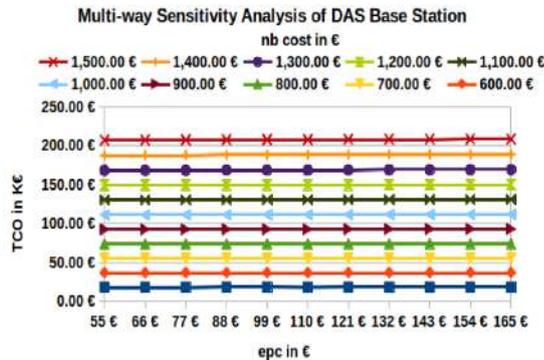


FIGURE 7.2: Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με το σταθμό βάσης.

Στο DAS ο εξοπλισμός (Σχήμα 7.3) δεν παίζει σημαντικό ρόλο σε κανένα είδος κόστους, ούτε στο κόστος κεφαλαίου, ούτε στο λειτουργικό κόστος, ούτε στο συνολικό κόστος.

Το κόστος υλοποίησης (Σχήμα 7.4) είναι υψίστης σημασίας για το κόστος κεφαλαίου, εφόσον αυξάνει σημαντικά. Ακόμα, το κόστος υλοποίησης δεν παίζει σημαντικό ρόλο σχετικά με το λειτουργικό κόστος. Το συνολικό κόστος επηρεάζεται σημαντικά από το κόστος υλοποίησης. Στην πραγματικότητα, τα κόστη υλοποίησης είναι αυτά τα οποία έχουν σχέση με τη δημιουργία και εγκατάσταση του συστήματος.

Το κόστος θέσης (Σχήμα 7.5) δε σχετίζεται με το κόστος κεφαλαίου. Το κόστος λειτουργίας είναι αυτό το οποίο επηρεάζεται. Κατά συνέπεια, επηρεάζεται και το συνολικό κόστος. Συνολικά, το κόστος λειτουργίας επηρεάζεται άμεσα από τα κόστη αυτά. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού η αλλαγή θέσης μπορεί να προκύψει σε

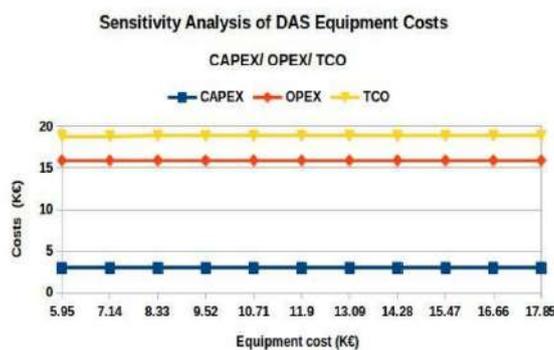


FIGURE 7.3: Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με τον εξοπλισμό στο σύστημα.

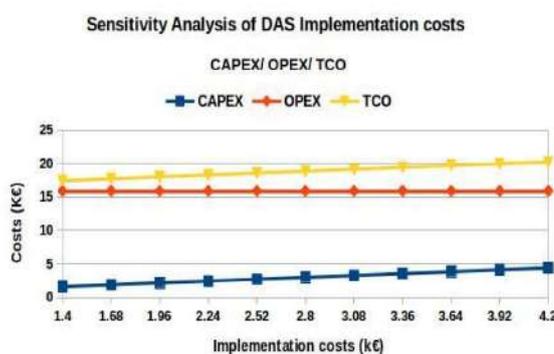


FIGURE 7.4: Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης για το σύστημα.

κάποια φάση της λειτουργίας του δικτύου και να χρειάζεται με σκοπό να εξασφαλιστεί η εύρυθμη λειτουργία της υποδομής, μία καλύτερη και πιο ευνοϊκή θέση κλπ.

Το κόστος κεφαλαίου επηρεάζεται μόνο από το πλήθος των σταθμών βάσης, οπότε σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να γίνεται πολύ αυστηρή μελέτη για να βρισκείται ο βέλτιστος αριθμός των σταθμών βάσης, που απαιτούνται να προστεθούν στην αρχιτεκτονική του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό θα είναι πιο εύκολο να υπάρξει ο ακριβής αριθμός των απαραίτητων δικτυακών στοιχείων. Από την άλλη μεριά όμως, κάτι τέτοιο μπορεί να μην καλύψει ανάγκες του δικτύου μελλοντικά και να οδηγήσει ουσιαστικά σε αύξηση του κόστους κεφαλαίου μίας και είναι πιθανόν να εμφανιστούν αυξημένες ανάγκες χωρητικότητας και κάλυψης και ένα μικρότερο δίκτυο να μην μπορεί να τις καλύψει. Μία ενδιαφέρουσα και πιθανή λύση θα μπορούσε να είναι η χρήση εικονικών δικτυακών στοιχείων, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση εκεί όπου υπάρχει ανάγκη. Ως αποτέλεσμα θα μπορούσε να δημιουργηθεί μία υβριδική λύση για το DAS με επιπρόσθετα εικονικά στοιχεία, όπως αυτή που προτείνεται στο Κεφάλαιο 8.

Από τα πιο πάνω καθίσταται σαφές ότι το κόστος λειτουργίας είναι το πιο σημαντικό κόστος και αυτό, που επιβαρύνει το δίκτυο. Το λειτουργικό κόστος επηρεάζεται άμεσα από ορισμένους σημαντικούς παράγοντες κόστους, όπως είναι για παράδειγμα, η θέση, το εύρος ζώνης, ενώ ο εξοπλισμός φαίνεται να μην έχει

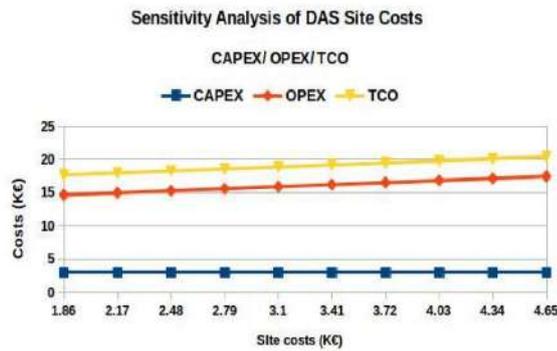


FIGURE 7.5: Μελέτη εφικτότητας για το κλασικό DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης της θέσης για το σύστημα.

μεγάλη επίδραση σε αυτού του είδους τα κόστη. Από την άλλη μεριά, όμως, είναι προφανές ότι όσο περισσότερος εξοπλισμός περιλαμβάνεται τόσο περισσότερο ρεύμα είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του συστήματος και ως αποτέλεσμα, το δίκτυο όχι μόνο δεν είναι πράσινο, αλλά καταναλώνει περισσότερο ρεύμα. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να μελετηθούν μέθοδοι και τεχνικές σύμφωνα με τις οποίες, θα μειώνεται ενεργά ο εξοπλισμός στο βέλτιστο και απολύτως απαραίτητο και θα μειώνονται ενεργά και τα κόστη αυτά.

Εν συνεχεία, το εύρος ζώνης αυξάνει σημαντικά αυτού του είδους το κόστος και είναι σημαντικό να επαναχρησιμοποιούνται οι διάφορες συχνοτικές ζώνες. Έτσι, είτε θα πρέπει να σημειωθούν τεχνικές, οι οποίες να περιλαμβάνουν τη αύξηση της επαναχρησιμοποίησης του εύρους ζώνης ή να γίνουν συζητήσεις με τις αρχές, που νοικιάζουν τις συχνότητες για μείωση των αντίστοιχων δαπανών. Τέλος, είναι λογικό ότι η θέση προκαλεί κόστη μίας και απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός, αλλά και εργατικά χέρια για την τοποθέτηση του συστήματος σε ένα κτήριο.

## Chapter 8

# NFV Distributed Antenna Systems (DAS)

Μία από τις καινοτομίες των τελευταίων ετών είναι η τεχνική **Virtualization**. Είναι ικανή να συμβάλει ενεργά στην πιο αποδοτική χρήση των τεχνολογιών και στη μείωση του κόστους για διάφορες δικτυακές τεχνολογίες και διάφορες δικτυακές παραμέτρους. Αποτελεί την πλέον μοντέρνα και πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Είναι μία λύση, που θα μειώσει ενεργά το κόστος των δικτύων κινητών και σταθερών και αναμένεται να δώσει απάντηση σε βασικά ζητήματα, που έχουν ανακύψει σε ό,τι αναφορά στον εξοπλισμό των κινητών δικτύων. Είναι μία τεχνολογική προσέγγιση, που επιτρέπει την παροχή συσκευών σε πολύ χαμηλότερο κόστος και για το λόγο αυτό αποτελεί σημαντικό εφαλτήριο για τις γενιές **5G** και εξής.

Η τεχνολογία **DAS** είναι μία πιθανή τεχνολογία, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ασύρματα και κινητά δίκτυα, ώστε να καλυφθούν οι αυξημένες ανάγκες των δικτύων. Παρόλο, που προτάθηκε το **1980** εντούτοις, δε χρησιμοποιήθηκε ευρέως λόγω του αυξημένου λειτουργικού κόστους, το οποίο επέφερε και ως αποτέλεσμα, δεν ήταν ιδιαίτερα ελκυστικό. Η ενσωμάτωση νέων ιδεών και τεχνολογικών επιτευγμάτων, όπως για παράδειγμα τα **NFVs**, θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά το κόστος του **DAS** και ως αποτέλεσμα να συμβάλουν, ώστε να χρησιμοποιηθεί το **DAS** σε νέα δεδομένα και να αναδειχθούν νέες χρήσεις και υπηρεσίες με βάση την τεχνολογία αυτή. Όμως, απ' ό,τι αναδεικνύεται παραπάνω, τα κόστη για το κεφάλαιο, τη λειτουργία και το συνολικό κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλά και ως αποτέλεσμα, αποτελούν σημαντικό αποτρεπτικό παράγοντα για την υιοθέτηση της τεχνολογίας από κάποια εταιρεία τηλεπικοινωνιών.

Με βασικό σκοπό τη μείωση του κόστους προτείνεται η τεχνική **virtualization** σε ήδη υπάρχον μοντέλο **DAS**. Μελέτες έχουν αναδείξει πως εφαρμογή παρόμοιων τεχνικών μπορεί να μειώσει αισθητά το κόστος των διαφόρων δικτυακών παραμέτρων από **20%** έως και **80%**, κάτι το οποίο είναι κρίσιμο για τη δραστηκή μείωση του κόστους και αποτελεί σημαντικό κίνητρο για την αξιοποίηση της **NFV** τεχνολογίας. Έτσι, θα τροποποιηθεί το μοντέλο **DAS**, που έχει περιγραφεί παραπάνω με στόχο να φανεί αν οι καινοτομίες αυτές μπορούν να επιδράσουν με τέτοιο τρόπο και να μειώσουν το κόστος για την υποδομή αυτή.

Δημοσιεύσεις, που έχουν προκύψει σε σχέση με τα θέματα του παρόντος κεφαλαίου είναι: (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2018), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017)

## 8.1 Αρχιτεκτονική

Η τροποποιημένη εκδοχή του DAS, που παρουσιάζεται, φιλοδοξείται ότι θα συμβάλει στο να μειωθούν πολλά είδη κόστους. Η ιδέα έγκειται στο ότι είναι εφικτό να αντικατασταθούν στοιχεία του εξοπλισμού του δικτύου με NFVs και περισσότερο απλοϊκό υλικό. Αυτή η λογική θα μειώσει το κόστος και θα επιφέρει θεμελιώδη πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία, που μπορούν να αντικατασταθούν είναι:

- **Εύρος ζώνης:** Με τη χρήση **virtualization** είναι δυνατό να απαιτείται λιγότερο εύρος ζώνης και να επιτυγχάνεται επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Ως αποτέλεσμα αυτό το γεγονός πρόκειται να μειώσει το κόστος και την ανάγκη για εύρος ζώνης, εφόσον λιγότερο εύρος ζώνης θα απαιτείται για την κάλυψη της συνολικής υποδομής σε σύγκριση με την κλασική αρχιτεκτονική. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε τεχνολογίες, που είναι φιλικές με τις τεχνολογίες νέφους. Ακόμα, διαφορετικές τεχνολογίες μήκους κύματος μπορεί να είναι διαθέσιμες άμεσα και επομένως, αυτό το γεγονός μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα του δικτύου.
- **Κεραίες:** Οι κεραίες μπορεί επίσης να αντικατασταθούν και να μειώσουν σημαντικά τα κόστη για τις υποδομές της κεραίας, καθώς και τα κόστη για το κατανομημένο σύστημα. Τα συστατικά των σταθμών βάσης με ενσωμάτωση της NFV μπορεί να συμβάλλουν ενεργά στη μείωση του κόστους. Εκτός από τη μείωση του κόστους κεφαλαίου, αυτά τα χαρακτηριστικά προσφέρουν ένα ακόμα πλεονέκτημα. Μειώνουν σημαντικά τα λειτουργικά κόστη, αφού καταναλώνεται πολύ λιγότερη ενέργεια για λιγότερο εξοπλισμό, επίσης, υπάρχουν λιγότερα έξοδα για τη συντήρηση και διαχείριση του συστήματος. Ακόμα, όλα αυτά καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και κατά συνέπεια, η λειτουργία και η διαχείριση όλων των παραπάνω απαιτεί πολύ λιγότερο χώρο, χρόνο και χρήμα.
- **Σταθμοί βάσης:** Οι σταθμοί βάσης μπορούν να αντικατασταθούν και με απλά "κουτιά" χωρίς ιδιαίτερη δικτυακή ευφυΐα, οπότε θα μειωθεί σημαντικά το κόστος. Μέσα στην απλοϊκή αυτή συσκευή μπορεί να "τρέχουν" εφαρμογές, που αντικαθιστούν διάφορες λειτουργίες.

Η βασική αρχιτεκτονική DAS έχει περιγραφεί αναλυτικά στα (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a) και (Liu et al., 2012). Η ενσωμάτωση των παραπάνω καινοτομιών περιγράφονται στην αρχιτεκτονική του Σχήματος 8.1. Στο μοντέλο αυτό, οι πηγές του εύρους ζώνης είναι δυνατό να διαχειρίζονται πολύ καλύτερα και οι κεραίες και οι σταθμοί βάσης αντικαθίστανται με άλλους **virtualized** και τελικά προκύπτουν πιο ευέλικτες, πιο οικονομικές και το ίδιο αν όχι και περισσότερο αποδοτικές αρχιτεκτονικές.

## 8.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο είναι όμοιο με εκείνο, που περιγράφεται για το DAS στο Κεφάλαιο 7 συνεπώς, δε θεωρείται σκόπιμο να περιγραφεί εκ νέου. Βασική διαφορά

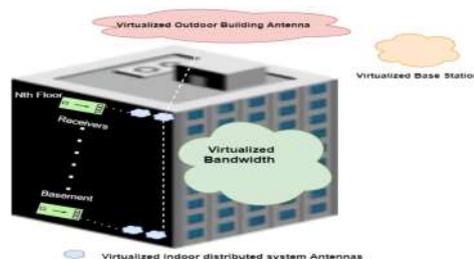


FIGURE 8.1: Ένα μοντέλο για την τροποποίηση της αρχιτεκτονικής του DAS με βάση την τεχνική NFV για εσωτερικούς χώρους.

στην περίπτωση αυτή είναι η εφαρμογή άλλων τιμών στις παραμέτρους, που προκύπτουν από τις μειώσεις των τιμών για τους παράγοντες, στους οποίους έχουν εφαρμοστεί τεχνικές **virtualization**. Στο ακόλουθο υποκεφάλαιο εξηγούνται αναλυτικά οι νέες τιμές, που θα προκύψουν για τα διάφορα είδη κόστους, καθώς και εξηγούνται αναλυτικά οι έρευνες από τις οποίες έχουν εξαχθεί τα δεδομένα.

### 8.3 Παράμετροι

Σε παλαιότερες ερευνητικές ενέργειες (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a) είχαν περιγράψει μοντέλα αρχιτεκτονικής και μαθηματικά μοντέλα σχετικά με τις τεχνικές και οικονομικές πλευρές της DAS τεχνολογίας. Ακόμα, είχαν γίνει πειράματα, που έδειχναν τα πιο σημαντικά κόστη, καθώς και καταδείκνυαν ποιοι παράγοντες κόστους πρέπει να μειωθούν σύμφωνα με το μέγεθος της υποδομής, που επιδιώκεται να καλυφθεί. Οι μελέτες εφικτότητας για το κλασικό μοντέλο DAS αναδεικνύουν τα πιο σημαντικά κόστη και την επίδρασή τους στο κόστος της συνολικής υποδομής.

Από την άλλη μεριά, σήμερα είναι γνωστές οι τιμές για όλα τα μεγέθη, που συμμετέχουν στη διαμόρφωση του κόστους. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι **virtualized** τεχνικές αναμένεται να μειώσουν το κόστος από 40-80% σε σχέση με τις τιμές, που ισχύουν σήμερα. Με βάση αυτό το σενάριο, δημιουργήθηκε νέα κοστολόγηση για τις παραμέτρους, οι οποίες πρέπει να τοποθετηθούν στο μοντέλο για να υπολογιστούν τα αντίστοιχα νέα κόστη. Με σκοπό να πραγματοποιηθεί μελέτη εφικτότητας, να φανούν τα νέα κόστη αναλυτικά και η επίδρασή τους στο μοντέλο δημιουργούνται διαστήματα τιμών, τα οποία αποτελούν τις προβλεπόμενες μελλοντικές τιμές για όλα τα συστατικά στοιχεία του κόστους, όπως για παράδειγμα για τα κόστη των σταθμών βάσης EPC, eNB, το κόστος για τον εξοπλισμό του DAS, το κόστος της θέσης του συστήματος, το κόστος λειτουργίας, το κόστος καλωδίωσης, το κόστος για το εύρος ζώνης, την κατανάλωση ενέργειας και τα κόστη υλοποίησης.

Η τεχνολογία 5G είναι κατά την περίοδο των πειραμάτων μία μελλοντική τεχνολογία. Ως αποτέλεσμα, δεν είναι εύκολο να προβλέψει κανείς ποιες θα είναι οι τιμές για τα διάφορα κόστη στο μέλλον. Για το σκοπό αυτό λοιπόν μία καλή ιδέα για πειράματα είναι η εξής: Αν υποθεθεί ότι οι μελλοντικές τιμές θα ανέλθουν σε +/-50% των σημερινών τιμών, έτσι αναπτύσσεται ένα πλήρες σενάριο ώστε να ελεγχθεί πώς θα κυμαίνονται οι τιμές στο μέλλον. Ακόμα, υπάρχει το σημαντικό

θέμα ότι οι **virtualized** τεχνικές αναμένεται να μειώσουν το κόστος από 40-80% σε σχέση με τις σημερινές τιμές.

Επίσης, προκύπτουν κι άλλα έμμεσα οφέλη, δηλαδή η ενσωμάτωση αυτών των τεχνικών μειώνει κι άλλα κόστη στο δίκτυο. Για παράδειγμα, η παραγωγή απλούστερου υλικού μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση, τα κόστη υλοποίησης, τα κόστη για τη συντήρηση και αντικατάσταση του εξοπλισμού. Επίσης, η προγραμματιζόμενη υποδομή δημιουργεί πιο καλές και πιο ευνοϊκές συνθήκες και μειώνει σημαντικά το κόστος του υλικού και των σχετικών με αυτό.

Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι τιμές για το εικονικό μοντέλο. Ακόμα, είναι προφανές ότι σε πολλά από τα είδη κόστους το εικονικό μοντέλο περιλαμβάνει πολύ χαμηλότερες χρεώσεις σε σχέση με το κλασικό, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 7. Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν διακύμανση 40% έως 80% κάτω από τις προηγούμενες τιμές σύμφωνα με τις προαναφερθείσες υποθέσεις και αναλύσεις.

TABLE 8.1: Παράμετροι και μεταβλητές κόστους για το τροποποιημένο DAS μοντέλο.

Παράμετρος	Περιγραφή	Εύρος τιμών	Τιμές το έτος <b>2017</b>
$C_{eNB}$	Κόστος για τον κόμβο eNB	[200,600] €	1000 €
$C_{EPC}$	Κόστος για έναν κόμβο EPC	[22, 66] €	110 €
$N$	Πλήθος DAS σταθμών βάσης	1	1
$r$	Περιοδικό επιτόκιο	[2, 20]%	6%
$C_{eq}$	Κόστος εξοπλισμού DAS	[2380, 7140] €	11900 €,
$d$	Αριθμός κατανεμημένων συστημάτων (κεραίες ανά όροφο)	[2, 200]	2
$f_{st}$	Κόστος συχνοτήτων	0.8	0.8 €
$c_{st}$	Κόστος θέσης συστήματος	[620, 1860] €	3100 €
$C_{run}$	Κόστος λειτουργίας	[178.5, 535.5]€	892.50 €
$C_{bh}$	Κόστος οπτικής ίνας	[2400, 7200] €	4800 €
$BW$	Κόστος για τη διασύνδεση σχετικά με το εύρος ζώνης	[5, 15] Gbps	10 Gbps
$f_{BW}$	Εύρος ζώνης σε €/Gbps	[234, 702]	1170 €
$C_{pw}$	Κόστος κατανάλωσης ενέργειας	[31.54, 94.61]	157.68 €
$C_{inc}$	Κόστος υλοποίησης	[560, 1680]	2800 €

## 8.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Μία άλλη σημαντική εφαρμογή των εξεταζόμενων τεχνολογιών είναι η τροποποίηση βασικών αρχιτεκτονικών με χρήση των αναφερθέντων τεχνολογικών προτάσεων. Ένα παράδειγμα είναι να τροποποιηθούν γνωστές αρχιτεκτονικές και δικτυακές τεχνολογίες επιλέγοντας να αντικατασταθούν κάποια τμήματα με εικονικά. Η NFV DAS αρχιτεκτονική οδηγεί στη μείωση του κόστους της συνολικής δομής για το ίδιο σενάριο κόστους. Επιλέχθηκαν οι βασικές παράμετροι του νέου μοντέλου βάση της βιβλιογραφικής υπόθεσης ότι οι τεχνικές αυτές μειώνουν το κόστος από 40-80%. Μέσα σε ένα διάστημα τιμών 40-80% της σημερινής τιμής επιλέχθηκαν τυχαίες τιμές, με βάση τις οποίες, πραγματοποιήθηκαν νέες μελέτες εφικτότητας.

Με σκοπό να αναδειχθούν τα οφέλη από αυτή την προσέγγιση, ακολουθώντας, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μελετών εφικτότητας για το εύρος ζώνης, το σταθμό βάσης, τον εξοπλισμό, την υλοποίηση των συστημάτων, της θέσης κλπ. Παρατηρείται ότι όλες οι παρακάτω πειραματικές διαδικασίες αναδεικνύουν την υπεροχή του μοντέλου μετά την ενσωμάτωση τεχνικών **virtualization** στο σύστημα και την αντίστοιχη μείωση του κόστους, που προκύπτει συγκριτικά με τα γραφήματα, που περιγράφουν την αντίστοιχη μελέτη στα κλασικά δίκτυα. Η ελάττωση αυτή του κόστους προκύπτει συνολικά, όπως για παράδειγμα για τα κόστη κεφαλαίου, για τα κόστη λειτουργίας και για το συνολικό κόστος, όμως προκύπτει κι εξετάζοντας κάθε παράγοντα ξεχωριστά. Γίνεται προφανές, ότι όποια περίπτωση κι αν ελεγχθεί σε σχέση για παράδειγμα, με όλες τις προηγούμενες μελέτες (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2016) και (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017a), ότι το συγκεκριμένο μοντέλο διατηρεί τα κόστη σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι και στα δύο μοντέλα το κόστος για το εύρος ζώνης (Σχήμα 8.2) επιδρά κυρίως στο λειτουργικό και στο συνολικό κόστος. Από την άλλη μεριά, παρατηρείται ότι τα συνολικά κόστη είναι έως και 2.5 φορές χαμηλότερα για καθεμία από τις πιο ακριβές περιπτώσεις. Το εύρος ζώνης επιδρά στο λειτουργικό κόστος, αφού η ενοικίαση του γίνεται συνήθως ετησίως και άρα είναι ένα ποσό, που καλύπτεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα κόστη για τους σταθμούς βάσης (Σχήματα 8.3 και 8.4) επιδρούν κυρίως στο κόστος κεφαλαίου, διότι πρέπει να εξασφαλιστεί η υποδομή εξ αρχής για να ολοκληρωθεί η δημιουργία του δικτύου. Είναι σημαντικό ότι μείωση στο κόστος για το σταθμό βάσης σημαίνει και μείωση στο συνολικό κόστος του δικτύου, στο λειτουργικό και στο κόστος κεφαλαίου.

Το κόστος του απαραίτητου υποστηρικτικού εξοπλισμού (Σχήμα 8.5) αυξάνει το λειτουργικό κόστος. Ακόμα, παρατηρείται ότι όλα τα είδη κόστους μειώνονται 2.5 περίπου φορές στο μοντέλο, που υλοποιείται συγκριτικά με το κλασικό μοντέλο. Τα κόστη υλοποίησης (Σχήμα 8.6) έχουν σημαντική επίδραση στο κόστος κεφαλαίου. Αν απλοποιηθεί ο εξοπλισμός, τότε απλοποιούνται και οι απαραίτητες ενέργειες για τη δόμηση του συνολικού συστήματος. Έτσι, παρατηρείται σημαντική μείωση όλων των ειδών κόστους. Σε αντίθεση, η θέση (Σχήμα 8.7) επιδρά στο λειτουργικό κόστος, αφού αν χρειάζεται μετακίνηση, τότε καλύπτεται αυτό το κόστος. Αποτελεί ένα κόστος συντήρησης και διαχείρισης της καλής λειτουργίας του συστήματος. Από την άλλη μεριά, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι και σε αυτή την περίπτωση τα συνολικά κόστη μειώνονται 2 έως 2.5 φορές.

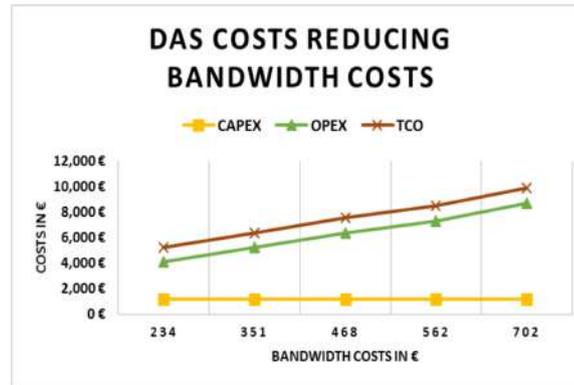


FIGURE 8.2: Μελέτη εφικτότητας virtualized μοντέλου DAS σχετικά με το εύρος ζώνης.

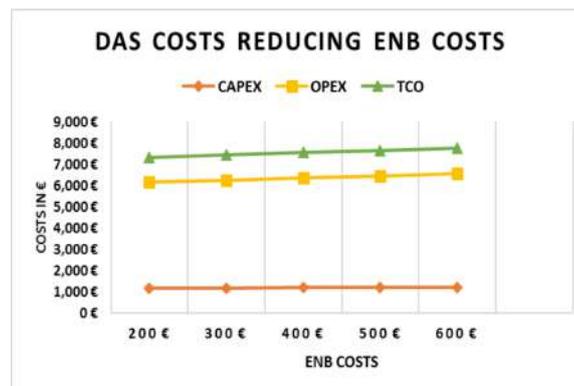


FIGURE 8.3: Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το eNB.

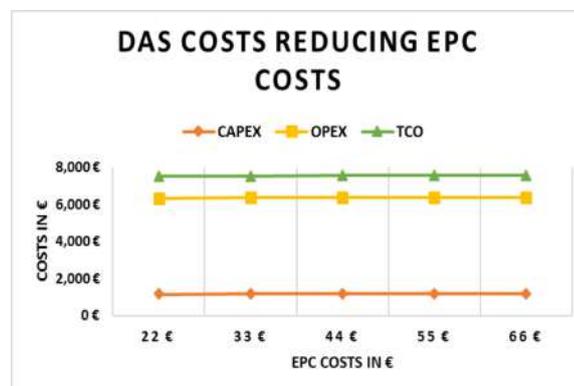


FIGURE 8.4: Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το EPC.

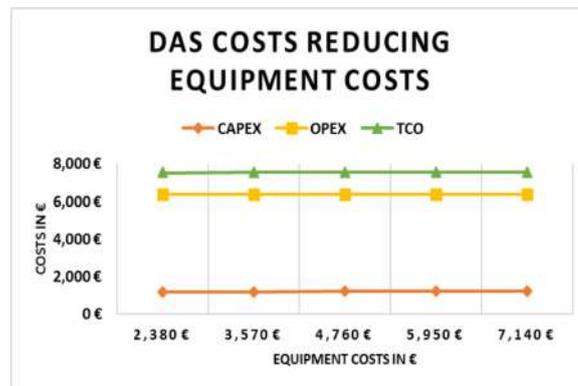


FIGURE 8.5: Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με τον εξοπλισμό στο σύστημα.

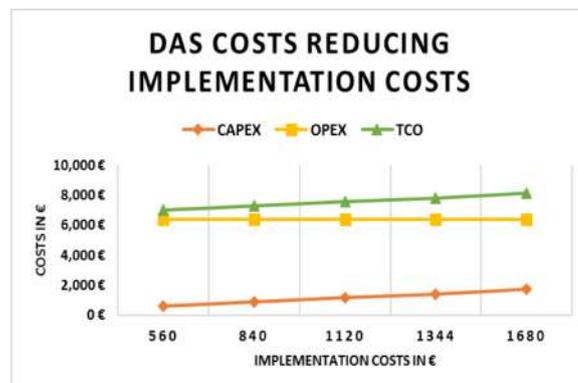


FIGURE 8.6: Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης για το σύστημα.

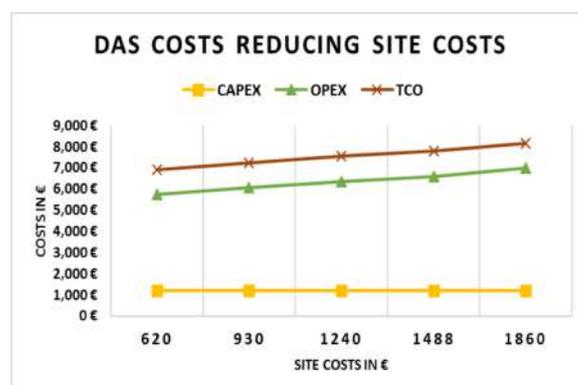


FIGURE 8.7: Μελέτη εφικτότητας για το virtualized DAS σχετικά με το κόστος υλοποίησης της θέσης για το σύστημα.

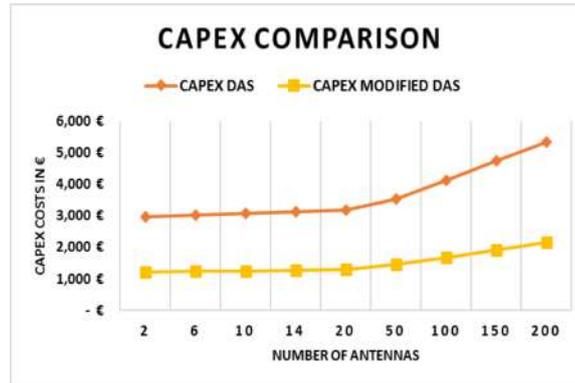


FIGURE 8.8: Σύγκριση κόστους κεφαλαίου για τα δύο DAS συστήματα.

Στα Σχήματα 8.8, 8.9 8.10 συγκρίνονται αντίστοιχα το κόστος κεφαλαίου, το λειτουργικό κόστος και το συνολικό κόστος για τις δύο αρχιτεκτονικές σε σχέση με το πλήθος κεραιών του συστήματος, αφού αυτό ουσιαστικά καθορίζει και το μέγεθος της συνολικής υποδομής. Σε κάθε μία από τις παρακάτω περιπτώσεις, φαίνεται ότι υπάρχει σημαντική υπεροχή του σεναρίου με τα **virtualized** συστατικά, αφού όλα τα είδη κόστους μειώνονται σημαντικά και καθιστούν τη δημιουργία, υλοποίηση και εγκατάσταση της δικτυακής υποδομής **DAS** περισσότερο έτοιμη σχετικά με τις υποδομές για τις επόμενες γενιές κινητών επικοινωνιών. Παρατηρείται εκθετική αύξηση στο κόστος κεφαλαίου με την αύξηση του πλήθους των κεραιών, ενώ το κόστος στο κλασικό **DAS** είναι 2 ή και 3 φορές μεγαλύτερο από το κόστος κεφαλαίου στο **virtualized** μοντέλο. Το λειτουργικό κόστος είναι σταθερό με την αύξηση του πλήθους των κεραιών, παρόλα αυτά όμως, το **virtualized** μοντέλο είναι παραπάνω από 2 φορές πιο οικονομικό από το κλασικό μοντέλο. Το συνολικό κόστος είναι σε σχετικά υψηλά επίπεδα και είναι 3 φορές μικρότερο στο **virtualized** μοντέλο.

Συνεπώς, γίνεται προφανές ότι η επίδραση της **virtualized** αρχιτεκτονικής είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ότι αναφορά στο κόστος και συνεπώς, είναι δυνατό να δημιουργεί πιο ευέλικτες και πιο οικονομικά βιώσιμες δομές ικανές να καλύψουν τις ανάγκες της **5G** και να ανταποκριθούν επιτυχώς στις υψηλές οικονομικές προσδοκίες των επιχειρήσεων. Ακόμα, η εισαγωγή της συγκεκριμένης ιδέας στα δίκτυα αποτελεί πολύ δυνατό εργαλείο και είναι εξαιρετικά σημαντικό να πραγματοποιηθούν μελέτες προς αυτή την κατεύθυνση.

Η χρήση μεθόδων **virtualization** σε διάφορα στοιχεία ενός δικτύου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της **DAS** αρχιτεκτονικής, μπορούν να συμβάλουν ενεργά στη μείωση του κόστους κεφαλαίου, του λειτουργικού κόστους και του συνολικού κόστους πολλές φορές. Αυτό συμβαίνει, διότι αλλάζουν οι υποδομές και γίνονται πιο απλές και βασίζονται περισσότερο σε λογισμικό. Κάτι τέτοιο, μπορεί να εξοικονομήσει πολλά χρήματα, ιδίως στο κομμάτι της συντήρησης, αλλά φυσικά και στο τμήμα της υλοποίησης. Αναλυτικά, οι πιο απλές συσκευές, όχι μόνο έχουν λιγότερα έξοδα, αλλά και η συντήρησή τους είναι πιο εύκολη, αφού μπορεί να απαιτείται μία απλή ενημέρωση του λογισμικού ή νέες εκδόσεις κατάλληλα ρυθμισμένες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Ακόμα, το να μειωθεί σημαντικά η πολυπλοκότητα των συσκευών οδηγεί σε μείωση του χώρου των εγκαταστάσεων,

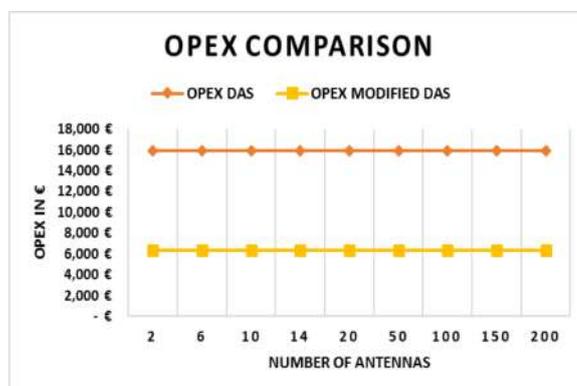


FIGURE 8.9: Σύγκριση λειτουργικού κόστους για τα δύο DAS συστήματα.

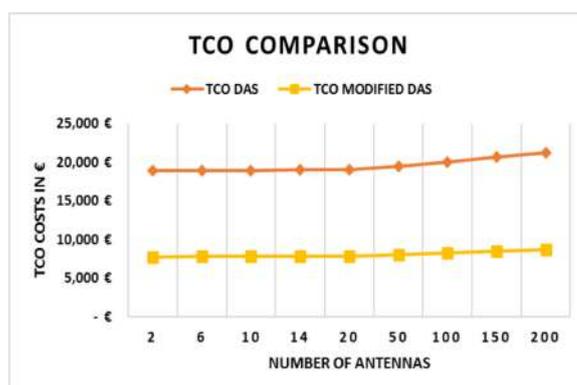


FIGURE 8.10: Σύγκριση συνολικού κόστους για τα δύο DAS συστήματα.

μείωση της υποδομής, ελάττωση του καταναλισκόμενου ρεύματος και μείωση της αντίστοιχης δαπάνης. Το συγκεκριμένο γεγονός εκτός ότι εξοικονομεί χρήματα αποτελεί και έναυσμα για πράσινη καινοτομία και επιχειρηματικότητα.

## Chapter 9

# Software Defined Networks (SDN)

Η τεχνολογία SDN αποτελεί μία βασική τεχνολογία, η οποία διευκολύνει σημαντικά την εξάπλωση και τον καθολικό έλεγχο των δικτύων. Τα SDN δίκτυα είναι ιδανικά για το μέλλον, καθώς όσο πολύπλοκη κι αν είναι μία αρχιτεκτονική εφόσον αυτή απεικονίζεται σε μεγάλη κλίμακα και είναι εύκολη και απτή η άμεση διαχείριση των δικτύων δια μέσου της διεπαφής του SDN, επιτυγχάνονται πολύ πιο άμεσα και αποτελεσματικά οι ενέργειες διαχείρισης. Ο συνδυασμός αυτού του είδους με την τεχνολογία NFV προσδίδει πολύ αποδοτικές αρχιτεκτονικές, που είναι μειωμένου κόστους, καθώς περιλαμβάνουν όλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα του λογισμικού συμπεριλαμβανομένου χαμηλού κόστους συντήρησης, μικρότερη καταναλισκόμενη ενέργεια, λιγότερο υλικό κλπ. Η RAN τεχνολογία αποτελεί βασικό πυλώνα για τα κινητά δίκτυα και σήμερα, αποτελεί την πιο σημαντική αρχιτεκτονική πρόταση για αυτά.

Ένα ακόμα στοιχείο, που είναι αναγκαίο να αναφερθεί είναι η τεχνολογία NFV, η οποία συμβάλει ενεργά στη δικτύωση, όπου οι οντότητες δικτύου, που παραδοσιακά χρησιμοποιούσαν ειδικά αντικείμενα υλικού αντικαθίστανται τώρα με υπολογιστές, στους οποίους τρέχει λογισμικό για την παροχή της ίδιας λειτουργικότητας. Η χρήση στο δίκτυο, που βασίζεται σε τεχνικές NFV, καθιστά ευκολότερο να επεκταθεί και να τροποποιηθεί το δίκτυο και να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς και να τυποποιήσει το μεγαλύτερο μέρος του υλικού. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μειωθεί σημαντικά το συνολικό κόστος, αλλά και τα επί μέρους κόστη.

Τα συνήθη και παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα αποτελούνται από πολλούς ανεξάρτητους σταθμούς βάσης. Κάθε ένας από αυτούς καλύπτει μια μικρή περιοχή, ενώ μια ομάδα σταθμών παρέχει κάλυψη σε μια μεγαλύτερη περιοχή. Κάθε σταθμός επεξεργάζεται και μεταδίδει το δικό του σήμα από και προς τα διάφορα τερματικά και κατευθύνεται προς το κεντρικό δίκτυο δια του μέσου μετάδοσης (backhaul).

Υπάρχει πλήθος περιορισμών στις βασικές αρχιτεκτονικές. Πρώτον, κάθε σταθμός είναι δαπανηρός και περιλαμβάνει υψηλά κόστη τόσο για την κατασκευή όσο και για τη λειτουργία του. Δεύτερον, η προσθήκη πολλών δομικών δικτυακών στοιχείων σε ένα σύστημα είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της χωρητικότητάς του. Τρίτον, οι παρεμβολές μεταξύ των σταθμών βάσης, κυρίως όταν οι σταθμοί είναι πλησιέστεροι μεταξύ τους και χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα δημιουργούν σημαντικά εμπόδια και παρεμβολές στη λειτουργία των δικτύων.

Το RAN αποτελεί ουσιαστικά μετεξέλιξη του κατακεκομένου συστήματος σταθμών βάσης. Επωφελείται από πολλές τεχνολογικές εξελίξεις σε ασύρματα, οπτικά και πληροφοριακά συστήματα. Εφαρμόζει την πρόσφατη τεχνολογία Data Center Network (DCN) με σκοπό να δημιουργήσει ένα δίκτυο διασύνδεσης χαμηλού κόστους, υψηλής αξιοπιστίας, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλού εύρους ζώνης.

Χρησιμοποιεί ανοιχτές πλατφόρμες και τεχνολογία **virtualization** σε πραγματικό χρόνο για την επίτευξη δυναμικής κατανομής κοινών πόρων και υποστήριξης πολυεθνικών τεχνολογικών περιβαλλόντων. (Pompili, Hajisami, and Viswanathan, 2015)

Το **EPC** συνιστά 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 ενιαίο δίκτυο πακέτων.

Δημοσιεύσεις, που έχουν προκύψει σε σχέση με τα θέματα του παρόντος κεφαλαίου είναι: (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2018), (Christos Bouras and Anastasia Kollia, 2019), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017c), (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2017b), (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, 2017)

## 9.1 Αρχιτεκτονική

### 9.1.1 Αρχιτεκτονική SDN

Η τεχνο-οικονομική ανάλυση αποδεικνύει ότι το **SDN** και η λειτουργία αναπαράστασης του εξοπλισμού του δικτύου οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους κεφαλαίου για τους διαχειριστές του (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Το **NFV** υλοποιεί λειτουργίες δικτύου μέσω λογισμικού, το οποίο λειτουργεί σε συνηθισμένους διακομιστές, σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα, τα οποία υλοποιούν αυτές τις λειτουργίες με χρήση υλικού ειδικού σκοπού, υψηλού κόστους αγοράς και συντήρησης. Όσον αφορά στο **SDN**, διαχωρίζοντας το επίπεδο ελέγχου και δεδομένων είναι δυνατόν για το χειριστή να αυξήσει την ταχύτητα εισαγωγής νέων λειτουργιών και να επιφέρει μείωση του συνολικού κόστους για το μοντέλο και την τεχνολογία. Επιπλέον, το πρωτόκολλο **OpenFlow**, το οποίο είναι ένα τυπικό πρωτόκολλο επικοινωνίας **SDN** επιτρέπει άμεση πρόσβαση και έλεγχο του επιπέδου προώθησης των συσκευών του δικτύου (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016) και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα της μείωσης του **CAPEX** στα **SDN** δίκτυα (Naudts et al., 2012).

Επιπρόσθετα, η κοινή χρήση εξοπλισμού μεταξύ διαχειριστών κινητών δικτύων επιτρέπει την αποδοτική χρήση των ήδη υπαρχόντων πόρων των δικτύων. Η λειτουργία **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, που θα επέφερε η διαδικασία αυτή στο 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**. Η διεπαφή παρέχει πρόσβαση στο **EPC** δια μέσω μιας εικόνας των φυσικών πόρων, που σχετίζονται με το δεδομένο **RAN** σταθμό βάσης. (Akyildiz, Pu Wang, and Lin, 2015)

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

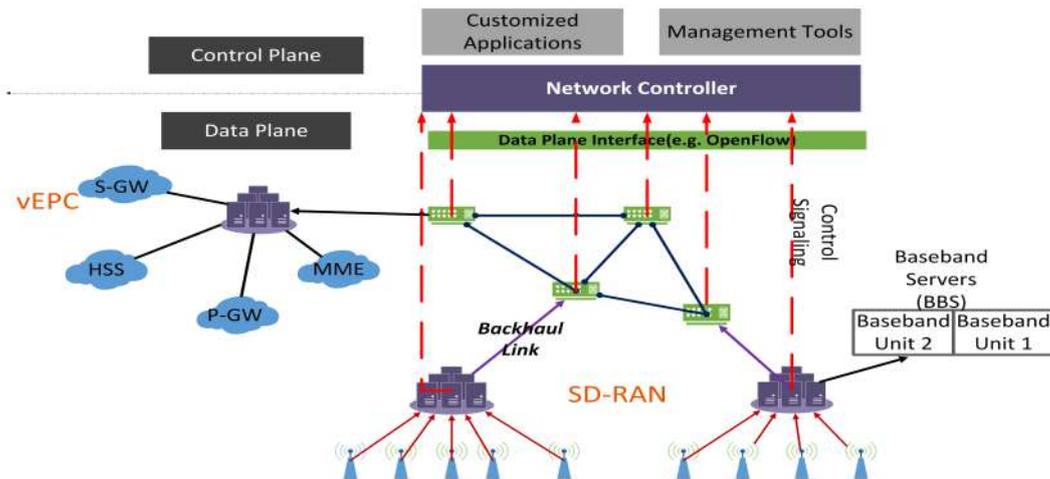


FIGURE 9.1: Μοντέλο Συστήματος SDN/NFV (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016).

