



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**Τεχνο - οικονομική Ανάλυση Κέρδους Παρόχων για Κινητά
Δίκτυα πέμπτης γενιάς και εξής:
Η περίπτωση των Ultra-dense υλοποιήσεων**

Φλώρου Αικατερίνη
Α.Μ. 1047169

Επιβλέπων
Καθ. Χρήστος Ι. Μπούρας

Επιτροπή:
Καθ. Ιωάννης Γαροφαλάκης
Επ. Καθ. Εύη Παπαϊωάννου

Πάτρα, 2022



© Copyright συγγραφέας Φλώρου Αικατερίνη, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Πατρών δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας και Πρύτανη του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Χρήστο Ι. Μπούρα για την καθοδήγησή του, καθώς και για την επιρροή του σαν καθηγητής καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα την διδάκτορα κ. Αναστασία Κόλλια για τις πολύτιμες συμβουλές της, τη συνεχή παρουσία της και την υποστήριξή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής για το πλήθος γνώσεων που μου πρόσφεραν για μια τόσο ξεχωριστή και ιδιαίτερη επιστήμη, αυτή των υπολογιστών.

Πάτρα, Φεβρουάριος 2022

Αικατερίνη Φλώρου



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί μια τεχνοοικονομική ανάλυση των ultra-dense υλοποιήσεων και συγκρίνει την τεχνολογία ultra-dense με άλλες macrocellular διατάξεις. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα και παρουσιάζεται ο στόχος της εργασίας και η δομή της.

Στη συνέχεια, γίνεται μια ανάλυση των κινητών δικτύων επικοινωνίας, στην οποία παρουσιάζονται οι προηγούμενες γενιές κινητών δικτύων με τα χαρακτηριστικά τους και τις σημαντικότερες τεχνολογίες τους, φτάνοντας ως και την έκτη γενιά κινητών δικτύων. Επίσης, αναφέρονται και επεξηγούνται και τα είδη των κυψελών, με πρωταγωνιστές τα femtocells.

Ακόμη, αναλύεται η τεχνολογία ultra-dense, παρουσιάζοντας όλα τα βασικά χαρακτηριστικά της, όπως δομή και λειτουργία. Γίνεται αναφορά, επίσης, στις τεχνολογίες της, καθώς επίσης και στις προκλήσεις και τα προβλήματα που αντιμετωπίζει.

Επιπλέον, γίνεται οικονομική ανάλυση με μαθηματικούς τύπους, τόσο των ultra-dense υλοποιήσεων, όσο και των macrocellular αναπτύξεων, εξετάζοντας τις κεφαλαιακές και λειτουργικές δαπάνες, καθώς και το συνολικό κόστος τους.

Με βάση αυτήν την οικονομική ανάλυση, στη συνέχεια γίνεται η πειραματική ανάλυση εφαρμόζοντας τιμές στους μαθηματικούς τύπους και παρουσιάζοντας τα αντίστοιχα διαγράμματα. Επιπροσθέτως, εξετάζονται από τα διαγράμματα ποιες είναι οι παράμετροι ή μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο τα τελικά κόστη.

Τέλος, με βάση και την πειραματική ανάλυση, εξάγονται κάποια συμπεράσματα, όπως το ότι οι ultra-dense υλοποιήσεις είναι πιο συμφέρουσες, αλλά σε μικρότερους χώρους, ενώ γίνονται και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα που πιθανώς να βοηθήσουν την ultra-dense τεχνολογία και τον τομέα των κινητών δικτύων επικοινωνίας.



EXECUTIVE SUMMARY

This thesis is a techno-economic analysis of ultra-dense implementations and compares ultra-dense technology with other macrocellular developments. In the beginning, there is an introduction to the topic and there are presented the purpose of the work and the structure of the paper.

Then, there is an analysis of mobile communication networks, in which the previous generations of mobile networks are presented with their characteristics and their most important technologies, reaching up to the sixth generation of mobile networks. In addition, there are mentioned and explained the types of cells, starring femtocells.

Moreover, there is an analysis of the ultra-dense technology, presenting all its basic characteristics, such as structure and function. Reference is also made to its technologies, as well as to the challenges and problems it faces.

Furthermore, there is a financial analysis with mathematical formulas, both for ultra-dense implementations and macrocellular developments, examining the capital and operating costs, as well as their total cost.

Based on this economic analysis, there is an experimental analysis that is then performed by applying values to the mathematical formulas and presenting the corresponding diagrams. In addition, the diagrams examine which are the parameters or variables that most affect the final costs.

Finally, based on the experimental analysis, there are conducted some important conclusions, such as that ultra-dense implementations are more advantageous, but in smaller spaces, and in the end, there are some suggestions for future research that may help ultra-dense technology and the field of mobile communication networks.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
EXECUTIVE SUMMARY	5
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	9
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Αναγκαιότητα της Διπλωματικής.....	15
2. ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ	18
2.1 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα Επικοινωνίας.....	18
2.2 Προηγούμενες Γενιές Κινητών Δικτύων	20
2.2.1 Πρώτη Γενιά Κινητών Δικτύων	21
2.2.2 Δεύτερη Γενιά Κινητών Δικτύων	22
2.2.3 Τρίτη Γενιά Κινητών Δικτύων.....	23
2.2.4 Τέταρτη Γενιά Κινητών Δικτύων	24
2.3 Πέμπτη Γενιά Κινητών Δικτύων (5G)	25
2.3.1 Τεχνολογία Multiple Input Multiple Output (MIMO).....	27
2.3.2 Τεχνολογία Software Defined Networking (SDN).....	28
2.3.3 Τεχνολογία Network Function Virtualization (NFV)	30
2.3.4 Τεχνολογία Millimeter Wave (MMWave).....	31
2.3.5 Τεχνολογία Cognitive Radio (CR)	32
2.3.6 Internet of Things (IoT).....	33
2.4 Έκτη Γενιά Κινητών Δικτύων (6G)	34
3. ΕΙΔΗ ΚΥΨΕΛΩΝ.....	37
3.1 Macrocell.....	37
3.2 Microcell.....	38
3.3 Picocell.....	39
3.4 Femtocell	40
3.4.1 Χαρακτηριστικά.....	40
3.4.2 Ιστορική Αναδρομή	41
3.4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	42
4. ULTRA-DENSE ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	43
4.1 Εισαγωγή.....	43
4.2 Δομή και Λειτουργία	44