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών SDN και NFV περιλαμβάνει πολλά πλεονεκτήματα, καθώς και πολλά μειονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα:  
Πλεονεκτήματα:

- Διαχωρισμός ελέγχου και επιπέδου δεδομένων
- Καλύτερη διανομή των πηγών
- Χρήση της στατιστικής του δικτύου για καλύτερη διαχείριση του
- Χαμηλότερο κόστος
- Γρηγορότερη είσοδος νέων υπηρεσιών στην αγορά
- Μείωση του λειτουργικού κόστους
- Περιορισμός του χώρου, που χρειάζεται για την υποδομή
- Ευκολότερη διαχείριση/αναβάθμιση/αντικατάσταση

Μειονεκτήματα:

- Κίνδυνοι ασφάλειας
- Κεντρικός έλεγχος οδηγεί σε κινδύνους επίθεσης στο κεντρικό σύστημα από κακόβουλους χρήστες
- Δεν υπάρχουν κατάλληλα διαμορφωμένα πρότυπα για την τεχνολογία
- Απαιτείται έρευνα για το συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες
- Προβλήματα και ελαττώματα λογισμικού

Ακολούθως, παρατίθεται η μελέτη SWOT. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα πιο σημαντικά στοιχεία σχετικά με τα δυνατά σημεία, τις αδυναμίες, τις απειλές και τις ευκαιρίες, που εμφανίζονται σχετικά με τις δύο συγκρινόμενες τεχνολογίες και την υιοθέτησή τους στη 5G.

	helpful	harmful
internal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Υψηλή απόδοση</li> <li>2. Επεκτασιμότητα</li> <li>3. Μείωση του υλικού</li> <li>4. Κεντρική διαχείριση του συστήματος</li> <li>5. VNFs εύκολα εισάγονται σε αρχιτεκτονικές</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Κίνδυνοι ασφάλειας</li> <li>2. Δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμα σε μεγάλη κλίμακα</li> <li>3. Εγείρονται ζητήματα αξιοπιστίας λόγω της κεντρικής φύσης τους</li> <li>4. Προσαρμογή στις σημερινές τεχνολογίες (LTE-A)</li> <li>5. Δεν έχουν ελεγχθεί σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας</li> </ol>
external	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Η έλευση του 5G</li> <li>2. Νέες υπηρεσίες, που πρόκειται να εμφανιστούν το επόμενο διάστημα</li> <li>3. Internet of Everything (IoE)</li> <li>4. Απαιτείται περισσότερος κεντρικός έλεγχος</li> <li>5. Χρειάζεται περισσότερο φάσμα</li> <li>6. Μείωση των εξόδων</li> <li>7. Λιγότερος καιρός για την εισαγωγή νέων τεχνολογιών να έρθουν στην αγορά</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Δυσπιστία χρηστών</li> <li>2. Απροθυμία των παρόχων για νέες επενδύσεις</li> <li>3. Ανάγκη προώθησης των νέων τεχνολογιών</li> <li>4. Δυσπιστία λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν ακόμα πρότυπα για το συνδυασμό SDN/NFV</li> </ol>

### 9.1.2 Αρχιτεκτονική LTE-A κινητού δικτύου

Το μοντέλο αυτό έχει αναλυθεί διεξοδικά (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Αποτελεί ένα μοντέλο με κυψέλες μικρές και μεγάλες, οι οποίες συνεργάζονται για να πραγματοποιείται η επικοινωνία του κάθε χρήστη με το δίκτυο, να καλύπτονται οι ανάγκες του δικτύου και να λειτουργούν πιο αποδοτικά και ομαλά, αλλά

και να είναι παντού διαθέσιμοι οι απαραίτητοι δικτυακοί πόροι. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται καθώς συγκρίνεται με την αντίστοιχη λύση, που προτείνεται για τα SD-N/NFV με σκοπό να φανούν τα πλεονεκτήματα της προγραμματιζόμενης λογικής σε σχέση με τα σημερινά δίκτυα. Τέτοια μοντέλα, όπως αυτό που παρουσιάζεται ακολούθως, συναντώνται ευρέως στα σημερινά δίκτυα, ενώ προγραμματιζόμενα και εικονικά τμήματα δικτύων θα αποτελούν οι πιο πρωταγωνιστικές λύσεις στο εγγύς μέλλον. Είναι άλλωστε προφανές ότι τα μελλοντικά δίκτυα θα διαφοροποιηθούν σημαντικά σε σχέση με τα σημερινά, κάτι που καθίσταται λογικό και με βάση τις καινοτόμες τεχνολογίες, που έχουν αναπτυχθεί και θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη γενιά δικτύων.

Προσεγγίσεις, όπως το IoT θα αποτελέσουν σταθμό για τα δίκτυα και αναδεικνύουν τη διαφορά των μελλοντικών δικτύων σε σχέση με τα σημερινά, δίνοντας παράλληλα την αίσθηση για το πόσες πολλές και διαφορετικές υπηρεσίες είναι δυνατό να προκύψουν από τα δίκτυα αυτά. Στο Κεφάλαιο αυτό θα επεξηγηθεί αναλυτικά η Αρχιτεκτονική και το Οικονομικό Μοντέλο για το δίκτυο Τέταρτης Γενιάς. Τα αντίστοιχα πειράματα παρατίθενται στα επόμενα κεφάλαια, καθώς επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η λύση αυτή για σύγκριση με μελλοντικές λύσεις, οπότε δε θεωρήθηκε σημαντικό να αναλυθεί πειραματικά το εν λόγω δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική γι' αυτά τα δίκτυα παρουσιάζεται παρακάτω. Μία βασική αρχιτεκτονική για ένα κινητό δίκτυο σήμερα αποτελείται από 3 βασικά τμήματα:

- τον εξοπλισμό χρήστη
- το Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)
- το Evolved Packet Core

Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει μικρότερα τμήματα, τα οποία είναι απολύτως απαραίτητα για την επικοινωνία των κινητών δικτύων και για να προσφέρονται οι κινητές υπηρεσίες, καθώς και για τη συνδεσιμότητα στους χρήστες. Όλα αυτά επιφέρουν σημαντικό κόστος για τον πάροχο του δικτύου ή/και για το χρήστη.

Στο Σχήμα 9.2 παρατίθεται μία αρχιτεκτονική LTE-A. Ο εξοπλισμός του χρήστη επικοινωνεί με την υποδομή E-UTRAN, η οποία επικοινωνεί με το Evolved Packet Core (EPC) και αλληλοεπιδρά με τους εξυπηρετητές. Μία LTE-A αρχιτεκτονική αναλύεται στο Σχήμα 9.3, όπου παρατίθενται αναλυτικότερα τα στοιχεία τα οποία αντικαθίστανται από εικονικά στις σύγχρονες δικτυακές αρχιτεκτονικές.

## 9.2 Μαθηματικό Μοντέλο SDN

Το μαθηματικό μοντέλο, που καταρτίστηκε για την οικονομική προσέγγιση του συνδυασμού των τεχνολογιών SDN και NFV παρουσιάζεται παρακάτω. Περιλαμβάνει τα κόστη τόσο για το EPC και RAN και χωρίζεται σε κόστος κεφαλαίου για τα συστατικά στοιχεία, τα οποία απαιτούνται για την επένδυση σε νέες συσκευές υλικό ή και λογισμικό, αλλά και στο λειτουργικό κόστος, που περιλαμβάνει τα κόστη, που προέρχονται από την καθημερινή λειτουργία του συστήματος.

## LTE-A ABSTRACT ARCHITECTURAL SCHEME

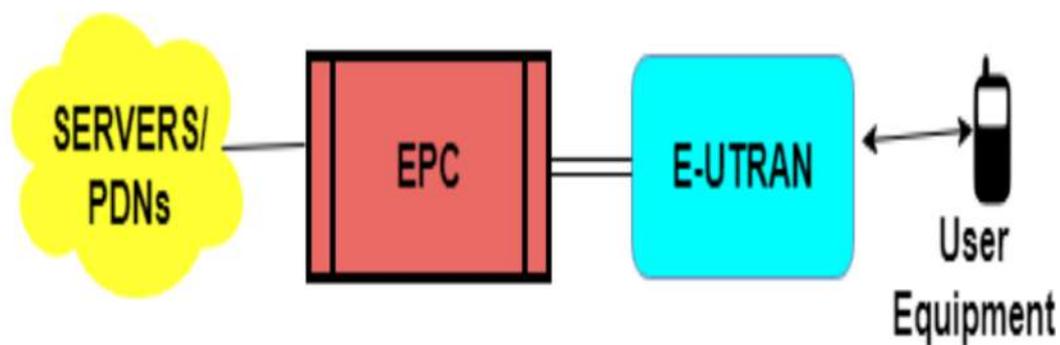


FIGURE 9.2: Η αρχιτεκτονική LTE-A μαζί με τα βασικά συστατικά.

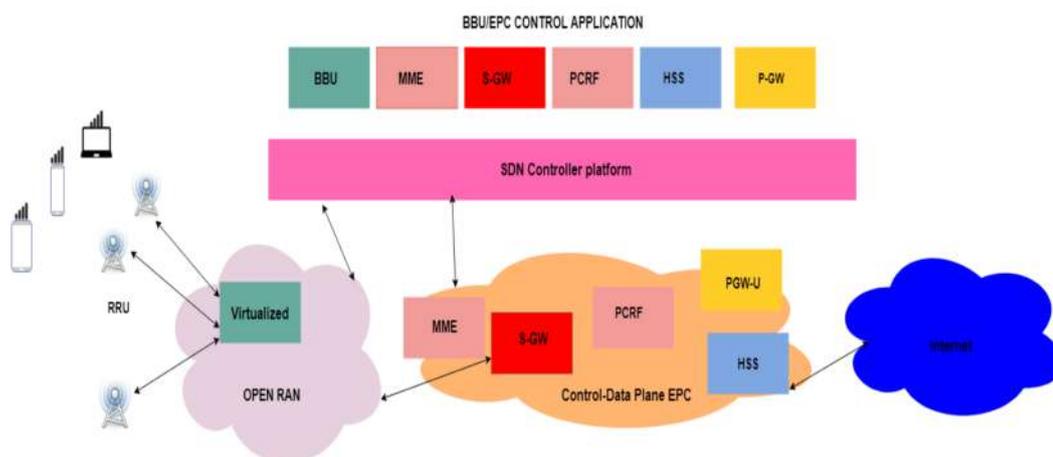


FIGURE 9.3: Η αρχιτεκτονική SDN/NFV μαζί με τα βασικά συστατικά στοιχεία της.

### 9.2.1 Κόστος κεφαλαίου

Σε αυτή την περίπτωση, το κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνει όλον τον απαιτούμενο εξοπλισμό, που χρειάζεται για το μοντέλο και τα αντίστοιχα κόστη. Περιέχει όλα τα έξοδα όλων των συσκευών και των NFVs τα οποία χρειάζονται, έτσι ώστε η υποδομή να αναπτυχθεί και να δουλεύει κανονικά.

- **RAN:** Υπάρχουν  $n_{vs}$  εικονικοί σταθμοί βάσης ανά υπερ-σταθμό βάσης.  $l_{SBS}$  είναι η μεταβλητή, που περιγράφει πόσοι χρήστες υπάρχουν σε μία συγκεκριμένη περιοχή, δηλαδή περιγράφει την πυκνότητα των χρηστών. Το πλήθος των υπερ-σταθμών, που υπάρχουν σε μία συγκεκριμένη περιοχή  $A$  είναι  $N_{SBS}$ . Η μέγιστη ακτίνα, στην οποία οι σταθμοί βάσης είναι δυνατό να πετύχουν τη μετάδοση της πληροφορίας είναι  $R_{max}$ . Κάθε θέση ενός υπερ-σταθμού επιφέρει αντίστοιχο κόστος, που αναπαρίσταται από τον παράγοντα  $C_{CS-SBS}$  και επίσης, ένα κόστος ανά μονάδα **SBS**, που δίνεται από την παράμετρο  $C_{SBS}$ . Οι χρήστες  $N_{UE}$  μίας συγκεκριμένης περιοχής δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$N_{UE} = n_{vs} l \pi R_{max}^2 N_{SBS}$$

όπου  $l$  είναι η ακτίνα κάλυψης της περιοχής  $A$ .

$$C_{site} = C_{CS-SBS} N_{SBS}$$

όπου  $C_{site}$  υποδηλώνει το κόστος για την κατασκευή των κυψελών για το **SBS** δίκτυο.

Οι εξισώσεις 9.2.1 and 9.2.1 συμβάλουν στον υπολογισμό του κόστους για το SDN RAN, το οποίο οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$CAPEX_{RAN}^{SDN} = \frac{N_{UE}}{n_{vs} l \pi R_i^2} (C_{CS-SBS} + C_{SBS})$$

- **EPC:** Τα NFVs προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες στο δίκτυο, όπως τη βελτίωση της απόδοσης και τη μείωση των διαφόρων τύπων κόστους, όπως τα **OPEX** και **CAPEX**. Χρησιμοποιούνται με σκοπό να εξασφαλίσουν την αποθήκευση και την επεξεργασία. Αντικαθιστούν τις πηγές υλικού με λογισμικό και λογική προγραμματισμού. Στην 5G υποδομή, το δίκτυο **EPC** θα είναι κυρίως εικονικό. Συνεπώς, θα υπάρχει μία  $C_{place}$  τοποθεσία, στην οποία θα ενοικιάζεται ή θα δημιουργείται το κέντρο δεδομένων. Επιπλέον, το συνολικό κόστος, το οποίο προκύπτει από τη χρήση του εξοπλισμού των εξυπηρετητών δίνεται από τη μεταβλητή  $C_{servers}$ . Η παράμετρος για την άδεια  $C_{license}$  περιλαμβάνει την ποσότητα των χρημάτων, που χρειάζεται να πληρωθεί με σκοπό να αποκτηθούν οι παράγοντες λογισμικού, που χρησιμοποιήθηκαν ως εικονικά **vEPC** δικτυακές συναρτήσεις (VNFs).

$n_{servers}$  αποτελούν την ποσότητα των εξυπηρετητών, τα οποία είναι απαραίτητα για το δίκτυο.  $C_{perServer}$  αναπαρίστα το κόστος, που χρειάζεται να πληρωθεί για κάθε εξυπηρετητή. Συνεπώς, το συνολικό κόστος κεφαλαίου για την απόκτηση των εξυπηρετητών:

$$C_{servers} = n_{servers} C_{perServer}$$

Με σκοπό να λειτουργήσουν τα NFVs υπάρχει ανάγκη να αποκτήσει μία ειδική άδεια. Περιλαμβάνει διάφορα είδη κόστους των δικτυακών παραμέτρων, που αντικαθίστανται ή συνεργάζονται με τα NFVs, δηλαδή HSS, MME, S-GW, P-GW, oVS, OF ελεγκτή.

$$C_{license} = C_{HSS} + C_{MME} + C_{S-GW} + C_{P-GW} + C_{oVS} + C_{OFController}$$

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου για το εικονικό EPC συντελεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} CAPEX_{virtualized}^{EPC} &= C_{servers} + C_{license} + C_{place} = \\ & n_{servers} C_{perServer} + C_{HSS} + C_{MME} + C_{S-GW} + C_{P-GW} \\ & + C_{oVS} + C_{OFController} + C_{place} \end{aligned}$$

Ως αποτέλεσμα, το συνολικό κόστος κεφαλαίου για την περίπτωση του SDN οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} CAPEX_{SDN} &= CAPEX_{virtualized}^{EPC} + CAPEX_{virtualized}^{RAN} = \\ & C_{servers} + C_{license} + C_{place} = \\ & n_{servers} C_{perServer} + C_{HSS} + C_{MME} + C_{S-GW} + C_{P-GW} + C_{oVS} + \\ & + C_{OFController} + C_{place} + \frac{N_{UE}}{n_{vs} l \pi R_i^2} (C_{CS-SBS} + C_{SBS}) \end{aligned}$$

### 9.2.2 Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει όλα τα έξοδα της συντήρησης, καθώς και τα έξοδα για τη λειτουργία του συστήματος. Αν και τα NFVs κοστίζουν πιο οικονομικά, επιφέρουν κόστη στο δίκτυο, όπως η κατανάλωση ενέργειας. Και το EPC και το RAN επιφέρουν κόστη στο δίκτυο και αυξάνουν το συνολικό κόστος του.

- **RAN:** Σε μία δεδομένη περιοχή, για παράδειγμα A, υπάρχουν  $N_{SBS}$  υπερσταθμοί βάσης μέσα σε αυτό και επίσης υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από  $n_{vs}$  εικονικούς σταθμούς βάσης. Στο (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016), υπολογίζεται ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη για το μικρο-κυματικό σύνδεσμο και τον ψύκτη, από άλλες πηγές, που επιφέρουν κόστος και ενεργειακή κατανάλωση. Η ενεργειακή κατανάλωση του SBS μπορεί να αυξηθεί ακόμα και στο 20%, με κάθε προστιθέμενη πλευρά στο σύστημα. Συνεπώς, η ενεργειακή κατανάλωση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{airSBS} = P_{air} [1 + 0.2(n_{vs} - 1)]$$

$$P_{mwSBS} = P_{mw} [1 + 0.2(n_{vs} - 1)]$$

Οι εικονικοί πάροχοι μοιράζονται την υποδομή της κεραίας και συνεπώς, η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται ακόμα περισσότερο. Συνεπώς, για δεδομένο

SBS, η καταναλισκόμενη ενέργεια της ραδιο-συχνότητας προκύπτει από:

$$P_{rfSBS} = (P_{trans} + P_{rect} + P_A)[1 + 0.2(n_{vs} - 1)]$$

Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του SBS προκύπτει χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις: (9.2.2, 9.2.2, 9.2.2) και προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{SBS} = n_a P_{rfSBS} + n_{vs} P_{DSP} + P_{airSBS} + P_{mwSBS}$$

Το συνολικό λειτουργικό κόστος για την υποδομή προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των σταθμών βάσης στην περιοχή με την ενεργειακή κατανάλωση ανά σταθμό βάσης και το κόστος ανά κιλοβατώρα  $C_{KWH}$ . Άρα, το συνολικό λειτουργικό κόστος θα είναι:

$$OPEX_{RAN}^{SDN} = P_{SBS} N_{SBS} C_{KWH}$$

- **EPC:** Σε μία συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν πολλά NFVs, όπως εικονικοί εξυπηρετητές για τη λειτουργία του συστήματος. Επιφέρουν πολλά λειτουργικά κόστη, επειδή καταναλώνουν ενέργεια για να λειτουργήσουν. Επίσης, χρειάζονται συντήρηση. Αν και αυτά τα κόστη μειώνονται συγκριτικά με τους φυσικούς εξυπηρετητές, δηλαδή σε σχέση με την παραδοσιακή λύση, επιφέρουν κόστη και αυξάνουν τα έξοδα του δικτύου.

Σε σχέση με (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016),  $n_{servers}$  χρειάζονται για το σύστημα να λειτουργήσουν. Αν  $VM_{required\_perHSS}$  ο αριθμός των εικονικών μηχανών, που χρειάζονται ανά HSS και ακόμα,  $VM_{SperServer}$  τοποθετούνται ανά εξυπηρετητή στο δίκτυο, τότε το πλήθος των εξυπηρετητών στο δίκτυο δίνεται:

$$n_{servers}^{HSS} = \frac{VM_{required\_perHSS}}{VM_{SperServer}}$$

Κατά συνέπεια, αν η ενεργειακή κατανάλωση ισούται για κάθε εξυπηρετητή με τον παράγοντα  $P_{perServer}$  και το κόστος της ανά ώρα δίνεται από  $C_{KWH}$ , τότε το λειτουργικό κόστος για τον εξοπλισμό EPC δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$OPEX_{SDN}^{EPC} = n_{servers} P_{perServer} C_{KWH} = \frac{VM_{required\_perHSS}}{VM_{SperServer}} P_{perServer} C_{KWH}$$

Συνεπώς, το συνολικό λειτουργικό κόστος για το SDN δίκτυο, προκύπτει από το άθροισμα του RAN και του EPC κόστους και δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$\begin{aligned} OPEX_{SDN} &= OPEX_{RAN}^{SDN} + OPEX_{SDN}^{EPC} = \\ &P_{SBS} N_{SBS} C_{KWH} + \frac{VM_{required\_perHSS}}{VM_{SperServer}} P_{perServer} C_{KWH} = \\ &C_{KWH} (P_{SBS} N_{SBS} + \frac{VM_{required\_perHSS}}{VM_{SperServer}} P_{perServer}) \end{aligned}$$

### 9.2.3 Συνολικό κόστος

Λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη ανάλυση (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016), το συνολικό κόστος της τεχνολογίας δίνεται ως εξής:

$$TCO^{SDN} = CAPEX_{SDN} + OPEX_{SDN} \\ \frac{N_{UE}}{n_{active} l \pi R_i^2} (C_{CS-SBS} + C_{SBS}) + \\ C_{KWH} (P_{SBS} N_{SBS} + \frac{VM_{required\_perHSS}}{VM_{SperServer} P_{perServer}})$$

## 9.3 Μαθηματικό Μοντέλο LTE-A κινητού δικτύου

Το παραδοσιακό μοντέλο είναι το μοντέλο, που χρησιμοποιείται σήμερα κατά κόρον. Αποτελεί ένα παράδειγμα προς αντιδιαστολή για τα μοντέλα, τα οποία θα υπάρχουν μελλοντικά και θα χρησιμοποιούνται για να επικοινωνούν τα κινητά δίκτυα το ένα με το άλλο, καθώς και οι διάφοροι χρήστες μεταξύ τους. Βασίζονται κυρίως στις πηγές υλικού και δεν περιλαμβάνουν πολλά ή σχεδόν καθόλου εικονικά τμήματα. Συνεπώς, επιφέρουν μεγάλα λειτουργικά κόστη. Όλα τα κόστη του δικτύου αυτού χωρίζονται σε EPC και RAN CAPEX και σε EPC και RAN OPEX.

### 9.3.1 Κόστος κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου και σε αυτή την περίπτωση αποτελείται από τον εξοπλισμό, ο οποίος απαιτείται για να δημιουργηθεί η βασική δομή του δικτύου αυτού και αποτελείται από δύο μέρη το RAN και το EPC τμήμα του δικτύου.

- **RAN:**

Στο παραδοσιακό δίκτυο υποτίθεται ότι υπάρχουν  $n_{op}$  πάροχοι, το κόστος μίας κυψέλης είναι  $C_{cs-sbs}$ , και το κόστος του σταθμού βάσης είναι  $C_{BS}$  και κάθε πάροχος αποκτά ένα σύνολο από  $N_{BSO}$  BSs. Το συνολικό κόστος ανά κατασκευασμένη κυψέλη όλων των διαφορετικών παρόχων, που συνυπάρχουν στην αρχιτεκτονική είναι:

$$C_{cs-sbs-total} = n_{op} N_{BSO} C_{cs-sbs}$$

Ενώ το κόστος για όλους τους υπάρχοντες σταθμούς βάσης των παρόχων θα είναι:

$$C_{BStotal} = n_{op} N_{BSO} C_{BS}$$

Συνεπώς, το συνολικό κόστος κεφαλαίου της παραδοσιακής αρχιτεκτονικής οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$CAPEX_{traditional}^{RAN} = C_{cs-sbs-total} + C_{BStotal} = \\ n_{op} N_{BSO} (C_{BS} + C_{cs-sbs})$$

- **EPC:**

Στο δίκτυο EPC, το συνολικό κόστος από τη χρήση του εξοπλισμού του εξυπηρετητή δίνεται από τον παράγοντα  $C_{servers}$ . Η μεταβλητή  $C_{license}$  περιλαμβάνει την ποσότητα χρημάτων, που χρειάζεται να καταβληθεί με σκοπό να αποκτηθεί το απαραίτητο λογισμικό για την κατάρτιση των vEPC.  $n_{servers}$  αποτελούν τους εξυπηρετητές, που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του δικτύου. Το κόστος  $C_{perServer}$  αναπαριστά τα κόστη, που χρειάζεται να πληρωθούν για κάθε εξυπηρετητή. Συνεπώς, το συνολικό κόστος κεφαλαίου για την απόκτηση των εξυπηρετητών οδηγεί στην πιο κάτω εξίσωση:

$$CAPEX_{traditional}^{EPC} = n_{servers}C_{perServer}$$

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου για το παραδοσιακό δίκτυο προκύπτει από το άθροισμα των εξόδων για το EPC και το RAN και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$CAPEX_{traditional} = CAPEX_{traditional}^{RAN} + CAPEX_{traditional}^{EPC} = n_{op}N_{BSO}(C_{BS} + C_{cs-sbs}) + n_{servers}C_{perServer}$$

### 9.3.2 OPEX

Το λειτουργικό κόστος και σε αυτή την περίπτωση, συμπεριλαμβάνει τα κόστη για τη λειτουργία του δικτύου από μέρα σε μέρα, τα κόστη για τη λειτουργία, τη διαχείριση του δικτύου, τα κόστη της ενεργειακής κατανάλωσης κλπ.

- **RAN:**

Το λειτουργικό κόστος για τη RAN υποδομή περιλαμβάνει πολλές οντότητες, όπως για παράδειγμα η ενεργειακή κατανάλωση για τη μετάδοση  $P_{trans}$ , τον ενισχυτή ( $P_{rect}$ ), την επεξεργασία του ψηφιακού σήματος ( $P_{DSP}$ ), τον ενεργειακό ενισχυτή ( $P_{PA}$ ), τη μικροκυματική μετάδοση ( $P_{MW}$ ), τον κλιματισμό ( $P_{air}$ ). Κατά συνέπεια, το λειτουργικό κόστος για την παραδοσιακή RAN αρχιτεκτονική δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$OPEX_{traditional}^{RAN} = n_a(P_{trans} + P_{rect} + P_{DSP} + P_{PA} + P_{MW} + P_{air})$$

όπου  $n_a$  αναπαριστά το πλήθος των κεραιών στο μοντέλο.

- **EPC:**

Το EPC δίκτυο περιλαμβάνει πολλά βοηθητικά στοιχεία εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα εξυπηρετητές για τη λειτουργία του συστήματος. Συνεπώς, αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν πολλά λειτουργικά έξοδα, διότι καταναλώνουν πολλή ενέργεια για να λειτουργήσουν. Επιπρόσθετα, χρειάζονται πολλές εργασίες συντήρησης. Κατά συνέπεια, αν  $n_{servers}$  υπάρχουν στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική και καταναλώνουν ενέργεια ίση με τον παράγοντα  $P_{perServer}$  και η ενεργειακή κατανάλωση σε KiloWatt ανά ώρα είναι  $C_{KWH}$ , τότε το λειτουργικό κόστος για τον EPC εξοπλισμό οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$OPEX_{traditional}^{EPC} = n_{servers}P_{perServer}C_{KWH}$$

Συνεπώς, το συνολικό λειτουργικό κόστος για την περίπτωση του παραδοσιακού μοντέλου, δίνεται από τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned} OPEX_{traditional} &= OPEX_{traditional}^{RAN} + OPEX_{traditional}^{EPC} = \\ & n_a(P_{trans} + P_{rect} + P_{DSP} + \\ & P_{PA} + P_{MW} + P_{air}) + n_{servers}P_{perServer}CKWH \end{aligned}$$

### 9.3.3 TCO

Το συνολικό κόστος απαιτείται να πληρωθεί για την υλοποίηση και συντήρηση του δικτύου. Είναι το άθροισμα του λειτουργικού και του κεφαλαιακού κόστους και συνοψίζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} TCO_{traditional} &= CAPEX_{traditional} + OPEX_{traditional} = \\ & n_{op}N_{BSO}(C_{BS} + C_{cs-sbs}) + n_{servers}C_{perServer} + \\ & n_a(P_{trans} + P_{rect} + P_{DSP} + \\ & P_{PA} + P_{MW} + P_{air}) + n_{servers}P_{perServer}CKWH \end{aligned}$$

## 9.4 Παράμετροι

Στους Πίνακες 9.1 και 9.2 περιλαμβάνονται όλες οι παράμετροι κι οι μεταβλητές του μοντέλου. Οι περισσότερες μεταβλητές λαμβάνονται από προηγούμενη ερευνητική δράση (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Οι τιμές κυμαίνονται σε ένα πεδίο τιμών +/- 50%. Αυτή η υπόθεση συμβαίνει, διότι το 5G είναι μία μελλοντική τεχνολογία και δεν πρόκειται να κυκλοφορήσει στο μέλλον. Συνεπώς, είναι εξαιρετικά πιθανό οι τιμές να αυξηθούν σημαντικά λόγω οικονομικών παραγόντων ή να μειωθούν αν νέες τεχνολογίες εισαχθούν και ως αποτέλεσμα διάφορα κόστη, όπως η ενεργειακή κατανάλωση, η απόκτηση θέσης, η ανάπτυξη κλπ. μειωθούν με κάποιον τρόπο σημαντικά. Μάλιστα, είναι σημαντικό να αναλυθούν τα διάφορα δικτυακά στοιχεία, ώστε να γίνει προφανές πως επιδρούν οι παράγοντες κόστους.

Στους Πίνακες 9.3 και 9.4 παρατίθεται ο εξοπλισμός και η χωρητικότητα ανά VM, καθώς και οι παράμετροι, που σχετίζονται με τη δημιουργία του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται οι ΚΜΕ, οι εικονικές μηχανές, οι αποθηκευτικοί χώροι, δικτυακή υποδομή κλπ.

## 9.5 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα πειράματα, που διεξήχθησαν σχετικά με τα δύο συγκρινόμενα μοντέλα. Με βάση τα μοντέλα, τα οποία περιγράφηκαν και τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν προηγουμένως, κάποια πειράματα εφικτότητας αναλύονται και για τα δύο μοντέλα, ενώ η μελέτη εφικτότητας διεξάγεται για τα στοιχεία της εικονικής υποδομής. Όλα τα πειράματα στοχεύουν στο να αναδείξουν την επιρροή της διακύμανσης των δικτυακών παραμέτρων στο συνολικό κόστος. Οι παράμετροι  $n_{vs}$ ,  $l_{SBS}$ ,  $n_{SBS}$ ,  $C_{CS-SBS}$ ,  $C_{SBS}$ ,  $P_{trans}$ ,  $P_{pa}$ ,  $P_{mw}$ ,  $P_{air}$ ,  $CKWh$ ,  $P_{perServer}$  θα αναλυθούν ως προς το συνολικό κόστος απόκτησης για τα δύο μοντέλα. Ενώ, οι

TABLE 9.1: Παράμετροι και μεταβλητές του SDN δικτύου-Κόστη RAN.

Κόστη RAN			
Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο τιμών για ME
$n_{vs}$	Πλήθος σταθμών βάσης ανά υπερ-σταθμό βάσης	6	[2, 12]
$l_{SBS}$	Αριθμός χρηστών	500	[100, 1000]
$N_{SBS}$	Αριθμός σταθμών βάσης ανά $km^2$	10	[1, 1000]
$C_{CS-SBS}$	Κόστος της κατασκευής κυψελών για το SBS	5000 €	[1000, 10000]
$C_{SBS}$	Κόστος για τον αναπτυγμένο vBSs	15596 €	[7798, 31192]
$P_{trans}$	Κατανάλωση ενέργειας στον πομπό	100 Watt	[50, 150]
$P_{rect}$	Κατανάλωση ενέργειας στο διορθωτή	100 Watt	[50, 150]
$P_{DSP}$	Κατανάλωση ενέργειας για την επεξεργασία ψηφιακών σημάτων	100 Watt	[50, 150]
$P_{PA}$	Κατανάλωση ενέργειας στον ενισχυτή ενέργειας	10 Watt	[5, 15]
$P_{mw}$	Κατανάλωση ενέργειας στα μικρο-κύματα	80Watt	[40, 160]
$P_{air}$	Κατανάλωση ενέργειας στο κλιματιστικό	225 Watt	[112.5, 450]
$n_{op}$	Πλήθος παρόχων	10	[5, 15]
$n_a$	Πλήθος κεραιών	4	[2, 8]

TABLE 9.2: Παράμετροι και μεταβλητές του SDN δικτύου- Κόστη EPC.

Κόστη <b>EPC</b>			
Κόστη ανά <b>S/P-GW</b>			
$CPU_{perS/P-GW}$	Εξοπλισμός ΚΜΕ	4 (CPU)	[2, 16]
$MemperS/P-GW$	Μνήμη	32 GB	[8,64]
$NetperS/P-GW$	Ρυθμός μετάδοσης	10 Gbps	[1,50]
$PpsperS/P-GW$	Πακέτα ανά δευτερόλεπτο	3.676 Mpps	[1000, 7000]
$HDDperS/P-GW$	Οδηγός σκληρού δίσκου	40 GB	[10, 70]
Κόστη ανά <b>MME</b>			
$CPU_{perMME}$	Εξοπλισμός ΚΜΕ	8 (CPU)	[2, 32]
$MemperMME$	Μνήμη	40 GB	[10, 70]
$NetperMME$	Ρυθμός μετάδοσης	5 Gbps	[2,20]
$PpsperMME$	Πακέτα ανά δευτερόλεπτο	3.676 Mpps	[1000, 7000]
$HDDperMME$	Οδηγός σκληρού δίσκου	3000 GB	[500, 15000]
Κόστη ανά <b>HSS</b>			
$CPU_{perHSS}$	Εξοπλισμός ΚΜΕ	8 (CPU)	[2, 32]
$MemperHSS$	Μνήμη	32 GB	[8, 64]
$NetperHSS$	Ρυθμός μετάδοσης	5 Gbps	[2,20]
$PpsperHSS$	Πακέτα ανά δευτερόλεπτο	3.676 Mpps	[1000, 7000]
$HDDperHSS$	Οδηγός σκληρού δίσκου	3000 GB	[500, 15000]
Κόστη ανά <b>OF Controller</b>			
$CPU_{perOFController}$	Εξοπλισμός ΚΜΕ	8 (CPU)	[2, 32]
$MemperOFController$	Μνήμη	32 GB	[8, 64]
$NetperOFController$	Ρυθμός μετάδοσης	2 Gbps	[1,10]
$PpsperOFController$	Πακέτα ανά δευτερόλεπτο	1.471 Mpps	[700, 5000]
$HDDperOFController$	Οδηγός σκληρού δίσκου	40 GB	[10, 70]
Κόστη ανά <b>oVS</b>			
$CPU_{peroVS}$	Εξοπλισμός ΚΜΕ	1 (CPU)	[1, 10]
$MemperoVS$	Μνήμη	8 GB	[2, 32]
$NetperoVS$	Ρυθμός μετάδοσης	4 Gbps	[1,16]
$PpsperoVS$	Πακέτα ανά δευτερόλεπτο	5882 Mpps	[1500, 10000]
$HDDperoVS$	Οδηγός σκληρού δίσκου	40 GB	[10, 70]
Άλλα κόστη			
$C_{license}$	Κόστος της άδειας	5000 €	[2000, 8000]
$C_{place}$	Κόστος τοποθέτησης εξοπλισμού	5000 €	[2000, 9000]
$C_{server}$	Κόστος εξυπηρετητή	5262 €	[1500, 11000]
$C_{KWh}$	Κόστος KiloWatt ανά ώρα	0.25 €	[0.12, 0.5]
$P_{server}$	Ενεργειακή κατανάλωση ανά εξυπηρετητή	1332 Watt	[500, 2600]

TABLE 9.3: Εξυπηρετητές.

KME	Μνήμη	Αποθήκευση	Δίκτυο
2xXEON (2x4 πυρήνες)	64GB ECC RAM	2TB RAID 1-HDD	4x10 GB

TABLE 9.4: Blade Server Resources.

VMs	KME	Μνήμη	Αποθήκευση	Δίκτυο	Επεξεργασία
4VMs max	2 πυρήνες/ VM	8 GB/VM	250GB/VM	10 GB max	1.9 Mpps/ VM

παράμετροι  $C_{HSS}$ ,  $C_{MME}$ ,  $C_{SGW}$ ,  $C_{PGW}$ ,  $C_{OVS}$ ,  $C_{OFController}$ ,  $N_{HSS}$  θα αναλυθούν σε σχέση με τα CAPEX, OPEX και TCO στο μοντέλο SDN.

### 9.5.1 Σύγκριση του παραδοσιακού LTE-A και του SDN μοντέλου

Σε αυτό το τμήμα, και τα δύο μοντέλα συγκρίνονται και αντιπαραβάλλονται με έναν τεχνο-οικονομικό τρόπο σχετικά με το TCO χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους και εξετάζοντας τη συμπεριφορά των μοντέλων, μέσα στα επιλεγμένα εύρη τιμών. Το Σχήμα 9.4 δείχνει ότι ο αριθμός των BS ανά SBS δεν επηρεάζει πολύ το TCO των δύο μοντέλων. Το κόστος για το παραδοσιακό μοντέλο είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του μοντέλου SDN, το οποίο είναι πολύ φυσιολογικό, διότι στο μοντέλο SDN πολλά εξαρτήματα εξοπλισμού αντικαθίστανται από NFVs και συνεπώς το κόστος, που σχετίζεται με αυτόν τον εξοπλισμό μειώνεται πάρα πολύ.

Στο Σχήμα 9.5 παρατίθεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το πλήθος των σταθμών βάσης ανά  $km^2$ . Γίνεται αντιληπτό ότι αυτό επηρεάζει και τα δύο μοντέλα αυξάνοντας σχεδόν ανάλογα το συνολικό κόστος. Για πολύ μικρό αριθμό σταθμών βάσης τα δύο μοντέλα δεν έχουν πολύ διαφορετικό κόστος, εντούτοις όμως για μεγάλους αριθμούς σταθμών βάσης, το συνολικό κόστος για το παραδοσιακό μοντέλο αυξάνεται σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.6 παρατίθεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος για την υλοποίηση του εικονικού σταθμού βάσης. Παρατηρείται ότι για το παραδοσιακό μοντέλο το κόστος αυτό είναι πολύ πιο αυξημένο και με την αύξηση του κόστους αυτού αυξάνεται σημαντικά το κόστος του παραδοσιακού μοντέλου. Το μοντέλο

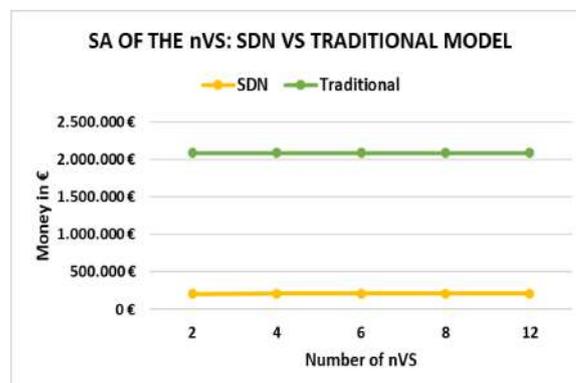


FIGURE 9.4: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το πλήθος των σταθμών βάσης.

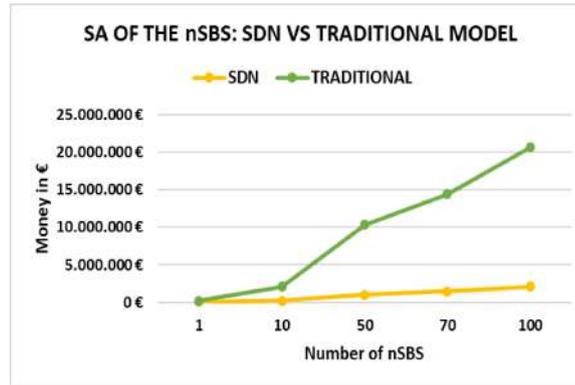


FIGURE 9.5: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το πλήθος των σταθμών βάσης ανά  $km^2$ .

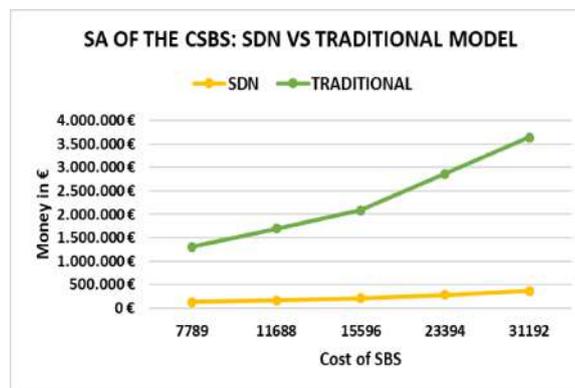


FIGURE 9.6: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το κόστος του εικονικού σταθμού βάσης.

του SDN επηρεάζεται σε πολύ μικρότερο βαθμό από την αύξηση του κόστους των κυψελών.

Στο Σχήμα 9.7 παρατίθεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος για την υλοποίηση του υπερ-σταθμού. Παρατηρείται ότι για το παραδοσιακό μοντέλο το κόστος αυτό είναι πολύ πιο αυξημένο και με την αύξηση του κόστους αυτού αυξάνεται σημαντικά το κόστος του παραδοσιακού μοντέλου. Το μοντέλο του SDN επηρεάζεται σε πολύ μικρότερο βαθμό από την αύξηση του κόστους των κυψελών.

Στο Σχήμα 9.8 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω των υπερ-σταθμών βάσης. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.9 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος του μεταδότη. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.10 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος του διορθωτή σήματος. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.11 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος

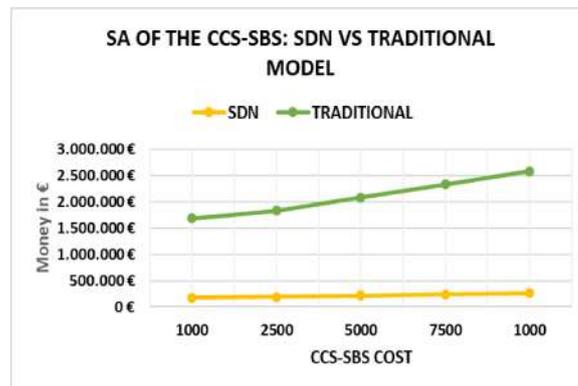


FIGURE 9.7: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το κόστος της δημιουργίας κυψελών του υπερ-σταθμού βάσης.

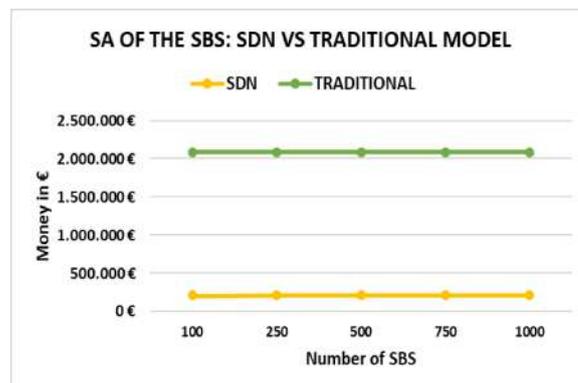


FIGURE 9.8: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το πλήθος των υπερ-σταθμών βάσης.

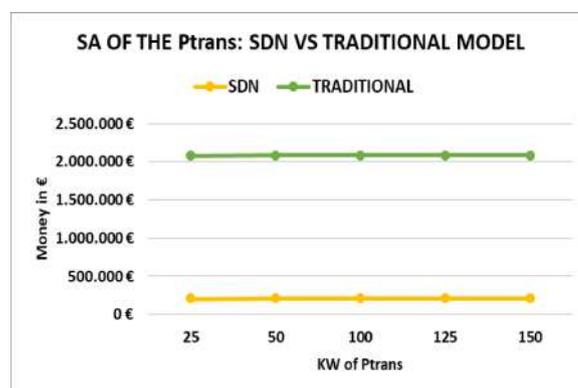


FIGURE 9.9: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ του μεταδότη.

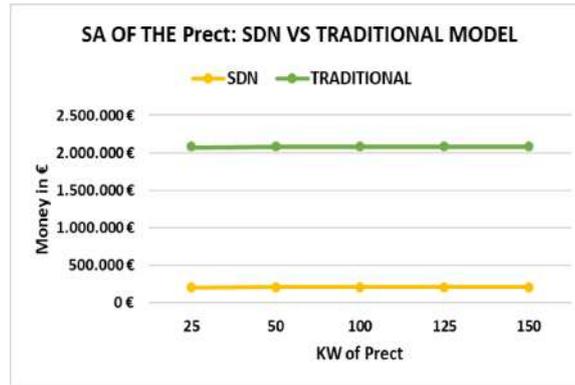


FIGURE 9.10: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ του διορθωτή σήματος.

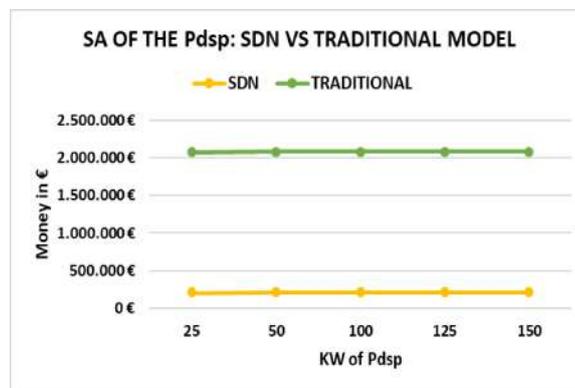


FIGURE 9.11: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος.

αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.12 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος του ενισχυτή. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.13 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος των μικρο-κυμάτων. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.14 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος του κλιματισμού. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.15 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος λόγω της ισχύος ανά εξυπηρετητή. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

Στο Σχήμα 9.16 διαφαίνεται το συνολικό κόστος σε σχέση με το κόστος κλιματισμού. Γίνεται αντιληπτό ότι το κόστος αυτό δεν προσδίδει μεγάλη επιβάρυνση σε κανένα από τα δύο μοντέλα και δεν τα επηρεάζει σημαντικά.

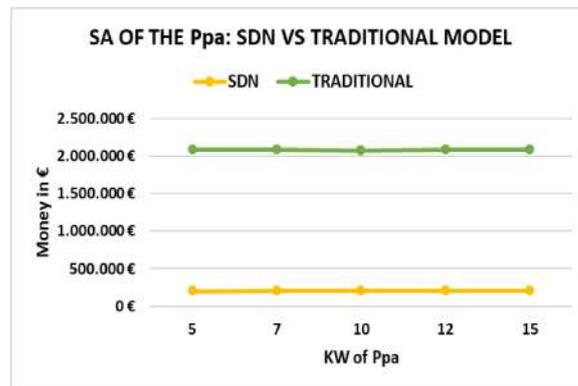


FIGURE 9.12: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ του ενισχυτή ισχύος.

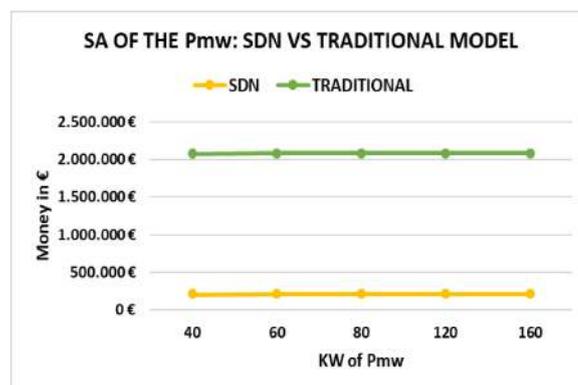


FIGURE 9.13: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ των μικρο-κυμάτων.

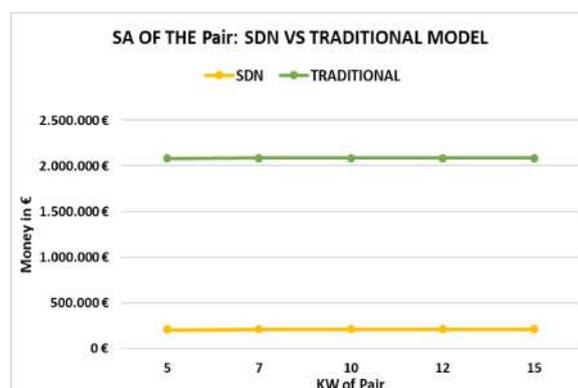


FIGURE 9.14: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ του κλιματισμού.

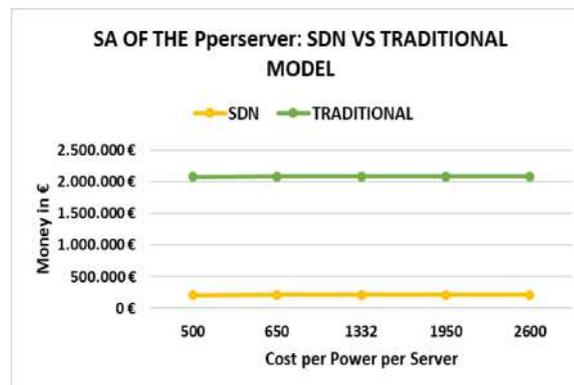


FIGURE 9.15: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με την ισχύ ανά εξυπηρετητή.

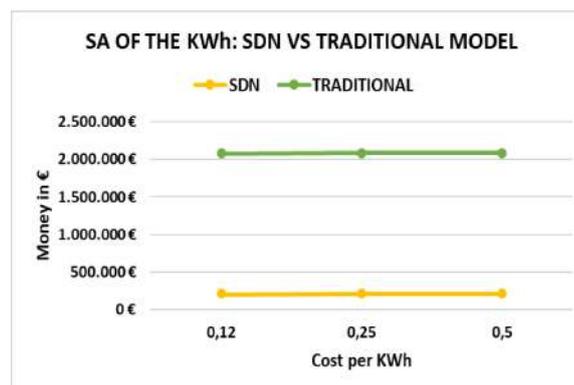


FIGURE 9.16: Σύγκριση των δύο μοντέλων SDN LTE-A σχετικά με το κόστος της KWh.

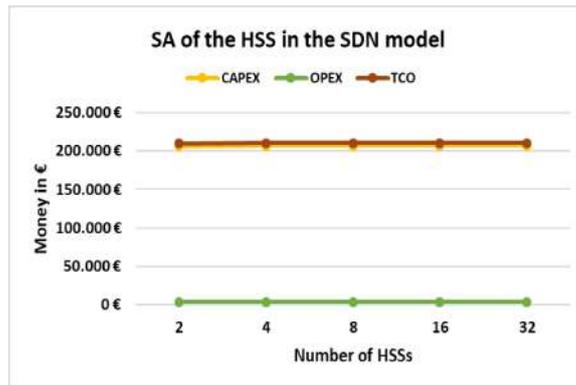


FIGURE 9.17: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με τα κόστη HSS του μοντέλου SDN.

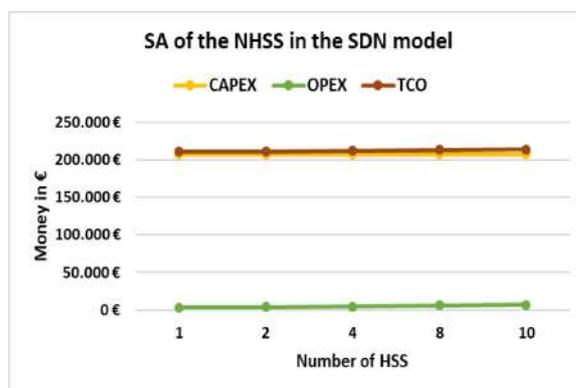


FIGURE 9.18: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με το πλήθος των HSS του μοντέλου SDN.

### 9.5.2 Μελέτη εφικτότητας για το SDN μοντέλο

Σε αυτή την ενότητα, το μοντέλο SDN αναλύεται με βάση αρκετές τιμές για κάθε παράμετρο για να αναδειχθεί ποιες είναι αυτές και κατά πόσο επηρεάζουν περισσότερο το μοντέλο και επομένως, έχει μεγάλη σημασία να μειωθούν για την ευρύτερη υιοθέτηση του μοντέλου SDN. Ακόμα, αναμένεται να εξαχθούν συμπεράσματα για τις κατευθύνσεις της μελλοντικής έρευνας.

Το Σχήμα 9.17 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $HSS$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι το κόστος του  $HSS$  έχει μεγαλύτερη επίδραση στο CAPEX, όμως προσδίδει μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική απεικόνιση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του  $HSS$ .

Το Σχήμα 9.18 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $N_{HSS}$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι οι διάφορες τιμές του  $N_{HSS}$  έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο CAPEX, όμως προσδίδουν μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική παράσταση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του  $N_{HSS}$ .

Το Σχήμα 9.19 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $MME$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι το κόστος του  $MME$  έχει μεγαλύτερη επίδραση στο CAPEX,

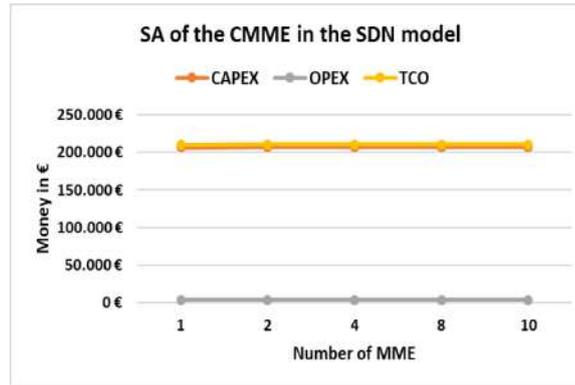


FIGURE 9.19: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με τα κόστη MME του μοντέλου SDN.

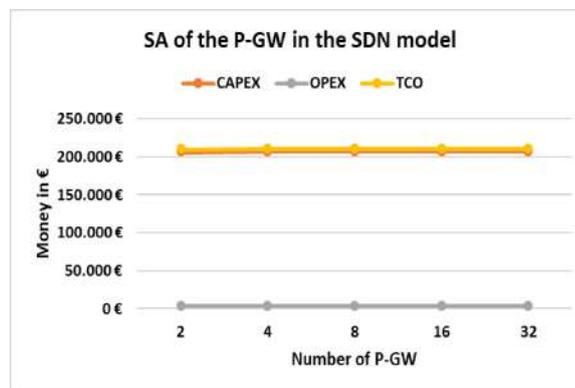


FIGURE 9.20: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με τα κόστη P-GW του μοντέλου SDN.

όμως προσδίδει μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική παράσταση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του  $MME$ .

Το Σχήμα 9.20 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $P - GW$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι οι διάφορες τιμές του  $P_{GW}$  έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο CAPEX, όμως προσδίδουν μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική παράσταση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του  $P - GW$ .

Το Σχήμα 9.21 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $S - GW$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι οι διάφορες τιμές του  $S_{GW}$  έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο CAPEX, όμως προσδίδουν μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική παράσταση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του  $S - GW$ .

Το Σχήμα 9.22 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $C_{oVS}$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι οι διάφορες τιμές του  $C_{oVS}$  έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο CAPEX, όμως προσδίδουν μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική παράσταση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του  $C_{oVS}$ .

Το Σχήμα 9.23 αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ του παράγοντα  $C_{oFController}$  και των διαφόρων κατηγοριών κόστους CAPEX, OPEX και TCO για το μοντέλο SDN. Παρατηρείται ότι οι διάφορες τιμές του  $C_{oFController}$  έχουν μεγαλύτερη επίδραση

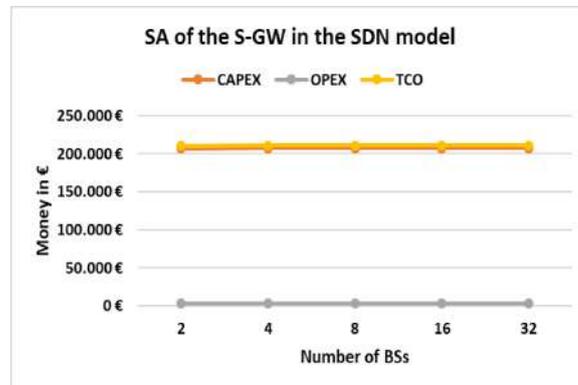


FIGURE 9.21: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με τα κόστη S-GW του μοντέλου SDN.

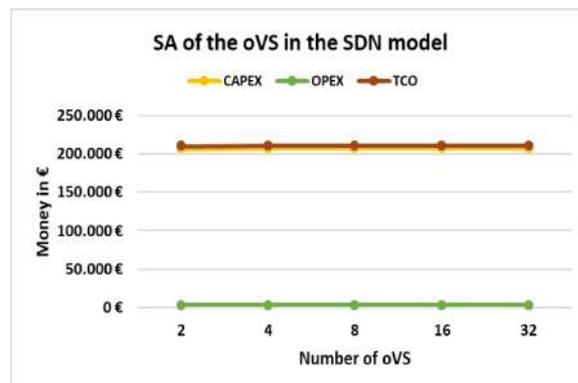


FIGURE 9.22: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με τα κόστη CoVS του μοντέλου SDN.

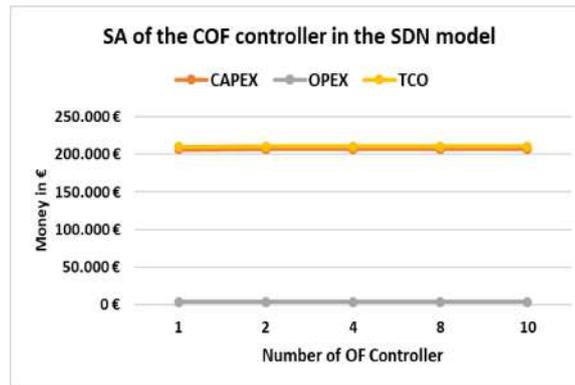


FIGURE 9.23: Μελέτη εφικτότητας των CAPEX, OPEX και TCO σε σχέση με τα κόστη COFController του μοντέλου SDN.

στο CAPEX, όμως προσδίδουν μικρή διαφοροποίηση στο κόστος και η γραφική παράσταση είναι σχεδόν σταθερή για τις διάφορες τιμές του *COFController*.

Συνολικά, τα έξοδα για τους BS επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό και τα δύο μοντέλα. Αναλυτικά, τόσο το παραδοσιακό μοντέλο όσο και το μοντέλο SDN επηρεάζονται από το κόστος BS και πιο συγκεκριμένα από τις ακόλουθες παραμέτρους κόστους: τα BS ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, τον αριθμό των υπερσταθμών, το κόστος υπερσταθμού. Από την άλλη πλευρά, ο αριθμός των BS ανά SuperBS και ο αριθμός των SuperBS δεν επηρεάζουν τα μοντέλα.

Η κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης μια άλλη σημαντική παράμετρος. Παρόλο που φαίνεται ότι το κόστος κατανάλωσης ενέργειας δεν επηρεάζει πολύ τα μοντέλα, έχει ισχυρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και επιδεινώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των τηλεπικοινωνιών. Έτσι, σήμερα που υπάρχει ένας διαρκής αγώνας για να βελτιωθεί η κατάσταση του πλανήτη και η μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων είναι απαραίτητο να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας, καθώς επιφέρει σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Η ΜΕ στο μοντέλο SDN ανέδειξε ότι το κόστος OPEX, δηλαδή το κόστος λειτουργίας και συντονισμού του συστήματος, καθώς και η καθημερινή διαχείριση και λειτουργία του δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το συνολικό μοντέλο τιμολόγησης και συνεπώς αυτό μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για τους φορείς εκμετάλλευσης και τους παρόχους, και να τους βοηθήσει να υιοθετήσουν αυτή τη λύση και να επωφεληθούν από όλα τα θεμελιώδη οφέλη, που περιγράφηκαν στην ανάλυση SWOT.

Παρόλο που το OPEX είναι χαμηλό και συμβάλλει σε μεγάλα κέρδη για τις εταιρείες, καθώς τα χαμηλότερα ποσά, που πρέπει να καταβληθούν σε αυτά τα κόστη θα δημιουργούν πλεόνασμα κάθε χρόνο, εντούτοις, είναι σημαντικό να παραμένουν χαμηλά και μειωμένα τα κόστη μίας και αποτελούν πάγιο έξοδο, επαναλαμβανόμενο και επιβαρύνουν το δίκτυο ετησίως. Το CAPEX είναι ακόμα υψηλό και ως εκ τούτου πρέπει να μειωθεί. Αποτελεί βέβαια ένα ποσό, που δίνεται εφάπαξ ως εκ τούτου είναι σημαντικό να μειωθεί για να μην αποτρέπεται νέα επένδυση από τους παρόχους. Να μη διστάζουν να προβαίνουν σε νέες επενδυτικές ενέργειες.

Πολλά δικτυακά στοιχεία, τα οποία αντιπροσωπεύονται από τις αντίστοιχες παραμέτρους κόστους, όπως: ο εξυπηρετητής συνδρομητών στο σπίτι, η οντότητα

διαχείρισης κινητής τηλεφωνίας, η S-GW, η P-GW, η oVS και η OFController συνεπιδρούν αποφασιστικά στο κόστος CAPEX και την αυξάνουν. Το γεγονός αυτό πρόκειται να αποτρέψει τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών να επενδύσουν στην SDN. Από την άλλη πλευρά, το ποσό αυτό είναι μικρό σε αντίθεση, με τα οφέλη των τεχνολογιών και τα οικονομικά κέρδη, που θα προκύψουν από τη χρήση του SDN στα μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και πιστεύεται ότι η περιστολή του κόστους θα συμβεί σύντομα λόγω του χαμηλού OPEX, που αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει.

Μελλοντικά, παρόλο που η 5η γενιά κινητών δικτύων είναι πιο κοντά από ποτέ, δεν υπάρχουν πολλές ήδη εφαρμοζόμενες τεχνολογίες, που θα μπορούσαν να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις αυτής της γενιάς από μόνες τους. Επομένως, νέες ιδέες και τεχνολογικές προτάσεις, όπως το SDN, θα λάβουν το βήμα. Πριν την ευρεία υιοθέτηση των προγραμματιζόμενων δικτύων, είναι ζωτικής σημασίας να επιλυθούν τα ζητήματα, που προκύπτουν από αυτά.

Θεωρείται ότι η μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα πρέπει να επικεντρωθεί κυρίως στους κινδύνους ασφαλείας, που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες έρευνες σχετικά με τα δίκτυα SDN. Επιπλέον, πρέπει να μειωθούν τα διάφορα κόστη και έξοδα για την τεχνολογία. Πρέπει να προταθούν νέοι αλγόριθμοι σχετικά με τον βελτιστοποιημένο αριθμό BS. Αυτές οι τεχνικές θα βοηθήσουν στην επιλογή του βέλτιστου αριθμού αυτών των οντοτήτων και συνεπώς, θα συμβάλλουν και θα ελέγχουν το κόστος, που συνδέεται με αυτά τα στοιχεία.

Αν και η κατανάλωση ενέργειας δε συμμετέχει σε τεράστιο βαθμό στο σχηματισμό του κόστους, φαίνεται ότι είναι σημαντικό να μειωθούν και αυτές οι δαπάνες. Σήμερα, η περιβαλλοντική συνείδηση έχει οδηγήσει στη διάθεση για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η παραγωγή ενέργειας είναι αναμφίβολα ένας παράγοντας, που δημιουργεί πολλούς περιβαλλοντικούς κινδύνους και αυξάνει τις εκπομπές των αερίων ρύπων. Οι αλγόριθμοι, που θα μπορούσαν να αποσυνδέουν τα εξαρτήματα και τις συσκευές θέτοντας τις σε κατάσταση «ύπνου», ενώ δεν λειτουργούν θα πρέπει να εισαχθούν και να χρησιμοποιηθούν στον εξοπλισμό SDN.

Επιπλέον, ασφαλείς και αποτελεσματικοί τρόποι υποκατάστασης του μεγαλύτερου μέρους του δικτύου με NFVs θα μειώσουν σίγουρα την κατανάλωση ενέργειας και άλλα λειτουργικά έξοδα, όπως τη συντήρηση, την προσαρμογή κλπ. Θα μπορούσαν επίσης να μειώσουν τον απαραίτητο εξοπλισμό και συνεπώς, να περιορίσουν το κόστος CAPEX και, ως εκ τούτου, τα χρήματα, που χρειάζονται να επενδύσουν στην απόκτηση της τεχνολογίας.

Καθώς η χρήση των προγραμματιζόμενων δικτύων αυξάνεται, είναι σαφές ότι θα υπάρξει πολύ περισσότερη έρευνα στον τομέα, στο μέλλον και τα πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα και οφέλη θα οδηγήσουν σε υπηρεσίες και χαρακτηριστικά δικτύου, στο μέλλον σίγουρα θα εκπλήσσουν.



## Chapter 10

# Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Η τεχνολογία **MIMO** παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και μπορεί να συντελέσει σημαντικά στην ικανοποίηση των αναγκών για τη γενιά **5G**, αφού προσφέρει: (Larsson et al., 2014)

- Αυξημένους ρυθμούς δεδομένων
- Βελτιωμένη αξιοπιστία
- Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση
- Μείωση παρεμβολής

Παρόλα αυτά, όμως, θεωρείται σημαντικό να παρέχεται βελτιστοποιημένο σχέδιο για τους σταθμούς βάσης στην τεχνολογία **MIMO**, ενώ υπάρχουν πολλά σημαντικά άλλα θέματα, που συγκεντρώνονται στην εύρεση ισορροπίας μεταξύ του κατάλληλου εύρους ζώνης, του αριθμού κβάντισης σε δυαδικά ψηφία και του πλήθους κεραιών (Senel, Björnson, and Larsson, 2017). Τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας έχουν μελετηθεί αναλυτικά (Verde et al., 2012), ενώ η απόδοση της τεχνολογίας αποτελεί σημαντικό κομμάτι για πολλές μελέτες μεταξύ των οποίων: (Lim, Chae, and Caire, 2015) και (Muharar and Evans, 2017). Σε ό,τι αναφορά στην ανάλυση κόστους, η κύρια μελέτη (Katsigiannis, Basaure, and Matinmikko, 2014) πραγματεύεται την τεχνο-οικονομική ανάλυση και σύγκριση της τεχνολογίας με τη διαμοιραζόμενη πρόσβαση δια μέσου άδειας στη χώρα της Φινλανδίας.

Με βάση την έρευνα του παρόντος κεφαλαίου έχουν προκύψει δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και έγκριτα συνέδρια: (Christos Bouras, Kokkalis, et al., 2020), (Christos Bouras, Kokkalis, et al., 2018)

### 10.1 Αρχιτεκτονική

Η τεχνολογία **MIMO** αποτελεί μία τεχνολογία, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις κεραιές. Πολλές κεραιές συνυπάρχουν στις δύο πλευρές μετάδοσης, δηλαδή στην πλευρά του δέκτη και του πομπού. Η τεχνική αυτή θέτει ως βασικό στόχο τη βελτίωση της χωρητικότητας, την αύξηση των ρυθμών δεδομένων και τη μείωση της καθυστέρησης σε ασύρματα ή κινητά δίκτυα. Κάθε πομπός/δέκτης μπορεί να αποστέλλει/λαμβάνει ταυτόχρονα περισσότερα σήματα. Αυτό το γεγονός οδηγεί

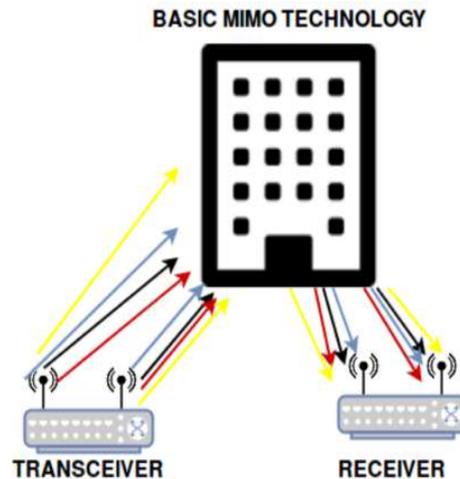


FIGURE 10.1: Το μοντέλο για την τεχνολογία MIMO.

σε καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και αποτελεί το πιο ισχυρό ίσως κίνητρο για την υιοθέτηση της τεχνολογίας αυτής.

Καθώς, παρατηρείται σχετική πρόοδος στον τομέα της 5G, η τεχνολογία MIMO γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, καθώς θεωρείται μία πιθανή λύση για την κάλυψη των αναγκών των χρηστών στο εγγύς μέλλον. Συγκεκριμένα, οι κεραιές των σταθμών βάσης θα είναι εφικτό να αποστέλλουν τα σήματα σε όλο και περισσότερες συσκευές, καθώς πιστεύεται ότι στις γενιές 5G και εξής, θα υπάρχουν περισσότερες συσκευές, που θα χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από το ίδιο άτομο, ιδίως αν αναλογιστεί κανείς την εξέλιξη του "έξυπνου σπιτιού" και του Internet of Things (IoT).

Στην τεχνολογία Massive MIMO περισσότερες κεραιές είναι απαραίτητες με σκοπό την επίτευξη της κάλυψης όλων των διασυνδεδεμένων συσκευών. Αυτές οι κεραιές θεωρείται ότι επιδρούν στην αύξηση του κόστους του σταθμού βάσης του δικτύου, κάτι που καθίσταται λογικό αν αναλογιστεί κανείς ότι η προσθήκη εξοπλισμού αυξάνει μεν τα κόστη κεφαλαίου για μία τεχνολογία, από την άλλη μεριά όμως, αυξάνει κι άλλα κόστη, όπως για παράδειγμα, κόστη συντήρησης συμπεριλαμβανομένου και της καταναλισκόμενης ενέργειας. Το Σχήμα 3.4 αντικατοπτρίζει μία MIMO αρχιτεκτονική. Πιο συγκεκριμένα, μπορούν να υπάρχουν 4, 8, 16 κεραιές και η αρχιτεκτονική καλείται MIMO, ενώ υπάρχουν λύσεις με 128, 256 κλπ. κεραιές και καλούνται Massive MIMO.

Στον Πίνακα 10.1 συνοψίζονται οι τεχνολογίες και τα μοντέλα MIMO και Massive MIMO και για το DAS απλό και για το τροποποιημένο μοντέλο. Περιλαμβάνονται συγκρίσεις για όλα τα μοντέλα σχετικά με τα βασικότερα στοιχεία ενός δικτύου. Όλες οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν υψηλά λειτουργικά κόστη, τα οποία πρέπει να ελαττωθούν σημαντικά με σκοπό να μεγιστοποιηθούν τα κέρδη των παρόχων. Σε κάποια από τα μοντέλα, όπως για παράδειγμα στο τροποποιημένο DAS τα κόστη ελαττώνονται χάρη στη χρήση τεχνικών NFV. Οι τεχνολογίες είναι επεκτάσιμες, καθώς είναι δυνατό να προστεθεί ή να αφαιρεθεί πλήθος κεραιών από την κάθε αρχιτεκτονική.

Επίσης, μπορούν και οι δύο να συνδυαστούν με άλλες βασικές τεχνολογίες, π.χ. την 802.11 και να παρέχουν πιο βελτιωμένες δομές και συστήματα. Ακόμα, μπορούν να δημιουργήσουν ετερογενείς δομές ικανές να καλύπτουν πολλές διασυνδεδεμένες συσκευές και το δίκτυο συνολικά. Τα μοντέλα έχουν υψηλή απόδοση και

TABLE 10.1: Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών για τα εξεταζόμενα μοντέλα Massive MIMO και DAS.

Παράγων	Δύση DAS	mDAS	MIMO	Massive MIMO
Κόστος	Υψηλά OPEX	Μειωμένα OPEX	Υψηλά OPEX	Υψηλά OPEX & CAPEX
Επέκταση	✓	✓	✓	✓
Υψηλή απόδοση	✓	✓	✓	✓
Υψηλή κάλυψη	✓	✓		✓
Ετερογένεια	✓	✓	✓	✓
Εύρος ζώνης	Ghz	Ghz	Ghz	Ghz
Παρεμβολές				✓
Εμφάνιση	1980's	προτεινόμενη	1970's	2010's
Υιοθέτηση	1990's	-	2000's	2020's

χωρητικότητα. Όλες λειτουργούν σε υψηλές συχνοτικές ζώνες, οι οποίες ποικίλουν από τεχνολογία σε τεχνολογία. Τα πιο υψηλά επίπεδα παρεμβολών παρατηρούνται στην τεχνολογία Massive MIMO, όπου το πλήθος κεραιών αυξάνει σημαντικά και βρίσκεται σε εξαιρετικά κοντινές αποστάσεις.

Έτσι, προκύπτουν παρεμβολές από την μία κεραιά στην άλλη, αφού, μεταδίδουν διαφορετική πληροφορία. Αν και οι υλοποιήσεις των μοντέλων για την τεχνολογία DAS ενδέχεται να περιλαμβάνουν μεγάλο πλήθος κεραιών αυτές εξαπλώνονται στο σύνολο του κτηρίου και έτσι οι παρεμβολές είναι μικρότερες.

Μία ανάλυση SWOT αποτελεί μία τεχνική, που συμβάλει στην ανάδειξη των παραγόντων, οι οποίοι προέρχονται από εσωτερικά ή εξωτερικά γεγονότα και μπορούν να συμβάλλουν ή να αποθαρρύνουν την επίτευξη ενός στόχου ή για την προώθηση ενός προϊόντος. Οι Δυνάμεις (Strengths) και οι Ευκαιρίες (Opportunities) είναι δυνατά σημεία για την υιοθέτηση μίας τεχνολογίας -στην προκειμένη περίπτωση- από εσωτερικά και εξωτερικά γεγονότα αντίστοιχα. Ακόμα, οι Αδυναμίες (Weaknesses) και οι Απειλές (Threats) είναι καταστάσεις, που δυσχεραίνουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας από εσωτερικά και εξωτερικά γεγονότα αντίστοιχα.

Στην εν λόγω περίπτωση, η ανάλυση SWOT σημειώνει τα βασικότερα ισχυρά σημεία και τις βασικότερες συνέπειες από την υιοθέτηση των τεχνολογιών. Αν και οι 2 τεχνολογίες έχουν πολλά δυνατά σημεία σχετικά με την απόδοσή τους, έχουν πολλές αδυναμίες και μειονεκτήματα, όπως παρεμβολές. Επίσης, οι πάροχοι ίσως διαφωνούν σημαντικά και δεν επιθυμούν να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες, ιδίως εφόσον οι παλαιότερες επενδύσεις δεν έχουν αποδώσει ακόμα καρπούς. Η έλευση της 5G γενιάς κινητών τηλεπικοινωνιών είναι εγγύτερα από ποτέ και οι εταιρείες επιθυμούν να αναβαθμίσουν τον εξοπλισμό τους.

helpful

harmful

internal

- 1. MIMO & DAS** περιλαμβάνουν πλεονεκτήματα και είναι ιδανικές λύσεις για ασύρματα και κινητά δίκτυα
  - Και οι **2** τεχνολογίες είναι εύκολα επεκτάσιμες
  - Είναι συμβατές μεταξύ τους, αλλά και με άλλες τεχνολογίες
  - Είναι πιθανό να συνδυαστούν με άλλες τεχνολογίες
  - Προσφέρουν μηχανισμούς, που βελτιώνουν τη διαθεσιμότητα των πόρων
- Περιλαμβάνουν υψηλά λειτουργικά κόστη (εύρος ζώνης, εξοπλισμός κλπ.)
  - Απαιτούν εξοπλισμό ή/και τροποποιήσεις για να υιοθετηθούν στις γενιές **5G** και εξής
  - Προβλήματα παρεμβολών σχετικά με το πλήθος των συμπεριλαμβανομένων κεραιών δεν έχουν πλήρως αντιμετωπιστεί
  - Δεν έχουν επιτευχθεί πράσινες/οικολογικές προσεγγίσεις
  - Οι υποδομές/αρχιτεκτονικές οδηγούν σε υψηλά κόστη υλοποίησης

<b>external</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Η έλευση της γενιάς <b>5G</b></li> <li>2. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες δεν απαντούν στις υψηλές απαιτήσεις, που σκιαγραφούνται και χρειάζεται να σημειωθεί έρευνα στον τομέα. Κάτι τέτοιο αποτελεί επίσης και μία ευκαιρία για προώθηση της επιστήμης των τηλεπικοινωνιών</li> <li>3. Νέες υπηρεσίες και προϊόντα συνδέονται με τη <b>5G</b></li> <li>4. Τα δίκτυα <b>5G</b> αναμένεται να είναι πολύ διαφορετικά από τα σημερινά δίκτυα και συνεπώς, απαιτούνται να υλοποιηθούν πολύ περίπλοκες, συνδυαστικές και ετερογενείς λύσεις για να ικανοποιηθούν τα πιο κοινά προβλήματα, που εμφανίζονται</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Είναι απαραίτητη επένδυση σε νέα προϊόντα/εξοπλισμό κλπ. από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους</li> <li>2. Υπάρχει δυσπιστία στους παρόχους για τη σχέση μεταξύ επένδυσης και κέρδους</li> <li>3. Υπάρχει δυσπιστία στους παρόχους για τη σχέση μεταξύ απόδοσης/πλεονεκτημάτων και δαπανών</li> <li>4. Οι παλαιότερες επενδύσεις για τα δίκτυα <b>LTE-A</b> δεν έχουν αποδώσει καρπούς έως σήμερα</li> </ol>
-----------------	--	---

## 10.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Η τεχνολογία **MIMO** αποτελεί μία τεχνολογία πολλά υποσχόμενη και για το λόγο αυτό βρίσκει πολλούς υποστηρικτές στην επιστημονική κοινότητα, ενώ θεωρείται μία από τις πιο σημαντικές λύσεις, που μπορούν να εφαρμοστούν για να αποδώσουν τα οφέλη, που υπόσχεται η **5G** τεχνολογία. Εντούτοις, η προσθήκη εξοπλισμού, όπως κεραιές κλπ. αυξάνει τα κόστη για την τεχνολογία αυτή. Με σκοπό την παρουσίαση των πιο σημαντικών παραγόντων, που επηρεάζουν το κόστος είναι υψίστης σημασίας να αναπτυχθεί και να αναλυθεί ένα μαθηματικό μοντέλο, που θα συνοψίζει το σύνολο όλων των επιμέρους συστατικών στοιχείων του κόστους.

Οι κεραιές **MIMO** πρέπει να ενσωματωθούν εντός ενός κόμβου σταθμού βάσης και επίσης, πρέπει να υπάρχει κι άλλος εξοπλισμός στην πλευρά των τερματικών, που να συμβάλει ενεργά στην ορθή λήψη των σημάτων. Καθίσταται συνεπώς υψίστης σημασίας τα κόστη του σταθμού βάσης να υπολογιστούν και επίσης, να περιγράφουν τον προστιθέμενο εξοπλισμό, καθώς και το κόστος κεφαλαίου, όσο και το λειτουργικό κόστος.

### 10.2.1 Κόστος κεφαλαίου

Το κόστος κεφαλαίου (CAPEX) αποτελεί την ποσότητα, που επενδύεται σε νέο εξοπλισμό και στην υποδομή. Είναι εμφανές ότι επιβαρύνει οικονομικά τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο. Ακόμα, για την τεχνολογία MIMO τέτοιο κόστος αποτελεί και η εγκατάσταση των κόμβων, καθώς και η εγκατάσταση συστατικών για το κυρίως δίκτυο.

Η μεταβλητή  $C_{eNB}$  θεωρείται το κόστος για έναν σταθμό βάσης και η  $C_{EPC}$  αποτελεί το κόστος για τις τροποποιήσεις και πιθανές εγκαταστάσεις, που απαιτείται να γίνουν σχετικά με το EPC. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή  $C_{eNB}$  περιλαμβάνει όλα τα κόστη για την απόκτηση του χώρου, την καλωδίωση στην υποδομή (είτε χαλκό είτε οπτική ίνα είτε άλλο υλικό) και τα κόστη για την υλοποίηση. Από την άλλη, η μεταβλητή  $C_{EPC}$  περιλαμβάνει το κόστος για το κυρίως δίκτυο, π.χ. για δίκτυα LTE-A αποτελεί το κόστος για έναν σταθμό βάσης και συνολικά, θα δίνεται από τη σχέση:  $C_{eNB} + C_{EPC}$ .

Αν όμως υπάρχουν συνολικά στο δίκτυο  $B$  σταθμοί βάσης, τότε το κόστος για τους σταθμούς βάσης θα ισούται με:  $B(C_{eNB} + C_{EPC})$ . Καθώς, η τεχνολογία MIMO θα ενσωματώνεται στα κινητά δίκτυα, πολλές κεραιές θα προστίθενται και στις δύο πλευρές στην πηγή και στον προορισμό. Συνεπώς, είναι ουσιώδες το κόστος των προστιθέμενων κεραιών και στις δύο πλευρές να υπολογίζεται. Η τεχνολογία MIMO προσφέρει τη δυνατότητα να υπάρχει διαφορετικό πλήθος κεραιών σε κάθε πλευρά. Άρα,  $M_s$  και  $M_d$  αποτελούν το πλήθος κεραιών στην πλευρά της πηγής (source) και στην πλευρά του δέκτη (destination) αντίστοιχα. Έτσι, το άθροισμα  $M_s + M_d$  αποτελεί το συνολικό πλήθος των υπαρχουσών κεραιών ανά θεμέλιο λίθο του δικτύου.

Το συνολικό κόστος για τη MIMO θα είναι:  $B(C_{eNB} + C_{EPC})(M_s + M_d)$  και εφόσον το κόστος κεφαλαίου είναι μία ποσότητα, που υπακούει στην εξίσωση (4.1), αφού αποτελεί επένδυση, το συνολικό κόστος κεφαλαίου για την τεχνολογία MIMO είναι αποτέλεσμα της ακόλουθης εξίσωσης:

$$C_{MIMO}^{CX} = B(C_{eNB} + C_{EPC})(M_s + M_d) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (10.1)$$

όπου  $C_{MIMO}^{CX}$  αποτελεί το συνολικό κόστος κεφαλαίου και  $n$  αποτελεί το πλήθος ετών για το πλάνο επενδύσεων στην τεχνολογία.

### 10.2.2 Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει το κόστος για τη λειτουργία του δικτύου μέρα με τη μέρα, καθώς και τις δραστηριότητες για τη συντήρηση. Αν χρειάζεται ενοικίαση χώρου για την υποδομή του δικτύου ένα τέτοιο κόστος θα συμπεριληφθεί σε αυτού του είδους τη δαπάνη. Από την άλλη μεριά, το κόστος για την ενέργεια, την υποστήριξη και τη συντήρηση, που αναπαρίστανται από τη μεταβλητή  $c_{run}$  είναι μία λειτουργική δαπάνη. Επίσης, υπάρχει κόστος, για την καλωδίωση και μπορεί να συμβολιστεί ως  $c_{bh}$ . Συνεπώς, αν υπάρχουν  $B$  σταθμοί βάσης, τότε το συνολικό κόστος για αυτούς θα δίνεται από τη σχέση:  $B(c_{run} + c_{bh})$ . Επιπλέον, επειδή υπάρχουν και τα συστατικά στοιχεία για την τεχνολογία MIMO, δηλαδή οι κεραιές, τότε το κόστος θα πρέπει να ισούται με:  $B(c_{run} + c_{bh})(M_s + M_d)$ .

Η λειτουργία, η θέση και διάφορα κόσθη υποστήριξης είναι δυνατό να συμπεριληφθούν στη μεταβλητή  $c_{st}$ . Με στόχο να συμπεριληφθούν κόσθη για όλους τους σταθμούς βάσης, η ποσότητα  $Bc_{st}$  θα αποτελεί το συνολικό κόστος για  $B$  σταθμούς βάσης. Ακόμα, η διάθεση της χρήσης του απαραίτητου εύρους ζώνης δίνεται από την παράμετρο  $BW$  πολλαπλασιασμένη με μία μεταβλητή  $f_{BW}$ , που υποδηλώνει το κόστος για το εύρος ζώνης, που χρειάζεται και την απαραίτητη καλωδίωση.

Συνοψίζοντας το συνολικό λειτουργικό κόστος  $C_{MIMO}^{OX}$ , ισούται με:

$$C_{MIMO}^{OX} = (M_s + M_d)[B(c_{run} + c_{bh})(C_{eNB} + C_{EPC}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + Bc_{st} + f_{BW}BW]$$

### 10.2.3 Συνολικό κόστος

Το συνολικό κόστος για μία τεχνολογία δίνεται από το άθροισμα των επιμέρους συστατικών κόστους, δηλαδή από το λειτουργικό κόστος και από το κόστος κεφαλαίου. Κατά συνέπεια, το συνολικό κόστος  $c_{MIMO}^{TCO}$  είναι:

$$c_{MIMO}^{TCO} = B(C_{eNB} + C_{EPC})(M_s + M_d) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + (M_s + M_d)[B(c_{run} + c_{bh})(C_{eNB} + C_{EPC}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + Bc_{st} + f_{BW}BW]$$

όπου  $i$  είναι το αντίστοιχο επιτόκιο και  $n$  αποτελεί τη διάρκεια του επενδυτικού πλάνου μετρημένου σε έτη.

## 10.3 Παράμετροι

Το μαθηματικό μοντέλο είναι σημαντικό και με την ενσωμάτωση των κατάλληλων παραμέτρων συμβάλει ενεργά στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την τεχνολογία MIMO. Οι διάφορες παράμετροι έχουν εξαχθεί για την ελληνική αγορά με χρήση μελετών (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015). Η ανάλυση του μοντέλου με τεχνο-οικονομικές παραμέτρους αναμένεται να αναδείξει ποια είναι τα βασικά προβλήματα, που σχετίζονται με το κόστος και συνεπώς, είναι δυνατό να ενθαρρύνουν/αποθαρρύνουν τους παρόχους να επενδύσουν στη δεδομένη τεχνολογική πρόταση.

Η γενιά 5G αποτελεί μία μελλοντική γενιά, συνεπώς, είναι πιθανό να αυξηθούν ή να ελαττωθούν τα κόσθη στο μέλλον. Με σκοπό να διεξαχθούν τα πειράματα πρέπει να επιλεγούν οι μεταβλητές κόστους. Επιπλέον, είναι σημαντικό να εξεταστεί πώς κάθε παράμετρος και κατά συνέπεια, κάθε συστατικό του δικτύου επιδρά στο συνολικό κόστος. Με σκοπό να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, όλες οι παράμετροι κυμαίνονται μέσα σε ένα διάστημα τιμών από +/-50% σε σχέση με τη σημερινή τιμή. Από τη μία μεριά, είναι πιθανό ότι μέσα στα επόμενα χρόνια, οι τιμές θα αυξηθούν, αλλά από την άλλη πλευρά η ενσωμάτωση καινοτομιών στις γνωστές τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα τεχνικές NFV ή SDN αναμένεται να μειώσουν σημαντικά το κόστος

TABLE 10.2: Τεχνολογία MIMO: Παράμετροι κόστους και μεταβλητές συστήματος.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο τιμών για τη ΜΕ
$C_{eNB}$	Κόστος κεφαλαίου για έναν σταθμό βάσης	1000 €	[500, 1500]
$C_{EPC}$	Κόστος υλοποίησης για έναν σταθμό βάσης	110 €	[55, 165]
$B$	Πλήθος σταθμών βάσης	1	[1, 100]
$n$	Διάρκεια πλάνου επενδύσεων σε έτη	10 yrs	[5, 20]
$r$	Περιοδικό επιτόκιο	6%	[2, 10]
$c_{st}$	Κόστη θέσης και άλλα λειτουργικά κόστη, π.χ. υποστήριξη και ενεργειακή κατανάλωση	3100 €	[1150, 4650]
$C_{run}$	Κόστη λειτουργίας	892.50 €	[446.25, 1338.75]
$C_{bh}$	Κόστη καλωδίωσης για οπτική ίνα	4800 €	[2400, 7200]
$BW$	Καλωδίωση για το εύρος ζώνης	10 Gbps	[5, 15]
$f_{BW}$	Γραμμική παράμετρος συσχέτισης της καλωδίωσης με το εύρος ζώνης και τα κόστη του δικτύου €/Gbps	1170	[585, 1755]
$M_s$	Πλήθος κεραιών στον πομπό	64	[2, 4, 8, 16, 64, 128, 256, 512]
$M_d$	Πλήθος κεραιών στο δέκτη	4	[2, 4, 8, 16, 64, 128, 256, 512]

του μοντέλου και να επιφέρουν κι άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα. Μελέτες έχουν δείξει πως εφαρμόζοντας τεχνικές **virtualization** σε διάφορα συστατικά στοιχεία του δικτύου είναι δυνατό να επιτευχθεί μείωση του κόστους για τις παραμέτρους αυτές σε ποσοστό 20-80%.

Ο Πίνακας 10.2 περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους κόστους, που επιλέγονται για τα σενάρια των τεχνολογιών MIMO και Massive MIMO (C. Bouras, V. Kokkinos, et al., 2015).