4.3 Πλεονεκτήματα.....	46
4.4 Τεχνολογίες Κλειδιά του UDN.....	47
4.5 Προκλήσεις και Προβλήματα.....	48
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	50
5.1 Εισαγωγή.....	50
5.2 Μεθοδολογία.....	51
5.3 Ultra-dense Υλοποιήσεις.....	51
5.3.1 Κεφαλαιακές Δαπάνες.....	51
5.3.2 Λειτουργικές Δαπάνες.....	52
5.3.3 Συνολικό Κόστος.....	53
5.4 Macrocellular Διατάξεις.....	53
5.4.1 Κεφαλαιακές Δαπάνες.....	53
5.4.2 Λειτουργικές Δαπάνες.....	53
5.4.3 Συνολικό Κόστος.....	54
5.5 Μοντέλα Τιμολόγησης.....	54
5.6 Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis-SA).....	56
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	58
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
8. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	71



ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας

Εικόνα 2.2.1: Motorola Dynatac 8000x

Εικόνα 2.2.3: UMTS Network Structure

Εικόνα 2.2.4: Εξέλιξη κινητών δικτύων (1G-4G)

Εικόνα 2.3.1: Βασικό Μοντέλο MIMO

Εικόνα 2.3.2: Αρχιτεκτονική τεχνολογίας SDN

Εικόνα 2.3.5: Αρχιτεκτονική τεχνολογίας CR

Εικόνα 2.3.6: Χρήσεις του Internet of Things

Εικόνα 3.2: Microcell Πύργος

Εικόνα 3.4.1: Συσκευές Femtocell

Εικόνα 4.2: UDN δομή

Εικόνα 6.3: Κόστος κεφαλαίου της ultra-dense σε σχέση με τον αριθμό κεραιών

Εικόνα 6.4: Λειτουργικό κόστος της ultra-dense σε σχέση με τον αριθμό κεραιών

Εικόνα 6.5: Συνολικό κόστος της ultra-dense τεχνολογίας

Εικόνα 6.6: Συνολικό κόστος ultra-dense υλοποιήσεων για backhaul τεχνολογίες

Εικόνα 6.7: Συνολικό κόστος ultra-dense υλοποιήσεων για πολύ μεγάλες υποδομές

Εικόνα 6.9: Ανάλυση ευαισθησίας της throughput density για τα small cells

Εικόνα 6.10: TCO των small cells για το κόστος eNB του BS

Εικόνα 6.11: TCO των small cells για το C_{EPC} του BS

Εικόνα 6.12: Προτεινόμενη τιμή με βάση την προσφερόμενη απόδοση

Εικόνα 6.13: Κόστος και κέρδος των small cells σε σχέση με το macrocellular κόστος και τα small cells που αναπτύσσονται



ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.3: Διαφορές δικτύων 4G και 5G

Πίνακας 2.4: Απαιτήσεις 5G vs. Beyond 5G vs. 6G

Πίνακας 4.1: Small cells

Πίνακας 4.5: UDN vs Traditional Cellular Network

Πίνακας 5.6: Ανάλυση SWOT της ανάλυσης ευαισθησίας στον τομέα των τηλεπικοινωνιών

Πίνακας 6.1: Πειραματική Ανάλυση-Παράμετροι κόστους και μεταβλητές συστήματος

Πίνακας 6.2: Πειραματική Ανάλυση-Παράμετροι τιμολόγησης και μεταβλητές συστήματος

Πίνακας 6.8: Throughput density σε διάφορες περιοχές



ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1G: First Generation cellular technology