## 10.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Τα πειράματα αναμένεται να συμβάλουν στην ανάλυση των τεχνολογικών προσεγγίσεων, καθώς και να εμφανιστεί ποια είναι τα κύρια προβλήματα, που υπάρχουν και ενδεχομένως, να αποτρέψουν την ευρεία υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Αρχικά, η εν λόγω τεχνολογία αποτελεί μία τεχνολογία με κεραιές και συνεπώς, θεωρήθηκε ως πιο δόκιμο να συγκριθεί με την τεχνολογία DAS, η οποία επίσης αποτελεί μία τεχνολογία με κεραιές. Στο βασικό τους πρότυπο και οι δύο τεχνολογίες περιλαμβάνουν ένα σημαντικό αριθμό κεραιών. Συνεπώς, επιλέχθηκε να δημιουργηθούν γραφικές παραστάσεις για τις δύο τεχνολογίες σχετικά με το

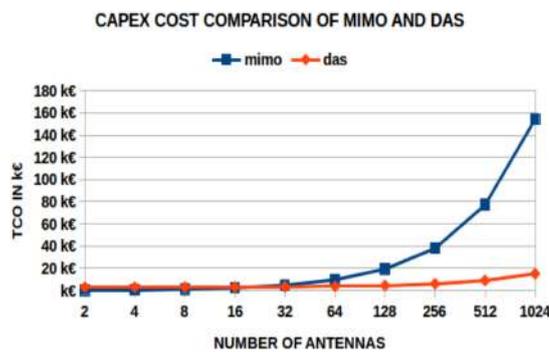


FIGURE 10.2: Η σύγκριση των κεφαλαιουχικών δαπανών της MIMO και της DAS.

πλήθος κεραιών, που μπορεί να αποτελέσει έναν κοινό παρονομαστή για να συγκριθούν τα κόστη κεφαλαίου, τα λειτουργικά και τα συνολικά κόστη των δύο τεχνολογιών.

Το Σχήμα 10.2 αντικατοπτρίζει τη σύγκριση του κόστους κεφαλαίου για τα δύο μοντέλα. Είναι εμφανές ότι για τις περιπτώσεις MIMO, δηλαδή εκεί όπου το πλήθος κεραιών  $\leq 64$ , το κόστος κεφαλαίου δε διαφοροποιείται σημαντικά σχετικά με το κόστος κεφαλαίου DAS. Φαίνεται πως και τα δύο αποτελούν συμφέρουσες λύσεις και διατηρούν τα κόστη τους σε χαμηλό επίπεδο. Από την άλλη μεριά, το κόστος κεφαλαίου για την τεχνολογία Massive MIMO, δηλαδή όταν το πλήθος των κεραιών είναι  $\geq 64$ , αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Το κόστος κεφαλαίου για το DAS αυξάνει με πολύ χαμηλότερο ρυθμό μέχρι τις 1000 κεραιές, ενώ μετά αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό. Εντούτοις, πάντοτε παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα κόστους συγκριτικά με την άλλη τεχνολογία.

Το Σχήμα 10.3 αναπαριστά τη σύγκριση ανάμεσα στα λειτουργικά κόστη των δύο μοντέλων. Είναι εμφανές ότι για τις περιπτώσεις MIMO, δηλαδή εκεί όπου το πλήθος κεραιών  $\leq 64$ , το λειτουργικό κόστος δε διαφοροποιείται σημαντικά σχετικά με το κόστος του DAS. Φαίνεται πως και τα δύο αποτελούν συμφέρουσες λύσεις και διατηρούν τα κόστη τους σε χαμηλό επίπεδο. Από την άλλη μεριά, το λειτουργικό κόστος για την τεχνολογία Massive MIMO, δηλαδή όταν το πλήθος των κεραιών είναι  $\geq 64$ , αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Το λειτουργικό κόστος για το DAS μένει σταθερό με την αύξηση του πλήθους των κεραιών.

Το Σχήμα 10.4 αντικατοπτρίζει τη σύγκριση του συνολικού κόστους των δύο μοντέλων. Είναι εμφανές ότι για τις περιπτώσεις MIMO, δηλαδή εκεί όπου το πλήθος κεραιών  $\leq 64$ , το συνολικό κόστος δε διαφοροποιείται σημαντικά σχετικά με το κόστος του DAS. Φαίνεται πως και τα δύο αποτελούν συμφέρουσες λύσεις και διατηρούν τα κόστη τους σε χαμηλό επίπεδο. Από την άλλη μεριά, το συνολικό κόστος για την τεχνολογία Massive MIMO, δηλαδή όταν το πλήθος των κεραιών είναι  $\geq 64$ , αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Το συνολικό κόστος για το DAS αυξάνει με πολύ χαμηλότερο ρυθμό μέχρι τις 1000 κεραιές, ενώ μετά αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό. Εντούτοις, πάντοτε παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα κόστους συγκριτικά με την άλλη τεχνολογία.

Κατά συνέπεια, και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν ένα όριο, πάνω από το

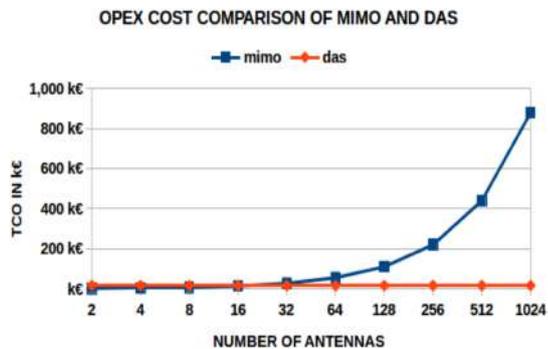


FIGURE 10.3: Η σύγκριση των λειτουργικών δαπανών της MIMO και της DAS.

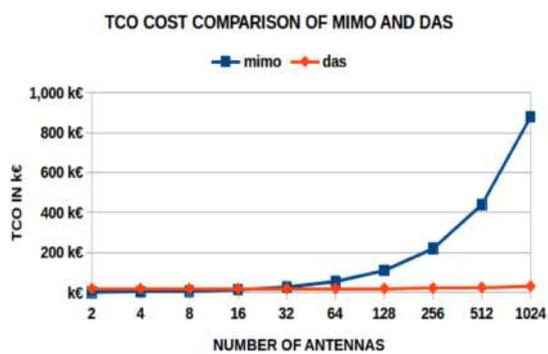


FIGURE 10.4: Η σύγκριση του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας της MIMO και της DAS.

οποίο, το κόστος αρχίζει να αυξάνεται σημαντικά και αυτό είναι στις 64 κεραιές για τη MIMO και στις 100 κεραιές για τη DAS. Επιπλέον, το μοντέλο DAS φαίνεται να είναι πιο οικονομικό ιδίως για μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές, ενώ για εφαρμογές πολύ μικρής κλίμακας, δηλαδή π.χ. 2 ή 4 κεραιών τότε το MIMO φαίνεται να διατηρεί συγκριτικό πλεονέκτημα κόστους.

Καθίσταται συνεπώς, επιτακτική ανάγκη η επιστημονική έρευνα να βασιστεί σε καινοτομίες, που θα μπορούσαν να μειώσουν τα κόστη αισθητά σε κάθε μία τεχνολογία, αλλά και στα επί μέρους συστατικά τους, όπως για παράδειγμα το κόστος των κεραιών, τα κόστη των σταθμών βάσης, τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη για το εύρος ζώνης.

Είναι απαραίτητο να διεξαχθεί ΜΕ για το μοντέλο MIMO, που αναπτύχθηκε και να αναδειχθεί ποιες μεταβλητές και ποια συστατικά του δικτύου κατέχουν το μεγαλύτερο κόστος και έχουν κατά συνέπεια, σημαντική επίδραση στη βιωσιμότητα του δικτύου και την υιοθέτησή του. Αυτή η μελέτη θα αναδείξει πώς επιδρούν στο κόστος κεφαλαίου, το λειτουργικό και το συνολικό κόστος οι διάφορες μεταβλητές. Για τις μεταβλητές  $B$ ,  $n$ ,  $r$ ,  $C_{st}$ ,  $C_{run}$ ,  $C_{bh}$  θεωρείται ότι έχουν μοναδική επίδραση πάνω στο μοντέλο και δε σχετίζονται άμεσα με κάποια άλλη παράμετρο. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί ΜΕ μίας μεταβλητής. Από την άλλη, τα ζεύγη των παραμέτρων  $M_s$  &  $M_d$ ,  $C_{eNB}$  &  $C_{EPC}$  και  $BW$  &  $f_{BW}$  συσχετίζονται άμεσα ως παράμετροι, αφού αντικατοπτρίζουν το ίδιο κόστος, με αποτέλεσμα, να συνδυαστούν και να αναλυθούν με ΜΕ δύο μεταβλητών.

#### 10.4.1 Μελέτη Εφικτότητας για το MIMO με μία μεταβλητή

Το Σχήμα 10.5 δείχνει ότι το πλήθος των σταθμών βάσης αποτελεί σημαντικό κριτήριο, καθώς αυξάνει σημαντικά το λειτουργικό και το συνολικό κόστος του μοντέλου. Όλα τα επί μέρους κόστη (κεφαλαίου, λειτουργικό, συνολικό) είναι ανάλογα με το πλήθος των προστιθέμενων κεραιών, όμως, το κόστος κεφαλαίου αυξάνει με χαμηλότερο ρυθμό. Το κόστος κεφαλαίου και το συνολικό κόστος αυξάνονται ανάλογα με το πλήθος των προστιθέμενων κεραιών, όμως, με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό και το κόστος του μοντέλου επηρεάζεται από αυτά τα κόστη πολύ περισσότερο. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι η αύξηση των σταθμών βάσης δεν επηρεάζει σημαντικά το κόστος του εξοπλισμού, όσο επηρεάζει το κόστος λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι να μειωθούν σημαντικά τα κόστη της λειτουργίας, όπως π.χ. το κόστος της ενέργειας, του εύρους ζώνης, καθώς και να αναπτύσσονται μελέτες, που να βρίσκουν το βέλτιστο πλήθος σταθμών βάσης για ένα δίκτυο.

Το Σχήμα 10.6 δείχνει ότι τα έτη του επενδυτικού σχεδίου επηρεάζουν σημαντικά το κόστος, καθώς η αύξηση των ετών της επένδυσης μειώνει αισθητά τα κόστη του μοντέλου. Όλα τα επί μέρους κόστη (κεφαλαίου, λειτουργικό, συνολικό) είναι αντιστρόφως ανάλογα με το πλήθος των ετών του πλάνου, όμως, το κόστος κεφαλαίου αυξάνει με χαμηλότερο ρυθμό. Το κόστος λειτουργίας και το συνολικό κόστος μειώνονται ανάλογα με την αύξηση του πλήθους των ετών, όμως, με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό και το κόστος του μοντέλου επηρεάζεται από αυτά τα κόστη πολύ περισσότερο. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι να αυξηθεί το πλάνο επενδύσεων για μία τεχνολογία. Κάτι τέτοιο καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο, καθώς οι μέχρι τώρα τηλεπικοινωνίες έχουν αποδείξει ότι η διάρκεια ζωής

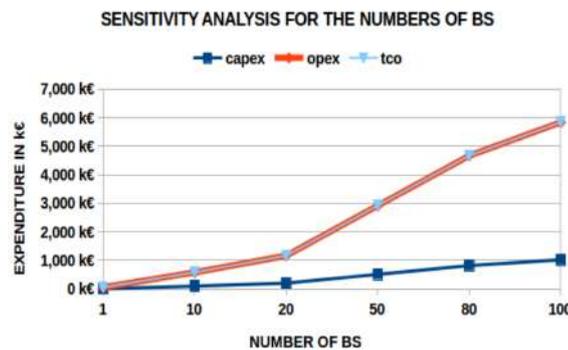


FIGURE 10.5: Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το πλήθος των σταθμών βάσης της τεχνολογίας MIMO.

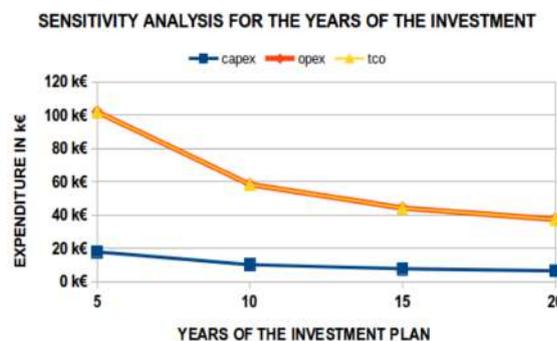


FIGURE 10.6: Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το σχέδιο επένδυσης της τεχνολογίας MIMO.

κάθε γενιάς είναι δέκα χρόνια, το πελατολόγιο αυξάνει σημαντικά τις επιδιώξεις του και τις δεδομένες ανάγκες, που απαιτούνται για κάθε γενιά. Άρα, είναι πιθανό κάποια τεχνολογία να γίνεται παρωχημένη με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, πρέπει να βρεθούν τρόποι να γίνονται όσο το δυνατό λιγότερες τροποποιήσεις στις υπάρχουσες τεχνολογίες και επίσης, να μελετάται εκτενώς το πως πρόκειται να παραμείνουν αποδοτικές στο πέρασμα του χρόνου.

Το Σχήμα 10.7 δείχνει ότι το επιτόκιο δανεισμού αποτελεί σημαντικό κριτήριο, καθώς αυξάνει σημαντικά τα κόστη του μοντέλου. Όλα τα επί μέρους κόστη (κεφαλαίου, λειτουργικό, συνολικό) είναι ανάλογα με την αύξηση του επιτοκίου, όμως, το κόστος κεφαλαίου αυξάνει με χαμηλότερο ρυθμό. Το κόστος κεφαλαίου και το συνολικό κόστος αυξάνουν ανάλογα με την αύξηση του επιτοκίου, όμως, με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό και το κόστος του μοντέλου επηρεάζεται από αυτά τα κόστη πολύ περισσότερο. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι η αύξηση του επιτοκίου δεν επηρεάζει σημαντικά το κόστος του εξοπλισμού, όσο επηρεάζει το κόστος λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι να μειωθούν σημαντικά τα κόστη της λειτουργίας, όπως π.χ. το κόστος της ενέργειας, του εύρους ζώνης, καθώς και να αναπτύσσονται σχετικές μελέτες. Ακόμα, παρατηρείται ότι όλα τα κόστη ανεξαιρέτως ουσιαστικά επηρεάζονται και από την κατάσταση της αγοράς κατά την περίοδο της επένδυσης, παράγων που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

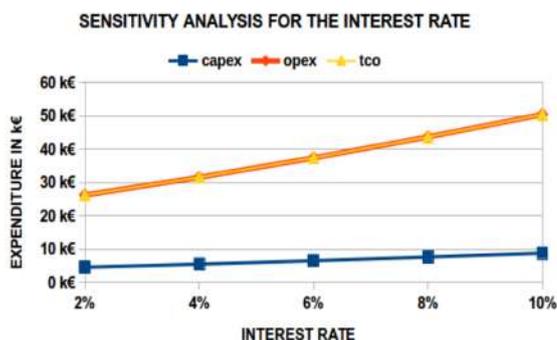


FIGURE 10.7: Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το επιτόκιο της τεχνολογίας MIMO.

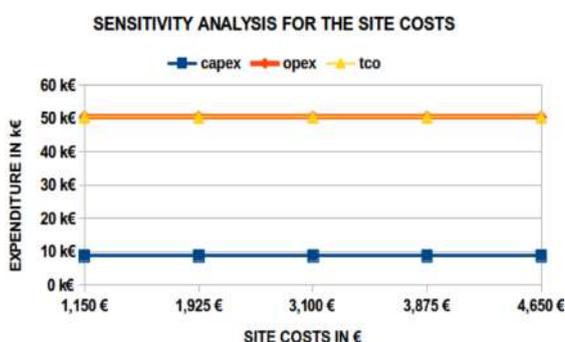


FIGURE 10.8: Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με το κόστος θέσης της τεχνολογίας MIMO.

Το Σχήμα 10.8 δείχνει ότι το κόστος της θέσης επηρεάζει κυρίως το λειτουργικό και το συνολικό κόστος. Αυτά τα κόστη ανέρχονται σε υψηλότερα επίπεδα. Εντούτοις, οι διαφορετικές τιμές του συνόλου τιμών, δεν επηρεάζουν σημαντικά το κόστος, αλλά το διατηρούν σχεδόν σταθερό, και άρα, φαίνεται ότι δεδομένη αύξηση ή μείωση της παραμέτρου δε θα επηρεάσει σημαντικά το μοντέλο.

Το Σχήμα 10.9 δείχνει ότι τα κόστη λειτουργίας επηρεάζουν σημαντικά το κόστος, καθώς η αύξηση τους αυξάνει αισθητά τα κόστη του μοντέλου. Τα επί μέρους κόστη (λειτουργικό, συνολικό) είναι ανάλογα του κόστους λειτουργίας. Το κόστος κεφαλαίου δεν επηρεάζεται καθόλου, κάτι πολύ φυσικό, αφού αποτελεί μία διαφορετική κατηγορία κόστους. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι να μειωθούν σημαντικά τα κόστη λειτουργίας, όπως για παράδειγμα να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωση με εφαρμογή διαφόρων καινοτόμων μεθόδων.

Το Σχήμα 10.10 δείχνει ότι τα κόστη καλωδίωσης επηρεάζουν σημαντικά το κόστος, καθώς η αύξηση τους αυξάνει αισθητά τα κόστη του μοντέλου. Τα επί μέρους κόστη (λειτουργικό, συνολικό) είναι ανάλογα του κόστους καλωδίωσης. Το κόστος κεφαλαίου δεν επηρεάζεται καθόλου, κάτι πολύ φυσικό αφού αποτελεί μία διαφορετική κατηγορία κόστους. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι να μειωθούν σημαντικά τα κόστη καλωδίωσης για τη διασύνδεση των διαφόρων στοιχείων όχι όμως σε βάρος της ποιότητας και της συνδεσιμότητας του

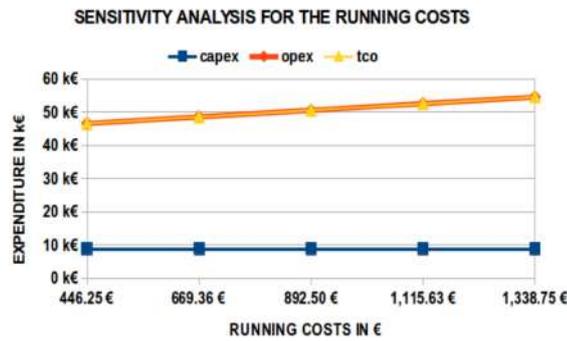


FIGURE 10.9: Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με τα λειτουργικά έξοδα της τεχνολογίας MIMO.

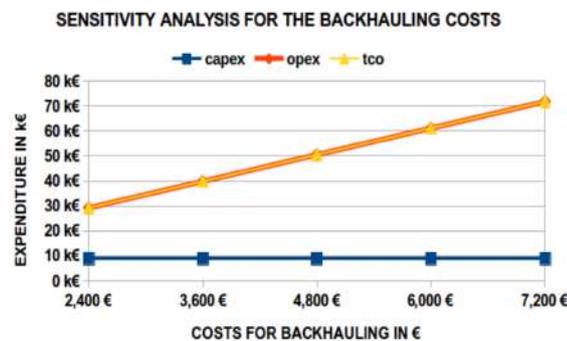


FIGURE 10.10: Μελέτη εφικτότητας μίας μεταβλητής σχετικά με τα κόστη καλωδίωσης της τεχνολογίας MIMO.

μοντέλου.

Συνολικά, διαφαίνεται ότι οι παράμετροι επηρεάζουν είτε το κόστος κεφαλαίου είτε το λειτουργικό κόστος, εντούτοις, όλες οι παράμετροι επηρεάζουν το συνολικό κόστος. Σύμφωνα με το μοντέλο, η επίδραση των δαπανών λειτουργίας είναι πολύ πιο σημαντική, αφού φαίνεται να δημιουργεί υψηλότερο κόστος και περισσότερες δαπάνες πρέπει να καλύπτονται σε αυτή την περίπτωση. Συνεπώς, η επιστημονική έρευνα είναι δυνατό να επικεντρωθεί σε μεθόδους για τη μείωση των δαπανών λειτουργίας, όπως για παράδειγμα η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, η χρήση οικονομικότερων και αποδοτικών τεχνολογιών και η βελτιστοποίηση του πλήθους των θεμέλιων λίθων της τεχνολογίας.

#### 10.4.2 Μελέτη Εφικτότητας για το MIMO με δύο μεταβλητές

Το Σχήμα 10.11 δείχνει πως δύο παράμετροι του πλήθους κεραιών επιδρούν στο συνολικό κόστος. Φαίνεται ότι σε μοντέλα, που το πλήθος των κεραιών είναι  $\geq 64$ , το συνολικό κόστος αυξάνεται σημαντικά και ίσως είναι ανεπαρκές. Λύσεις, που έχουν διαφορετικό αριθμό κεραιών σε κάθε πλευρά, με τη μία πλευρά να περιλαμβάνει μικρό πλήθος κεραιών και την άλλη μεγαλύτερο να κερδίζουν σημαντικό έδαφος, καθώς φαίνονται αποδοτικές και ίσως, επιλύουν προβλήματα κάλυψης και χωρητικότητας. Άλλη ερώτηση, που εγείρεται είναι: Υπάρχουν τρόποι να μειωθεί

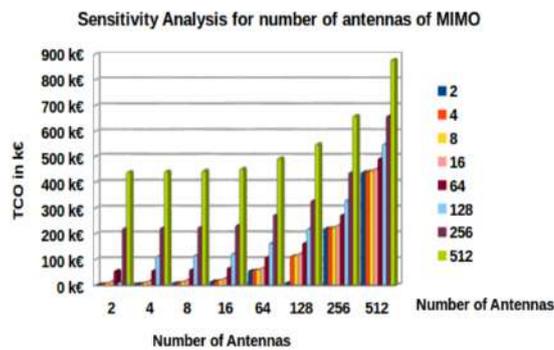


FIGURE 10.11: Μελέτη εφικτότητας δύο μεταβλητών σχετικά με τα κόστη κεραιών της τεχνολογίας MIMO.

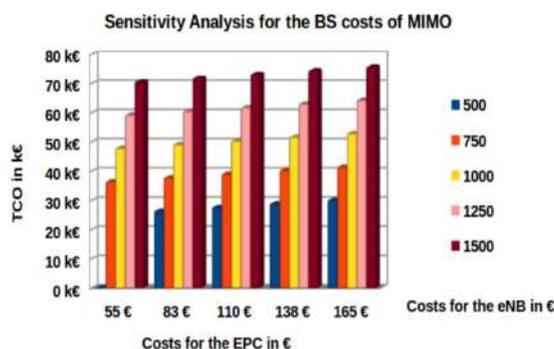


FIGURE 10.12: Μελέτη εφικτότητας δύο μεταβλητών σχετικά με τα κόστη σταθμών βάσης της τεχνολογίας MIMO.

το κόστος για τις κεραιές; Ή μήπως υπάρχουν πιο αποδοτικές δομές σχετικά με τη βασική ιδέα του MIMO, όπως για παράδειγμα με τη βελτιστοποίηση του πλήθους κεραιών σε κάθε πλευρά; Συνεπώς, φαίνεται σαν ύψιστη ανάγκη ότι η μελλοντική έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί προς αυτή την κατεύθυνση.

Το Σχήμα 10.12 δείχνει ότι η μείωση των δαπανών για τους σταθμούς βάσης ωθεί σε μείωση του συνολικού κόστους. Κατά συνέπεια, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να βρεθούν τρόποι να προστεθούν καινοτόμες τεχνολογίες ή μέθοδοι virtualization στις τεχνολογίες των σταθμών βάσης, οι οποίες θα συμβάλουν ενεργά στη μείωση αυτών των δαπανών και θα μειώσουν και το συνολικό κόστος για το μοντέλο.

Το Σχήμα 10.13 δείχνει ότι η μείωση των δαπανών για το εύρος ζώνης ωθεί σε μείωση του συνολικού κόστους. Κατά συνέπεια, γίνεται αντιληπτό ότι πρέπει να βρεθούν τρόποι να προστεθούν καινοτόμες τεχνολογίες ή μέθοδοι virtualization στις τεχνολογίες, οι οποίες θα συμβάλουν ενεργά στην αποδοτικότερη διαχείριση του διαθέσιμου εύρους ζώνης και των διαθέσιμων πόρων και συνεπώς, θα επιτύχουν μείωση αυτών των δαπανών και θα μειώσουν και το συνολικό κόστος για το μοντέλο.

Η μελέτη αυτών των ζευγών παραμέτρων καταδεικνύει ότι ταυτόχρονη αύξηση και στους δύο παράγοντες θα εκτοξεύσει το κόστος και θα οδηγήσει σε μη

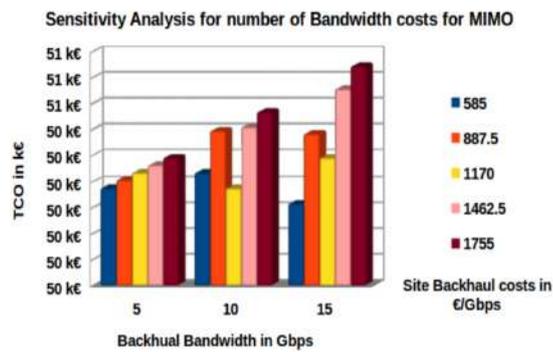


FIGURE 10.13: Μελέτη εφικτότητας δύο μεταβλητών σχετικά με τα κόστη εύρους ζώνης της τεχνολογίας MIMO.

αποδεκτά υψηλές δαπάνες για τις επιχειρήσεις στον τομέα, καθιστώντας αποτρεπτικό να επενδύσει κανείς στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Σημαντικά μέτρα και επιστημονικές μελέτες πρέπει να εστιάσουν στον τομέα και να αναδείξουν νέους τρόπους, ώστε να μειωθούν τα κόστη για την τεχνολογία.

## Chapter 11

# Cognitive Radio (CR)

Η τεχνολογία CR αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία αναμένεται να πρωταγωνιστήσει στα 5G δίκτυα. Για την τεχνολογία αυτή δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικές μαθηματικές αναλύσεις μία με βάση το πρότυπο SDN και μία με βάση το Stackelberg game. Σύμφωνα με τα πρότυπα η CR συνιστά μία ενδιαφέρουσα τεχνολογία, η οποία συγκεντρώνει πολλά οφέλη. Με βάση την έρευνα του παρόντος κεφαλαίου έχουν προκύψει δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και έγχριτα συνέδρια: (C. Bouras, A. Kollia, and Maligianni, 2019)

### 11.1 Cognitive Radio-SDN

Ένας τρόπος για την ενίσχυση της εκμετάλλευσης του δικτύου είναι η τεχνολογία CR, η οποία ουσιαστικά συνιστά ένα είδος εφαρμογής. Είναι δομημένη στην κορυφή του RAN και επιτρέπει την έξυπνη διαμόρφωση του ραδιοσυστήματος, έτσι ώστε να προσαρμόζεται στη στιγμιαία κατάσταση του φάσματος και των απαιτήσεων του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο (Fomin and Medeisis, 2015). Οι τεχνολογίες πρόσβασης στο ραδιοφάσμα θα μπορούσαν να είναι ευκαιριακές ή και δυναμικές (Liang et al., 2011).

Το ραδιοφάσμα είναι ο πιο πολύτιμος πόρος στις ασύρματες επικοινωνίες (Preet, Kaur, and Sahib, 2014). Υπάρχουν διάφοροι τύποι κοινής χρήσης του φάσματος και ταξινόμησης CR, όπως (πλήρης CR, με άδεια ζώνης CR, μη εξουσιοδοτημένη ζώνη CR), καθώς και αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης φάσματος (ανιχνευτής ενέργειας, ανίχνευση με βάση κυματομορφή, κυκλοστασιαρχία, ταιριασμένες τεχνικές φιλτραρίσματος κ.α.). Η CR μπορεί επίσης να συνδυαστεί με ετερογενή δίκτυα (macro-cells, femtocells) (Xie et al., 2012). Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχουν τόσο πρωτογενή όσο και δευτερεύοντα δίκτυα και γνωστικοί Σταθμοί Βάσης (BS). Το συνεταιριστικό φάσμα, που ανιχνεύει τους κόμβους CR, που λειτουργούν με την ίδια συχνότητα βελτιώνει την πιθανότητα ανίχνευσης και την αποτελεσματικότητα του συστήματος (Numan et al., 2016). Τα κέρδη του CR σε επιχειρηματικές εφαρμογές και εφαρμογές πραγματικού χρόνου εξετάζονται επίσης (Barrie et al., 2011), (Medeisis and Delaere, 2011). Παρόλο που υπάρχουν άλλες τεχνικοοικονομικές μελέτες για το 5G (π.χ. (Smail and Weijia, 2017)), δεν υπάρχουν πολλά σχετικά με την CR.

### 11.1.1 Αρχιτεκτονική

Η τεχνολογία **Cognitive Radio** είναι μία τεχνολογία, που στοχεύει στο να πραγματοποιήσει έξυπνη κατανομή του ραδιοφάσματος. Αυτή η τεχνολογία είναι ικανή να αλληλοεπιδρά με το χρήστη με έναν έξυπνο τρόπο, να αλληλοεπιδρά με αισθητήρες και το δίκτυο και να έχει δυνατότητες διαμοιρασμού του φάσματος. Η τεχνολογία αλληλοεπιδρά κυρίως στα επίπεδα Εφαρμογών, Δικτύων και Διασύνδεσης δεδομένων του μοντέλου **ISO/OSI**. Το κυριότερο πρόβλημα είναι η διαχείριση των πόρων, καθώς το ραδιο-φάσμα είναι μία κατανεμημένη πηγή, που σημαίνει ότι αν ένα συγκεκριμένο δικτυακό αντικείμενο/τερματικό κλπ. μονοπωλεί το φάσμα, τα άλλα συνδεδεμένα αντικείμενα δε θα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτό. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται μία εξέχουσα ανάγκη να εξασφαλίζεται ένας ισορροπημένος τρόπος για να πραγματοποιείται η διαχείριση των πόρων.

Σε αυτά τα δίκτυα υπάρχουν διάφορες λειτουργικότητες, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι οι:

- Ανίχνευση φάσματος
- Διαχείριση φάσματος
- Κινητικότητα φάσματος
- Κοινή χρήση ραδιοφάσματος

Όλες αυτές οι δυνατότητες καθιστούν την τεχνολογία **CR** μία υποσχόμενη λύση για τα δίκτυα **5G** και ως συνέπεια, είναι μία βασική τεχνολογία για τα μελλοντικά δίκτυα, που θα διαθέτουν πολύ διαφορετικές και ιδιαίτερες ανάγκες σε σχέση με τα σημερινά δίκτυα.

Η τεχνολογία περιλαμβάνει ένα πρωτεύων και ένα δευτερεύων δίκτυο. Στο πρωτεύων δίκτυο υπάρχουν πρωτεύοντες χρήστες ή πρωτεύοντες σταθμοί βάσης. Επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται αδειοδοτούμενες φασματικές ζώνες, που να είναι σε θέση να χρησιμοποιούν το φάσμα. Ο πρωτεύων σταθμός βάσης διαχειρίζεται τη χρήση του δικτύου και των πόρων. Οι πρωτεύοντες χρήστες επικοινωνούν με άλλους χρήστες, κυρίως δια της αλληλεπίδρασης με το πρωτεύων δίκτυο. Το πρωτεύων δίκτυο και οι χρήστες σε αυτό δεν έχουν γνωσιακές δυνατότητες. Το δευτερεύων δίκτυο περιλαμβάνει δευτερεύοντες χρήστες και κάποιες φορές σταθμούς βάσης (ιδίως αν δεν πρόκειται για αδόμητο δίκτυο). Οι δευτερεύοντες σταθμοί βάσης διαθέτουν γνωστικές ιδιότητες. Είναι δηλαδή, κατάλληλα εξοπλισμένοι ώστε να ανιχνεύουν μία μετάδοση από το πρωτεύων δίκτυο και να μη μεταδίδουν αν δε βρουν κενές συχνοτικές περιοχές.

Στο προτεινόμενο μοντέλο, οι πρωτεύοντες χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν τις αδειοδοτούμενες συχνοτικές ζώνες, ενώ οι δευτερεύοντες δεν μπορούν, αν στο μεταξύ μεταδίδουν πρωτεύοντες χρήστες. Αν για παράδειγμα, ένας δευτερεύων χρήστης μεταδίδει σε μία αδειοδοτούμενη ζώνη και ένας πρωτεύων χρήστης ξεκινήσει τη μετάδοση, τότε ο δευτερεύων σταματά αμέσως μόλις «αντιληφθεί» τη μετάδοση και ξεκινά την αναζήτηση μίας άλλης διαθέσιμης ζώνης και μεταδίδει εκεί. Στην περίπτωση, που ο δευτερεύων σταθμός στο δίκτυο μαθαίνει από τους δευτερεύοντες σταθμούς βάσης ότι συντελείται μετάδοση από πρωτεύων στοιχείο, τότε σταματά οποιαδήποτε μετάδοση. Ο δευτερεύων σταθμός ενημερώνει όλους τους δευτερεύοντες χρήστες και τους αποτρέπει από το να εκπέμψουν εκεί.

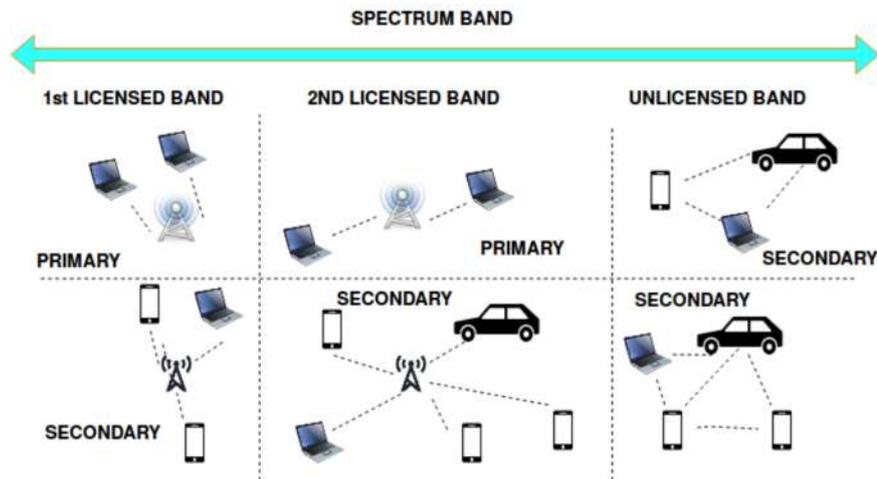


FIGURE 11.1: Το βασικό μοντέλο της αρχιτεκτονικής της τεχνολογίας Cognitive Radio και της αλληλεπίδρασής του με τα βασικά συστατικά.

Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση τα πρωτεύοντα στοιχεία διαθέτουν προτεραιότητα στη μετάδοση, ενώ τα δευτερεύοντα αναζητούν κενές συχνοτικές περιοχές για να μεταδώσουν.

Το Σχήμα 11.1 αντικατοπτρίζει μία βασική αρχιτεκτονική, όπου οι πρωτεύοντες χρήστες μεταδίδουν στις αδειοδοτούμενες ζώνες, ενώ οι δευτερεύοντες αναμένουν από τους πρωτεύοντες να ολοκληρώσουν τη μετάδοση ή μεταβαίνουν σε μη αδειοδοτημένες ή άλλες διαθέσιμες ζώνες. Σε κάθε περίπτωση, οι πρωτεύοντες είναι σε προτεραιότητα.

Στον Πίνακα 11.1 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων τεχνολογιών CR και SDN (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016), (Xie et al., 2012). Το SDN αποτελεί μία πρόταση μειωμένου κόστους, ενώ το CR περιλαμβάνει οφέλη για τους χρήστες. Οι δύο τεχνολογίες είναι εύκολα επεκτάσιμες και υψηλής απόδοσης, ενώ εύκολα μπορεί να υποστηρίξουν και ετερογενείς υλοποιήσεις. Συμβάλλουν ενεργά στην καλύτερη χρήση του εύρους ζώνης, καθώς «μαθαίνουν» το δίκτυο. Το SDN βάση στατιστικής, ενώ το CR λόγω γνωστικών ιδιοτήτων. Το SDN εμφανίστηκε το 2011, ενώ το CR το 1999. Το πρωτόκολλο OpenFlow, βασικό πρότυπο για το SDN προτάθηκε το 2011, ενώ για το CR υπάρχει το IEEE 802.22, που προτάθηκε το ίδιο έτος.

Ακολούθως παρατίθεται μία μελέτη SWOT για την τεχνολογία. Στον πίνακα αυτό παρατίθενται τα πιο σημαντικά στοιχεία σχετικά με τα δυνατά σημεία, τις αδυναμίες, τις απειλές και τις ευκαιρίες, που εμφανίζονται σχετικά με τις δύο συγκρινόμενες τεχνολογίες και την υιοθέτησή τους στη 5G. Και οι δύο τεχνολογίες είναι σημαντικές για τα μελλοντικά δίκτυα. Πληροφορίες από τα δίκτυα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και να συμβάλουν, ώστε να κατανέμονται καλύτερα οι πόροι του δικτύου. Όμως, είναι τεχνολογίες, με ανοιχτά ζητήματα, που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, ώστε να μην επιφέρουν προβλήματα στο δίκτυο.

helpful

harmful

TABLE 11.1: Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών CR και SDN των μοντέλων, που αναλύθηκαν παραπάνω.

Παράγοντας \ Τεχνολογία	SDN	CR
Κόστος	Μειωμένο κόστος	Οικονομικά οφέλη
Επεκτασιμότητα	✓	✓
Υψηλή απόδοση	✓	✓
Υψηλή χωρητικότητα	✓	✓
Ετερογενείς υλοποιήσεις	✓	✓
Εύρος ζώνης	επαναχρησιμοποίηση	επαναχρησιμοποίηση
"Γνωσιακές ικανότητες"	Στατιστική	Δευτερεύοντες σταθμοί
Εμφάνιση	2011	1999
Υιοθέτηση	Περιορισμένη σήμερα	Στα 5G
Προτυποποίηση	OpenFlow πρωτόκολλο- 2011	IEEE 802.22- 2011

internal

1. Οι τεχνολογίες **CR & SDN** περιλαμβάνουν σημαντικά πλεονεκτήματα και είναι ιδανικές λύσεις για ασύρματα και κινητά δίκτυα
2. Οι τεχνολογίες **CR & SDN** εκμεταλλεύονται προηγούμενη γνώση και συμπεριφορά του δικτύου
3. Είναι συμβατές μεταξύ τους, αλλά και με άλλες πιθανές λύσεις
4. Συνδυάζονται μεταξύ τους, αλλά και με άλλες λύσεις
5. Βελτιώνουν σημαντικά τη διαθεσιμότητα δικτυακών πηγών

1. Αποτελούν νέες τεχνολογίες με υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας και πιθανούς κινδύνους ασφαλείας
2. Ιδίως το **SDN** περιλαμβάνει πολλούς κινδύνους, π.χ. επιθέσεις τύπου **Denial of Service (DOS)** ή **Distributed DOS**
3. Απαιτούν τροποποιήσεις, ώστε να προσαρμοστούν στα **5G** δίκτυα
4. Τα πλήρως οικολογικά και πράσινα δίκτυα δεν έχουν επιτευχθεί ακόμα
5. Οι ευρείες υποδομές επιφέρουν μεγάλα κόστη υλοποίησης

<b>external</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Έλευση της <b>5G</b></li> <li>2. Οι συμβατικές τεχνολογίες δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις της <b>5G</b> και απαιτείται επιπρόσθετη έρευνα στον τομέα</li> <li>3. Νέες υπηρεσίες και προϊόντα θα έρχονται πιο γρήγορα στην αγορά και θα παρέχονται από το <b>5G</b></li> <li>4. Τα δίκτυα <b>5G</b> θα είναι πολύ διαφορετικά από τα σημερινά δίκτυα και συνεπώς, πιο πολύπλοκες, συνδυαστικές και ετερογενής λύσεις θα πρωταγωνιστούν</li> <li>5. Είναι υψίστης σημασίας το ότι θα απεικονίζεται το δίκτυο και πληροφορίες από τη χρήση θα αξιοποιούνται, καθώς και στατιστικά στοιχεία από το δίκτυο</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Απαιτούνται νέες επενδύσεις σε προϊόντα/ εξοπλισμό κλπ. από τους παρόχους</li> <li>2. Υπάρχει δυσπιστία από τους παρόχους σχετικά με τη σχέση της επένδυσης-οφέλους, που προκύπτει</li> <li>3. Υπάρχει δυσπιστία από τους παρόχους σχετικά με τη σχέση της επένδυσης-απόδοσης/πλεονεκτημάτων, που προκύπτει</li> <li>4. Παλαιότερες επενδύσεις π.χ. στην <b>4η</b> γενιά δεν έχουν ακόμα αποδώσει τα μέγιστα</li> </ol>
-----------------	--	---

### 11.1.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Η τεχνολογία **Cognitive Radio** περιλαμβάνει πολλούς σταθμούς βάσης στη βασική δομή, οι οποίοι περιλαμβάνουν πρωτεύοντες και δευτερεύοντες σταθμούς. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι ότι στους δευτερεύοντες υπάρχει λογική, που αποτρέπει οι δευτερεύοντες σταθμοί να συνδέονται και να μεταδίδουν στο δίκτυο, ενόσω μεταδίδουν οι πρωτεύοντες και συμβάλει ενεργά στο να βρεθούν δευτερεύουσες ή και εναλλακτικές πηγές μετάδοσης σε μη χρησιμοποιούμενες και μη αδειοδοτούμενες συχνοτικές ζώνες για τους δευτερεύοντες σταθμούς και χρήστες. Σε αυτή την περίπτωση, αν και οι δύο τύποι διαφορετικών σταθμών υπάρχουν, διαφέρουν σημαντικά, εντούτοις επιλέγεται να έχουν το ίδιο κόστος, αφού στα δίκτυα πέμπτης γενιάς, τα διάφορα συστατικά στοιχεία του δικτύου αναμένεται να περιλαμβάνουν πλήθος ιδιοτήτων γνωσιακών, αλλά και στατιστικών, έτσι ώστε να μπορούν να καλύπτονται όλες οι διαφορετικές τεχνολογίες, που θα συνυπάρχουν στα δίκτυα αυτά παρέχοντας τόσο **CR** όσο και **SDN** τεχνολογίες (Akyildiz, Nie, et al., 2016). Το μαθηματικό μοντέλο, για την τεχνολογία παρατίθεται ακολούθως:

### Κόστος κεφαλαίου

Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ένα πλήθος από εικονικούς σταθμούς βάσης ανά ομάδα και αυτό σχετίζεται με την παράμετρο  $n_{vs}$ . Από την άλλη πλευρά, μόνο οι σταθμοί βάσης του πρωτεύοντος δικτύου μαζί με το δευτερεύον δίκτυο, τα οποία βρίσκονται εκτός του αδειοδοτούμενου φάσματος είναι δραστήρια κάθε χρονική στιγμή. Έτσι,  $n_{vs} = n_{active} + n_{not-active}$ , συνεπώς:  $n_{active} = n_{vs} - n_{not-active}$ .

Άλλη σημαντική παράμετρος είναι η πυκνότητα των χρηστών σε μία συγκεκριμένη περιοχή, η οποία αναπαρίσταται από τη μεταβλητή  $l_{SBS}$ . Σε μία συγκεκριμένη περιοχή, έστω  $A$ , υπάρχουν  $N_{SBS}$  εντός της ομάδας των σταθμών βάσης και επίσης το κόστος ανά μονάδα σχετίζεται με τα  $C_{CS-SBS}$  και  $C_{SBS}$  αντίστοιχα.

Όλοι οι χρήστες σε μία συγκεκριμένη περιοχή, σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση δίνονται από τη σχέση:

$$N_{UE} = l_{SBS}A = n_{active}l_{pi}R_{max}^2N_{SBS} \quad (11.1)$$

Το κόστος για τη δημιουργία όλων των κυψελών θα είναι:

$$C_{site} = C_{CS-SBS}N_{SBS} \quad (11.2)$$

Το συνολικό κόστος για την ομάδα των σταθμών βάσης δίνεται από τα πιο κάτω:

$$N_{SBSO} = C_{SBS}N_{SBS} \quad (11.3)$$

Το συνολικό κόστος κεφαλαίου για την τεχνολογία αυτή δίνεται από το άθροισμα των προηγούμενων εξισώσεων **11.1**, **11.2**, **11.3**:

$$CAPEX_{RAN}^{CR} = C_{site} + C_{SBSO} = \frac{N_{UE}}{n_{active}l_{pi}R_i^2} (C_{CS-SBS} + C_{SBS})$$

### Λειτουργικό κόστος

Το λειτουργικό κόστος αποτελείται κυρίως από κόστη σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας για τα διάφορα συστατικά του δικτύου. Τα κύρια συστατικά, τα οποία επιφέρουν κατανάλωση ενέργειας μαζί με τις παραμέτρους, που τα αναπαριστούν παρατίθενται ακολούθως:

- Πομποδέκτης ( $P_{trans}$ )
- Ανορθωτής ( $P_{rect}$ )
- Ψηφιακός επεξεργαστής σήματος ( $P_{DSP}$ )
- Ενισχυτής ισχύος ( $P_{PA}$ )
- Ραδιο-φασματική μετάδοση ( $P_{MW}$ )
- Κλιματισμός ( $P_{air}$ )

Σε αυτή την περίπτωση ξανά, δίνεται μία συγκεκριμένη περιοχή, π.χ. A, όπου  $N_{SBS}$  αποτελεί την ομάδα σταθμών βάσης στην περιοχή και  $n_{vs}$  τους εικονικούς σταθμούς βάσης. Η καταναλισκόμενη ισχύς για τη ραδιο-φασματική μετάδοση θεωρείται μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του κλιματισμού (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας SBS μπορούν να αυξηθούν σε ποσοστό, που ξεπερνά και το 20%. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{airSBS} = P_{air}[1 + 0.2(n_{vs} - 1)] \quad (11.4)$$

$$P_{mwSBS} = P_{mw}[1 + 0.2(n_{vs} - 1)] \quad (11.5)$$

Στην περίπτωση αυτή, οι πάροχοι μοιράζονται την υποδομή της κεραίας και η ενεργειακή κατανάλωση είναι μειωμένη. Συνεπώς, για δεδομένο SBS, η καταναλισκόμενη ενέργεια του ραδιο-φάσματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{rfSBS} = (P_{trans} + P_{rect} + P_A)[1 + 0.2(n_{active} - 1)] \quad (11.6)$$

Ως αποτέλεσμα, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ενός SBS δίνεται χρησιμοποιώντας τις 11.4, 11.5, 11.6 και προκύπτει η πιο κάτω εξίσωση:

$$P_{SBS} = n_a P_{rfSBS} + n_{active} P_{DSP} + P_{airSBS} + P_{mwSBS} \quad (11.7)$$

Το συνολικό λειτουργικό κόστος για την υποδομή αποτελεί αποτέλεσμα του πλήθους των σταθμών βάσης στην περιοχή πολλαπλασιασμένη με την ενέργεια επί Kilo Watt ανά ώρα (KWH). Συνεπώς, το συνολικό λειτουργικό κόστος φαίνεται ακολούθως:

$$OPEX_{RAN}^{CR} = P_{SBS} N_{SBS} C_{KWH} \quad (11.8)$$

Συνολικό Κόστος

Το συνολικό κόστος είναι το άθροισμα του κεφαλαιακού και του λειτουργικού κόστους ?? και 11.8 και κατά συνέπεια, δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} TCO_{RAN}^{CR} &= CAPEX_{RAN}^{CR} + OPEX_{RAN}^{CR} = \\ &= \frac{N_{UE}}{n_{active} l p_i R_i^2} (C_{CS-SBS} + C_{SBS}) + \\ &+ P_{SBS} N_{SBS} C_{KWH} \end{aligned}$$

### 11.1.3 Παράμετροι

Η επιλογή των παραμέτρων για την πειραματική διαδικασία επεξηγείται ακολούθως. Στον Πίνακα 11.2 παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι και οι μεταβλητές, που σχετίζονται με τα μοντέλα κοστολόγησης. Οι πραγματικές τιμές εξάγονται από προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Με σκοπό να πραγματοποιηθεί μελέτη εφικτότητας, οι σημερινές τιμές θα κινηθούν σε ένα πεδίο τιμών, τέτοιο ώστε να κινείται εντός του +/- 50%.

TABLE 11.2: Παράμετροι και μεταβλητές συστήματος για την τεχνολογία CR

Κόστη			
Παράμετροι	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο τιμών
$n_{vs}$	Πλήθος σταθμών βάσης ανά ομάδα σταθμών βάσης	6	[2, 12]
$n_{active}$	Πλήθος ενεργών σταθμών βάσης ανά ομάδα σταθμών βάσης	4	[1, 10]
$l_{SBS}$	Πλήθος χρηστών	500	[100, 1000]
$N_{SBS}$	Πλήθος σταθμών βάσης ανά $\tau\chi\mu^2$	10	[1, 1000]
$C_{CS-SBS}$	Κόστος της κυψέλης για την ομάδα των σταθμών βάσης	5000 €	[1000, 10000]
$C_{SBS}$	Εικονικοί σταθμοί βάσης	15596 €	[7798, 31192]
$P_{trans}$	Κατανάλωση ισχύος πομπού	100 Watt	[50, 150]
$P_{rect}$	Κατανάλωση ισχύος ανορθωτή	100 Watt	[50, 150]
$P_{DSP}$	Κόστος της ισχύος επεξεργαστή ψηφιακού σήματος	100 Watt	[50, 150]
$P_{PA}$	Κόστος για την κατανάλωση ενισχυτή ισχύος	10 Watt	[5, 15]
$P_{mw}$	Κατανάλωση ισχύος μικρόκύματος	80Watt	[40, 160]
$P_{air}$	Κατανάλωση ισχύος κλιματισμού	225 Watt	[112.5, 450]
$n_{op}$	Πλήθος παρόχων	10	[5, 15]
$n_a$	Πλήθος κεραιών	4	[2, 8]
$C_{KWh}$	Kilowatt ανά ώρα	0.25 €	[0.12, 0.5]

Αυτή η υπόθεση πραγματοποιείται, διότι τα δίκτυα 5G είναι μία μελλοντική τεχνολογία και θα κυκλοφορήσει το 2020. Συνεπώς, είναι εξαιρετικά πιθανό ότι οι τιμές θα αυξηθούν λόγω των οικονομικών παραγόντων ή τιμών θα μειωθούν σημαντικά αν οι νέες τεχνολογίες εισάγονται και ως αποτέλεσμα, θα μειωθούν τα κόστη της καταναλισκόμενης ενέργειας. Επίσης, είναι υψίστης σημασίας να αναδειχθούν παράμετροι, που επιδρούν στο συνολικό μοντέλο και μπορεί να λειτουργούν υπερ ή κατά για κάθε πάροχο.

#### 11.1.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

##### Σύγκριση κόστους για SDN & CR

Παρουσιάζονται τα κόστη σύγκρισης των δύο διαφορετικών μοντέλων. Και τα δύο συγκρινόμενα μοντέλα SDN και CR είναι παρόμοια, από την άλλη πλευρά, όμως, το μοντέλο CR περιλαμβάνει λιγότερους λειτουργικούς σταθμούς βάσης, εφόσον, υπάρχουν μερικοί δευτερεύοντες σταθμοί βάσης, που δε μπορούν να έχουν πρόσβαση

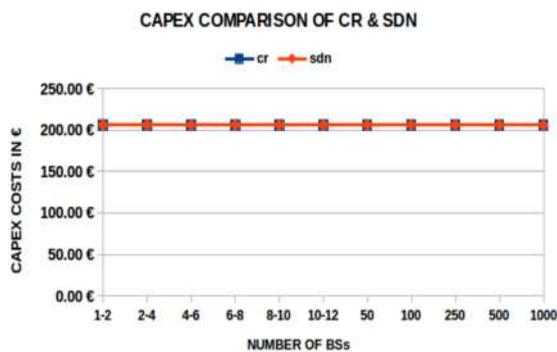


FIGURE 11.2: Η σύγκριση του κόστους κεφαλαίου για το SDN & CR συγκριτικά με το πλήθος κεραιών.

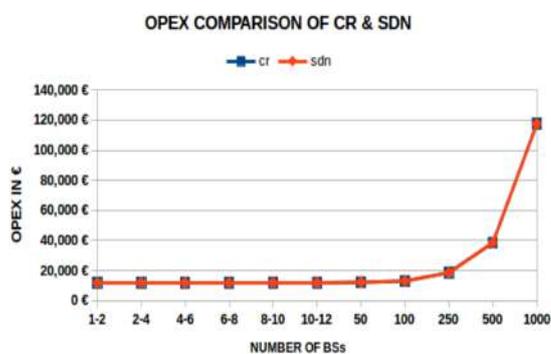


FIGURE 11.3: Η σύγκριση του λειτουργικού κόστους για το SDN & CR συγκριτικά με το πλήθος κεραιών.

στο φάσμα με μία εξουσιοδοτούμενη μέθοδο. Από την άλλη πλευρά, στο μοντέλο SDN όλοι οι σταθμοί βάσης λειτουργούν και υποστηρίζουν πιθανούς χρήστες.

Πιο συγκεκριμένα, το κόστος κεφαλαίου (Σχήμα 11.2) είναι σταθερό και ίσο και για τα δύο μοντέλα. Συνεπώς, το πλήθος των σταθμών βάσης δεν παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του κόστους κεφαλαίου.

Το λειτουργικό κόστος (Σχήμα 11.3) εξαρτάται από την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση μέχρι τις 100 κεραιές. Όταν το πλήθος κεραιών αυξάνεται με εκθετικό τρόπο και συνεπώς, αυτά τα κόστη επηρεάζουν σημαντικά τα κόστη για τα δύο μοντέλα.

Το συνολικό κόστος (Σχήμα 11.4) επηρεάζει την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση έως το πλήθος των κεραιών να αυξηθεί σε 100. Όταν το πλήθος των κεραιών αυξάνει με εκθετικό τρόπο και συνεπώς, αυτά τα κόστη επηρεάζουν σημαντικά τα κόστη και για τα δύο μοντέλα.

### Μελέτη Εφικτότητας για τη CR

Η ΜΕ είναι μία σημαντική τεχνική, που επιτρέπει να αναδειχθεί ποιες παράμετροι επηρεάζουν το μοντέλο συνολικά. Συνεπώς, γίνεται προφανές ότι τα κόστη των παραμέτρων αυτών πρέπει να μειωθούν με στόχο να υιοθετηθούν οι τεχνολογίες αυτές ευρέως.

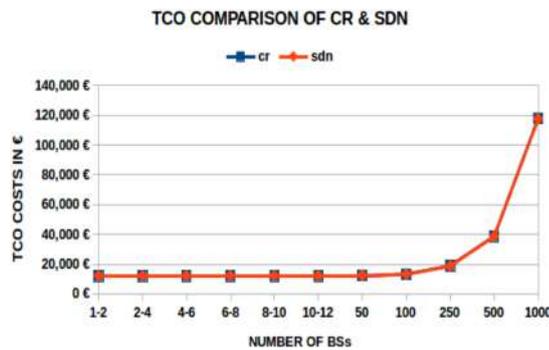


FIGURE 11.4: Η σύγκριση του συνολικού κόστους για το SDN & CR συγκριτικά με το πλήθος κεραιών.

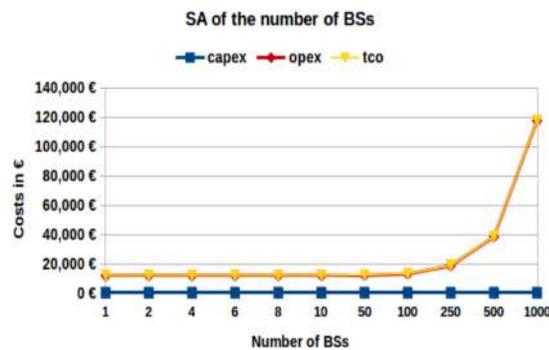


FIGURE 11.5: Η ME του πλήθους των εικονικών σταθμών βάσης στο μοντέλο CR.

Το κόστος κεφαλαίου είναι σταθερό και ίσο για τα δύο μοντέλα. Συνεπώς, το πλήθος των σταθμών βάσης δεν παίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία του κόστους κεφαλαίου. Το λειτουργικό κόστος εξαρτάται από την αύξηση του πλήθους των κεραιών. Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση μέχρι ο αριθμός κεραιών να φτάσει στο 100. Μετά τις 100 κεραιές, τα κόστη αυξάνονται με εκθετικό τρόπο και συνεπώς, το μοντέλο επηρεάζεται σημαντικά. Το συνολικό κόστος εξαρτάται από την αύξηση του αριθμού των κεραιών. Αν και η διακύμανση δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη ως ότου το πλήθος των κεραιών γίνει 100. (Σχήμα 11.5)

Το πλήθος των κεραιών του μοντέλου δεν επηρεάζει κανένα είδος κόστους και δεν είναι σημαντικό για το μοντέλο (Σχήμα 11.6).

Το κόστος της δημιουργίας κυψελών στο μοντέλο δεν επηρεάζει το κόστος κεφαλαίου, το λειτουργικό κόστος και το συνολικό κόστος, και συνεπώς, δεν είναι πολύ βασικό για το μοντέλο (Σχήμα 11.7).

Το κόστος κεφαλαίου είναι σταθερό και ίσο και για τα δύο μοντέλα. Επομένως, ο αριθμός των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  δε διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη δημιουργία του κόστους κεφαλαίου. Το λειτουργικό κόστος εξαρτάται από την αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$ . Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση μέχρι το πλήθος των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  να είναι 100. Το κόστος των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  αυξάνεται με εκθετικό τρόπο και ως εκ τούτου, αυτοί οι τύποι κόστους επηρεάζουν ιδιαίτερα το κόστος και των δύο μοντέλων. Το

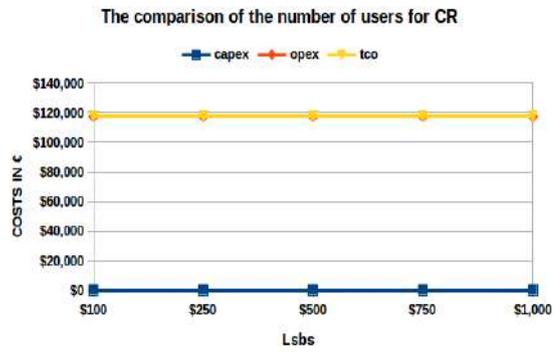


FIGURE 11.6: Η ΜΕ του πλήθους των σταθμών βάσης ανά ομάδα σταθμών στο μοντέλο CR.

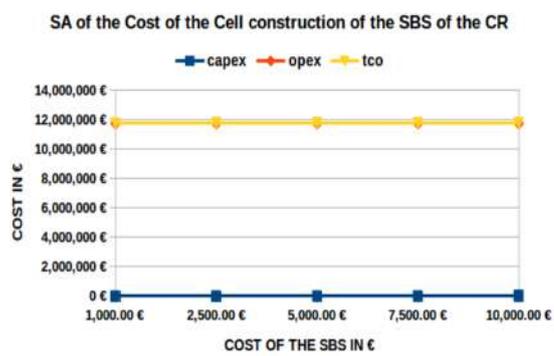


FIGURE 11.7: Η ΜΕ του κόστους της κατασκευής των κυψελών ανά ομάδα σταθμών στο μοντέλο CR.

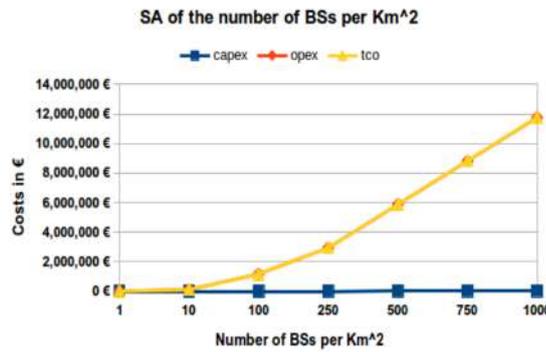


FIGURE 11.8: Η ΜΕ για το κόστος του αριθμού των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  στο μοντέλο CR.

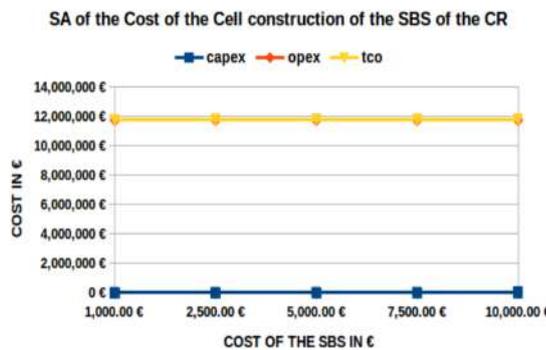


FIGURE 11.9: ΜΕ του πλήθους των υλοποιημένων σταθμών βάσης στο μοντέλο CR.

λειτουργικό κόστος εξαρτάται από την αύξηση των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$ . Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση μέχρις ότου το πλήθος των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  είναι 100. Τότε, ο αριθμός των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  αυξάνεται με εκθετικό τρόπο και ως εκ τούτου, αυτοί οι τύποι κόστους επηρεάζουν ιδιαίτερα το κόστος και των δύο μοντέλων (Σχήμα 11.8).

Το πλήθος των υλοποιημένων σταθμών βάσης επηρεάζει κυρίως το κόστος κεφαλαίου του μοντέλου, που αυξάνει γραμμικά το πλήθος των υλοποιημένων σταθμών βάσης. Από την άλλη πλευρά, αυτά τα κόστη παραμένουν σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, που δεν είναι πολύ ακριβό, αλλά περιορισμένο. Το λειτουργικό και το συνολικό κόστος αυξάνονται γραμμικά με το πλήθος των προστιθέμενων υλοποιημένων σταθμών βάσης. Σε σχέση με το κόστος κεφαλαίου, τα κόστη αυξάνονται με χαμηλότερο ρυθμό (Σχήμα 11.9).

Το κόστος κατανάλωσης ενέργειας δεν επηρεάζει σημαντικά το κόστος κεφαλαίου. Όλα τα κόστη κατανάλωσης ενέργειας δεν επηρεάζουν σημαντικά το λειτουργικό κόστος και το συνολικό κόστος. Πιο συγκεκριμένα, τα κόστη της ενεργειακής κατανάλωσης (πομπού, ανορθωτή, ψηφιακού επεξεργαστή, ενισχυτή, κύματος, κλιματισμού) αυξάνει γραμμικά με την αυξανόμενη ενεργειακή κατανάλωση (Σχήμα 11.10, Σχήμα 11.11, Σχήμα 11.12, Σχήμα 11.13, Σχήμα 11.14).

Το πλήθος των παρόχων δεν επηρεάζει το κόστος κεφαλαίου, το λειτουργικό και το συνολικό κόστος. Συνεπώς, δεν παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο κόστος και

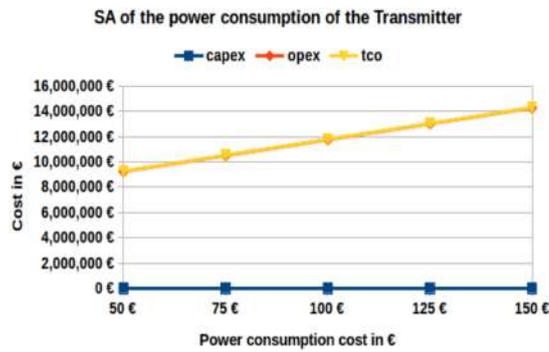


FIGURE 11.10: Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον πομπό για το μοντέλο CR.

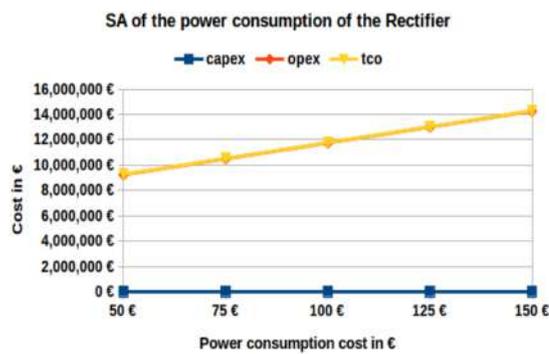


FIGURE 11.11: Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον ανορθωτή για το μοντέλο CR.

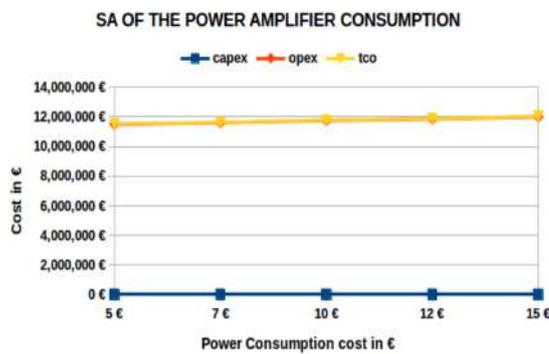


FIGURE 11.12: Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον ψηφιακό επεξεργαστή για το μοντέλο CR.

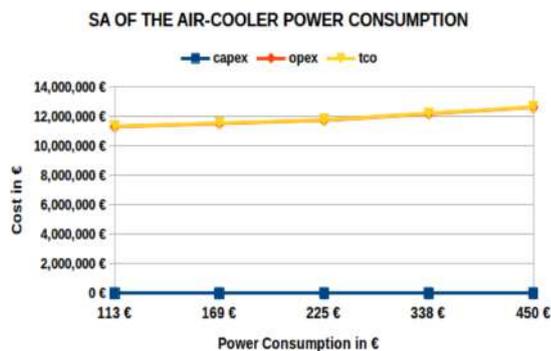


FIGURE 11.13: Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στον κλιματισμό για το μοντέλο CR.

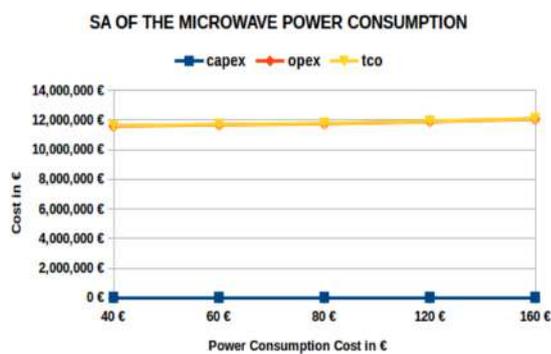


FIGURE 11.14: Η ΜΕ για το κόστος της ενεργειακής κατανάλωσης στα μικρο-κύματα για το μοντέλο CR.

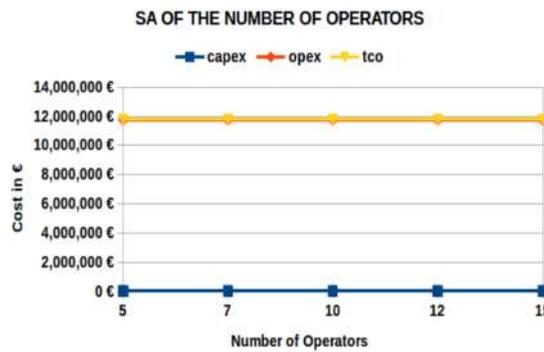


FIGURE 11.15: Η ΜΕ για το πλήθος των παρόχων στο μοντέλο CR.

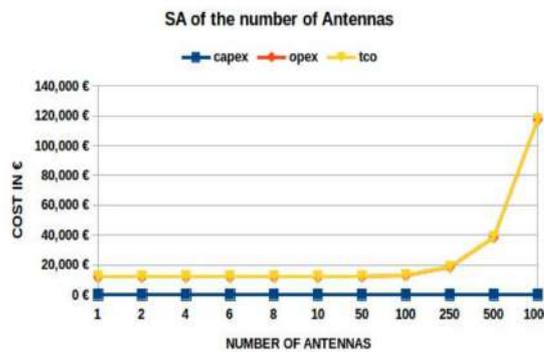


FIGURE 11.16: Η ΜΕ για το κόστος του αριθμού των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  στο μοντέλο CR.

κατά συνέπεια, μια διακύμανση στο συγκεκριμένο σύνολο τιμών δεν έχει μεγάλη επίδραση στο μοντέλο (Σχήμα 11.15).

Το κόστος κεφαλαίου είναι σταθερό και ίσο και για τα δύο μοντέλα. Επομένως, ο αριθμός των κεραιών ανά  $\tau\chi\mu^2$  δε διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη δημιουργία του κόστους κεφαλαίου. Το λειτουργικό κόστος εξαρτάται από την αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$ . Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση μέχρι το κόστος των κεραιών ανά  $\tau\chi\mu^2$  να είναι 100. Το κόστος των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  αυξάνεται με εκθετικό τρόπο και ως εκ τούτου, αυτοί οι τύποι κόστους επηρεάζουν ιδιαίτερα το κόστος και των δύο μοντέλων. Το λειτουργικό κόστος εξαρτάται από την αύξηση των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$ . Αν και δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση μέχρις ότου το κόστος των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  είναι 100. Όταν το κόστος των σταθμών βάσης ανά  $\tau\chi\mu^2$  αυξάνεται με εκθετικό τρόπο και ως εκ τούτου, αυτοί οι τύποι κόστους επηρεάζουν ιδιαίτερα το κόστος και των δύο μοντέλων (Σχήμα 11.16).

Και τα δύο μοντέλα είναι σημαντικά και αναμένεται ότι θα διαδραματίσουν θεμελιώδη ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα. Το λειτουργικό και το συνολικό κόστος των δύο τεχνολογιών είναι μεγάλα και επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό μοντέλο. Το κόστος κεφαλαίου δεν είναι τόσο ακριβό και δεν επηρεάζει σημαντικά το συνολικό μοντέλο. Οι παράμετροι του μοντέλου, όπως το πλήθος των σταθμών βάσης, αυξάνουν σημαντικά το λειτουργικό και το συνολικό κόστος. Το πλήθος

των σταθμών βάσης επηρεάζει το συνολικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, οι υλοποιημένοι σταθμοί βάσης επηρεάζουν αρκετά το λειτουργικό και το συνολικό κόστος. Η ενεργειακή κατανάλωση επηρεάζει το λειτουργικό και κατά συνέπεια και το συνολικό κόστος.

## 11.2 Stalkerberg game για την τεχνολογία Cognitive Radio

Το μοντέλο Stackelberg αποτελεί ένα στρατηγικό «παιχνίδι», που χρησιμοποιείται στον κλάδο της οικονομίας και αναφέρει ότι η εταιρεία αρχηγός οδηγεί το παιχνίδι και κατ' επέκταση τη δυναμική της αγοράς κάνει την πρώτη κίνηση και οι ακόλουθοι της κινούνται διαδοχικά. Σύμφωνα με τους όρους της θεωρίας παιγνίων, οι συμμετέχοντες στο «παιχνίδι» αυτό ονομάζονται αρχηγός (leader), ακόλουθος (follower) και ανταγωνίζονται με σκοπό το βέλτιστο κέρδος και όφελος.

Επιπλέον, υπάρχουν μερικοί περαιτέρω περιορισμοί, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία Stackelberg και κατ' επέκταση η ισορροπία των επιχειρήσεων στην αγορά. 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.

Για τον υπολογισμό του κόστους στο μοντέλο, 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. (Von Stackelberg, 2010) Έτσι, όλοι επιδιώκουν τα μέγιστα οφέλη.

Για τη δημιουργία του οικονομικού μοντέλου χρησιμοποιείται το Stackelberg Game. Θεωρείται λοιπόν ένα "παιχνίδι" ανάμεσα στον πάροχο 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 τη ζήτηση του φάσματος για τον cognitive σταθμό βάσης. Τέλος, στο τρίτο στάδιο, δοθείσης της στρατηγικής, που χρησιμοποιείται για τον διαμοιρασμό ισχύος, βελτιστοποιεί την απόδοση του femtocell βάσης σταθμού και ως αποτέλεσμα έχει θετική απόκριση στο δίκτυο. (Beloglazov, Abawajy, and Buyya, 2012)

### 11.2.1 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική, που χρησιμοποιείται για το συγκεκριμένο σενάριο, είναι η ίδια με αυτή, που χρησιμοποιείται για το πιο πάνω σενάριο, που εξετάζεται απλά το τεχνοοικονομικό μοντέλο για το CR.

### 11.2.2 Μαθηματικό Μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο για την περίπτωση αυτή βασίζεται στο παιχνίδι Stackelberg. Συγκεκριμένα για να επιτευχθεί βέλτιστη λύση χρησιμοποιείται η ιδέα της ανάστροφης επαγωγής. Παρακάτω παρουσιάζονται οι φάσεις του ανεστραμμένου παιχνιδιού.

### Ανάστορφο 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 (Beloglazov, Abawajy, and Buyya, 2012). Ξεκινώντας, δηλαδή, από το τρίτο στάδιο με σκοπό τον ποιοτικότερο διαμοιρασμό ισχύος ή του κόστους κλπ. Στη συνέχεια, στο δεύτερο στάδιο αποφασίζεται το μέγεθος του φάσματος. Τέλος, στο στάδιο I, ο διαχειριστής καταλήγει στη βέλτιστη απόφαση σχετικά με την τιμή, η οποία επιτυγχάνεται και θα είναι η πλέον κατάλληλη για το σύστημα. (Beloglazov, Abawajy, and Buyya, 2012)

### Στάδιο III, Διαμοιρασμός Ισχύος

Όταν, λοιπόν, το φάσμα  $w_l$  διαμοιράζεται στο σταθμό βάσης femtocell αριθμού  $k$ . Αυτό έχει ως σκοπό να πετύχει τον βέλτιστο ενεργειακά διαμοιρασμό ισχύος. Έτσι, προκύπτει η σχέση (Beloglazov, Abawajy, and Buyya, 2012):

$$\frac{\partial \pi_k(p_k)}{\partial p_k} = \frac{R'_k(p_k)(p_a + p_k) - R_k(p_k)}{(p_a + p_k)^2} = \frac{\varphi(p_k)}{(p_a + p_k)^2} \quad (11.9)$$

όπου  $p_k$  συμβολίζεται ο διαμοιρασμός της ισχύος, ο οποίος αποτελεί τη συνάρτηση κόστους και  $R_k(p_k)$  ισούται με  $\sum_{l=1}^L ((\zeta_k - c_b)x_{lk}w_l \log_2(1 + \frac{h_{lk}^2 p_k}{\sigma^2}))$ , όπου το  $\zeta_k$  είναι τα έσοδα του σταθμού βάσης Femtocells  $c_b$  το κόστος διαμοιρασμού φάσματος από τον CR σταθμό βάσης,  $x_{lk}$  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 της Cognitive Radio

Μετά την ολοκλήρωση του Σταδίου III ο cognitive σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να αποφασίσει το μέγεθος του φάσματος, που θα πρέπει να αγοραστεί από τα διάφορα πρωτεύοντα δίκτυα. Σύμφωνα με το (Beloglazov, Abawajy, and Buyya, 2012), η συνάρτηση για το cognitive σταθμό βάσης ορίζεται ως:

$$\frac{\partial \pi_b(w)}{\partial w_l} = \left( \sum_{k=1}^K c_b x_{lk} \eta_{lk} + \sum_{i=1}^I \xi_i x_{li} \eta_{li} \right) - w_l - \theta \sum_{q \neq l} w_q - c_l = 0 \quad (11.10)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση διαφαίνεται ότι η ποσότητα του φάσματος, που θα αγοραστεί από τα πρωτεύοντα δίκτυα είναι:

$$w_l^* = \frac{(\sum_{k=1}^K c_b x_{lk} \eta_{lk} - c_l)(\theta(L-2) + 1)}{(1-\theta)(\theta(L-1) + 1)} - \frac{\theta \sum_{q \neq l} (\sum_{k=1}^K c_b x_{qk} \eta_{lk} + \sum_{i=1}^I \xi_i x_{qi} \eta_{qi} - c_q)}{(1-\theta)(\theta(L-1) + 1)} \quad (11.11)$$

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 το κόστος για κάθε πρωτεύον δίκτυο εξαρτάται από την δική του τιμή  $c_l$ , αλλά και από τις τιμές  $c_{-l}$  άλλων πρωτεύοντων δικτύων.

Για το λόγο αυτό ο καθορισμός 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, εφαρμόζεται το θεώρημα της ισορροπίας του Nash και σύμφωνα με το (Beloglazov, Abawajy, and Buyya, 2012) καταλήγοντας στην παραγοντοποιημένη για συνάρτηση κόστους, είναι:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_l(c)}{\partial c_l} = & a_1 k_l \frac{(\theta(L-2)+1)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} - \frac{c_l(\theta(L-2)+1)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} + \\ & \frac{(\sum_{k=1}^K c_b x_{lk} \eta_{lk} + \sum_{i=1}^L \xi_i x_{li} \eta_{li} - c_l)(\theta(L-2)+1)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} - \\ & \frac{\theta \sum_{q \neq l} (\sum_{k=1}^K c_b x_{qk} \eta_{qk} + \sum_{i=1}^L \xi_i x_{qi} \eta_{qi} - c_q)}{(1-\theta)(\theta(L-1)+1)} \end{aligned} \quad (11.12)$$

### 11.2.3 Παράμετροι

Στους Πίνακες 11.3 και 11.4 φαίνονται οι τιμές για το CR δίκτυο, το Stackelberg game και για τις διάφορες παραμέτρους για τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα (C. Bouras, Ntarzanos, and A. Papazois, 2016). Επίσης, φαίνεται από ποιες μελέτες έχουν εξαχθεί οι τιμές του δικτύου.

### 11.2.4 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Για να είναι δυνατή η διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών έχουν τεθεί συγκεκριμένες τιμές σε μεταβλητές του προτεινόμενου μοντέλου. Για τη θετική σχεδιαστική παράμετρο  $a_1 = 1$ , η απόδοση εκπομπής ραδιοσυχνότητας  $k_l = 2$ . Επιπλέον, η παράμετρος υποκατάστασης φάσματος  $\theta$ , η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-1, 1]$  με  $\theta = 1$  σημαίνει ότι οι μονάδες-σταθμοί βάσης Femtocell ή MSUS μπορούν να αλλάξουν εντός του φάσματος, από  $\theta = 0$  να σημαίνει ότι οι μονάδες δε μπορούν να αλλάξουν στο φάσμα και  $\theta < 0$ , το φάσμα, που χρησιμοποιείται από FBS ή MSUs και είναι συμπληρωματικό. Ακόμη, η παράμετρος  $c_l$ , 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 τη μεταβλητή του κόστους του διαμοιρασμού του φάσματος θεωρήθηκε  $c_b = 1$ . Επιπρόσθετα, οι τιμές για την ενεργειακά αποδοτική εκπομπή από το εξεταζόμενο πρωτεύον δίκτυο στους δευτερεύοντες χρήστες και στα femtocells είναι  $h_{li} = h_{lk} = 200$ , ενώ για την ενεργειακά αποδοτική εκπομπή σε άλλο πρωτεύον δίκτυο στους δευτερεύοντες χρήστες και στα femtocell είναι  $h_{qi} = h_{qk} = 50$ . Τέλος, το κόστος που οι MSUS πληρώνουν στο CR σταθμό βάσης τίθεται ως  $j_i = 1$ .

Στη συνέχεια, θεωρούνται οι τιμές για το SDN μοντέλο, ο αριθμός των εικονικών BS ανά SuperBS τίθεται ως  $nus = 6$ . Επιπλέον, στην πυκνότητα των χρηστών ανά περιοχή δόθηκε η τιμή  $lsbs = 500$  και η μέγιστη κάλυψη της BS πήρε την τιμή  $Rmax = 200m$ . Για το κόστος ανά θέση κυψέλης της SBS ( $C_{sscb}$ ), το κόστος μια SBS μονάδας (CSBS) και το συνολικό αριθμό χρηστών ( $Nue$ ) επιλέχθηκαν μεταβαλλόμενες τιμές κατά τα πειράματα. Ακόμη, στην ισχύ του πομποδέκτη τέθηκε η τιμή  $P_{trans} = 100W$ , στην ανορθωτική ισχύς  $P_{rect} = 100W$  και στην

TABLE 11.3: Παράμετροι και μεταβλητές κόστους για το CR Stackelberg σενάριο.

Παράμετροι	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο τιμών
$n_{vs}$	Πλήθος BS ανά SBS	6	[2, 12]
$n_{active}$	Πλήθος ενεργών BS ανά SBS	4	[1, 10]
$l_{SBS}$	Πλήθος χρηστών	500	[100, 1000]
$N_{SBS}$	Πλήθος BSs ανά $km^2$	10	[1, 1000]
$C_{CS-SBS}$	Κόστος υλοποίησης κυψέλης SBS	5000 €	[1000, 10000]
$C_{SBS}$	Υλοποιημένοι vBSs	15596 €	[7798, 31192]
$R_{max}$	Μέγιστη κάλυψη για τους BS	200	$R_{max} > 0$
$P_{trans}$	Ενεργειακή κατανάλωση πομπού	100 Watt	[50, 150]
$P_{rect}$	Ενεργειακή κατανάλωση ανορθωτή	100 Watt	[50, 150]
$P_{DSP}$	Κόστος της ισχύος του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος	100 Watt	[50, 150]
$P_{PA}$	Ενεργειακή κατανάλωση ενισχυτή	10 Watt	[5, 15]
$P_{mw}$	Ενεργειακή κατανάλωση Μικροκυμάτων	80 Watt	[40, 160]
$P_{air}$	Κόστος κατανάλωσης κλιματισμού	225 Watt	[112.5, 450]
$n_{op}$	Πλήθος παρόχων	10	[5, 15]
$n_a$	Πλήθος κεραιών	4	[2, 8]
$C_{KWh}$	Kilowatt ανά ώρα	0.25 €	[0.12, 0.5]
$C_{place}$	Κόστος για το χώρο δεδομένων	21 €	10.000,00 €
$C_{servers}$	Συνολικό κόστος για τον εξοπλισμό server	72 €	5.262,00 €
$C_{license}$	Συνολικό κόστος αδειοδότησης λογισμικού	17 €	5.000,00 €

TABLE 11.4: Παράμετροι και μεταβλητές κόστους για το CR Stackelberg σενάριο (Xie et al., 2012).

Παράμετροι	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο τιμών
$l$	πρωτεύων δίκτυο	5	[3, 6]
$k$	femtocell	5	[3, 6]
$L$	πλήθος πρωτευόντων δικτύων	10	[6, 12]
$p_k$	διαμοιρασμός ενέργειας	1	$p_k > 0$
$a$	παράμετρος σχεδιασμού	1	$a > 0$
$\zeta_k$	εισόδημα από femtocell BS	3	$\zeta_k > 0$
$c_b$	κόστος διαμοιρασμού φάσματος CR BS	1	$c_b > 0$
$\sigma^2$	λευκός θόρυβος	$\eta_{lk}/\kappa$	$\sigma^2 > 0$
$p_a$	επιπρόσθετη ενεργειακή κατανάλωση	0.1W	$p_a > 0$
$w_l$	φάσμα	25 MHz	$w_l > 0$
$c_l$	τιμολόγηση	6	[0,12]
$x_{lk}$	δείκτης διαμοιρασμού φάσματος	0.1	[0, 1]
$\eta_{lk}$	ενεργειακά αποδοτική μετάδοση	200	$\eta_{lk} > 0$
$\xi_i$	κόστος MSUs του CR BS	1	$\xi_i > 0$
$\theta$	δυνατότητα υποκατάστασης φάσματος	-1	[-1, 1]

ισχύ ενισχυτή  $P_{PA} = 10.4W$ . Επίσης, η ισχύς του ψηφιακού επεξεργαστή σήματος τέθηκε ως  $P_{DSP} = 100W$ , η ισχύς ψύξης  $P_{air} = 225W$  και η ισχύς εκπομπής MW  $P_{mw} = 80W$ . 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 δημιουργία ή την ενοικίαση του κέντρου δεδομένων  $C_{place} = 21$ .

### 11.2.5 Σύγκριση των μοντέλων CR και SDN

Στα πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν για το μοντέλο του CR, η παράμετρος  $\theta$ , δηλαδή η παράμετρος 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  $c_l$ , με τον αριθμό των πρωτευόντων δικτύων  $L = 10$  και τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών και των femtocells να είναι  $I = K = 5$ . Επιπλέον, η τιμή των λοιπών πρωτευόντων δικτύων έχει τεθεί ως  $c_q = 2$ . Ενώ, για το μοντέλο του SDN κατά το πείραμα, που πραγματοποιήθηκε το κόστος ανά μονάδα SBS παρέμεινε σταθερό με  $CSBS = 2$ , ενώ το κόστος ανά κυψέλη μεταβάλλονταν παίρνοντας τις τιμές  $C_{csscb} = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 12]$ . Τέλος, ο αριθμός των χρηστών τέθηκε ως  $N_{ue} = 5$ .

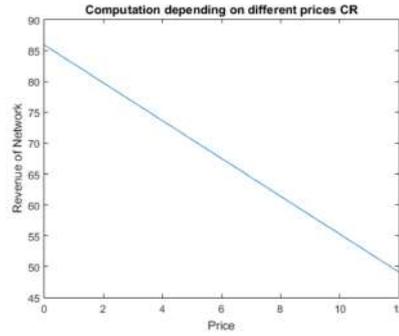


FIGURE 11.17: Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_i$  στο CR.

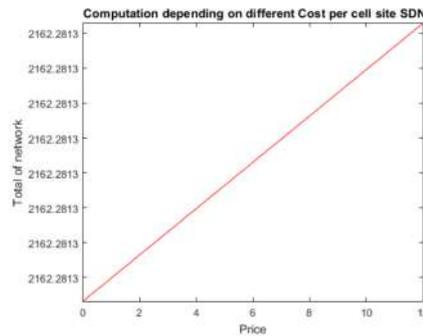


FIGURE 11.18: Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές  $C_{csscb}$  στο SDN.

Από τα σχήματα παρατηρείται 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 στα femtocell δεν είναι ικανό να καλύψει τα έξοδα της συνεχώς αυξανόμενης τιμής του. Παράλληλα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της κυψέλης τόσο αυξάνεται και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και άρα, το κέρδος του δικτύου μειώνεται. Έτσι, παρατηρείται μείωση του συνολικού κέρδους του δικτύου για τις παραπάνω περιπτώσεις και στα δύο μοντέλα.

Εν συνεχεία, εξετάζεται το συνολικό κέρδος του πρωτεύοντος δικτύου για τις διάφορες τιμές των άλλων πρωτευόντων δικτύων  $c_g$ , 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  $C_{csscb} = 2$  το κόστος ανά μονάδα SBS μεταβαλλόταν λαμβάνοντας τις τιμές  $CSBS = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 12]$ . Τέλος, ο αριθμός των χρηστών επιλέχθηκε ως  $Nue = 5$ .

Από τα σχήματα παρατηρείται ότι αρχικά το κέρδος παρουσιάζει μια μικρή μείωση, αλλά στη συνέχεια καθώς η τιμή των άλλων πρωτευόντων δικτύων αυξάνεται το ίδιο συμβαίνει και με το κέρδος, αφού ο CR BS θα αγοράσει περισσότερο φάσμα από το πρωτεύον δίκτυο, όταν τα άλλα πρωτεύοντα δίκτυα έχουν υψηλότερες τιμές. Από το σχήματα παρατηρείται ότι το κόστος ανά μονάδα SBS αυξάνεται και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και άρα, το κέρδος του δικτύου μειώνεται. Στη

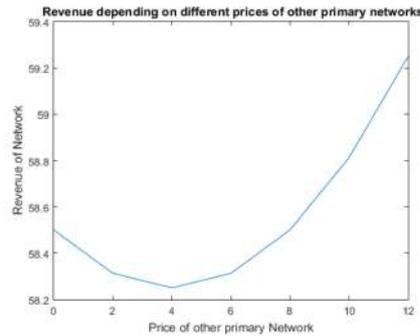


FIGURE 11.19: Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_q$  CR.