2G: Second Generation cellular technology

3G: Third Generation cellular technology

3GPP: 3rd Generation Partnership Project

4G: Fourth Generation cellular technology

5G: Fifth Generation cellular technology

6G: Sixth Generation cellular technology

AMPS: Advanced Mobile Phone System

AMTS: Advanced Mobile Telephone Service

ANR: Automatic Neighbor Relations

AR: Augmented Reality

APs: Access Points

BCI: Brain-Computer Interactions

BS: Base Station

CAPEX: Capital Expenditure

CDMA: Code Division Multiple Access

CN: Core Network

CR: Cognitive Radio

CRAS: Connected Robotics and Autonomous Systems

DECT: Digital Enhanced Cordless Telecommunications

DLT: Distributed Ledger Technologies

EDGE: Enhanced Data rates for GSM Evolution

EPC: Evolved Packet Core



eNB: evolved Node-B

FDMA: Frequency Division Multiple Access

GSM: Global System for Mobile Communication

GPRS: General Packet Radio Service

HSDPA: High-Speed Downlink Packet Access

HSPA: High-Speed Packet Access

HSPA+: Evolved High-Speed Packet Access

ID: physical layer Identifier

IMTS: Improved Mobile Telephone Service

IoT: Internet of Things

IP: Internet Protocol

LAN: Local Area Network

LTE: Long Term Evolution

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MLB: Mobile Load Balancing

MMWave: Milimeter Wave

mMTC: massive Machine Type Communications

MR: Mixed Reality

MTS: Mobile Telephone Service

NFV: Network Function Virtualization

NFVI: NFV Infrastructure

NFV MANO: NFV Management and Orchestration

NMT: Nordic Mobile Telephone



OPEX: Operational Expenditure

PHS: Personal Handy-phone System

PU: Primary User

QoE: Quality of Experience

QoS: Quality of Service

RAT: Radio Access Technology

RAN: Radio Access Network

RF: Radio Frequency

RRM: Radio Resource Management

SA: Sensitivity Analysis

SDN: Software Defined Networking

SIM: Subscriber Identity Module

SU: Secondary User

SWOT: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats

TACS: Total Access Communication System

TCO: Total Cost of Ownership

TDMA: Time Division Multiple Access

UDN: Ultra-dense Network

UE: User Equipment

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

URLLC: Ultra-Reliable Low Latency Communications

UTRAN: UMTS Terrestrial Radio Access Network-RAN

VNFs: Virtual Network Functions

VR: Virtual Reality



WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access

WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN: Wireless Local Area Network

XR: Extended Reality



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα και στο πρόσφατο μέλλον, για να ανταπεξέλθουν στις προκλήσεις, τα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να προχωρήσουν και να προσδεύσουν με διάφορους τρόπους. Στοιχεία πρόσφατης τεχνολογίας προβάλλονται ως τμήμα της προόδου των τρεχουσών τεχνολογιών που βασίζονται σε ασύρματα δίκτυα. Ωστόσο, κάποια βοηθητικά στοιχεία είναι πιθανό, επίσης, να αποτελούν μελλοντικές νέες ασύρματες τεχνολογίες, με τις οποίες μπορεί να συνοδεύονται οι πιο εξελιγμένες τεχνολογίες. Κάποια δείγματα των στοιχείων αυτών είναι οι διαφορετικοί τρόποι πρόσβασης στο φάσμα και τα σημαντικά υψηλότερα εύρη συχνοτήτων, η άμεση επικοινωνία συσκευής με συσκευή (device-to-device) και οι ultra-dense υλοποιήσεις.

Η ασύρματη κινητή επικοινωνία, από τη στιγμή της έναρξής της στα τέλη της δεκαετίας του 1970, έχει αντιμετωπίσει από αναλογικές φωνητικές κλήσεις, έως και σύγχρονες τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να παρέχουν υψηλής ποιότητας κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες με πολύ υψηλές ταχύτητες δεδομένων τελικού χρήστη, που φτάνουν αρκετά megabits ανά δευτερόλεπτο σε μεγάλες περιοχές και δεκάδες ή και εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο τοπικά. Οι όλο και αυξανόμενες βελτιώσεις των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα δίκτυα κινητής επικοινωνίας, μαζί με την έναρξη νέων τύπων κινητών συσκευών, έχουν προκαλέσει μια έκρηξη νέων εφαρμογών, καθώς και μια σημαντική ανάπτυξη στην κυκλοφορία του δικτύου, σε μικρό χρονικό διάστημα.

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει σήμερα και θα αντιμετωπίσει στο μέλλον η ασύρματη επικοινωνία είναι πολλές. Οι αποφάσεις που θα παρθούν και οι τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη αυτών των προκλήσεων, μπορεί να οδηγήσουν σε μια δικτυωμένη κοινωνία στην οποία θα υπάρχει απεριόριστη πρόσβαση σε πληροφορίες και κοινή χρήση δεδομένων που είναι προσβάσιμα παντού και κάθε φορά για όλους και για όλα. Παρόλα αυτά, με τη συνεχή εξέλιξη των τεχνολογιών, είναι πιθανό να μην μπορούν να αντιμετωπιστούν επαρκώς όλες οι προκλήσεις. Η ανάπτυξη εντελώς νέων ασύρματων τεχνολογιών είναι ικανή να συμπληρώσει τις ήδη υπάρχουσες και να οδηγήσει στην υλοποίηση αυτής της δικτυωμένης κοινωνίας. [61]

Η εξέλιξη του ασύρματου δικτύου έχει περάσει από πολλά στάδια, έχοντας ως επίκεντρο στοιχεία και τεχνολογίες πομποδέκτη, όπως η τεχνολογία Multiple Input Multiple Output (MIMO), κατανομή πόρων και διαχείριση δικτύου και, τέλος, επικοινωνίες με επίκεντρο τον χρήστη και με γνώμονα τη συσκευή για την υλοποίηση της έννοιας του Διαδικτύου των πάντων (Internet of everything). Διάφορες εφαρμογές, όπως αυτές της κοινωνικής δικτύωσης, επηρεάζουν κατά πολύ την εξέλιξη των δικτύων, απαιτώντας έτσι την επιτάχυνσή της. Το κέντρο βάρους μετατοπίζεται στο 5G και στη συνδεσιμότητα που βασίζεται σε εφαρμογές, η οποία ενεργοποιείται μέσω πυκνής ανάπτυξης κόμβων πρόσβασης/εξυπηρέτησης και εκμετάλλευσης επικοινωνιών, που συνήθως αναφέρονται ως network densification. Αντιθέτως με τις προηγούμενες εφαρμογές εξέλιξης της κινητής τηλεφωνίας, οι



οποίες βασίστηκαν κυρίως στην αύξηση του εύρους ζώνης του συστήματος και στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης (πολλαπλών χρηστών), το network densification αποτελεί σταθμό στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων. Χρησιμοποιήθηκε και σε προηγούμενες γενιές κινητών δικτύων, κυρίως όμως ως πρόσθετο στοιχείο, ώστε να αντιμετωπιστούν τοπικά τα υπερφορτωμένα τμήματα του συστήματος και όχι ως μια θεμελιώδης ιδέα σχεδιασμού/συστήματος μεγάλης κλίμακας.