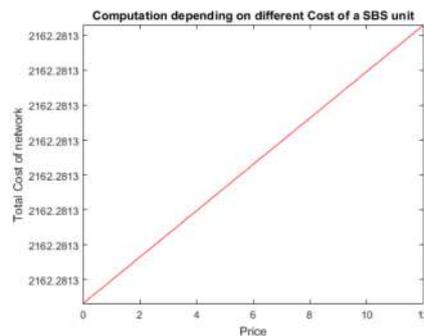


FIGURE 11.20: Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές  $C_{SBS}$ SDN

προκειμένη περίπτωση, στο μοντέλο του CR παρατηρείται αρχικά μείωση, ενώ στη συνέχεια αύξηση του συνολικού κέρδους, ενώ στο SDN παρατηρείται μείωση από την αρχή μέχρι το τέλος.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση για το μοντέλο του Cognitive Radio κατά την οποία, οι τιμές των πρωτευόντων δικτύων παραμένουν σταθερές με  $c_l = c_q = 2$ , αλλά ο αριθμός των πρωτευόντων δικτύων μεταβάλλεται, όπως και ο αριθμός των femtocells και των δευτερευόντων χρηστών. Κατά τη δημιουργία του μοντέλου θεωρήθηκε ότι το άθροισμα του πλήθους των femtocells με τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών ισούται με τον συνολικό αριθμό πρωτευόντων δικτύων. Για το μοντέλο του SDN κατά το πείραμα παρέμειναν σταθερές οι τιμές του κόστους ανά κυψέλη, αλλά και του κόστους ανά μονάδα SBS  $C_{SSB} = C_{SBS} = 2$  και μεταβαλλόταν ο αριθμός των χρηστών παίρνοντας τις τιμές  $N_{ue} = [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]$ .

Από τα σχήματα γίνεται κατανοητό ότι το κέρδος αυξάνεται, όταν ο αριθμός των πρωτευόντων δικτύων αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει, διότι όταν υπάρχουν περισσότερα πρωτεύοντα δίκτυα, ο CR BS μπορεί να αγοράσει περισσότερο φάσμα από τα δίκτυα σε χαμηλότερη τιμή. Έτσι, τα έσοδα αυξάνουν και υπάρχει περισσότερη ζήτηση φάσματος. Ακόμα, είναι φανερό ότι με την αύξηση του αριθμού των χρηστών αυξάνεται και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας 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.

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

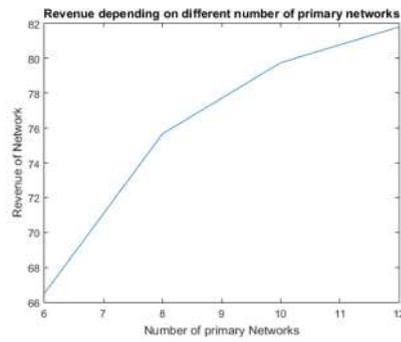


FIGURE 11.21: Κέρδος με βάση τον αριθμό πρωτευόντων δικτύων στο CR.

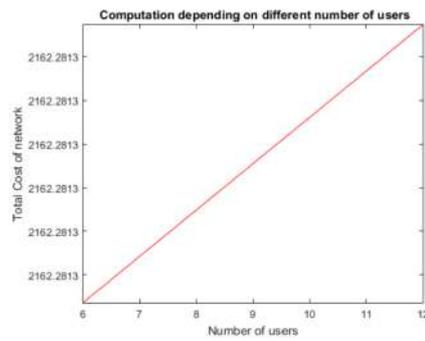


FIGURE 11.22: Συνολικό Κόστος με βάση τον αριθμό των χρηστών SDN

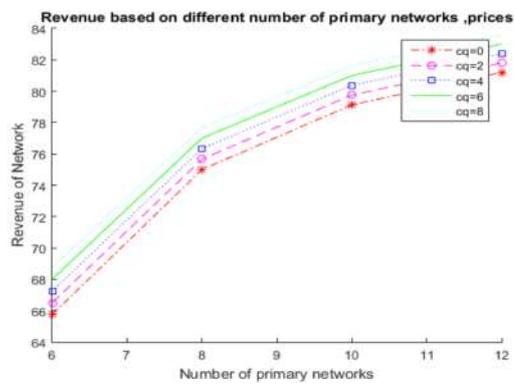


FIGURE 11.23: Κέρδος με βάση τον αριθμό πρωτευόντων δικτύων και των τιμών  $cq$ .

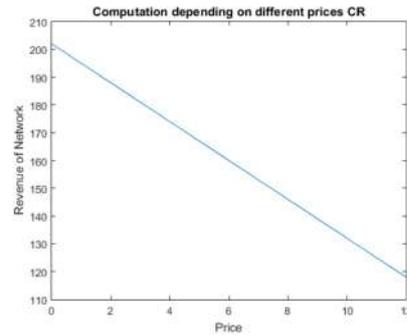


FIGURE 11.24: Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_l$ ,  $\theta = 0$

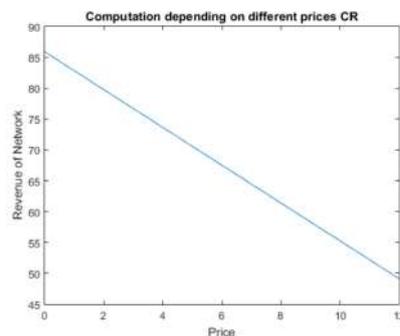


FIGURE 11.25: Συνολικό Κόστος με βάση διάφορες τιμές  $c_l$ ,  $\theta = -1$

Στο Σχήμα 11.23 παρατηρείται αύξηση του κέρδους κατά την αύξηση του αριθμού των χρηστών διότι, ο CR BS θα αγοράσει περισσότερο φάσμα από το πρωτεύον δίκτυο, όταν τα άλλα πρωτεύοντα δίκτυα έχουν υψηλότερες τιμές, αλλά ακόμα αγοράζει περισσότερο φάσμα από τα δίκτυα με χαμηλότερη τιμή. Έτσι, τα έσοδα αυξάνουν και υπάρχει περισσότερη ζήτηση φάσματος.

Μελέτη Εφικτότητας για την παράμετρο υποκατάστασης φάσματος  $\theta = 0$

Στα πειράματα, που πραγματοποιήθηκαν για το μοντέλο CR, το  $\theta$ , δηλαδή η παράμετρος υποκατάστασης φάσματος έχει την τιμή  $\theta = 0$ . Αυτό σημαίνει ότι οι μονάδες FBS και MSU δεν αλλάζουν εντός του φάσματος.

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

Από τα σχήματα είναι κατανοητό ότι και στις δύο περιπτώσεις, όσο αυξάνεται η τιμή τόσο μειώνεται το συνολικό κέρδος του δικτύου. Παράλληλα, όμως, παρατηρείται ότι στην περίπτωση, όπου το  $\theta = 0$  και οι μονάδες FBS ή MSUS δε 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 δε διαμοιράζεται και με τον τρόπο αυτό μπορεί να προσφερθεί περισσότερο φάσμα προς διάθεση για πώληση.

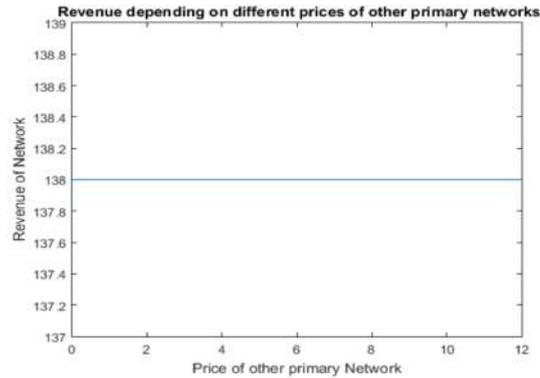
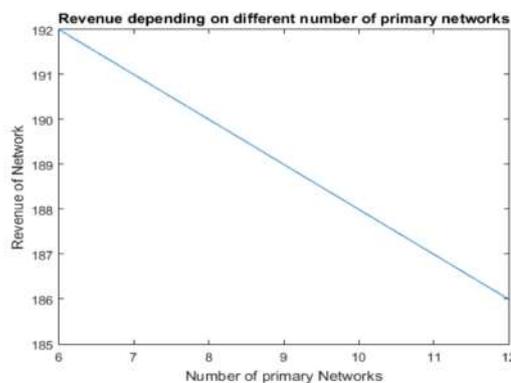
FIGURE 11.26: Κέρδος του δικτύου με βάση διάφορες τιμές  $c_q$ .

FIGURE 11.27: Κέρδος με βάση των αριθμό πρωτευόντων δικτύων.

Επιπλέον, εξετάζεται το συνολικό κέρδος του πρωτεύοντος δικτύου για τις διάφορες τιμές των άλλων πρωτευόντων δικτύων  $c_q$ .

Από το Σχήμα 11.26 παρατηρείται ότι το συνολικό κέρδος του δικτύου παραμένει σταθερό για οποιαδήποτε αλλαγή της τιμής των λοιπών πρωτευόντων δικτύων. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει, διότι το φάσμα δε διαμοιράζεται στα λοιπά πρωτεύοντα δίκτυα και επομένως, η τιμή τους δεν επηρεάζει το συνολικό κέρδος του δικτύου.

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

Από το Σχήμα 11.27 παρατηρείται μικρή μείωση στο συνολικό κέρδος του δικτύου κατά την αύξηση του αριθμού των πρωτευόντων δικτύων, άρα και των femtocells και των δευτερευόντων χρηστών.

Επιπρόσθετα, το κέρδος, που προκύπτει από το δίκτυο σε σχέση με τις τιμές  $c_l$  και  $c_q$ . Στα πειράματα αυτά, οι τιμές αυξάνουν ταυτόχρονα. Στο Σχήμα 11.28 φαίνεται ότι όταν δύο τιμές αυξάνουν τότε το εισόδημα του δικτύου επίσης, αυξάνει και φτάνει σε μία μεγάλη τιμή.

Το κέρδος του δικτύου υπολογίζεται με βάση τη σχέση με την παράμετρο μεταφοράς ενέργειας  $h_{lk}$ . Το Σχήμα 11.29 δείχνει ότι οι τιμές της ενεργειακής

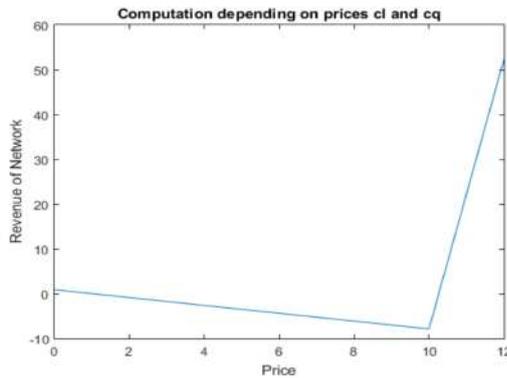


FIGURE 11.28: Κέρδος με βάση τις παραμέτρους  $c_l$  και  $c_q$ .

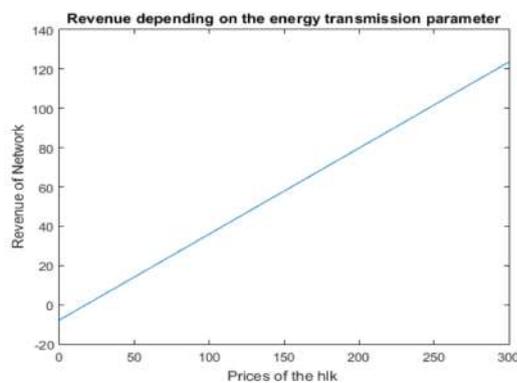


FIGURE 11.29: Κέρδος με βάση των αριθμό πρωτευόντων δικτύων.

απόδοσης αυξάνουν και το ίδιο συμβαίνει και με το κέρδος του δικτύου.

Η CR τεχνολογία, λοιπόν, είναι μία μορφή ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να ανιχνεύσει έξυπνα ποια κανάλια επικοινωνίας είναι σε χρήση και ποια δεν είναι. Έτσι, βελτιστοποιείται η χρήση του διαθέσιμου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων και ελαχιστοποιείται τις παρεμβολές. Η σπουδαιότητα CR εναπόκειται κυρίως στη δυνατότητα δημιουργίας 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 CR έχουν τη δυνατότητα να αποφεύγουν σενάρια παρεμβολής ραδιοσυχνοτήτων. Με την ανίχνευση της διαθεσιμότητας του καναλιού αποφεύγουν το μπλοκάρισμα με δυναμική και προληπτική μετάβαση σε κανάλια υψηλότερης ποιότητας, ιδιότητα η οποία, οδηγεί στην καλύτερη εξυπηρέτηση, αλλά και βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσίας Quality of Service (QoS). Επιπλέον, η τεχνολογία του CR μπορεί να προσφέρει στα δίκτυα 5G ευφυΐα, αποδοτικότητα, προσαρμοστικότητα καθώς και συνειδητότητα.

Παραμένει ανοιχτό ζήτημα η αναζήτηση των ζωνών συχνοτήτων, οι οποίες είναι κατάλληλες για την εφαρμογή CR. Έτσι λοιπόν, το ερευνητικό ενδιαφέρον πρέπει να στραφεί προς το σχεδιασμό υλικού (hardware) και λογισμικού (software) για CR. Ένας ακόμη τομέας, ο οποίος πρέπει να ερευνηθεί, είναι η ανάπτυξη μοντέλων και αλγορίθμων για τα CR δίκτυα, καθώς και σχετικών πρωτοκόλλων, όπως επίσης και

η αξιολόγηση και η μέτρηση των διαφορετικών μοντέλων. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός ευέλικτων δικτύων επικοινωνιών αποτελούμενων από **CR** τερματικά.



## Chapter 12

# Millimeter Wave (mmWave)

Τα τελευταία χρόνια, έχει επισημανθεί μια τεράστια αύξηση των ροών βίντεο ανάμεσα στους χρήστες κοινωνικών δικτύων, οι οποίοι μοιράζονται τις ιστορίες τους χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο φάσμα. Επιπλέον, όλο και περισσότερες συσκευές συνδέονται με τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Σύμφωνα με μελέτες, μέχρι το 2025, περισσότερα από 75 δισεκατομμύρια συσκευές θα συνδέονται καθημερινά στο δίκτυο, συμπεριλαμβανομένου και οικιακών συσκευών, όπως ψυγεία, πλυντήρια, κάμερες, συστήματα ασφαλείας, θερμαντικά, ψυκτικά σώματα κλπ. Οι τεχνολογίες 5G συμβάλλουν καθοριστικά προς αυτήν την κατεύθυνση. Ειδικότερα, η τεχνολογία IoT πρόκειται να συνδέσει πολλές οικιακές συσκευές με το κινητό τηλέφωνο των χρηστών, καθιστώντας την απομακρυσμένη διαχείριση των συσκευών μία καθημερινή πρακτική και πραγματικότητα.

Από την άλλη πλευρά, οι χρήστες έχουν γίνει πιο απαιτητικοί και χρειάζονται κάλυψη στα πιο απομακρυσμένα μέρη, που μέχρι πρότινος ήταν αδιανόητη ακόμα και η συνδεσιμότητα κλήσεων. Επιπλέον, απαιτούν ποιότητα εμπειρίας QoE και ζητούν προηγμένες υπηρεσίες, όπως πλοήγηση στο διαδίκτυο, εφαρμογές αλληλεπίδρασης κ.α. Οι τηλεπικοινωνιακές εταιρείες καλούνται να επενδύσουν σημαντικά ποσά στην ανάπτυξη δικτύων σε κάθε απομακρυσμένη περιοχή, πολλές φορές ακόμα και με δορυφορικά μέσα, κάτι το οποίο καθιστά την ανάπτυξη τέτοιων δικτύων ιδιαίτερα δαπανηρή. Οι πάροχοι ακόμα χρειάζεται να αποκομίζουν κέρδη από τα δίκτυα και να χρησιμοποιούν εξοπλισμό από προηγούμενες επενδύσεις με στόχο να επιτυγχάνουν το μέγιστο δυνατό κέρδος. Το γεγονός αυτό υποστηρίζει την υιοθέτηση φθηνών τεχνολογιών και την αποφυγή νέων επενδύσεων.

Οι πόροι, που απαιτούνται για την κάλυψη των απαιτήσεων των μελλοντικών τεχνολογιών, δηλαδή των 5G και εξής δεν είναι άμεσα διαθέσιμοι. Ως εκ τούτου, οι φορείς εκμετάλλευσης θα πρέπει να βρουν τρόπους, μεθόδους και λύσεις για να αυξήσουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης (BW) και την κάλυψη χωρίς να αυξήσουν σημαντικά το κόστος του δικτύου. Μια ιδέα θα ήταν η **virtualization** του διαθέσιμου εύρους ζώνης με χρήση τεχνικών NFV και η εύρεση φθηνών και εύκολων τρόπων για τη χρήση περισσότερων πηγών. Επιπλέον, τεχνολογίες που είναι σε θέση να αναδιανείμουν τους πόρους δικτύου, όπως μικροκυψέλες, δίκτυα SDN, αποτελούν (Akyildiz, Nie, et al., 2016) κλειδιά για την ενεργοποίηση του 5G.

Το Millimeter Wave (mmWave) θα μπορούσε, επίσης, να είναι μια πιθανή λύση δικτύωσης, που θα μπορούσε να βοηθήσει στην ανακατανομή του BW και την επαναχρησιμοποίηση των πόρων με πιο αποδοτικό τρόπο από πλευράς κόστους και απόδοσης. Σήμερα, οι συχνότητες Mid Band κατανέμονται για την κινητή δικτύωση, δηλαδή οι συχνότητες, που βρίσκονται ανάμεσα στα 3,7-24 GHz. Μεγαλύτερες συχνότητες 30-300 GHz δε χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες και

δεν είναι δεσμευμένες εκτός από μερικές πολύ μικρές περιοχές. Ως εκ τούτου, το μη χρησιμοποιούμενο φάσμα φαίνεται απαραίτητο να δημοπρατηθεί και να καταστεί διαθέσιμο για δικτυακή χρήση. Το mmWave, λοιπόν, αποτελεί μία πιθανή προσέγγιση για τις ανάγκες αυτές, αφού καλύπτει τις συχνότητες μεταξύ 30-300 GHz, που δε χρησιμοποιούνται.

Η κατανομή μνήμης, που προτείνεται (Qiao, He, and Shen, 2016) διατηρεί αποτελεσματικά τη ροή βίντεο, όταν οι χρήστες κινητών τηλεφώνων και οι φορητοί υπολογιστές έχουν πολύ σύντομο χρόνο σύνδεσης για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση θα μπορούσε να βοηθήσει στην ενίσχυση των προβλημάτων ροής.

Αρκετά υπάρχοντα προβλήματα της επικοινωνίας mmWave, όπως, για παράδειγμα οι καιρικές συνθήκες, οι ισχυρές βροχές, ο σχηματισμός ακτινών πολλαπλών συστοιχιών, παρατίθενται στο (Pi and Khan, 2011). Το mmWave είναι μια πολύ ελπιδοφόρα λύση, καθώς προσφέρει ταχύτητες δεδομένων της τάξης των gigabit ανά δευτερόλεπτο (Wei et al., 2014). Τα 28 και 38 GHz θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από την επικοινωνία mmWave και θα μπορούσαν να παρέχουν το αχρησιμοποίητο αυτό φάσμα στις συσκευές. (Rappaport et al., 2013)

Το ψηφιακό Beamforming θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πάνω από την αναλογική μορφοποίηση ακτινών, έτσι ώστε η συνολική απόδοση του συστήματος να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. (Han et al., 2015) Το mmWave θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε 30-300 GHz του εύρους ζώνης (Peng Wang et al., 2015). Αυτό το γεγονός προσφέρει φάσμα. Μια άλλη αναφερθείσα πρόκληση της τεχνολογίας mmWave είναι ότι απαιτείται η διαδικασία της κατάρτισης δέσμης, έτσι ώστε ο πομπός και ο δέκτης να κατευθύνουν τις δέσμες τους η μία προς την άλλη. (Niu et al., 2015) 220m είναι η πραγματική ακτίνα κυψελών για τα 28GHz. Θα πρέπει να βρεθούν νέοι τρόποι χρήσης των κεραιών, καθώς το μικρό μήκος κύματος δεν θα καλυφθεί με τις σημερινές τεχνολογίες. (Sulyman et al., 2014) Το αχρησιμοποίητο εύρος ζώνης θα μπορούσε να καταστεί διαθέσιμο για χρήση με ή χωρίς άδεια χρήσης. (Maccartney et al., 2015)

Με βάση την έρευνα του παρόντος κεφαλαίου έχουν προκύψει δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και έγκριτα συνέδρια: (mmWave)

### 12.0.1 Αρχιτεκτονική

Σήμερα, το μεσαίο εύρος ζώνης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στις τηλεπικοινωνίες, αφού είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον και αποτελεί το βασικό φάσμα εκπομπής. Οι απαιτήσεις της 5G για καινοτόμες υπηρεσίες, ροές βίντεο και συνδεσιμότητα συσκευών δείχνουν ότι η αποκλειστική χρήση ζωνών χαμηλής συχνότητας είναι μη ρεαλιστική για το μέλλον και θα χρειαστεί περισσότερο BW για να εξακολουθούν να λειτουργούν σωστά και αποδοτικά τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι πρέπει να ληφθούν νέα μέτρα προσαρμοσμένα στις σημερινές και στις μελλοντικές διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες.

Το mmWave συνιστά μια ιδανική λύση, καθώς περιλαμβάνει όλες τις συχνότητες μεταξύ 30-300GHz. Αυτά τα αχρησιμοποίητα συχνотικά μέρη θα μπορούσαν να καλύψουν τους στόχους του 5G. Τα σήματα στις ζώνες αυτές δε μπορούν να μεταδοθούν σε τεράστια απόσταση. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με το (Sulyman et al., 2014), η πραγματική ακτίνα κυψελών για αυτή την τεχνολογία

είναι περίπου 220m. Η τεχνολογία είναι σε θέση να μεταδίδει ένα ισχυρότερο σήμα όταν υπάρχει Line of Sight (LOS), ενώ μπορεί επίσης να μεταδίδει, όταν δεν υπάρχει LOS λόγω της αντανάκλασης του σήματος στα κτίρια και σε άλλες επιφάνειες.

Το κύριο πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν καλύπτει τις εσωτερικές περιοχές, καθώς το σήμα αποδυναμώνεται με τη διέλευση από τοίχους και άλλες στερεές επιφάνειες και συμπαγή υλικά. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να εγκατασταθούν αρκετοί αναμεταδότες και σημεία πρόσβασης για μετάδοση στις εισόδους των διαφόρων εμπορικών και οικιστικών κτιρίων. Ως εκ τούτου, οι δαπάνες για την ενσωμάτωση σε αυτή την αρχιτεκτονική δικτύου πρόκειται να αυξηθούν σε μεγάλο βαθμό, καθώς θα απαιτηθεί νέος εξοπλισμός για να αντισταθμιστεί η αποδυνάμωση, που παρατηρείται στο σήμα, όταν αυτό καλείται να μεταδοθεί μέσα σε διάφορες επιφάνειες.

Το mmWave προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα (Peng Wang et al., 2015), όπως:

- Υψηλό κέρδος και ισχύ εξόδου
- Εγγυημένα υψηλά ποσοστά δεδομένων
- Μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων με ισχυρή αντοχή στις καιρικές συνθήκες
- Χαμηλού κόστους γρήγορη πολιτική αδειοδότησης
- Οικονομικές λύσεις υψηλής αποδοτικότητας

Επιπλέον, εμφανίζει πολλά μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν, αφού εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας (Peng Wang et al., 2015):

- Ατμοσφαιρική εξασθένιση
- Ομίχλη & σύννεφα
- Βροχή
- Σκόνη και μικρά σωματίδια
- Κρύσταλλοι πάγου και χιόνι
- Φύλλωμα δέντρων

Στα δίκτυα 5G θα πρέπει να εισαχθούν πολλές διαφορετικές τεχνολογίες. Η υπάρχουσα υποδομή των μακροκυψελών και των μικροκυψελών δεν θα είναι αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, ιδίως σε χώρους με πληθυσμιακή συμφόρηση. Ως εκ τούτου, απαιτείται υπερβολική πυκνότητα για την κάλυψη των απαιτήσεων του δικτύου. Η εικόνα 12.1 υποδεικνύει τη βασική αρχιτεκτονική μικρών κυψελών, που υπάρχει σήμερα .

Σε αυτές τις αρχιτεκτονικές, υπάρχουν πολλές μικρές κυψέλες (picocells, femtocells, κλπ.) Σε μία μόνο μικροκυψέλη και επίσης, πολλές μικροκύψελες μέσα σε μία μακροκυψέλη. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στην επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος και των ζωνών συχνοτήτων, επιτρέποντας σε όλο και περισσότερους χρήστες να συνδεθούν στο διαδίκτυο και να απολαύσουν μια αυξημένη και ποιοτική εμπειρία δικτύωσης. Οι Ultra-dense αρχιτεκτονικές περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό ουσιαστικών προνομίων για τους χρήστες και τους παρόχους, όπως:

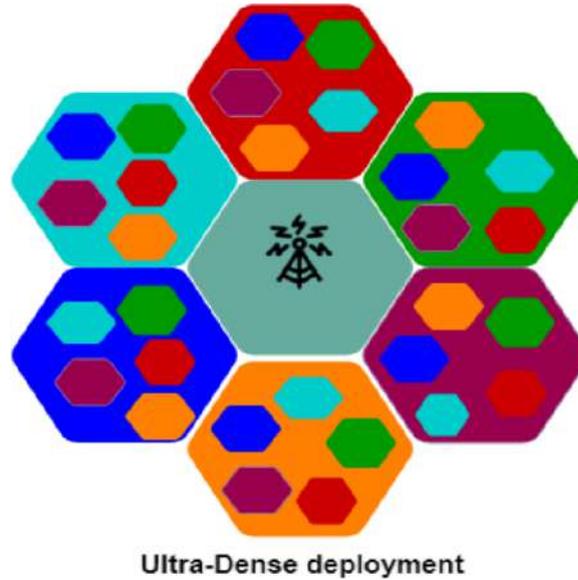


FIGURE 12.1: Το βασικό μοντέλο της Ultra-dense αρχιτεκτονικής σε δίκτυα 5G.

- Αύξηση της απόδοσης
- Βελτίωση κάλυψης
- Υποχρεώσεις βελτίωσης
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας

	helpful	harmful
<b>internal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Υψηλά ποσοστά μεταφοράς δεδομένων</li> <li>2. Γρήγορη αδειοδότηση και χαμηλού κόστους άδεια</li> <li>3. Υψηλή απόδοση</li> <li>4. Αχρησιμοποίητες συχνότητες</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ατμοσφαιρικές συνθήκες</li> <li>2. Καιρικές συνθήκες</li> <li>3. Μικροσωματίδια</li> <li>4. Μεγάλο κόστος ενοικίασης των υψηλών συχνοτήτων</li> <li>5. Δέντρα και άλλοι περιβαλλοντικοί παράγοντες</li> </ol>

<b>external</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. έλευση της <b>5G</b></li> <li>2. Αδυναμία των χαμηλότερων συχνοτήτων να καλύψουν τις ανάγκες</li> <li>3. Νέα προϊόντα και υπηρεσίες στη <b>5G</b></li> <li>4. Μεγάλη διαφοροποίηση σημερινών δικτύων σε σχέση με τα μελλοντικά δίκτυα</li> <li>5. Περιγραφή του δικτύου και εκμετάλλευση πληροφοριών από τη χρήση και τη στατιστική του δικτύου</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Επένδυση σε νέο εξοπλισμό από τους παρόχους</li> <li>2. Δυσπιστία παρόχων για το κέρδος από τις επενδύσεις</li> <li>3. Δυσπιστία παρόχων για τα πλεονεκτήματα</li> <li>4. Δεν έχουν αποζημιωθεί ακόμα από παλαιότερες επενδύσεις και τεχνολογίες</li> </ol>
-----------------	--	---

### 12.0.2 Μαθηματικό μοντέλο

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρατίθενται τα οικονομικά μοντέλα. Δύο διαφορετικά μοντέλα αναλύονται. Υπάρχει ένα μοντέλο σχετικό με τις μακρο-κυψέλες και ένα άλλο σχετικά με τις μικρο-κυψέλες. Ο συνδυασμός των δύο μοντέλων διαφοροποιείται σχετικά με τις παραμέτρους, που παρατίθενται ακολούθως, στην οποία αναλύονται η τιμολόγηση και τα κόστη μίας πλήρους αρχιτεκτονικής.

Σε κάθε οικονομικό μοντέλο υπάρχουν συγκεκριμένα κόστη. Αναλυτικά, υπάρχουν κόστη κεφαλαίου και λειτουργικά κόστη. Το κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνει όλα τα κόστη, που χρειάζονται εκ των προτέρων κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης του δικτύου. Αυτά τα έξοδα περιλαμβάνουν όλα τα είδη κόστους, τα οποία σχετίζονται με τη δόμηση των δικτύων, όπως για παράδειγμα: απαραίτητο εξοπλισμό, τοποθεσία κλπ. Από την άλλη πλευρά, τα λειτουργικά κόστη σχετίζονται άμεσα με τα έξοδα, τα οποία απαιτούνται από την καθημερινή λειτουργία των συστημάτων, διαχείρισης και συντονισμού. Το συνολικό κόστος είναι η συνολική ποσότητα χρημάτων, οι οποίες απαιτείται να πληρωθούν με σκοπό να αποκτήσουν μία συγκεκριμένη τεχνολογία και προκύπτει από το κόστος κεφαλαίου και το λειτουργικό κόστος.

Με σκοπό να περιγραφούν τα χρήματα, που απαιτούνται να επενδυθούν εκ των προτέρων και ως αποτέλεσμα, απαιτείται να αποκτηθούν σε μορφή δανείου. Με βάση την εξίσωση 4.1, η ανάπτυξη των οικονομικών μοντέλων δομείται ως ακολούθως:

### 12.0.3 Μακροκυψέλες

Με βάση την (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois, 2014), τα δίκτυα μακροκυψέλης αναλύονται. Οι δαπάνες για τις μακροκυψέλες χωρίζονται σε CAPEX και OPEX, και τα δύο αυτά είδη κόστους καταβάλλονται από τους παρόχους δικτύου, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία των σταθμών βάσης των δικτύων.

## Κόστος Κεφαλαίου

Το eNB, δηλαδή οι μακροκυβελικοί σταθμοί βάσης αποτελούνται από δικτυακό εξοπλισμό. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει επιπλέον κόστη σχετικά με το δίκτυο πυρήνα και τη δρομολόγηση των πακέτων πυρήνα. Το τμήμα του δικτύου καλείται Evolved Packet Core (EPC). Συνεπώς, τα κόστη για έναν eNB είναι  $C_{eNB} + C_{EPC}$ .

Άρα, αυτά τα κόστη πρέπει να πληρώνονται ετησίως, επειδή αυτή η ποσότητα αποτελεί μία επένδυση. Κατά συνέπεια, το ετήσιο κόστος προέρχεται από το συνδυασμό του κόστους eNB, που συνδυάζεται με 4.1. Υποθέτοντας ότι χρειάζονται  $N$  σταθμοί βάσης, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για να κατασκευαστεί το δίκτυο, το CAPEX του μακροκυβελικού μοντέλου δίνεται από:

$$C_{MACRO}^{CAPEX} = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} N(C_{eNB} + C_{EPC}) \quad (12.1)$$

## Λειτουργικό Κόστος

Στην περίπτωση των μακροκυβελών, το OPEX περιλαμβάνει όλα τα έξοδα συντήρησης, λειτουργίας και μίσθωσης του συστήματος. Όλα αυτά τα έξοδα εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του σχηματισμού της μακροκυβελικής δομής. Το  $C_{running}$  περιλαμβάνει όλα τα έξοδα για τη λειτουργία μίας μόνο τοποθεσίας, παράλληλα με την κατανάλωση ρεύματος, τις δραστηριότητες υποστήριξης και συντήρησης εντός και εκτός του χώρου αυτού. Το  $f_{site}$  είναι ένας συντελεστής, που θεωρείται γραμμικά ανάλογος με το CAPEX και επίσης, το ποσό  $C_{site}$  περιλαμβάνει κάθε άλλο κόστος τοποθεσίας. Υποθέτοντας ότι  $N_{eNB}$  BS είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του δικτύου, οι συνολικές δαπάνες, που πρέπει να καταβληθούν για την ορθή λειτουργία του συστήματος δίδονται από τη σχέση:  $NC_{running} = f_{site}C_{MACRO}^{CAPEX} + N_{eNB}C_{site}$

Επιπλέον, υπάρχουν αρκετές δραστηριότητες και εξοπλισμός backhauling για να συνδεθεί το δίκτυο με τη βασική υποδομή, οι οποίες σημειώνονται με το συντελεστή  $C_{backhaul}$ . Προκειμένου να μισθωθεί το απαιτούμενο εύρος ζώνης (BW), το κόστος  $f_{BW}$  πρέπει να καταβληθεί. Το κόστος αυτό είναι γραμμικά ανάλογο προς το κόστος ανακαίνισης. Λαμβάνοντας υπόψη όλα αυτά τα κόστη θεωρείται η ακόλουθη εξίσωση για το OPEX του macrocell  $C_{MACRO}^{OPEX}$ :

$$C_{MACRO}^{OPEX} = f_{site}C_{MACRO}^{CAPEX} + N_{eNB}C_{site} + f_{BW}BW \\ + f_{site} \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} N_{eNB}(C_{eNB} + C_{EPC}) \\ + NC_{site} + f_{BW}BW$$

Συνολικό κόστος

Το συνολικό κόστος για τη μακροκυβελική υποδομή δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 C_{MACRO}^{TCO} &= C_{MACRO}^{CAPEX} + C_{MACRO}^{OPEX} = \\
 &= (f_{site} + 1)C_{MACRO}^{CAPEX} + N_{eNB}C_{site} + f_{BW}BW \\
 &= (f_{site} + 1) \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} N_{eNB} (C_{eNB} \\
 &\quad + C_{EPC}) + N_{eNB}C_{site} + f_{BW}BW
 \end{aligned}$$

#### 12.0.4 Small cells

Με βάση την (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois, 2014), αναλύεται το κόστος του μικροκυβελικού δικτύου. Οι δαπάνες των μικροκυβελών χωρίζονται στα κεφάλαια CAPEX και OPEX και τα δύο πληρώνονται από το νοικοκυριό στο οποίο είναι χτισμένο το μικρό κελί.

Κόστος Κεφαλαίου

Το Home evolved NodeB (HeNB), δηλαδή η μικρο-κυψέλη, αποτελείται από τον εξοπλισμό του δικτύου και την ανάπτυξη του. Επιπλέον, υπάρχουν δαπάνες σχετικά με τη δρομολόγηση και τη διεπαφή της κίνησης προς και από το κεντρικό δίκτυο. Πρόκειται για το μοναδικό CAPEX, που συμβαίνει στην περίπτωση των μικρών κυβελών, αγνοώντας ότι το κόστος της απαραίτητης ευρυζωνικής σύνδεσης υπάρχει ήδη, καθώς σήμερα τα περισσότερα κτίρια κατοικιών, πολυκατοικιών, σπιτιών κλπ. διαθέτουν σύνδεση στο διαδίκτυο. Σχεδόν παντού υπάρχει ευρυζωνική σύνδεση στο διαδίκτυο. Το κόστος αυτό μπορεί να αντιπροσωπεύεται από τον συντελεστή  $C_{i/f}$ , ο οποίος και στην περίπτωση αυτή θεωρείται ως επένδυση και επομένως χρησιμοποιείται ξανά η εξίσωση ???. Επιπλέον, εάν ληφθεί υπόψη ένα σύνολο  $N_{HeNB}$  HeNBs, τότε το CAPEX για τις μικρο κυψέλες  $C_{small}^{CAPEX}$  δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{small}^{CAPEX} = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} N_{HeNB} (C_{i/f}) \quad (12.2)$$

Λειτουργικό Κόστος

Στην περίπτωση αυτή, το OPEX περιλαμβάνει όλα τα έξοδα συντήρησης, λειτουργίας και μίσθωσης των μικροκυβελών. Αναλυτικά, το κόστος αυτό δεν περιλαμβάνει τη μίσθωση χώρου, αφού οι μικροκυψέλες τοποθετούνται σε θέση της επιλογής του συνδρομητή, η κατανάλωση ενέργειας καταβάλλεται από τον συνδρομητή στο λογαριασμό του, η υποστήριξη/συντήρηση και η ευρυζωνική σύνδεση δεν υπολογίζονται, δεδομένου ότι ο συνδρομητής είναι ήδη σε θέση να τους παράσχει. Ως αποτέλεσμα, το  $C_{small}^{OPEX}$  αναπτύσσεται ως συντελεστής  $f_{site}$ , ο οποίος είναι γραμμικά

ανάλογος του  $C_{small}^{CAPEX}$ :

$$C_{small}^{OPEX} = f_{site} C_{small}^{CAPEX} \\ f_{site} \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} N_{HeNB} C_{i/f}$$

Συνολικό Κόστος

Το συνολικό κόστος από τις μικρο-κυψέλες δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{small}^{TCO} = C_{small}^{CAPEX} + C_{small}^{OPEX} = \\ = (f_{site} + 1) C_{small}^{CAPEX} \\ = (f_{site} + 1) \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} N_{HeNB} C_{i/f}$$

### 12.0.5 Παράμετροι

Σε αυτή την ενότητα, επιλέγονται οι παράμετροι των προτεινόμενων μοντέλων. Ο πίνακας 12.1 περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους και τις μεταβλητές, που σχετίζονται με τα μοντέλα τιμολόγησης. Αυτές οι μεταβλητές βασίζονται σε προηγούμενες ερευνητικές δραστηριότητες (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Anastasia Kollia, et al., 2017), (Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois, 2014). Επιπλέον, επιλέγονται εύρη τιμών για την SA, η οποία χρησιμοποιείται για την πειραματική ανάλυση.

Η SA είναι μια πολύ γνωστή τεχνική, στην οποία αναλύονται διάφορες παράμετροι ενός προϊόντος και παρουσιάζεται αν επηρεάζουν ή όχι ένα οικονομικό μοντέλο και ποιον αντίκτυπο έχουν αυτά τα μοντέλα. Αυτή η τεχνική βοηθά στην αναγραφή των παραμέτρων του δικτύου, που πρέπει να μειωθούν και έτσι οδηγεί την επιστημονική έρευνα στην αντίστοιχη κατεύθυνση. Υπάρχουν δύο τύποι ανάλυσης, η μονόδρομη και η αμφίδρομη SA. Στην πρώτη περίπτωση, μόνο μία παράμετρος μεταβάλλεται και έτσι υποδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο αυτή ατομικά επηρεάζει το μοντέλο. Στη δεύτερη περίπτωση, συνδυάζεται ένα σύνολο πολλαπλών παραμέτρων για να δείξει πώς επηρεάζουν ταυτόχρονα και συνολικά το δεδομένο μοντέλο.

Για την ανάλυση αυτή, θεωρείται ότι οι τιμές στο μέλλον, θα μπορούσαν είτε να αυξηθούν έως και 75% είτε να μειωθούν έως και 75%. Αυτή η θεώρηση χρησιμοποιείται εφόσον πολλοί οικονομικοί παράγοντες, π.χ. οικονομική ύφεση, αύξηση των τιμών ή τεράστια τεχνολογική έκρηξη, θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην αύξηση των τιμών των παραγόντων. Επιπλέον, η τεχνολογική πρόοδος και η ενσωμάτωση προγραμματιζόμενης λογικής ή η υιοθέτηση πιο προσιτών τρόπων ανάπτυξης για κάθε στοιχείο του δικτύου θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των τιμών.

TABLE 12.1: Παράμετροι κόστους TCO και μεταβλητές συστήματος για τη mmWave αρχιτεκτονική.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Πεδίο τιμών
$C_{eNB}$	Κόστος κεφαλαίου για ένα eNB	1000 €	[250, 1750]
$C_{EPC}$	Κεφαλαιακό κόστος δικτύου πυρήνα για την ανάπτυξη ενός ενιαίου eNB	110	[55, 165]
$C_{HeNB}$	Κόστος κεφαλαίου για ένα HeNB	110 €	[55, 165]
$N_{eNB}$	Αριθμός απαιτούμενων eNBs	1	[1, 10]
$N_{HeNB}$	Αριθμός απαιτούμενων HeNBs	50	[10, 100]
$i$	Ετήσιο επιτόκιο	6 %	[2, 12]
$n$	Διάρκεια του σχεδίου δόσεων	10	[1, 20]
$f_{st}$	Γραμμικός συντελεστής	0.8	[0.2, 1.2]
$C_{site}$	Κόστος τοποθεσίας	3100 €	[775, 5425]
$C_{run}$	Έξοδα λειτουργίας	892.5 €	[223, 1561]
$C_{backhaul}$	Backhaul για μικροκύματα	3800 €	[2850, 5950]
$C_{backhaul}$	Backhaul για οπτικές ίνες	4800 €	[3600, 8400]
$f_{BW}$	Κόστους γραμμικού συντελεστή του ετήσιου κόστους backhaul με την παρεχόμενη BW - εκφρασμένη σε ευρώ/Gbps	1170	[877, 2047]
$BW$	MBS Bandwidth για τη διασύνδεση ενός ιστοτόπου	10Gbps	[5, 20]
$BW$	mmWave Εύρος ζώνης για τη διασύνδεση ενός ιστοτόπου	135Gbps	[30, 300]

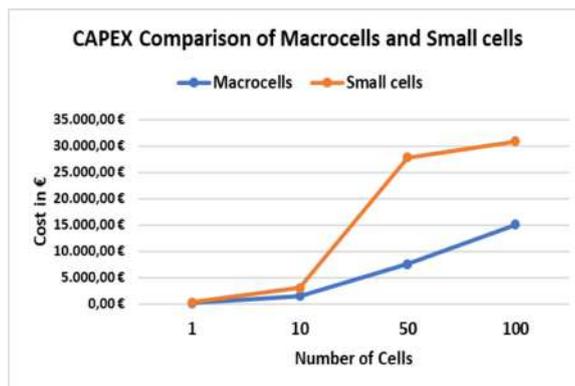


FIGURE 12.2: Το κόστος κεφαλαίου σε σχέση με το πλήθος των κυψελών για το μοντέλο mmWave.

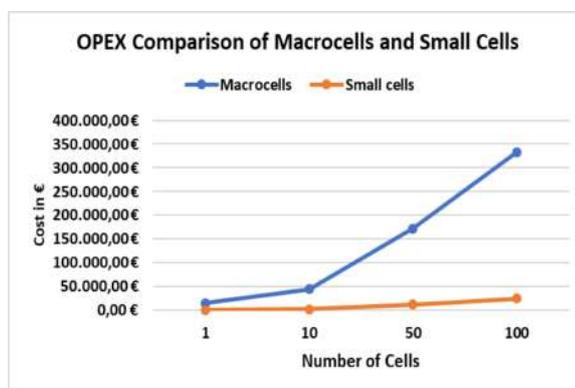


FIGURE 12.3: Το λειτουργικό κόστος σε σχέση με το πλήθος των κυψελών για το μοντέλο mmWave.

### 12.0.6 Ανάλυση κόστους & Μελέτη Εφικτότητας

Στο Σχήμα 12.2 φαίνεται η σχέση, που υπάρχει μεταξύ του κόστους κεφαλαίου και του πλήθους των κυψελών. Είναι προφανές ότι το κόστος κεφαλαίου επηρεάζει σημαντικά τη δημιουργία των μικρο-κυψελών και όχι τόσο των μακροκυψελών. Εντούτοις, και στις δύο περιπτώσεις τα κόστη αυξάνουν με την προσθήκη κυψελών στην αρχιτεκτονική. Από τη μία πλευρά, σε ό,τι αναφορά στις μικρο-κυψέλες αυτό επιβαρύνει το χρήστη, που τις εγκαθιστά στο χώρο του, ενώ για τις μακροκυψέλες αυτό επιβαρύνει τον πάροχο της συνολικής υποδομής.

Στο Σχήμα 12.3 φαίνεται η σχέση, που υπάρχει μεταξύ του λειτουργικού κόστους και του πλήθους κυψελών. Είναι προφανές ότι το λειτουργικό κόστος είναι αυξημένο για την περίπτωση των μακροκυψελών. Και για τις μικρο-κυψέλες και για τις μακρο-κυψέλες η αύξηση στο πλήθος κυψελών αυξάνει και το λειτουργικό κόστος. Εντούτοις, η αύξηση αυτή είναι πολύ σημαντικότερη για τις μικρο-κυψέλες σε σχέση με τις μακρο-κυψέλες. Το λειτουργικό κόστος επιβαρύνει τον πάροχο στις μακροκυψέλες και τον χρήστη στις μικροκυψέλες.

Το συνολικό κόστος σε σχέση με το πλήθος των κυψελών φαίνεται στο Σχήμα 12.4. Το συνολικό κόστος για μικρό αριθμό κυψελών είναι συγκρίσιμο για τις μικρο-κυψέλες και τις μακρο-κυψέλες. Και στις δύο περιπτώσεις, τα συνολικά κόστη είναι ανάλογα με την αύξηση του πλήθους των κυψελών. Το συνολικό κόστος αποτελεί

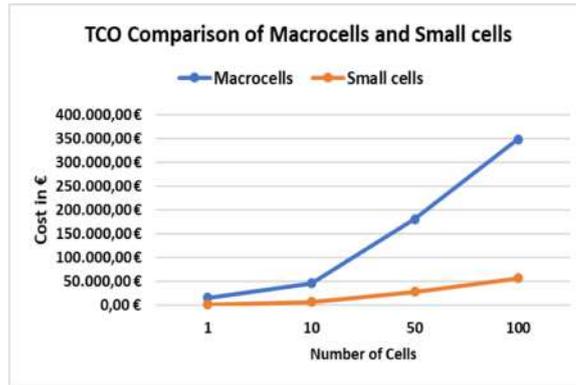


FIGURE 12.4: Το συνολικό κόστος σε σχέση με το πλήθος των κυψελών για το μοντέλο mmWave.

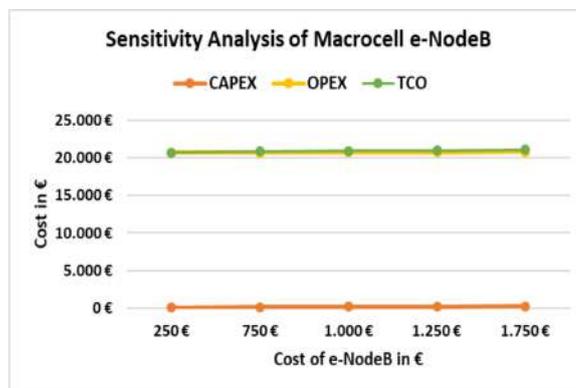


FIGURE 12.5: Μελέτη εφικτότητας για τα Macrocell σε σχέση με τα κόστος CAPEX, OPEX and TCO με κριτήριο το κόστος του eNB.

το άθροισμα των μικρο-κυψελών και των μακροκυψελών. Το κόστος των μικρο-κυψελών επιβαρύνει τον κάτοχο της συσκευής, ενώ το κόστος των μακρο-κυψελών επιβαρύνει τον πάροχο.

### 12.0.7 Μελέτη Εφικτότητας Μίας Μεταβλητής

Στο Σχήμα 12.5 είναι προφανές ότι η παράμετρος eNodeB, δηλαδή το κόστος για τον κόμβο δεν επηρεάζει σημαντικά κανένα από τα διαφορετικά είδη κόστους, δηλαδή το κόστος κεφαλαίου, το λειτουργικό κόστος και το συνολικό κόστος. Παρατηρείται ότι η αύξηση του κόστους του κόμβου δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό κανένα είδους κόστος.

Στο Σχήμα 12.6 παρατίθεται η σχέση του εύρους ζώνης στις Μακρο-κυψέλες. Το κόστος κεφαλαίου δεν επηρεάζεται καθόλου από το εύρος ζώνης. Σε αντίθεση το OPEX και το συνολικό κόστος αυξάνονται εκθετικά με πολύ γρήγορο ρυθμό, ιδίως όταν το εύρος ζώνης ξεπερνά τα 50GBps. Αυτό είναι φυσικό, αφού το εύρος ζώνης ενοικιάζεται και συνεπώς, είναι λογικό ότι πληρώνεται από τον πάροχο, έτσι ώστε να παρέχεται και να χρησιμοποιείται όπου είναι ανάγκη. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο. Άλλωστε, οι συχνότητες οι μεγαλύτερες των 30GBps, που είναι mmWave, είναι πιο ακριβές και είναι προφανές ότι αυξάνουν σημαντικά αυτά τα είδη του κόστους.

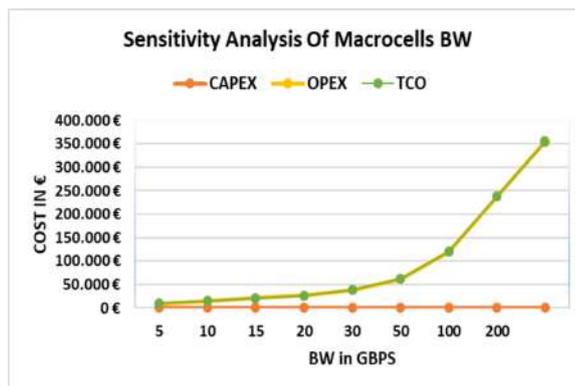


FIGURE 12.6: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το εύρος ζώνης.

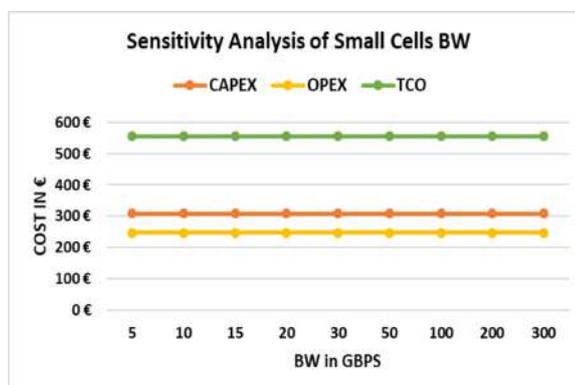


FIGURE 12.7: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της μικροκυψέλης σε σχέση με το εύρος ζώνης.

Στο Σχήμα 12.7 παρατίθεται η σχέση του εύρους ζώνης με τα διάφορα είδη κόστους των μικρο-κυψελών. Παρατηρείται ότι το εύρος ζώνης δεν έχει επίδραση στο μοντέλο. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς, τα *small cells* λειτουργούν στις οικίες των ανθρώπων και όσων κατέχουν συσκευές όπως *picocells*, *femtocells* κλπ. με χρήση του ήδη υπάρχοντος φάσματος. Δεν απαιτείται συνεπώς, ενοικίαση νέου ή περισσότερου φάσματος. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι το εύρος ζώνης είναι μία παράμετρος σημαντική για τις μακροκυψέλες και όχι για τις μικροκυψέλες.

Στο Σχήμα 12.8 παρατηρείται η σχέση, που έχει το κόστος EPC της μακροκυψέλης με τα CAPEX, OPEX και TCO. Το EPC δεν επηρεάζει καθόλου τα επί μέρους κόστη στην περίπτωση των Μακροκυψελών. Δεν παρατηρείται διακύμανση σε κανένα από τα CAPEX, OPEX και TCO.

Στο Σχήμα 12.9 απεικονίζεται η σχέση του κόστους EPC της μικροκυψέλης με τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO. Το EPC επηρεάζει όλα τα κόστη και μάλιστα είναι ανάλογο της αύξησης της τιμής του EPC. Για τη μικροκυψέλη το EPC διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο και αποτελεί παράγοντα, που υποδεικνύει όλα τα κόστη. Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα το EPC επηρεάζει σημαντικά το κόστος των *small cells*, αλλά δεν έχει κάποια επίδραση στο κόστος των *Macrocells*.

Το  $f_{BW}$  είναι μια παράμετρος, που επηρεάζει τα *Macrocells*. Αυτή η παράμετρος (Σχήμα 12.10) επηρεάζει το *Macrocell* OPEX και το TCO. Δεν επηρεάζει το CAPEX. Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, το BW μισθώνεται και συνεπώς

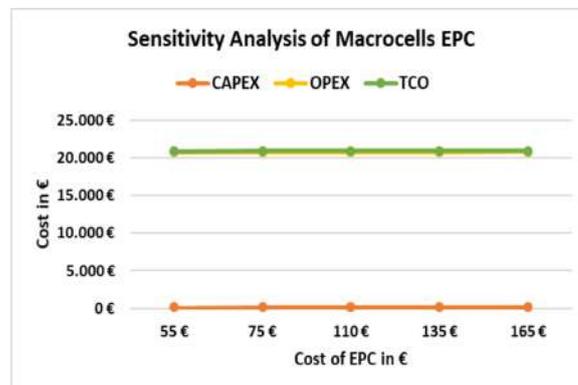


FIGURE 12.8: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το EPC.

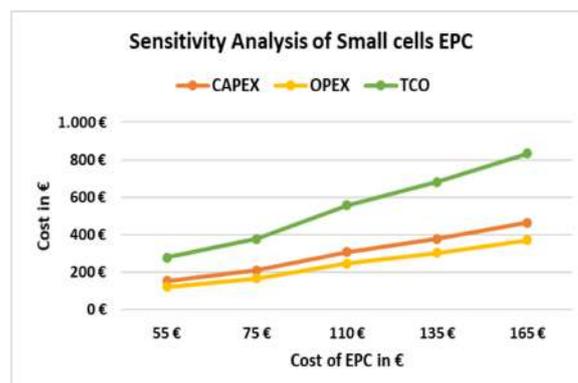


FIGURE 12.9: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το EPC.

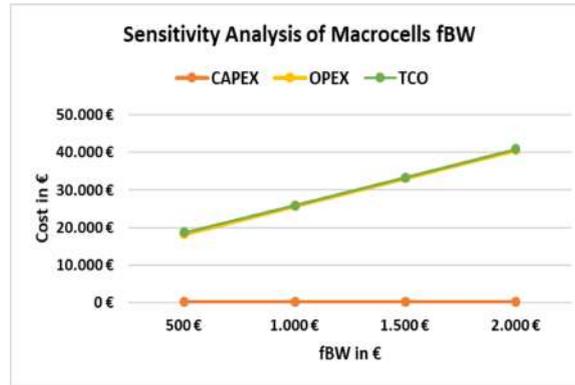


FIGURE 12.10: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το  $f_{BW}$ .

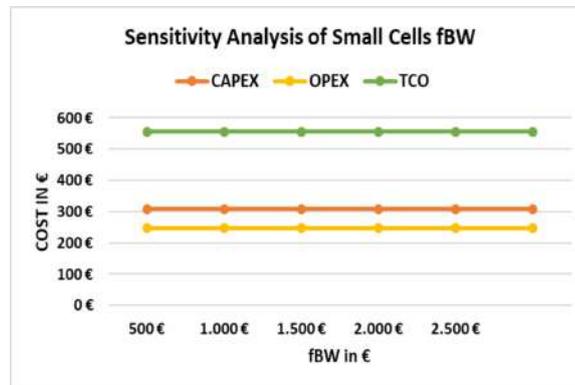


FIGURE 12.11: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το  $f_{BW}$ .

τα χρήματα δαπανώνται κάθε χρόνο για να διατίθεται το BW και να χρησιμοποιείται. Από την άλλη πλευρά, το CAPEX δεν επιβαρύνεται από τα κόστη του εύρους ζώνης, καθώς το BW δε λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης του δικτύου, αλλά αποκτάται στη συνέχεια.

Σχετικά με το  $f_{BW}$  σε σχέση με τις μικροκυψέλες, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 12.11, δεν επηρεάζει ούτε το CAPEX, ούτε το OPEX ούτε το TCO. Το BW δε φαίνεται να έχει καμία συμμετοχή στο σχηματισμό του κόστους της μικροκυψέλης.

Το Σχήμα 12.12 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ  $f_{site}$  και των διαφόρων τύπων κόστους. Το  $f_{site}$  είναι μια παράμετρος, που έχει να κάνει με τη θέση των κυψελών στο δίκτυο. Σύμφωνα με το σχήμα, δεν επηρεάζει κανένα τύπο κόστους. Έτσι, δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους Macrocell.

Το ποσό  $f_{st}$  είναι τα χρήματα, που σχετίζονται με τη θέση των κυψελών εντός του δικτύου. Η σχέση, που έχει με τα διάφορα είδη κόστους απεικονίζεται στο Σχήμα 12.13. Παρόλο που το ποσό αυτό δεν επηρεάζει το CAPEX, επηρεάζει το OPEX και το TCO. Το OPEX και το TCO είναι γραμμικά ανάλογα με την αύξηση του  $f_{st}$ .

Σύμφωνα με το Σχήμα 12.14, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό, τόσο μεγαλύτερο είναι το CAPEX, το OPEX και το TCO. Φαίνεται ότι όλα τα είδη του κόστους επηρεάζονται από το  $i$ . Επομένως, το  $i$  είναι υψίστης σημασίας και θα

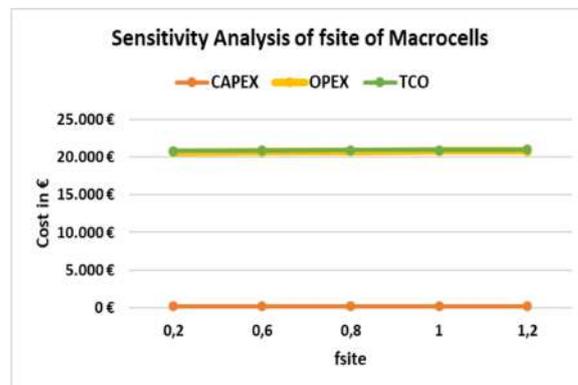


FIGURE 12.12: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το  $f_{st}$ .

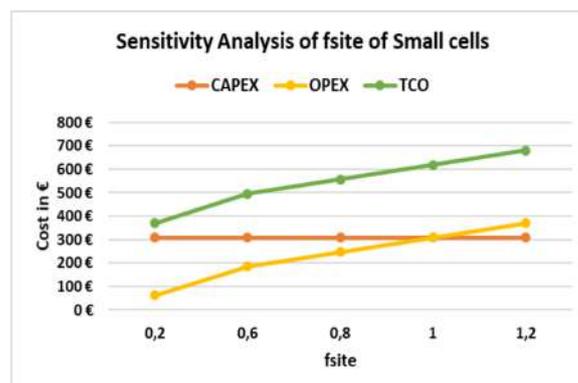


FIGURE 12.13: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το  $f_{st}$ .

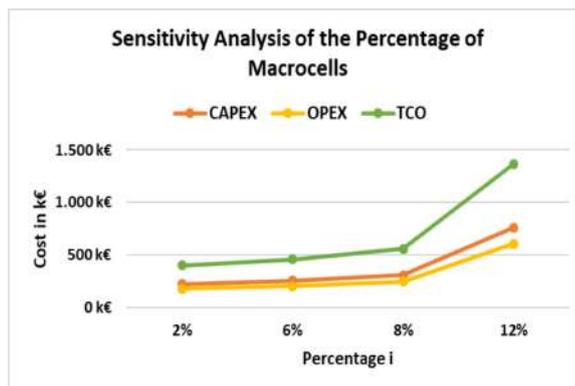


FIGURE 12.14: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το  $i$ .

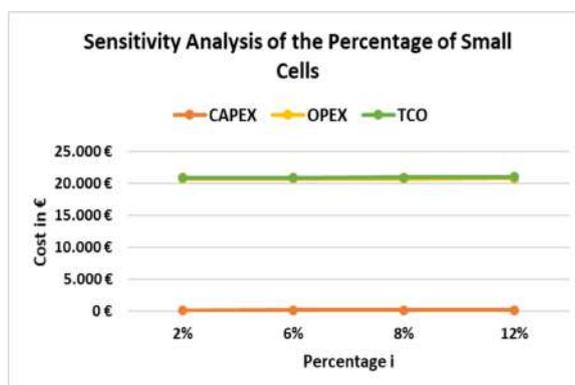


FIGURE 12.15: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το  $i$ .

πρέπει να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα για τη βιωσιμότητα των μοντέλων.

Σύμφωνα με το Σχήμα 12.15, το  $i$  δεν επηρεάζει κανένα κόστος CAPEX, OPEX και TCO.

Το επενδυτικό σχέδιο για την Μακροκυψελική Υποδομή δίνεται από την παράμετρο  $n$ . Επηρεάζει όλα τα είδη δαπανών CAPEX, OPEX και TCO. Παρόλο που, όταν τα έτη επενδύσεων είναι λιγότερα από 5, τότε όλα τα είδη των δαπανών αυξάνονται πραγματικά και τα επόμενα χρόνια μειώνονται. Αυτό είναι φυσιολογικό δεδομένου ότι η επένδυση δεν έχει χρόνο να αποζημιώσει τον πάροχο σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 12.16 αναλύεται η σχέση μεταξύ των ετών της επένδυσης και των διαφορετικών τύπων κόστους.

Το επενδυτικό σχέδιο για τις μικροκυψέλες δίνεται από την παράμετρο  $n$ . Επηρεάζει όλα τα είδη δαπανών CAPEX, OPEX και TCO. Παρόλο που, όταν τα έτη επενδύσεων είναι λιγότερα από 5, τότε όλα τα είδη των δαπανών αυξάνονται πραγματικά και τα επόμενα χρόνια μειώνονται. Αυτό είναι φυσιολογικό δεδομένου ότι η επένδυση δεν έχει χρόνο να αποζημιώσει το χρήστη σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 12.17 αναλύεται η σχέση μεταξύ των ετών της επένδυσης και των διαφορετικών τύπων κόστους.

Το Σχήμα 12.18 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ  $C_{site}$  και του κόστους. Το  $C_{site}$  είναι μια παράμετρος, που έχει να κάνει με το κόστος των κυψελών στο δίκτυο. Αυτός ο παράγοντας επηρεάζει πολύ το OPEX και το TCO. Επηρεάζει πολύ το

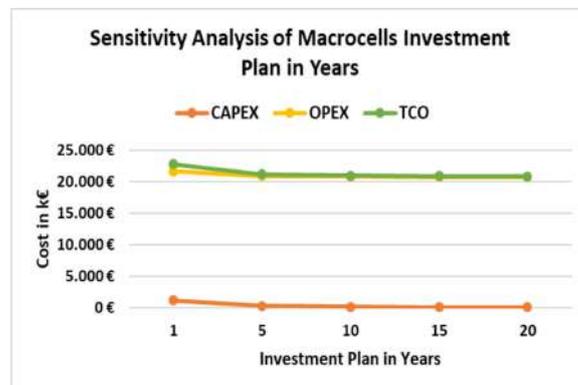


FIGURE 12.16: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με τα έτη επένδυσης  $n$ .

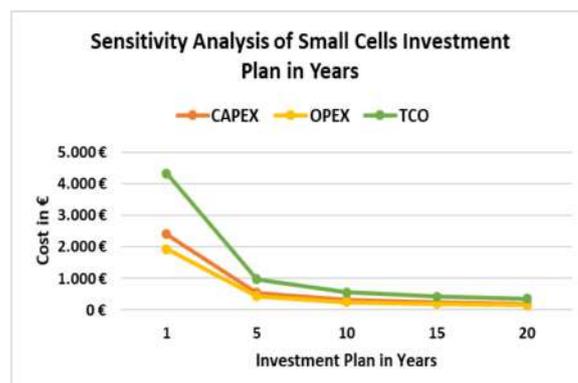


FIGURE 12.17: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με τα έτη επένδυσης  $n$ .

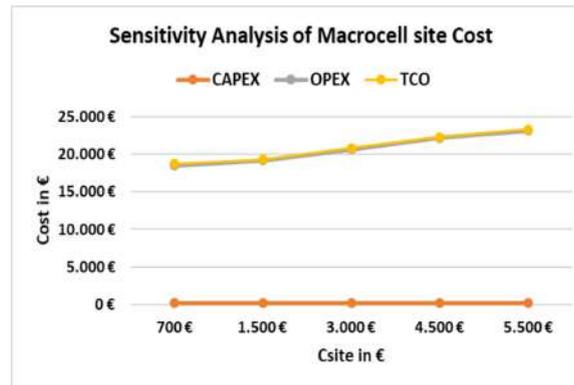


FIGURE 12.18: Μελέτη εφικτότητας για τα κόστη CAPEX, OPEX και TCO της Μικροκυψέλης σε σχέση με το  $C_{site}$ .

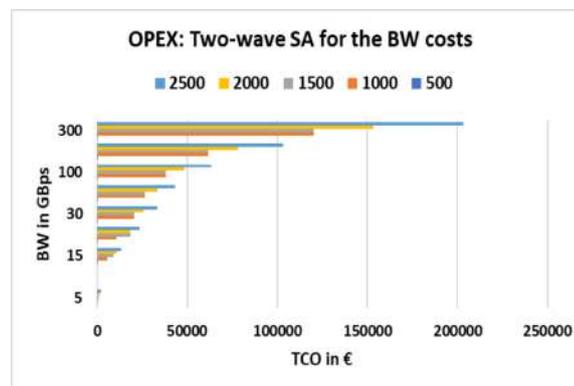


FIGURE 12.19: Μελέτη εφικτότητας για το OPEX της Μακροκυψέλης σε σχέση με το  $f_{BW}$  και  $BW$ .

σχηματισμό κόστους Macrocell, καθώς επιφέρει μεγάλο OPEX, που συμμετέχει στη διαμόρφωση του κόστους. Από την άλλη πλευρά, δεν φαίνεται να έχει αντίκτυπο στο CAPEX του μοντέλου.

### 12.0.8 Μελέτη Εφικτότητας Δύο Μεταβλητών

Στην αμφίδρομη SA επιλέγεται ένα σύνολο παραμέτρων, που επηρεάζουν το συνολικό μοντέλο. Οι παράμετροι  $BW$  είναι αυτές, που επιλέγεται να σχετιστούν. Το  $BW$ , που επιλέχθηκε προκαλεί τεράστιο OPEX στην περίπτωση Macrocellular, έτσι είναι πολύ σημαντικό να διερευνηθεί διεξοδικά. Όπως αποδείχθηκε στην παραπάνω ανάλυση, το CAPEX δεν επηρεάζεται όταν οι παράμετροι του μοντέλου κυμαίνονται. Έτσι, δεν εξετάζεται σε αυτή την ανάλυση.

Το σχήμα 12.19 υποδεικνύει τη συμπεριφορά του μοντέλου για το OPEX όταν οι δύο παράμετροι  $BW$  και  $f_{BW}$  κυμαίνονται. Φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι παράμετροι, τόσο μεγαλύτερο είναι το OPEX. Συνεπώς, θα πρέπει να καταβληθούν μεγάλες προσπάθειες ώστε να μην αυξηθούν αυτές τις δαπάνες.

Ως αποτέλεσμα, γίνεται φανερό ότι, καθώς το OPEX επηρεάζεται από τις παραμέτρους  $BW$ , επηρεάζεται και το TCO. Το σχήμα 12.20 υποδεικνύει τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων TCO και  $BW$  του μοντέλου.

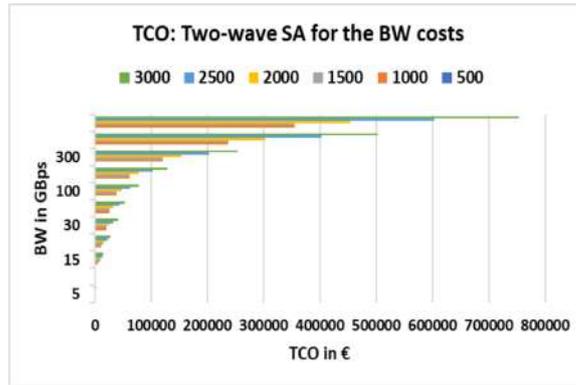


FIGURE 12.20: Μελέτη εφικτότητας για το TCO της Μακροκυψέλης σε σχέση με το  $f_{BW}$  και  $BW$ .

Παρουσιάστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα, που αφορούν στις Μακροκυψέλες και τις μικροκυψέλες. Μια ανάλυση σχετικά με τις συχνότητες mmWave και Mid-Band εξετάστηκε. Το μακροκυψελικό μοντέλο επηρεάζεται κυρίως από το BW, το επιτόκιο, τα έτη επενδύσεων και τις παραμέτρους τοποθεσίας. Το BW και οι παράμετροι τοποθεσίας επηρεάζουν το OPEX του μοντέλου, ενώ το επιτόκιο και τα έτη επένδυσης επηρεάζουν το CAPEX, το OPEX και το TCO του μοντέλου. Για την περίπτωση της Μικροκυψέλης, το EPC και τα έτη επένδυσης επηρεάζουν όλα τα είδη δαπανών, ενώ οι παράμετροι της τοποθεσίας επηρεάζουν κυρίως το OPEX.

Συνοψίζοντας, η μελλοντική ερευνητική δραστηριότητα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη μείωση του κόστους OPEX και των δύο μοντέλων και σε τρόπους μείωσης του υψηλού κόστους του BW για τις τιμές mmWave.



## Chapter 13

# Συμπεράσματα

### 13.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τη CISCO (CISCO, 2019), έως το 2023, η 5G ταχύτητα θα αυξηθεί 13 φορές περισσότερο σε σχέση με τις σημερινές δικτυακές ταχύτητες. Ακόμα, 5,7 δισεκατομμύρια άτομα θα διαθέτουν έξυπνα τηλέφωνα με σύνδεση στο διαδίκτυο, το οποίο θα αποτελεί περίπου το 71% του συνολικού πληθυσμού της γης. Στο 5G δίκτυο θα είναι συνδεδεμένες περίπου 2 δισεκατομμύρια συσκευές. Ακόμα, 50% των συνδεδεμένων συσκευών θα συνδέονται σε δίκτυα IoT. Η κίνηση, που θα επιφέρουν οι συσκευές στα δίκτυα 5G είναι 3 φορές πιο αυξημένη σε σχέση με την ταχύτητα, που επιφέρει στις μέρες μας το 4G. Επιπρόσθετα, θα δημιουργηθούν περισσότερα από 628 εκατομμύρια WiFi hotspots, δηλαδή 4 φορές περισσότερα από τα σημερινά. Επίσης, αναμένεται ότι στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη μέχρι το 2023:

- θα υπάρχουν περίπου 388 εκατομμύρια χρήστες του Διαδικτύου (78% του περιφερειακού πληθυσμού), από 323 εκατομμύρια (το 65% του πληθυσμού) το 2018.
- 404 εκατομμύρια θα αριθμούν οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας (81% του περιφερειακού πληθυσμού), από 393 εκατομμύρια (79% του περιφερειακού πληθυσμού) το 2018.
- 2 δισεκατομμύρια δικτυωμένες συσκευές / συνδέσεις, από 1,2 δισεκατομμύρια, που αριθμούσαν το 2018.
- 48% όλων των δικτυωμένων συσκευών θα είναι συνδεδεμένες σε κινητό δίκτυο και το 52% θα είναι σε ενσύρματο ή συνδεδεμένο μέσω Wi-Fi.
- Η μέση σταθερή ευρυζωνική ταχύτητα θα φτάσει τα 87,7 Mbps, που αντιπροσωπεύει αύξηση 2,5 φορές από το 2018 (35,0 Mbps).
- μέση ταχύτητα κινητής τηλεφωνίας, θα αγγίξει τα 43.0 Mbps, που αντιπροσωπεύει αύξηση 3,3 φορές από το 2018 (12,9 Mbps).
- Οι μέσες ταχύτητες Wi-Fi από τις κινητές συσκευές της θα προσεγγίζουν τα 53 Mbps, που αντιπροσωπεύει 2,3 φορές αύξηση από το 2018 (22,6 Mbps).

Ακόμα, η πιο ραγδαία αυξανόμενη κατηγορία δικτυακών μεταδόσεων θα είναι η M2M και θα έπονται τα έξυπνα τηλέφωνα. Μάλιστα σε ό,τι αναφορά στην M2M περισσότερες από 14 δισεκατομμύρια συσκευές αναμένεται να είναι συνδεδεμένες

μεταξύ τους έως το 2023. Αυτό θα φέρει μία μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων, παράλληλα όμως θα προκαλέσει και φόρτο στο δίκτυο.

Στο μέλλον, οι τηλεπικοινωνίες θα πάρουν μία νέα τροπή, αφού ακόμα και συχνότητες της τάξεως των THz θα είναι διαθέσιμες και θα χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών (**ert**). Έχει αποδειχτεί ότι το 5G χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από τα 4G στα μεγάλα bitrates, αλλά περισσότερη για βασικές εργασίες, σύμφωνα με (*5G uses less power than 4G at peak bitrates, but more for basic tasks n.d.*).

Η ύπαρξη των περιβαλλοντικών προβλημάτων, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η αύξηση των αέριων ρύπων, η αύξηση της τρύπας του όζοντος θα ωθήσουν ούτως ώστε οι νέες τηλεπικοινωνιακές δομές να μειώνουν αισθητά τις εκπομπές αερίων. Σύμφωνα με μελέτες στον τομέα (**Standard, 2017**), οι παγκόσμιες εκπομπές αέριων ρύπων λόγω των τηλεπικοινωνιών μέχρι το 2030 αναμένεται να είναι 1.25Gt CO<sub>2</sub>, δηλαδή 1.97% των συνολικών εκπομπών αέριων ρύπων. Ενώ αν δεν λαμβάνονταν μέτρα για την περιστολή τους θα ήταν περισσότερο από 12Gt CO<sub>2</sub>, δηλαδή 10 φορές περισσότερο σε σχέση με αυτά, που θα προκαλούνται. Συνεπώς, θα πρέπει να σημειωθούν περαιτέρω μελέτες, ώστε να καθίστανται όλο και πιο πράσινες οι σύγχρονες τεχνολογίες.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι οι σημερινές υπέρχουσες δικτυακές λύσεις δεν είναι σε θέση να καλύψουν τις δικτυακές ανάγκες και θα είναι πολύ ισχνές και αδύναμες με τη μορφή, στην οποία βρίσκονται σήμερα χωρίς να υποστούν κάποια τροποποίηση. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό να σημειωθούν τα βασικότερα προβλήματα, τα οποία έχουν προκύψει και τα οποία μπορεί να απαντηθούν από τις συγκεκριμένες τεχνολογίες. Από την άλλη μεριά, οι πάροχοι κινητών υπηρεσιών δεν επιθυμούν διόλου να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές, αν πρώτα δε λάβουν τα πλήρη οφέλη από τις επενδύσεις, που έχουν ήδη πραγματοποιήσει για τα δίκτυα προηγούμενων γενιών. Σε αυτή τη Διδακτορική Διατριβή συντελέστηκαν μελέτες εφικτότητας και ευαισθησίας των δικτυακών παραμέτρων των διαφόρων τεχνολογιών και εξάχθηκαν συμπεράσματα σχετικά με το ποια από αυτά τα συστατικά αποτελούν τους πιο υψηλού κόστους παράγοντες και κατά συνέπεια, οφείλουν να μειωθούν για την ευρύτερη υιοθέτηση των δικτύων και των αντίστοιχων τεχνολογιών.

Οι μικροκυψέλες επηρεάζονται από την πυκνότητα με την οποία εμφανίζονται στην αρχιτεκτονική, το περιοδικό επιτόκιο και το κόστος για τους σταθμούς βάσης. Με την αύξηση των παραπάνω παραμέτρων, το συνολικό κόστος των μικροκυψελών επίσης, αυξάνεται με γραμμικά ανάλογο τρόπο.

Η τεχνολογία DAS από την άλλη, επηρεάζεται κυρίως από παραμέτρους, όπως το εύρος ζώνης, η εφαρμογή και το κόστος της θέσης και της τοποθεσίας, επειδή στην περίπτωση αυτή το συνολικό κόστος είναι γραμμικά ανάλογο με την αντίστοιχη αύξηση. Ο εξοπλισμός, η κατανάλωση ενέργειας και η καλωδίωση (**back-hauling**) συνιστούν δαπάνες, οι οποίες δεν επηρεάζουν το συνολικό κόστος DAS. Το τροποποιημένο σενάριο DAS, σχετίζεται με την ενσωμάτωση NFVs στη βασική DAS αρχιτεκτονική, για το ίδιο δίκτυο οι τιμές είναι πραγματικά χαμηλότερες και οι τεχνολογικές προτάσεις, που εισάγονται βοηθούν στην επιτυχία της παροχής ενός φτηνού και όμως αποτελεσματικού δικτύου.

Το κόστος για το σταθμό βάσης BS επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και τα δύο μοντέλα. Αναλυτικά, τόσο τα παραδοσιακά όσο και τα μοντέλα SDN επηρεάζονται

από το κόστος **BS** και ειδικότερα από τις ακόλουθες παραμέτρους κόστους: **BS** ανά  $km^2$ , τον αριθμό των σταθμών. Από την άλλη, ο αριθμός των **BS** ανά **SBS** και ο αριθμός των **SBS** δεν επηρεάζουν τα μοντέλα. Η κατανάλωση ενέργειας είναι επίσης μια άλλη σημαντική παράμετρος. Αν και φαίνεται ότι όλα τα έξοδα κατανάλωσης ενέργειας δεν επηρεάζουν πολύ τα μοντέλα τιμολόγησης σε ό,τι αναφορά στο συνολικό κόστος, έχουν ένα ισχυρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο και επιδεινώνουν το περιβάλλον των τηλεπικοινωνιών. Έτσι, σήμερα υπάρχει ένας αγώνας για να βελτιωθεί η κατάσταση του πλανήτη, και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας.

Η Μελέτη εφικτότητας στο μοντέλο **SDN** ανέφερε ότι το κόστος του **OPEX**, δηλαδή το κόστος για τη λειτουργία και το συντονισμό του συστήματος και την καθημερινή διαχείριση και λειτουργία του **SDN** δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το συνολικό μοντέλο τιμολόγησης και, κατά συνέπεια, καθίσταται μια βιώσιμη λύση για τους φορείς εκμετάλλευσης και τους παρόχους να υιοθετήσουν αυτή τη λύση και να επωφεληθούν από όλα τα θεμελιώδη οφέλη της τεχνολογίας. Αν και το **OPEX** παραμένει χαμηλό και συμβάλλει σε μεγάλα κέρδη για τις εταιρείες, καθώς τα χαμηλότερα ποσά, που πληρώνονται σε αυτές τις δαπάνες θα δημιουργούν ετήσιο πλεόνασμα κάθε χρόνο, το **CAPEX** είναι ακόμα υψηλό και ως εκ τούτου πρέπει να μειωθεί. Πολλά στοιχεία του δικτύου, που αντιπροσωπεύονται από τις αντίστοιχες παραμέτρους κόστους, όπως το **HSS**, το **S-GW**, το **P-GW**, το **oVS** και το **OFController** συνεισφέρουν αποφασιστικά στο κόστος **CAPEX** και το αυξάνουν.

Τα τεχνοοικονομικά μοντέλα **MIMO** και **DAS** συγκρίθηκαν και προέκυψε ότι και οι δύο τεχνολογίες φαίνονται ελπιδοφόρες λύσεις για τις απαιτήσεις της τεχνολογίας **5G**. Από την άλλη, το υψηλό τους κόστος καθιστά δύσκολη για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους να στραφούν προς αυτές. Σύμφωνα με την ανάλυση, που αναπτύχθηκε παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι η **DAS** είναι φθηνότερη από ότι η τεχνολογία **MIMO** για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, αλλά από την άλλη πλευρά, για μικρότερες λύσεις η **MIMO** φαίνεται να είναι πιο οικονομική. Ακόμα, συνάχθηκε το συμπέρασμα ότι τα λειτουργικά έξοδα, όπως το κόστος διαχείρισης και η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να μειωθούν για να διασφαλιστεί η αποδοτικότητα κόστους των μοντέλων **MIMO**.

Η **CR** είναι μια πολύ αποτελεσματική και τεχνολογικά καινοτόμα ιδέα, αλλά θα μπορούσε επίσης να είναι πολύ ευνοϊκή από μια τεchnο-οικονομική προοπτική. Επιπλέον, η έξυπνη λογική **CR** μπορεί να βοηθήσει τα **femtocells** και τους δευτερεύοντες χρήστες / **BS** για να αποκτήσουν κέρδη από τη χρήση του δικτύου και, ως εκ τούτου, περιορίζουν το κόστος των υπηρεσιών των υποδομών ή ακόμα ενισχύουν τη δημιουργία νέων εισοδημάτων. Το **SDN** προσφέρει πολλά θεμελιώδη οφέλη για τα δίκτυα και το συνολικό κόστος υιοθέτησης δεν είναι απαγορευτικό για έναν πάροχο. Επιπλέον, προσφέρει μια ολόκληρη νέα προσέγγιση στο δίκτυο και ο συνδυασμός με το **NFV** συμβάλλει ενεργά στη μείωση του κόστους. **mmWave** συχνότητες θα αποτελέσουν μία πιθανή λύση για τα **5G** δίκτυα και εξής. Για το σκοπό αυτό πρέπει να λυθούν τα βασικά ζητήματα αγοράς συχνοτήτων και φυσικά, του διαγωνισμού για την απόκτησή τους.

Πολλές διαφορετικές τεχνολογίες, π.χ. **SDN**, **NFV**, **Cognitive Radio**, **MIMO**, **Massive MIMO**, **IoT**, **D2D**, **Cloud Computing**, **mmWave** κ.λπ., είναι απαραίτητες και ως εκ τούτου είναι βασικές τεχνολογίες για την 5η γενιά του κινητών δικτύων. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν μεγάλα πλεονεκτήματα και υπάρχουν πολλά ανοικτά

ζητήματα, που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Οι τεχνολογίες mmWave και MIMO φαίνεται να έχουν αυξημένα OPEX. Οι τεχνολογίες MIMO και D2D χρειάζονται βελτιστοποιημένη χρήση και μεγαλύτερο BW, για να λειτουργήσουν. Η κατανάλωση ισχύος των IoT, D2D και MIMO πρέπει να μειωθεί. Επιπλέον, το CAPEX όλων των τεχνολογιών θα πρέπει να περιοριστεί έτσι ώστε, οι πάροχοι να υιοθετούν αυτές τις τεχνολογίες.

Η κυκλική οικονομία προβάλλεται ολοένα και περισσότερο ως αναγκαία και σίγουρα αποτελεί μία πρόκληση για τις τεχνολογίες. Κάτι τέτοιο, δεν επιβάλλεται μόνο από τους παρόχους για οικονομικούς λόγους, αλλά είναι απαραίτητο και για οικολογικούς λόγους. Είναι δηλαδή σημαντικό να αυξηθεί σημαντικά ο κύκλος ζωής των προϊόντων πριν αυτά καταλήξουν να αντικατασταθούν, έτσι ώστε να μειώνεται ενεργά ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των τηλεπικοινωνιών.

Οι τηλεπικοινωνίες αναμένεται να εξελιχθούν πάρα πολύ μέσα στα επόμενα έτη, μάλιστα, η εταιρεία Huawei ήδη ξεκινά έρευνα 6G για κινητά δίκτυα επικοινωνιών, που μπορεί να κινηθεί πολύ πέρα από τα smartphones. Η 6G προβλέπεται να αλλάξει θεμελιωδώς τη σχέση των ανθρώπων με την τεχνολογία. Ακόμα, η Huawei δεν αποτελεί τη μόνη εταιρεία, που ερευνά το 6G, το οποίο εκτιμάται ότι θα κυκλοφορήσει στη δεκαετία του 2030 (Weedon, n.d.).

## Chapter 14

# Μελλοντική έρευνα

Τα κινητά δίκτυα επικοινωνίας αποτελούν σήμερα πολύ σημαντικό τομέα της καθημερινής επικοινωνίας και αναμένεται να απασχολήσουν και στο μέλλον τους επιστήμονες και τις επιχειρήσεις, ενώ συνιστούν για τους χρήστες από τα πιο σημαντικά εναύσματα για πρόοδο και διευκολύνουν ιδιαίτερα τη ζωή και την καθημερινότητα. Παρόλο που σήμερα, έχουν ληφθεί πολλά μέτρα και οι κινητές επικοινωνίες έχουν εξελιχθεί ραγδαία και έχουν βελτιωθεί σημαντικά σε πολλά επίπεδα, εντούτοις, πολλά ανοιχτά θέματα εμφανίζονται και εγείρονται, τα οποία χρήζουν αντιμετώπισης.

### 14.1 Μελλοντική έρευνα

Σημειώνονται (Chiani, Paolini, and Callegati, 2018) τα πιο σημαντικά ζητήματα τα οποία εξακολουθούν και παραμένουν ανοιχτά στα 5G δίκτυα και χρειάζονται μεγαλύτερη έρευνα και μεγαλύτερη προσπάθεια για να αντιμετωπιστούν. Ακολούθως παρατίθενται τα ακόλουθα θέματα:

- **5G Κάλυψη:** η οποία επιδιώκεται να έχει αυξηθεί σημαντικά έως το 2027 και να καλύπτει το 90% σε κάποια μέρη, όπως για παράδειγμα στο Ηνωμένο Βασίλειο.
- **Νέες παρεχόμενες υπηρεσίες, οι οποίες παρέχονται:** Οι πόροι για τις υπηρεσίες αυτές είναι ιδιαίτερα απαιτητικές, όπως στα αυτοκίνητα χωρίς οδηγό, στους αισθητήρες συσκευών κλπ. και θα πρέπει να παρέχουν υψηλή ποιότητα υπηρεσίας, ώστε να είναι πολύ αξιόπιστες.
- **Προκλήσεις και προβλήματα για τα D2D:** Υπάρχουν ανοιχτά θέματα, τα οποία έχουν σχέση με την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ευάλωτη σε ό,τι αναφορά στην ιδιωτικότητα και σε επιθέσεις στο δίκτυο, καθώς είναι πιθανό να επιτεθούν κάποιοι και να αντλήσουν προσωπικά δεδομένα των χρηστών. Για παράδειγμα, στις IoT συσκευές είναι πιθανό ένας επιτιθέμενος να παρακολουθεί το εσωτερικό μίας οικίας.
- **Network slicing:** Είναι ανοιχτό το πως θα πραγματοποιηθεί ο τεμαχισμός του δικτύου και ποιες είναι οι πιο αποδοτικές μέθοδοι για να γίνει, ο πιο βέλτιστος τρόπος και πόσα slices είναι χρήσιμα και αποτελούν το πιο αποδοτικό πλήθος slices για το δίκτυο.

Ακόμα, χρειάζεται να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι απαραίτητες ερευνητικές δράσεις, προσεγγίσεις και προσπάθειες σε ό,τι αναφορά στο 6G, δηλαδή στην αμέσως επόμενη γενιά κινητών δικτύων επικοινωνίας στην ανάπτυξη και την υλοποίησή του. Οι επιστήμονες και οι ερευνητές πρέπει να είναι σε ετοιμότητα και να βρουν μεθόδους και λύσεις για να ικανοποιήσουν τις ακόμα υψηλότερες απαιτήσεις, που σημειώνονται σε αυτή τη γενιά κινητών δικτύων. Στα δίκτυα αυτά αναμένεται ότι: (Chiani, Paolini, and Callegati, 2018)

- Χρειάζονται δεδομένα της τάξεως των Exabytes.
- Απαιτείται να επιτευχθεί δικτυακή ευφυΐα σύμφωνα με την οποία το δίκτυο να μαθαίνει τις «συνήθειες» των χρηστών και να προσαρμόζεται μόνο του στις ανάγκες κάθε στιγμή.
- Σύντομη επαναχρησιμοποίηση φάσματος
- Βελτιωμένοι αισθητήρες
- Μεγαλύτερη διάρκεια μπαταρίας και εξοικονόμηση ενέργειας
- Κβαντικοί υπολογιστές και κβαντικά δίκτυα
- Έμφαση στην ασφάλεια, την ιδιωτικότητα, τη διαχείριση δεδομένων.
- Περισσότεροι εικονικοί πάροχοι

Σε ό,τι αναφορά στην παρούσα διατριβή, τα διάφορα πειράματα, τα οποία ολοκληρώθηκαν, ανέδειξαν κάποια ανοιχτά θέματα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη και να μειωθούν οι συνέπειές τους, ώστε να υιοθετηθούν ευρέως οι τεχνολογίες, που προτάθηκαν από τους παρόχους για τη βελτίωση των τηλεπικοινωνιών. Γενικά, υπάρχουν κάποια θέματα, τα οποία είναι απαραίτητα σημειώνονται σε πολλές από τις τεχνολογίες και πρέπει να μελετηθούν μελλοντικά.

- Πράσινες τεχνολογίες: όλες οι τεχνολογίες πρέπει να γίνουν πολύ πιο πράσινες, μίας και σήμερα ο πλανήτης είναι πολύ επιβαρυσμένος από εκπομπές αέριων ρύπων, ενώ καταναλώνεται ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι συνεπώς, αρκετά σημαντικό να μειωθεί σημαντικά ο εξοπλισμός και η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται για τα δίκτυα. Ακόμα θα είναι μία καλή ιδέα να εισαχθούν πιο οικολογικές λύσεις, όπως για παράδειγμα η υποστήριξη του εξοπλισμού με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον.
- Μείωση λειτουργικών δαπανών: Οι λειτουργικές δαπάνες επαναλαμβάνονται συνεχώς κάθε έτος και σχετίζονται με την καθημερινή λειτουργία του δικτύου, οπότε είναι σαφές ότι θα πρέπει να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό οι δαπάνες αυτές, ώστε τα δίκτυα να είναι οικονομικά βιώσιμα για κάθε τηλεπικοινωνιακό πάροχο.
- Έτη επένδυσης: Πρέπει να βρίσκεται το βελτιστοποιημένο διάστημα, σύμφωνα με το οποίο μία επένδυση σε νέα τεχνολογία/εξοπλισμό αναμένεται να προσδώσει τα μέγιστα και να μειώσει ενεργά το ρίσκο της επένδυσης.