Με σκοπό την πραγματοποίηση όλων των στόχων για το 5G, η πυκνότητα των κόμβων πρόσβασης/εξυπηρέτησης αυξάνεται σε σημείο που να είναι συγκρίσιμη ή να ξεπεράσει την πυκνότητα του εξοπλισμού χρήστη (User Equipment-UE), εισάγοντας έτσι το ultra-dense network (UDN). Η υλοποίηση αυτής της διασπαστικής τοπολογίας δικτύου, σε σχέση με την πορεία εξέλιξης των προηγούμενων κυψελωτών δικτύων, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας, εκτός από τα πυκνοποιημένα παραδοσιακά Access Nodes (ANs), όπως τα small cells, τα ANs που αναπτύσσονται από τον χρήστη (π.χ. Wi-Fi και femtocells), καθώς επίσης και UEs των προμηθευτών υποδομής, δηλαδή (κινητές) συσκευές με υπολογιστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες που τους επιτρέπουν να λειτουργούν ως ANs υποδομής.

Ωστόσο, μια επιτυχημένη υλοποίηση UDN δεν είναι τόσο απλή και εύκολη, λόγω των παρεμβολών που εισάγονται και, σε μεγάλο βαθμό, λόγω της ακανόνιστης ανάπτυξης των ANs με εκπομπές στο πλαίσιο ενός καθολικού συστήματος επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Για την επιτυχή και αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, είναι υψίστης σημασίας η σαφής κατανόηση των θεμελιωδών ορίων απόδοσης του UDN, που επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. [62]

Η πυκνότητα των ασύρματων δικτύων υποκινείται από τις τάσεις της κίνησης δεδομένων που μετρούνται. Με τους σπάνιους πόρους του φάσματος, μια ζωτική και μακροπρόθεσμη λύση είναι η αύξηση της επαναχρησιμοποίησης ανά μονάδα επιφάνειας του υπάρχοντος φάσματος. Η επαναχρησιμοποίηση αυτή του φάσματος έχει διττό κέρδος. Το φάσμα επαναχρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, πράγμα που βελτιώνει σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου. Επίσης, η σύνδεση με τον τελικό χρήστη γίνεται μικρότερη, γεγονός που βελτιώνει την ποιότητα της σύνδεσης.

Προφανώς, το network densification δεν μπορεί να συνεχιστεί για πάντα. Θα πρέπει να υπάρχει ένα θεμελιώδες όριο για το network densification, το οποίο απαιτεί εκτεταμένη έρευνα για ρεαλιστικά μοντέλα συστημάτων για την αποτύπωση της πραγματικότητας των πυκνών dense δικτύων. Ωστόσο, ορισμένες εξιδανικεύσεις του μοντέλου χρειάζονται περαιτέρω έρευνες για την πλήρη κατανόηση αυτών των θεμελιωδών ορίων. [49]

1.1 Αναγκαιότητα της Διπλωματικής Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει μια τεχνοοικονομική ανάλυση των ultra-dense υλοποιήσεων, στο πλαίσιο της πέμπτης γενιάς κινητών δικτύων. Γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της συγκεκριμένης



τεχνολογίας και παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα, όπως και προκλήσεις και προβλήματα, ώστε να διευκολύνουν τόσο τους συνδρομητές, όσο και τους παρόχους κινητών δικτύων, στην επιλογή αυτής της τεχνολογίας. Επίσης, παρουσιάζονται και άλλες τεχνολογίες, συγκεκριμένα 5G τεχνολογίες, με σκοπό να υπάρξει μια σύγκριση των τεχνολογιών αυτών με τις ultra-dense υλοποιήσεις και να αποφασιστεί κατά πόσο καλύτερη είναι η ultra-dense τεχνολογία, κατά πόσο συμφέρει και κατά πόσο μπορεί να γίνει συνδυασμός της με άλλες τεχνολογίες.

Επιπλέον, στόχος της διπλωματικής είναι η παρουσίαση κάποιων μοντέλων υπολογισμού των σημαντικότερων δαπανών της τεχνολογίας, ώστε οι ενδιαφερόμενοι, με τη χρήση κατάλληλων τιμών, να είναι σε θέση να αποφασίσουν αν θέλουν να χρησιμοποιήσουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία, καθώς και να τη συγκρίνουν με άλλες τεχνολογίες που ανήκουν στις macrocellular διατάξεις. Στον τομέα της οικονομικής ανάλυσης της ultra-dense τεχνολογίας δεν υπάρχουν αρκετές και πρόσφατες μελέτες, συνεπώς αναλύσεις όπως η συγκεκριμένη, είναι αναγκαίες και σημαντικές. Με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μελέτη είναι προφανές πόσο συμφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία τόσο σε επίπεδο κοστολόγησης, όσο και σε επίπεδο κέρδους, ενώ προτείνονται και κάποιες λύσεις που μπορεί να εφαρμοστούν από τους παρόχους και μελλοντικά να οδηγήσουν τις ultra-dense υλοποιήσεις σε μια ακόμα καλύτερη οικονομικά λύση.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι γενιές των κινητών δικτύων επικοινωνίας με τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους, από την αρχή μέχρι και σήμερα. Δίνεται έμφαση στην πέμπτη γενιά κινητών δικτύων και στις σημαντικότερες και πιο δημοφιλείς τεχνολογίες της. Ακόμη, περιλαμβάνεται και μια εισαγωγή στην έκτη γενιά κινητών δικτύων, τις υπηρεσίες που θα προσφέρει και ένα πίνακα με τις πιο βασικές διαφορές που θα έχει με την πέμπτη γενιά κινητών δικτύων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα είδη των κυψελών, δίνοντας έμφαση στα femtocells, ενώ το Κεφάλαιο 4 πραγματεύεται την τεχνολογία που εξετάζει η διπλωματική εργασία, την ultra-dense τεχνολογία. Αναλύονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της, όπως δομή, λειτουργία, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ενώ παρουσιάζονται και κάποιες τεχνολογίες του ultra-dense δικτύου (UDN).

Τα Κεφάλαια 5 και 6 αφορούν την οικονομική ανάλυση της ultra-dense τεχνολογίας. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 5 αναλύονται τα βασικότερα κόστη, τα οποία είναι το κόστος λειτουργίας και το κόστος κεφαλαίου και παρουσιάζονται σε εξισώσεις, τόσο για τις ultra-dense υλοποιήσεις, όσο και για τις macrocellular διατάξεις, καταλήγοντας έτσι και στο συνολικό κόστος που έχουν και ποιοι παράγοντες και μεταβλητές το επηρεάζουν.

Στο Κεφάλαιο 6, χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις του Κεφαλαίου 5 και εισάγοντας ενδεικτικές τιμές που παρουσιάζονται σε πίνακες, γίνεται η πειραματική ανάλυση με την παρουσίαση κάποιων διαγραμμάτων, ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Τα διαγράμματα αφορούν τα διαφορετικά κόστη και πώς αυτά επηρεάζονται από κάποιες παραμέτρους.



Στο Κεφάλαιο 7 σημειώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική ανάλυση του Κεφαλαίου 6 και, τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα που ενδέχεται να βοηθήσουν ενδιαφερόμενους και επιστήμονες όσον αφορά τη συγκεκριμένη τεχνολογία, αλλά και τις τηλεπικοινωνίες γενικότερα.



2. ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή στα Κινητά Δίκτυα Επικοινωνίας

Τα κινητά δίκτυα έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και αποτελούν την πιο διαδεδομένη εφαρμογή στα ασύρματα δίκτυα. Ονομάζονται και κυψελοειδή δίκτυα καθώς οι γεωγραφικές περιοχές που καλύπτουν τηλεπικοινωνιακά έχουν κυψελοειδή μορφή και κάθε περιοχή αποτελεί ένα κελί (cell). Παρέχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων στους συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας με αυξημένη χωρητικότητα δικτύου και με ποιότητα στην επικοινωνία. [1], [2]

Σπουδαία χαρακτηριστικά που κάνουν τα κυψελοειδή δίκτυα να ξεχωρίζουν είναι, επίσης, το συμβατό και φιλικό περιβάλλον που προσφέρουν στους χρήστες, η έλλειψη παρεμβολών όπως και η έλλειψη μετάδοσης λανθασμένων πληροφοριών. Σε συνδυασμό μάλιστα με τη μείωση του συνδρομητικού κόστους, είναι φανερό πως καλύπτουν και βελτιώνουν τις ελλείψεις των παλαιότερων παραδοσιακών συστημάτων. [2]

Ωστόσο, τόσο οι εφαρμογές που χρησιμοποιεί ένα κινητό δίκτυο όσο και ο σχεδιαστής του, έχουν να αντιμετωπίσουν κάποιους περιορισμούς. Μια ιδιαιτερότητα των ασύρματων κυψελοειδών δικτύων είναι ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, καθώς και η υψηλή μεταβλητότητά του. Καιρικά φαινόμενα, παρεμβολές από άλλες συσκευές και ο αέρας ως μέσο μετάδοσης είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά που ευθύνονται για αυτές τις ιδιαιτερότητες. Επιπλέον, ακόμα και η κινητικότητα του χρήστη μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του δικτύου.

Στα ασύρματα δίκτυα προκαλούνται, ακόμη, προβλήματα από τις ετερογενείς συνδέσεις, λαμβάνοντας υπόψιν πόσες πολλές και διαφορετικές συσκευές υπάρχουν σήμερα σε μια περιοχή κάλυψης και πόσο μπορεί να επηρεάσει αυτό την ποιότητα του δικτύου. Κίνδυνοι ασφάλειας, επιπλέον, καθιστούν μια ασύρματη σύνδεση αρκετά ευάλωτη σε σχέση με μια ενσύρματη όπου οι χρήστες είναι συνδεδεμένοι σε ένα δίκτυο, με αποτέλεσμα να είναι ακόμα πιο επικίνδυνη η υποκλοπή δεδομένων. Τέλος, η χαμηλή ισχύς των κινητών συσκευών και το μέγεθος της επιφάνειας διεπαφής τους, το οποίο είναι μικρό για το χειρισμό πολλών λειτουργιών ταυτόχρονα, είναι κάποιες ιδιαιτερότητες που δεν μπορούν να περάσουν απαρατήρητες. [1]

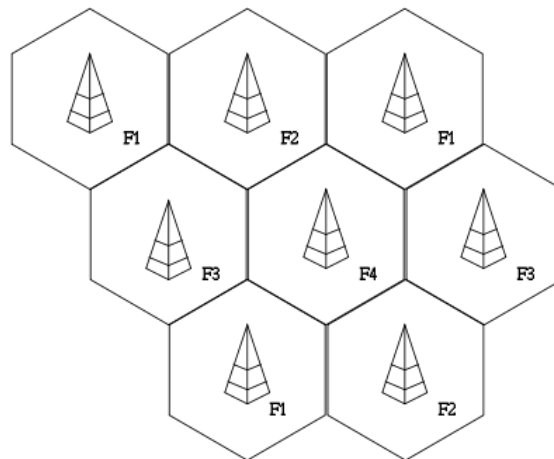
Τα κυψελοειδή δίκτυα καλύπτουν ένα χώρο ο οποίος χωρίζεται σε κυψέλες και κάθε κυψέλη περιέχει το σταθμό βάσης (Base Station-BS) και την κεραία. Ο σταθμός βάσης τοποθετείται μέσα στην κυψέλη στην κατάλληλη θέση, με τέτοιο τρόπο ώστε οι κυψέλες να ισαπέχουν, και επικοινωνεί με τους κινητούς σταθμούς. Οι κεραίες εκπομπής και λήψης τοποθετούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένο ιστό στο σταθμό βάσης, ο οποίος περιέχει επίσης και τα κανάλια ραδιοεπικοινωνίας. Προβλήματα στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει η αραιή τοποθέτηση των σταθμών