- Εύρος ζώνης: Το εύρος ζώνης είναι απαραίτητο να επαναχρησιμοποιείται και να ανακατανέμεται.

Όσον αφορά στις υπέρ-πυκνές αρχιτεκτονικές, οι οποίες αποτελούνται από Femtocells, Picocells, Attocells κλπ., θα πρέπει να:

- Σημειωθεί το βέλτιστο πλήθος μικροκυψελών, που απαιτούνται.
- Το μέγιστο πλήθος χρηστών, που καλύπτει ικανοποιητικά κάθε μικρο-κυψέλη δεδομένου των νέων τηλεπικοινωνιακών αναγκών που θα προκύψουν μέσα στα επόμενα έτη.
- Πρέπει να αξιοποιηθούν προτεινόμενοι αλγόριθμοι, οι οποίοι να θέτουν αχρησιμοποίητες κυψέλες και μικρο-κυψέλες σε κατάσταση *idle*, ώστε να εξοικονομείται ενέργεια και να μειώνονται σημαντικά τα κόστη, που συνεπάγονται οι κυψέλες.

Όσον αφορά στις αρχιτεκτονικές DAS θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα θέματα:

- Το μέγεθος χώρων/πόλεων κλπ. για το οποίο το DAS, για το οποίο το DAS είναι κατάλληλο.
- Το βέλτιστο πλήθος κεραιών ανά δίκτυο/πόλη/χώρα/περιοχή κλπ.
- Η συμβολή της τεχνολογίας NFV και η ενσωμάτωσή της σε διάφορες δικτυακές συσκευές ώστε να βελτιώνεται σημαντικά η υποδομή.

Σε ό,τι αναφορά στην τεχνολογία SDN σημειώνονται βασικές προκλήσεις, οι οποίες είναι σημαντικό να απαντηθούν στις επόμενες γενιές κινητών δικτύων.

- Εύρεση βέλτιστου πλήθους σταθμών βάσης
- Συνδυασμός της τεχνολογίας SDN και NFV
- Υπηρεσίες, οι οποίες αναμένεται να προκύψουν με βάση το SDN

Για την τεχνολογία MIMO είναι σημαντικό να σημειωθεί ποιο είναι το βέλτιστο πλήθος κεραιών, που απαιτείται. Ακόμα, για το CR είναι απαραίτητο να σημειωθούν:

- πως θα πραγματοποιείται ο έλεγχος και η διαχείριση των δεδομένων,
- πως η ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να επιτευχθεί στην τεχνολογία αυτή,
- να βρεθούν οι τρόποι με τους οποίους οι γνώσεις των δικτύων μπορούν να αξιοποιηθούν.

Σχετικά με το εύρος ζώνης (είτε Mid-band είτε mmWave συχνότητες), είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, αλλά και να ευρεθούν οι βέλτιστες περιοχές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις διάφορες επικοινωνίες.



## Appendix A

# Δημοσιεύσεις, που υποστηρίζουν τη διδακτορική διατριβή

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν οι εξής δημοσιεύσεις σε:

### A.1 Συνέδρια

1. Έχουν ήδη περιγραφεί επιθυμητοί στόχοι σχετικά με την επόμενη γενιά κινητών δικτύων. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι απαιτήσεις, εισάγονται νέες τεχνολογίες ή ενσωματώνονται νέες έννοιες σε συμβατικές ήδη υπάρχουσες. Στην παρούσα εργασία περιγράφεται μια τροποποιημένη αρχιτεκτονική συστήματος **DAS** και μια μελέτη εφικτότητας υποδεικνύει ποιες από τις παραμέτρους κόστους του δικτύου είναι οι πιο σημαντικές για αυτό το μοντέλο. Αρκετά εξαρτήματα υλικού αντικαθίστανται με τεχνικές **NFV**, οι οποίες εισάγονται έτσι ώστε να συμβάλλουν στη μείωση των κεφαλαιακών και των λειτουργικών εξόδων. Το μοντέλο περιγράφεται μαθηματικά, συγκρίνεται και αντιπαραβάλλεται με το συμβατικό μοντέλο, που προτείνεται από τους συγγραφείς σε προηγούμενες ερευνητικές δραστηριότητες. Τα σενάρια προσομοίωσης συμβάλλουν σε συμπεράσματα και σε θεμελιώδη αποτελέσματα σχετικά με τους πιο αποτρεπτικούς παράγοντες κόστους, π.χ. εύρος ζώνης, συχνότητα, χωρητικότητα, κάλυψη κλπ. (C. Bouras, A. Kollia, and A. Papaiozis, 2018)
2. Το 2020 θα είναι το έτος, στο οποίο πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία η γενιά **5G**, ως εκ τούτου, είναι θεμελιώδες όλες οι τεχνολογίες να αναλύονται με τεχνικό και οικονομικό τρόπο. Ο επιχειρηματικός κόσμος δεν είναι πολύ ευνοϊκά κείμενος όσον αφορά σε επενδύσεις σε καινοτόμες τεχνολογίες. Στη συγκεκριμένη εργασία, οι συγγραφείς προτείνουν ένα τεχνο-οικονομικό μοντέλο για την τεχνολογία **MIMO** και το συγκρίνουν με το μοντέλο, που είχε αναπτυχθεί προηγουμένως για τα **DAS**. Τα μαθηματικά μοντέλα παρουσιάζονται και αναλύονται. Ακόμα, τα μαθηματικά μοντέλα επεξηγούνται και επιλέγονται οι σχετικές παράμετροι. Τα πειράματα βοηθούν στη σύγκριση των δύο διαφορετικών τεχνολογιών. Δεν υπάρχουν πολλές ερευνητικές ενέργειες σχετικά με τις τεχνο-οικονομικές προοπτικές του **MIMO**, και επίσης, δεν υπάρχουν ερευνητικές εργασίες, που το συγκρίνουν με το **DAS**. (Christos Bouras, Kokkalis, et al., 2018)

3. Στις μέρες μας, τα κινητά δίκτυα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής. Παρόλο που η εμφάνιση της 5G είναι επικείμενη, υπάρχουν ακόμα πολλές ανοιχτές ερωτήσεις. Συνεπώς, καθίσταται πολύ σημαντική η παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και προβλημάτων της 5ης γενιάς κινητών δικτύων. Τα ισχυρά σημεία και τα αδύναμα μέρη θα πρέπει να υποδεικνύονται έτσι ώστε να αντιμετωπίζονταν. Σε αυτή την εργασία, ολοκληρώνεται μια ανασκόπηση των σημερινών τεχνολογιών θεμελιωδών λίθων των δικτύων 5G. Παρουσιάζεται η κατάσταση όλων των διαφορετικών τεχνολογιών ως σημείο αναφοράς για τα δίκτυα της επόμενης γενιάς. (Christos Bouras, Praskevi Fotakopoulou, and Anastasia Kollia, 2019)
4. Τα πρώτα εμπορικά προϊόντα 5G θα κυκλοφορήσουν εντός του 2020 και ως εκ τούτου καθίσταται απόλυτη αναγκαιότητα να διερευνηθεί κατά πόσον οι βασικές και επωφελείς τεχνολογικά λύσεις είναι κατάλληλες και θα ωθήσουν τους επενδυτές να επενδύσουν χρήματα σε αυτές. Μία από τις πιο θεμελιώδεις τεχνολογίες η CR διερευνάται σε σχέση με τη βιωσιμότητας της σε σενάρια 5G. Δεν υπάρχει μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα. Η παρούσα εργασία αναπτύσσει ένα τεχνοοικονομικό πλαίσιο για την τεχνολογία CR και συγκρίνεται και αντιπαραβάλλεται με ένα ήδη υπάρχον μοντέλο για δίκτυα τύπου Software Defined Network (SDN). Μια ανάλυση εφικτότητας (Sensitivity Analysis- SA) υποδεικνύει ποιες παράμετροι κόστους είναι οι πιο ακριβές και επομένως, πρέπει να επανεξεταστούν για την ευρεία υιοθέτηση και βιωσιμότητα του μοντέλου. (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2020)
5. Η Πέμπτη γενιά (5G) είναι πιο κοντά από ποτέ. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες δεν καλύπτουν επαρκώς τις απαιτήσεις της γενιάς 5G, επομένως πρέπει να εισαχθούν νέες ή τροποποιημένες εκδόσεις των υφιστάμενων τεχνολογιών. Οι φορείς τηλεπικοινωνιών παραμένουν σκεπτικοί σχετικά με το κόστος, που επιφέρεται εξαιτίας των τεχνολογιών 5G. Στο πλαίσιο αυτό, είναι θεμελιώδους σημασίας, να εξεταστούν τεχνοοικονομικά οι τεχνολογίες, που καθιστούν δυνατή την πραγματοποίηση της 5G. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζονται μοντέλα Cognitive Radio (CR) και Software Defined Networking (SDN). Αναπτύσσονται οικονομικά μοντέλα βασισμένα στον ανταγωνισμό Stackelberg, επιλέγουν τις παραμέτρους πειραματισμού και διεξάγουν πειράματα, που δείχνουν ποιοι είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες για κάθε τεχνολογία, που προτείνει τρόπους περιορισμού της. Παρόλο που η CR είναι ένας από τους βασικούς συντελεστές 5G, δεν έχει αναλυθεί τεχνοοικονομικά. (C. Bouras, A. Kollia, and Maligianni, 2019)
6. Σήμερα, οι χρήστες αυξάνουν ταχύτητα και χρειάζονται πιο αποτελεσματική και καλύτερη κάλυψη δικτύου. Συνεπώς, το διαθέσιμο φάσμα δεν είναι σε θέση να καλύψει αυτές τις υπερβολικές απαιτήσεις. Στο δίκτυο 5G εισάγονται πολλές νέες τεχνολογίες και προσεγγίσεις. Ένα από αυτά είναι το φάσμα mmWave. Στην εργασία αναπτύσσεται μια τεχνικοοικονομική ανάλυση του mmWave σε σύγκριση με το Mid-Band Spectrum (MBS). Οι τεχνολογίες

αναλύονται με τεχνικό τρόπο. Εξετάζονται τα μαθηματικά μοντέλα, που βοηθούν στον προσδιορισμό της τιμολόγησης των μοντέλων. Επιπλέον, πραγματοποιούνται διάφορα πειράματα χρησιμοποιώντας την τεχνική ανάλυσης ευαισθησίας **Sensitivity Analysis (SA)**, η οποία καθορίζει εάν τα πλεονεκτήματα και τα κέρδη υπερτερούν των μειονεκτημάτων. (Christos Bouras and Anastasia Kollia, 2020)

## A.2 Περιοδικά

1. Νέες λειτουργίες θα προκύψουν από τη δικτύωση **cloud** και θα αντικαταστήσουν σταδιακά την υπάρχουσα υποδομή των κινητών δικτύων με εικονικά. Δύο τεχνολογίες, συγκεκριμένα οι **SDN** και **NFV**, προσφέρουν τα σημαντικά οφέλη τους και ένας συνδυασμός αυτών είναι μια απάντηση στις απαιτήσεις που τέθηκαν, όπως το **CORD**. Τα **ONOS** και **POX** είναι ελεγχτές **SDN** και προσφέρουν τη δυνατότητα συνδυασμού **SDN** και **NFV** για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων στον τομέα των κινητών δικτύων. Στο παρόν άρθρο, οι τεχνολογίες και οι ελεγχτές συγκρίνονται και αντιπαραβάλλονται. Ενδεικτικές περιπτώσεις τοπολογιών προσομοιώνονται και βοηθούν στην αξιολόγηση και των δύο ελεγκτών. Σύμφωνα με τα πειραματικά ευρήματα, ο **ONOS** είναι ένας από τους σημαντικότερους ελεγχτές για πρακτικούς, θεωρητικούς, ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς, ενώ το **POX** είναι ένας χρήσιμος και απλούστερος ελεγκτής για άλλες εκπαιδευτικές εφαρμογές. (Christos Bouras, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois, 2018)
2. Ήδη από τα προηγούμενα έτη έχουν καθοριστεί και τεθεί υψηλά πρότυπα επικοινωνίας για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας **5G**. Ως εκ τούτου, έχει μεγάλη σημασία να υιοθετηθούν τεχνολογικές λύσεις/προτάσεις, που περιλαμβάνουν πλήθος σημαντικών χαρακτηριστικών, όπως η υψηλή κάλυψη και η χωρητικότητα και οι μικρές καθυστερήσεις για την επόμενη γενιά κινητών δικτύων. Εκτός από την τεχνική αποτελεσματικότητά τους, αυτές οι τεχνολογίες θα πρέπει να είναι κερδοφόρες και για τους παρόχους. Ως αποτέλεσμα, ανακύπτει η ανάγκη περιορισμού του κόστους, που δαπανάται για την ανάπτυξη τους. Σε αυτή την εργασία, αναπτύσσονται τέσσερα μοντέλα- δύο για κάθε μια από τις δύο λύσεις για δίκτυα **5G**-, δηλαδή **MIMO** και **DAS**. Αναφέρονται τα αρχιτεκτονικά μοντέλα, που αναπτύσσονται για τις τεchnο-οικονομικές αναλύσεις. Τα μαθηματικά μοντέλα για τις δύο τεχνολογίες αναπτύσσονται. Τα πειράματα διεξάγονται χρησιμοποιώντας τις τιμές της ελληνικής αγοράς και χρησιμοποιείται επίσης, η μελέτη εφικτότητας, η οποία αναδεικνύει ποιες παράμετροι κόστους είναι οι πιο ακριβές και συνεπώς, είναι πιθανό να αποθαρρύνουν τους παρόχους να επενδύσουν σε αυτές. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι η έρευνα για αυτά τα μοντέλα είναι ζωτικής σημασίας για την επόμενη γενιά δικτύων κινητής επικοινωνίας, καθώς αποτελούν θεμέλιους λίθους για τη **5G**. (Christos Bouras, Kokkalis, et al., 2020)

3. Η επικείμενη έλευση της πέμπτης γενιάς κινητών δικτύων (**5G**) θα ενισχύσει την τεχνολογία, καθώς χρειάζονται νέες λύσεις για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων της **5G**. Αυτές οι καινοτομίες σημειώνονται τόσο από τους επιστήμονες όσο και από τους παρόχους τηλεπικοινωνιών. Προγραμματικές λογικές λύσεις πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, καθώς συσσωρεύουν οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς και υψηλές επιδόσεις. Η προγραμματιζόμενη λογική σήμερα αντιπροσωπεύεται από τον συνδυασμό **SDN-NFV**. Αυτός ο συνδυασμός όχι μόνο μειώνει το υλικό, καθώς τα περισσότερα στοιχεία του δικτύου αντικαθίστανται από **NFVs** ή εικονικές μηχανές, αλλά προσφέρει επίσης καλύτερη κατανομή πόρων και παρέχει περισσότερο εύρος ζώνης, **CPU** κλπ. στα τμήματα του δικτύου, που καθίστανται πιο κορεσμένα. Οι λύσεις, όπως το **SDN**, μπορούν να συγκεντρώσουν θεμελιώδη πλεονεκτήματα και κέρδη, αλλά φαίνονται να αντιμετωπίζουν βασικά προβλήματα και ως εκ τούτου, τίθενται βασικά ερωτήματα σχετικά με το κόστος και την ασφάλειά τους. Ένα από τα θέματα αυτά περιλαμβάνει όλες τις δαπάνες, που πρέπει να γίνουν για την απόκτηση της τεχνολογίας και τις προσαρμογές, που πρέπει να ενσωματωθούν στην τρέχουσα υποδομή ώστε να είναι σε θέση να καλύψει και τα δίκτυα **SDN**. Η εργασία αναλύει ένα προγραμματιζόμενο μοντέλο **SDN** σε συνδυασμό με **NFVs**. Προβλέπεται ανάλυση **SA**, που επιτρέπει τον προσδιορισμό των παραγόντων, που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τιμολόγηση, ώστε να προταθούν τρόποι για τη σημαντική μείωση των διαφόρων τύπων κόστους και να προταθούν λύσεις ή κατευθύνσεις έρευνας για τη μείωση των εξόδων αυτών των παραγόντων του δικτύου. (Christos Bouras and Anastasia Kollia, 2019)
4. Στη **5G** γενιά κινητών δικτύων, έχουν καθοριστεί σημαντικές απαιτήσεις. Αν και υπάρχουν πολλές αποδοτικές τεχνολογίες στον τομέα των τηλεπικοινωνιών δεν ανταποκρίνονται στους στόχους της **5G**. Αφετέρου, οι φορείς τηλεπικοινωνιών και οι πάροχοι υπηρεσιών δεν επιθυμούν να επενδύσουν σε νέο εξοπλισμό / αρχιτεκτονικές. Τα **CR** και **SDN** αποτελούν δύο τεχνολογίες με ιδιαίτερα πλεονεκτήματα. Σε αυτό το άρθρο, αναπτύσσονται διάφορα τεχνικά και οικονομικά μοντέλα. Η **CR** συνδυάζεται με το Παιχνίδι **Stackelberg** της Θεωρίας Παιγνίων. Μια ανάλυση ευαισθησίας **SA** εφαρμόζεται και οι παράμετροι, που επηρεάζουν κυρίως το μοντέλο σημειώνονται. Δείχνεται ότι η τεχνολογία **CR** μπορεί προσφέρει όλα τα θεμελιώδη πλεονεκτήματα και ακόμη τα οικονομικά κέρδη της στις εταιρείες τηλεπικοινωνιών. (Christos Bouras, 2020)
5. Η **5G** προσεγγίζει και οι απαιτήσεις των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας αυξάνονται σταδιακά όσον αφορά στην κάλυψη του δικτύου και στην αποδοτικότητα. Η αύξηση των ροών δεδομένων ιδίως στα κοινωνικά δίκτυα και σε άλλα μέσα συνέβαλαν στην αύξηση των απαιτήσεων όλο και περισσότερο φάσματος. Έτσι, οι ήδη διαθέσιμες συχνότητες δεν επαρκούν για την κάλυψη των απαιτήσεων του δικτύου και των αναγκών. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία **mmWave** είναι μία από τις τεχνολογίες κλειδιά για την επόμενη γενιά. Το αχρησιμοποίητο και διαθέσιμο φάσμα των **30-300GHz** θα

μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες σε εύρος ζώνης. Η ζώνη mmWave είναι σχεδόν αχρησιμοποίητη, με αποτέλεσμα να καλύπτει μελλοντικές απαιτήσεις και χρήστες του δικτύου. Σε αυτή την εργασία, η mmWave αναλύεται με τεχνικό-οικονομικό τρόπο. Επιπλέον, αναπτύσσονται μαθηματικά μοντέλα για την κοστολόγηση του mmWave. Οι παράμετροι για τα μοντέλα επιλέγονται διεξοδικά. Η ανάλυση SA συμβάλλει στην ανάδειξη των πιο θεμελιωδών παραμέτρων δικτύου και κόστους σχετικά με το mmWave και το εύρος ζώνης. Τα συμπεράσματα συνοψίζονται και σημειώνεται η μελλοντική έρευνα. Αυτή η εργασία είναι σίγουρα χρήσιμη, καθώς το mmWave είναι μια σχετικά νέα αντίληψη και δεν υπάρχει αρκετή έρευνα σχετικά με το τεchnο-οικονομικό της υπόβαθρο. Παρόλο που υπάρχει μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με τα μοντέλα τιμολόγησης του 5G, δεν υπάρχει μεγάλη έρευνα σχετικά με την τιμολόγηση του mmWave. (Υπό εξέλιξη αξιολόγηση)



## Βιβλιογραφία

- 5G uses less power than 4G at peak bitrates, but more for basic tasks* (n.d.). <https://venturebeat.com/2019/09/11/5g-uses-less-power-than-4g-at-peak-bitrates-but-more-for-basic-tasks/>. Accessed: 2020-02-25.
- Agyapong, Patrick Kwadwo et al. (2014). “Design considerations for a 5G network architecture”. In: *IEEE Communications Magazine* 52.11, pp. 65–75.
- Ahmed, Ashraf Awadelkarim Widaa et al. (2014). “Techno-economics of green mobile networks considering backhauling”. In: *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference*. VDE, pp. 1–6.
- Aissioui, Abdelkader et al. (2015). “Toward Elastic Distributed SDN/NFV Controller for 5G Mobile Cloud Management Systems.” In: *IEEE Access* 3.0, pp. 2055–2064.
- Akyildiz, Ian F, Shuai Nie, et al. (2016). “5G roadmap: 10 key enabling technologies”. In: *Computer Networks* 106, pp. 17–48.
- Akyildiz, Ian F, Pu Wang, and Shih-Chun Lin (2015). “SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems”. In: *Computer Networks* 85, pp. 1–18.
- Ali-Ahmad, Hassan et al. (2013). “An SDN-based network architecture for extremely dense wireless networks”. In: *Future Networks and Services (SDN4FNS), 2013 IEEE SDN for*. IEEE, pp. 1–7.
- Amin, Adnan et al. (2015). “Churn prediction in telecommunication industry using rough set approach”. In: *New Trends in Computational Collective Intelligence*. Springer, pp. 83–95.
- Anderson, Thomas, Peter Bosch, and Alessandro Duminuco (2016). *Bandwidth Control and Regulation in Mobile Networks via SDN/NFV-Based Platforms*.
- Artuso, Matteo et al. (2016). “Towards flexible SDN-based management for cloud-based mobile networks”. In: *Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2016 IEEE/IFIP*. IEEE, pp. 474–480.
- Attiah, Mothana L et al. (2019). “Joint QoE-based user association and efficient cell-carrier distribution for enabling fully hybrid spectrum sharing approach in 5G mmWave cellular networks”. In: *Wireless Networks* 25.8, pp. 5027–5043.
- Barrie, Matthias et al. (2011). “Techno-economic evaluation of cognitive radio in a factory scenario”. In: *International Conference on Research in Networking*. Springer, pp. 52–61.
- Beloglazov, Anton, Jemal Abawajy, and Rajkumar Buyya (2012). “Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing”. In: *Future generation computer systems* 28.5, pp. 755–768.
- Beming, Per et al. (2007). “LTE-SAE architecture and performance”. In: *Ericsson Review* 3, pp. 98–104.

- Bernardos, C.J. et al. (June 2014). “An architecture for software defined wireless networking”. In: *Wireless Communications, IEEE* 21.3, pp. 52–61. ISSN: 1536-1284. DOI: [10.1109/MWC.2014.6845049](https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6845049).
- Blackman, Colin (2017). “Telecommunications policy: The medium is the message”. In: *Telecommunications Policy*.
- Bormann, Kai (2010). “Telecommunications management. Industry structures and planning structures. by Richard A. Gershon”. In: *JMM-The International Journal on Media Management* 5.1, pp. 76–77.
- Bouras, C., V. Kokkinos, et al. (Aug. 2015). “Techno-economic analysis of ultra-dense and DAS deployments in mobile 5G”. In: *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pp. 241–245. DOI: [10.1109/ISWCS.2015.7454337](https://doi.org/10.1109/ISWCS.2015.7454337).
- Bouras, C., A. Kollia, and E. Maligianni (Sept. 2019). “The techno-economic models for CR and SDN in 5G”. In: *2019 12th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, pp. 39–46. DOI: [10.23919/WMNC.2019.8881823](https://doi.org/10.23919/WMNC.2019.8881823).
- Bouras, C., A. Kollia, and A. Papazois (Apr. 2016). “Sensitivity analysis of small cells and DAS techno-economic models in mobile 5G”. In: *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–6. DOI: [10.1109/WCNC.2016.7565168](https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7565168).
- (Mar. 2017). “SDN & NFV in 5G: Advancements and challenges”. In: *2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, pp. 107–111. DOI: [10.1109/ICIN.2017.7899398](https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899398).
- (June 2018). “DAS Modifications for More Efficient Network Cost in 5G”. In: *2018 14th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1110–1115. DOI: [10.1109/IWCMC.2018.8450534](https://doi.org/10.1109/IWCMC.2018.8450534).
- Bouras, C., P. Ntarzanos, and A. Papazois (Oct. 2016). “Cost modeling for SDN/NFV based mobile 5G networks”. In: *2016 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, pp. 56–61. DOI: [10.1109/ICUMT.2016.7765232](https://doi.org/10.1109/ICUMT.2016.7765232).
- Bouras, Christos, Praskevi Fotakopoulou, and Anastasia Kollia (July 2019). “5G Networks: Advancements and Challenges”. In: *The Fifteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC 2019)*.
- Bouras, Christos, Stylianos Kokkalis, et al. (Sept. 2018). “Techno-economic analysis of MIMO & DAS in 5G”. In: *11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC 2018)*. Ed. by Dusan Maga. Vol. IFIP eCollection-3. Wireless and Mobile Networking Conference. Prague, Czech Republic, pp. 73–80. URL: <https://hal.inria.fr/hal-01995438>.
- (2020). “Techno-economic comparison of MIMO and DAS cost models in 5G networks”. In: *Wireless Networks* 26, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1780-6>.
- Bouras, Christos, Vasileios Kokkinos, Anastasia Kollia, et al. (2017). “Analyzing Small-Cells and Distributed Antenna Systems from Techno-Economic Perspective”. In: *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies (IJWNBT)* 6.1, pp. 45–64.
- Bouras, Christos, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois (2014). “Financing and Pricing Small Cells in Next-Generation Mobile Networks”. In: *Wired/Wireless*

- Internet Communications*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg.
- Bouras, Christos and Anastasia Kollia (Dec. 2019). “Techno-Economic Analysis for Programmable Networks”. In: pp. 1–22. ISBN: 9781119471509. DOI: [10.1002/9781119471509.w5GRef114](https://doi.org/10.1002/9781119471509.w5GRef114).
- (2020). “Techno-economic analysis of MMWave vs mid-band spectrum in 5G networks”. In: *International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Springer, pp. 90–105.
- Bouras, Christos, Anastasia Kollia, and Andreas Papazois (2017a). “Dense Deployments and DAS in 5G: A Techno-Economic Comparison”. In: *Wireless Personal Communications* 94.3, pp. 1777–1797. DOI: [10.1007/s11277-016-3711-0](https://doi.org/10.1007/s11277-016-3711-0). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-016-3711-0>.
- (2017b). “Teaching 5G networks using the ONOS SDN controller”. In: *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2017 Ninth International Conference on*. IEEE, pp. 312–317.
- (2017c). “Teaching network security in mobile 5G using ONOS SDN controller”. In: *Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2017 Ninth International Conference on*. IEEE, pp. 465–470.
- (2018). “Exploring SDN & NFV in 5G Using ONOS & POX Controllers”. In: *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN)* 10.4, pp. 46–60.
- (2020). “Techno-economic analysis of cognitive radio models in 5G networks”. In: *Procedia Computer Science* 175. The 17th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC), The 15th International Conference on Future Networks and Communications (FNC), The 10th International Conference on Sustainable Energy Information Technology, pp. 300–307. ISSN: 1877-0509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.045>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920317257>.
- Bradai, Abbas et al. (2015). “Cellular software defined networking: A framework”. In: *Communications Magazine, IEEE* 53.6, pp. 36–43.
- Brief, ONF Solution (2013). “OpenFlow™-Enabled Mobile and Wireless Networks”. In: *white paper*.
- Chappell, Caroline (2015). “Deploying virtual network functions: The complementary roles of TOSCA and NETCONF/YANG”. In: *White Paper*.
- Chen, Tao et al. (2015). “Software defined mobile networks: concept, survey, and research directions”. In: *IEEE Communications Magazine* 53.11, pp. 126–133.
- Chiani, Marco, Enrico Paolini, and Franco Callegati (2018). “Open issues and beyond 5G”. In: *5G Italy White eBook: from Research to Market*.
- Chiaraviglio, Luca et al. (2017). “An economic analysis of 5G Superfluid networks”. In: *2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Presented at the 2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pp. 1–7.
- Christos Bouras Anastasia Kollia, Eleftheria Maligianni (2020). “Techno-economic comparison of Cognitive Radio and Software Defined Network (SDN) cost models in mobile 5G”. English. In: *Wireless Personal Communications*.

- Chrysikos, Theofilos et al. (2016). “Techno-economic analysis for the deployment of PPDR services over 4G/4G+ Networks”. In: *2016 International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU)*. IEEE, pp. 1–7.
- CISCO (2019). *Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. Accessed: 2020-02-25.
- Claussen, H., L.T.W. Ho, and L.G. Samuel (June 2007). “Financial Analysis of a Pico-Cellular Home Network Deployment”. In: *IEEE International Conference on Communications, 2007 (ICC '07)*, pp. 5604–5609. DOI: [10.1109/ICC.2007.929](https://doi.org/10.1109/ICC.2007.929).
- Correia, L.M. et al. (2010). “Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks”. In: *Communications Magazine, IEEE* 48.11, pp. 66–72. ISSN: 0163-6804. DOI: [10.1109/MCOM.2010.5621969](https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5621969).
- Diakoumi, Gianna et al. (2014). “Psychosocial risk factors in telecommunications service providers in Greece”. In: *International Journal of Human Factors and Ergonomics* 3.2, pp. 170–187.
- Discover how 6G will change our lives* (n.d.). <https://www.oulu.fi/6gflagship>. Accessed: 2019-06-30.
- Dodd, Annabel Z (2002). *The essential guide to telecommunications*. Prentice Hall Professional.
- Duan, Lingjie and Jianwei Huang (2012). “Economic Viability of Femtocell Service Provision”. In: *Game Theory for Networks*. Ed. by Rahul Jain and Rajgopal Kannan. Vol. 75. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Springer Berlin Heidelberg, pp. 413–428. ISBN: 978-3-642-30372-2. DOI: [10.1007/978-3-642-30373-9\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30373-9_29). URL: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30373-9\\_29](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30373-9_29).
- Duan, Xiaoyu and Xianbin Wang (Apr. 2015). “Authentication handover and privacy protection in 5G hetnets using software-defined networking”. In: *Communications Magazine, IEEE* 53.4, pp. 28–35. ISSN: 0163-6804. DOI: [10.1109/MCOM.2015.7081072](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7081072).
- Eghbali, Homa and Vincent WS Wong (2015). “Bandwidth allocation and pricing for SDN-enabled home networks”. In: *Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 5342–5347.
- Expert Working Group (2014a). *Next Generation of Wireless Networks*. NetWorld 2020 ETP.
- (2014b). *What is 5G (Really) About?* NetWorld 2020 ETP.
- Fomin, Vladislav V and Arturas Medeisis (2015). “Co-Evolutionary Analysis of Cognitive Radio Systems”. In: *Modern Trends Surrounding Information Technology Standards and Standardization Within Organizations*. IGI Global, pp. 107–124.
- Ford, Douglas JG (n.d.). “The Effects of Microwave Radiation From Telecommunication Base Stations”. In: ().
- Fotakopoulou, Paraskevi (2019). “5G”. PhD thesis. University of Patras.
- Fratu, Ioavian et al. (2014). “Small Cells in Cellular Networks: Challenges of Future HetNets”. English. In: *Wireless Personal Communications* 78.3, pp. 1613–1627. ISSN: 0929-6212. DOI: [10.1007/s11277-014-1906-9](https://doi.org/10.1007/s11277-014-1906-9). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-014-1906-9>.

- Frias, Zoraida and Jorge Pérez Martínez (2017). “5G networks: Will technology and policy collide?” In: *Telecommunications Policy*.
- Frias, Zoraida and Jorge Pérez (2012). “Techno-economic analysis of femtocell deployment in long-term evolution networks”. In: *EURASIP journal on wireless communications and networking* 2012.1, p. 288.
- Gruber, Harald and Pantelis Koutroumpis (2011). “Mobile telecommunications and the impact on economic development”. In: *Economic Policy* 26.67, pp. 387–426.
- Guizani, Mohesen, Hsiao-Hwa Chen, and Chonggang Wang (2015). *The Future of Wireless Networks: Architectures, Protocols, and Services*. Vol. 21. CRC Press.
- Hamidouche, Kenza (2016). “Game Theoretic Approach for Resource Allocation in Small Cell Networks”. PhD thesis. University of Oulu.
- Han, Shuangfeng et al. (2015). “Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G”. In: *IEEE Communications Magazine* 53.1, pp. 186–194.
- Hossain, M and Nusrat Jahan Suchy (2013). “Influence of customer satisfaction on loyalty: A study on mobile telecommunication industry”. In: *Journal of Social Sciences* 9.2, pp. 73–80.
- Hossain, Moazzem, Angela Hecimovic, and Aklema Choudhury Lema (2015). “Corporate Social and Environmental Responsibility Reporting Practices from an Emerging Mobile Telecommunications Market”. In: *Australian Accounting Review* 25.4, pp. 389–404.
- Huang, Mei-Hua, Perng-Fei Huang, and Chih-Ling Hsieh (2017). “Key Factors Influencing B2B Relationship Marketing in the Telecommunications Industry”. In: *Proceedings of the 2017 International Conference on E-Business and Internet*. ACM, pp. 22–26.
- Iswardiani, Eka PP et al. (2016). “Techno economic approach of spectrum sharing between radar bands and LTE cellular system”. In: *Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), 2016 10th International Conference on*. IEEE, pp. 1–5.
- Jiang, Chunxiao et al. (2014). “Optimal pricing strategy for operators in cognitive femtocell networks”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 13.9, pp. 5288–5301.
- Kabir, Md Humayun (2014). “A novel architecture for SDN-based cellular network”. In: *International Journal of Wireless & Mobile Networks* 6.6, p. 71.
- Katsigiannis, Michail, Arturo Basaure, and Marja Matinmikko (2014). “Cost comparison of Licensed Shared Access (LSA) and MIMO scenarios for capacity growth in Finland”. In: *5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), 2014 1st International Conference on*. IEEE, pp. 291–296.
- Kollia, Anastasia (2014). “5G”. PhD thesis. University of Patras.
- Kolydakis, Nikolaos and I Tomkos (2014). “A techno-economic evaluation of different strategies for front-/back-hauling of mobile traffic: Wireless versus fiber based solutions”. In: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*. IEEE, pp. 1–4.
- Ku, Ian, You Lu, and Mario Gerla (2014). “Software-defined mobile cloud: Architecture, services and use cases”. In: *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2014 International*. IEEE, pp. 1–6.

- Larsson, Erik G et al. (2014). “Massive MIMO for next generation wireless systems”. In: *IEEE Communications Magazine* 52.2, pp. 186–195.
- Lee, Jeongkeun et al. (2014). “meSDN: mobile extension of SDN”. In: *Proceedings of the fifth international workshop on Mobile cloud computing & services*. ACM, pp. 7–14.
- Li, Li Erran, Z Morley Mao, and Jennifer Rexford (2012). “Toward software-defined cellular networks”. In: *Software Defined Networking (EWSDN), 2012 European Workshop on*. IEEE, pp. 7–12.
- Li, Ming et al. (2019). “Iterative hybrid precoder and combiner design for mmWave MIMO-OFDM systems”. In: *Wireless Networks* 25.8, pp. 4829–4837.
- Liang, Y. C. et al. (Sept. 2011). “Cognitive radio networking and communications: an overview”. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60.7, pp. 3386–3407. ISSN: 0018-9545. DOI: [10.1109/TVT.2011.2158673](https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2158673).
- Lim, Yeon-Geun, Chan-Byoung Chae, and Giuseppe Caire (2015). “Performance analysis of massive MIMO for cell-boundary users”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 14.12, pp. 6827–6842.
- Liu, Zhen (Dec. 2013). “Techno-economical Analysis of Indoor Enterprise Solutions”. PhD thesis. Aalborg University.
- Liu, Zhen et al. (Sept. 2012). “Economical Comparison of Enterprise In-Building Wireless Solutions Using DAS and Femto”. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, pp. 1–5. DOI: [10.1109/VTCFall.2012.6399316](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2012.6399316).
- Maccartney, George R et al. (2015). “Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks”. In: *IEEE Access* 3, pp. 2388–2424.
- Markendahl, J. and O. Makitalo (2010). “A comparative study of deployment options, capacity and cost structure for macrocellular and femtocell networks”. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pp. 145–150. DOI: [10.1109/PIMRCW.2010.5670351](https://doi.org/10.1109/PIMRCW.2010.5670351).
- Matthaiou, Michail (2011). “Mimo systems in wireless networks”. In.
- Medeisis, Arturas and Simon Delaere (2011). “High-level scenarios for the future of cognitive radio business”. In: *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*. IEEE, pp. 2330–2334.
- Mehta, Harit (2009). “Recent Advances in Cognitive Radios”. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 59.8, pp. 736–741.
- Mekikis, Prodromos-Vasileios et al. (2014). “Two-tier cellular random network planning for minimum deployment cost”. In: *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, pp. 1248–1253.
- Mendonca, Marc, Katia Obraczka, and Thierry Turletti (2012). “The case for software-defined networking in heterogeneous networked environments”. In: *Proceedings of the 2012 ACM conference on CoNEXT student workshop*. ACM, pp. 59–60.
- Michalakelis, Christos, Thomas Sphicopoulos, and Dimitris Varoutas (2011). “Modeling competition in the telecommunications market based on concepts of population Biology”. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 41.2, pp. 200–210.

- Mitola, Joseph (2000). “Cognitive radio—an integrated agent architecture for software defined radio”. In.
- Mitola, Joseph and Gerald Q Maguire (1999). “Cognitive radio: making software radios more personal”. In: *IEEE personal communications* 6.4, pp. 13–18.
- Muharar, Rusdha and Jamie Evans (2017). “Performance Analysis of Massive MIMO Networks with Random Unitary Pilot Matrices”. In: *arXiv preprint arXiv:1709.03325*.
- Naudts, Bram et al. (2012). “Techno-economic analysis of software defined networking as architecture for the virtualization of a mobile network”. In: *2012 European workshop on software defined networking*. IEEE, pp. 67–72.
- Nikolikj, Vladimir and Toni Janevski (2014). “Cost Modeling of Advanced Heterogeneous Wireless Networks under Excessive User Demand”. In: *Wired/Wireless Internet Communications*. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg.
- Niu, Yong et al. (2015). “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges”. In: *Wireless Networks* 21.8, pp. 2657–2676.
- Numan, Paulson Eberechukwu et al. (2016). “Hidden Node Scenario: A Case for Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks”. In: *Indian Journal of Science and Technology* 9.46.
- Orange, Jean Sebastian-Bedo et al. (2015). “White paper for research beyond 5G”. In: *Accessed 23*, p. 2016.
- Pei, Xiaoyan et al. (n.d.). “Network Functions Virtualisation (NFV)”. In: ().
- Peres, MA et al. (n.d.). “Advantages of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) testing using low level excitation systems”. In.
- Pi, Zhouyue and Farooq Khan (2011). “An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems”. In: *IEEE communications magazine* 49.6.
- Pompili, Dario, Abolfazl Hajisami, and Hariharasudhan Viswanathan (2015). “Dynamic provisioning and allocation in cloud radio access networks (C-RANs)”. In: *Ad Hoc Networks* 30, pp. 128–143.
- Preet, Ayubi, Amandeep Kaur, and Sggswu Fatehgarh Sahib (2014). “Review paper on cognitive radio networking and communications”. In: *International Journal of Computer Science and Information Technologies* 5.4, pp. 5508–5511.
- Papatwibul, Pakawat et al. (2013). “Developing an application based on openflow to enhance mobile ip networks”. In: *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks-Workshops*. IEEE, pp. 936–940.
- Qiao, Jian, Yejun He, and Xuemin Sherman Shen (2016). “Proactive Caching for Mobile Video Streaming in Millimeter Wave 5G Networks.” In: *IEEE Trans. Wireless Communications* 15.10, pp. 7187–7198.
- Rappaport, Theodore S et al. (2013). “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!” In: *IEEE access* 1.1, pp. 335–349.
- rfwireless-world.com* (n.d.). <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Cognitive-Radio.html>. Accessed: 2018-11-21.
- Riggio, Roberto et al. (2014). “Programming software-defined wireless networks”. In: *Network and Service Management (CNSM), 2014 10th International Conference on*. IEEE, pp. 118–126.

- Senel, Kamil, Emil Björnson, and Erik G Larsson (2017). “Optimal Base Station Design with Limited Fronthaul: Massive Bandwidth or Massive MIMO?” In: *arXiv preprint arXiv:1709.05172*.
- Sesia, Stefania, Issam Toufik, and Matthew Baker (2011). *LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- Sharma, Umesh and Stewart Lawrence (2015). “Power, politics and privatization: A tale of a telecommunications company”. In: *Critical Perspectives on Accounting* 28, pp. 13–29.
- Shetty, N., S. Parekh, and J. Walrand (Dec. 2009). “Economics of Femtocells”. In: *IEEE Global Telecommunications Conference, 2009 (GLOBECOM '09)*, pp. 1–6. DOI: [10.1109/GLOCOM.2009.5426129](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2009.5426129).
- Siris, Vasilios A, Christopher N Ververidis, and George C Polyzos (2013). “Techno-economic gains analysis of services over an information-centric integrated satellite-terrestrial network”. In: *Future Network and Mobile Summit (FutureNetworkSummit), 2013*. IEEE, pp. 1–10.
- Smail, Ghoul and Jia Weijia (2017). “Techno-economic analysis and prediction for the deployment of 5G mobile network”. In: *Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN), 2017 20th Conference on*. IEEE, pp. 9–16.
- Standard, GHG Protocol Product (2017). “ICT Sector Guidance built on the GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard”. In: *Global Sustainability Initiative*.
- Sulyman, Ahmed Iyanda et al. (2014). “Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands”. In: *IEEE Communications Magazine* 52.9, pp. 78–86.
- Tehrani, Mohsen Nader and Murat Uysal (2012). “Pricing for open access femtocell networks using market equilibrium and non-cooperative game”. In: *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, pp. 1827–1831.
- Trossen, Dirk and Alexandros Kostopoulos (2012). “Techno-economic aspects of information-centric networking”. In: *Journal of Information Policy* 2, pp. 26–50.
- Ultra High Capacity Networks White Paper (Apr. 2014). *Evolutionary & Disruptive Visions Towards High Capacity Networks*. <http://www.iwpc.org/WhitePaper.aspx?WhitePaperID=17>: International Wireless Industry Consortium (IWPC).
- Verde, Francesco et al. (2012). “Cooperative MIMO multicell networks”. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2012.1, p. 41.
- Von Stackelberg, Heinrich (2010). *Market structure and equilibrium*. Springer Science & Business Media.
- Wang, Baoxia et al. (2015). “Virtual Tenant Network Research based on Price Mechanism in SDN Architecture”. In.
- Wang, Peng et al. (2015). “Multi-gigabit millimeter wave wireless communications for 5G: From fixed access to cellular networks”. In: *IEEE Communications Magazine* 53.1, pp. 168–178.
- Wang, Xiaofei et al. (2014). “Cache in the air: exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems”. In: *IEEE Communications Magazine* 52.2, pp. 131–139.
- Weedon, Alan (n.d.). *Huawei is beginning 6G research — a mobile network that may move far beyond smartphones*. <https://www.abc.net.au/news/2019->

- [08-22/huawei-reportedly-entering-into-6g-research/11427056](#). Accessed: 2020-02-25.
- Wei, Lili et al. (2014). “Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems”. In: *IEEE Wireless Communications* 21.6, pp. 136–143.
- Xie, Renchao et al. (2012). “Energy-efficient resource allocation for heterogeneous cognitive radio networks with femtocells”. In: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 11.11, pp. 3910–3920.
- Yang, Mao et al. (2015). “Software-defined and virtualized future mobile and wireless networks: A survey”. In: *Mobile Networks and Applications* 20.1, pp. 4–18.
- Yap, Kok-Kiong et al. (2010). “Blueprint for introducing innovation into wireless mobile networks”. In: *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Virtualized infrastructure systems and architectures*. ACM, pp. 25–32.
- Yunas, Syed Fahad, Mikko Valkama, and Jarno Niemelä (2015). “Techno-Economical Comparison of Dynamic DAS and Legacy Macrocellular Densification”. In: *International Journal of Wireless Information Networks* 22.4, pp. 312–326.
- Yusof, Azita Laily et al. (2013). “Performance analysis of handover strategy in femtocell network”. In: *Journal of Communications* 8.11, pp. 724–729.
- Μπούρας, Χρήστος Ι. (2017a). Κινητά δίκτυα 4G/5G- Κεφάλαιο 11. Ευρυζωνικές Τεχνολογίες.
- (2017b). Κινητά Δίκτυα Επικοινωνίας- Κεφάλαιο 9. Δίκτυα Δημόσιας Χρήσης και Διασύνδεση Δικτύων.