βάσης και η αύξηση στον αριθμό των κλήσεων, καθώς ο σταθμός μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι ένα μέγιστο αριθμό. [1], [3], [4]

Ο κινητός σταθμός στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιείται εν κινήσει και σε διαφορετικές περιοχές. Βασικό δομικό στοιχείο είναι και ο δίαυλος ελέγχου. Πρόκειται για διαύλους ραδιοεπικοινωνίας που μεταδίδουν πληροφορίες όπως η προετοιμασία, η αίτηση και η έναρξη μιας κλήσης μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού. Οι δίαυλοι downlink και uplink μεταδίδουν τις πληροφορίες από το σταθμό βάσης προς το κινητό και από το κινητό προς το σταθμό βάσης αντίστοιχα.

Βασικό μέρος στα κινητά δίκτυα επικοινωνίας είναι ακόμη το κέντρο μεταγωγής το οποίο είναι υπεύθυνο για το συντονισμό της δρομολόγησης κλήσεων στα όρια μιας περιοχής εξυπηρέτησης ενός κινητού δικτύου. Επιπλέον, διαχειρίζεται και τη διαδικασία της μεταπομπής, ή αλλιώς handoff, σύμφωνα με την οποία ένας κινητός σταθμός μεταφέρεται από ένα κανάλι σε ένα άλλο ή από ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλον. [4]

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας είναι η επαναχρησιμοποίηση καναλιών. Τα διαθέσιμα κανάλια στα κυψελοειδή δίκτυα είναι περιορισμένα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται παρεμβολές όταν χρησιμοποιούνται και από άλλους χρήστες σε κοντινή απόσταση. Το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο έντονο όταν πρόκειται για γειτονικές κυψέλες. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να χρησιμοποιούνται διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων από γειτονικές κυψέλες, ενώ όταν οι κυψέλες έχουν μακρινή απόσταση και δεν τίθεται το θέμα των παρεμβολών, μπορούν να χρησιμοποιούνται οι ίδιες συχνοτικές ζώνες. [1]



Εικόνα 2.1: Οι κυψέλες με το ίδιο όνομα χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια συχνοτήτων [2]

Με σκοπό να αξιοποιηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα τα συχνοτικά κανάλια, ακολουθούνται κάποιες στρατηγικές που διακρίνονται σε:

- σταθερές και
- δυναμικές.



Στην περίπτωση των σταθερών στρατηγικών, οι κυψέλες έχουν ένα συγκεκριμένο αριθμό καναλιών τα οποία εξυπηρετούν κάθε κλήση που πραγματοποιείται μέσα στην εκάστοτε κυψέλη. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια, η κλήση δεν εξυπηρετείται. Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα της χρησιμοποίησης ενός γειτονικού καναλιού που είναι διαθέσιμο (στρατηγική δανεισμού), με την προϋπόθεση ότι δεν προκαλεί παρεμβολές στην κυψέλη, πράγμα που επιβλέπεται από το κέντρο μεταγωγής.

Σε αντίθεση με τη σταθερή στρατηγική, στη δυναμική στρατηγική οι κυψέλες δεν έχουν κάποιο περιορισμό στον αριθμό των καναλιών. Το κέντρο μεταγωγής είναι υπεύθυνο για τη διάθεση καναλιού στο σταθμό βάσης όταν πραγματοποιείται μια κλήση, επιβλέποντας και πάλι την κατάσταση του καναλιού και την πιθανότητα μη εξυπηρέτησης. Με τη στρατηγική αυτή αυξάνεται η χωρητικότητα κορμού του συστήματος, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των καναλιών που είναι διαθέσιμα, ταυτόχρονα όμως αυξάνεται ο φόρτος στο κέντρο μεταγωγής λόγω των ταυτόχρονων λήψεων δεδομένων από όλα τα κανάλια. [4]

Μια βασική αρχή στα κυψελωτά δίκτυα είναι αυτή της πολυπλεξίας. Σύμφωνα με αυτήν, εξυπηρετείται μεγάλος αριθμός χρηστών με περιορισμένη ποσότητα φάσματος. Οι χρήστες έχουν πρόσβαση σε ένα μικρό σύνολο διαθέσιμων καναλιών σε μια κυψέλη και ύστερα από την κλήση τους, το κανάλι γίνεται και πάλι διαθέσιμο. Με αυτόν τον τρόπο, περιορισμένος αριθμός καναλιών εξυπηρετεί μεγάλο αριθμό χρηστών. Οι TDMA (Time Division Multiple Access), FDMA (Frequency Division Multiple Access) και CDMA (Code Division Multiple Access) είναι από τις βασικότερες μεθόδους πολυπλεξίας και αντιπροσωπεύουν την πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου, συχνοτήτων και κώδικα αντίστοιχα. [1], [4]

2.2 Προηγούμενες Γενιές Κινητών Δικτύων

Η κινητή τηλεφωνία αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας του ανθρώπου με περισσότερους από 6 δις συνδρομητές της σε όλο τον κόσμο. Από την αρχή της ψηφιακής μετάδοσης το 1946 μέχρι σήμερα, η εξέλιξη στον τομέα κινητής τηλεφωνίας είναι αναμφισβήτητα αλματώδης. [5]

Η 0G τεχνολογία αποτελείται από τα ραδιοτηλεφωνικά κινητά συστήματα, τα οποία εμφανίστηκαν πριν τα κυψελωειδή συστήματα πρώτης γενιάς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα τηλέφωνα αυτοκινήτου που διαφημίστηκαν το 1946 στις ΗΠΑ. Οι Push to Talk, το Mobile Telephone Service (MTS), το Improved Mobile Telephone Service (IMTS) και το Advanced Mobile Telephone Service (AMTS) είναι μερικές από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται από αυτά τα συστήματα.

Η ιδιαιτερότητα των ραδιοτηλεφωνικών συστημάτων σε σχέση με παλαιότερα συστήματα είναι η διάθεσή τους στο εμπόριο ως υπηρεσία που ήταν μέρος δημόσιου δικτύου και όχι κάποιου κλειστού. [6], [7]

2.2.1 Πρώτη Γενιά Κινητών Δικτύων

Τη δεκαετία του 1980 η εξέλιξη στα ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας οδήγησε στα πρώτης γενιάς κινητά τηλέφωνα (1G). Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας αυτής ήταν η χρήση αναλογικών σημάτων στην ομιλία με αποτέλεσμα η μετάδοση της φωνής να έχει χαμηλή ποιότητα και να δημιουργούνται και προβλήματα στη σύνδεση. [8]

Το βάρος, το οποίο υπολογίζεται περίπου στα 2 κιλά, το μεγάλο κόστος, όπως και η χρήση, που συνίσταται σε εταιρική και όχι τόσο σε προσωπική, είναι κάποιιοι από τους παράγοντες των τηλεφώνων πρώτης γενιάς που τα καθιστούσαν μη φιλικά προς το χρήστη. Επιπλέον περιορισμοί στην εποχή των 1G δικτύων ήταν το χαμηλό επίπεδο ασφάλειας, η περιορισμένη κάλυψη, η χαμηλή χωρητικότητα λόγω της τεχνολογίας FDMA, καθώς και η έλλειψη υποστήριξης περιαγωγής μεταξύ διαφορετικών παρόχων. [6]



Εικόνα 2.2.1: Κινητό πρώτης γενιάς δικτύων – Motorola Dynatac 8000x [9]

Κάποιες από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνταν από τα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι οι:

- AMPS (Advanced Mobile Phone System)
- NMT (Nordic Mobile Telephone)
- TACS (Total Access Communication System)

Η τεχνολογία AMPS είναι ένα αναλογικό πρότυπο συστήματος κινητής τηλεφωνίας που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ στα εργαστήρια της Bell. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία FDMA και λειτουργεί σε συχνότητες των 800MHz (824-894MHz). Με το σύστημα AMPS τα κέντρα κυψελών μπορούσαν να εκχωρήσουν κανάλια σε συσκευές χειρός με βάση την ισχύ του σήματος, επιτρέποντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση της ίδιας συχνότητας, χωρίς παρεμβολές, εάν οι τοποθεσίες ήταν αρκετά διαχωρισμένες. Τα κανάλια ομαδοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε ένα να



χρησιμοποιούνται διαφορετικά σύνολα σε γειτονικά κελιά. Έτσι, μια γεωγραφική περιοχή μπορούσε να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό τηλεφώνων. [10]

Το σύστημα NMT βασίζεται στην αναλογική τεχνολογία και πρόκειται για ένα αυτόματο σύστημα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο δημιουργήθηκε από τις σκανδιναβικές χώρες Νορβηγία και Σουηδία και εμφανίστηκε το 1981. Με την τεχνολογία NMT το δίκτυο μπορούσε να εξυπηρετήσει περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα σε μικρότερη εμβέλεια και επέτρεπε επίσης, ταυτόχρονη λήψη και μετάδοση φωνής. Το μέγεθος των κυψελών σε ένα NMT δίκτυο κυμαινόταν από 2 έως 30 χιλιόμετρα. [6], [11]

Τη δεκαετία του '80 αναπτύχθηκε στην Ευρώπη το σύστημα TACS, το οποίο ήταν μια παραλλαγή του συστήματος AMPS. Η τεχνολογία αυτή, σε αντίθεση με το AMPS, αξιοποιούσε συχνότητες 900MHz και υποστήριζε διάφορες υπηρεσίες, όπως η πληροφορία χρέωσης, υποστηρίζονταν από αυτή. [8]

2.2.2 Δεύτερη Γενιά Κινητών Δικτύων

Οι ελλείψεις και οι περιορισμοί της πρώτης γενιάς κινητών δικτύων αποτέλεσαν την αφετηρία για τη δημιουργία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς (2G). Τα ραδιοσήματα που χρησιμοποιούσαν τα δίκτυα δεύτερης γενιάς ήταν ψηφιακά, σε αντίθεση με αυτά της πρώτης γενιάς που ήταν αναλογικά. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούσε η γενιά αυτή ήταν οι TDMA και CDMA με τις οποίες οι χρήστες είχαν τη δυνατότητα να αποστέλλουν και να λαμβάνουν μηνύματα κειμένου, εικόνων και πολυμέσων. Το φάσμα στα δίκτυα 2G ήταν πολύ πιο αποτελεσματικό καθώς η χωρητικότητα των συστημάτων αυξήθηκε σημαντικά σε σχέση με τα δίκτυα 1G. [7], [12]

Στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, ένα από τα βασικότερα πρότυπα αποτελεί αυτό του GSM (Global System for Mobile Communications). Αρχικά ονομάστηκε Group Special Mobile και εμφανίστηκε το 1982 όταν το Ευρωπαϊκό Τηλεπικοινωνιακό Συμβούλιο ξεκίνησε να δημιουργεί ένα κοινό Ευρωπαϊκό ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς. Το GSM είναι κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα και χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Επιπλέον, χρησιμοποιεί την τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης διαχωρίζοντας το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων σε έναν αριθμό καναλιών και στη συνέχεια τα διαιρεί σε χρονοθυρίδες για τη μετάδοση σημάτων. [8]

Για κάθε κανάλι 200kHz, το GSM υποστηρίζει 8 χρήστες. Κάποιες από τις τηλεπηρεσίες που παρέχει είναι φαξ, κλήση έκτακτης ανάγκης, videotext, teletext, ενώ παρέχει διάφορες υπηρεσίες δεδομένων με τις οποίες είναι δυνατή η επικοινωνία υπολογιστή με υπολογιστή και η μεταγωγή πακέτων. Δημοφιλές χαρακτηριστικό του συστήματος GSM είναι η κάρτα SIM (Subscriber Identity Module) με την οποία κάθε χρήστης έχει ένα μοναδικό αριθμό. [12]

Εξέλιξη των δικτύων 2G αποτελούν τα δίκτυα γενιάς 2.5G. Η αναβάθμιση έγινε θέτοντας ως στόχο την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και την παροχή



ποιοτικότερων, καθώς και περισσότερων υπηρεσιών. Η τεχνολογία που χρησιμοποιούσαν τα δίκτυα αυτά είναι η GPRS (General Packet Radio Service) η οποία πρόσφερε γρήγορη αποστολή και λήψη δεδομένων με την τεχνολογία μεταγωγής πακέτων. Επέτρεπε, επίσης, να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα περισσότερες χρονοθυρίδες.

Μια μεταβατική γενιά κινητών δικτύων πριν τα τρίτης γενιάς δίκτυα (3G) αποτελούσε η γενιά 2.7G. Το EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) είναι η κύρια τεχνολογία που χρησιμοποιούταν από αυτή τη γενιά και ήταν μια εξέλιξη της GPRS. Με την τεχνολογία αυτή επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες μετάδοσης που παρέχουν υπηρεσίες 3G, όπως video streaming, Internet browsing κτλ., ενώ η χωρητικότητα δικτύου στα 2G δίκτυα τριπλασιάζεται. Οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας επιτρέπουν την εγκατάσταση του EDGE μόνο με βελτίωση του υπάρχοντος εξοπλισμού χωρίς τη χρήση νέου. [8]

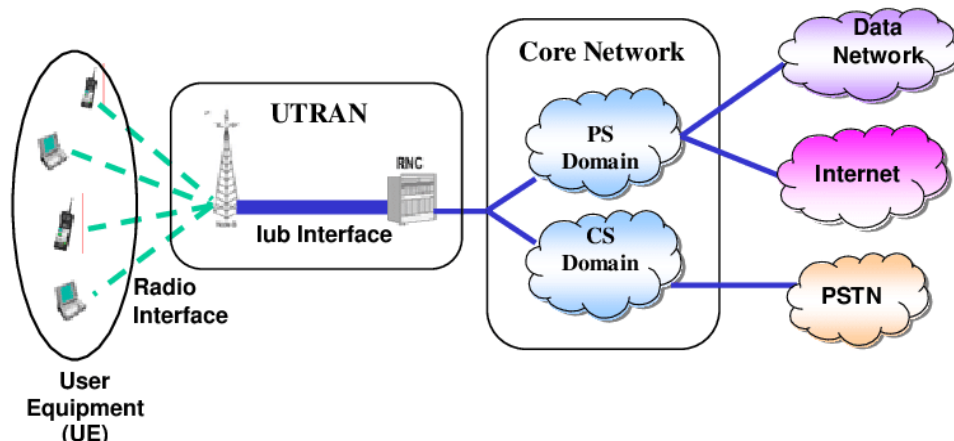
2.2.3 Τρίτη Γενιά Κινητών Δικτύων

Η τεχνολογία 2G άρχισε να διαδίδεται τόσο πολύ με αποτέλεσμα να αυξηθούν κατά πολύ οι χρήστες κινητών τηλεφώνων της. Αυτό επέφερε και τη ζήτηση για περισσότερες υπηρεσίες δεδομένων και με μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης, πράγμα που αποτέλεσε την αρχή για την ανάπτυξη της επόμενης γενιάς κινητών δικτύων, αυτή της τρίτης γενιάς (3G). Τα 3G δίκτυα τηλεπικοινωνιών υποστήριζαν υπηρεσίες που προσέφεραν μετάδοση πληροφοριών ρυθμού τουλάχιστον 144kbit/s. [13], [14]

Από τα σημαντικότερα συστήματα της τρίτης γενιάς ήταν αυτό του UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Το σύστημα αυτό έκανε την εμφάνισή του το 2001 και χάρις σε αυτό αυξήθηκε η χωρητικότητα, η υποστήριξη δεδομένων και το εύρος υπηρεσιών κάνοντας χρήση ενός πρωτοποριακού σχήματος ράδιο-πρόσβασης και ενός εξελιγμένου αναπτυσσόμενου καλωδιακού δικτύου. Σε σύγκριση με τα προηγούμενα συστήματα, το UMTS υποστήριζε μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, όπως φαίνεται και παρακάτω:

- GSM (9.6Kbps)
- GPRS (115Kbps)
- EDGE (384Kbps)
- UMTS (2000Kbps)

Όσον αφορά την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο, το UMTS χρησιμοποιούσε το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) το οποίο εκμεταλλευόταν ένα ζεύγος καναλιών εύρους 5MHz. Επίσης, η αρχιτεκτονική του συστήματος UMTS περιλάμβανε το CN (Core Network), το UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network-RAN) και το τερματικό του χρήστη (User Equipment-UE), ενώ τα κανάλια του χωριζόταν σε Logical Channels, Transport Channels και Physical Channels. [5]



Εικόνα 2.2.3: Δομή Δικτύου UMTS [15]

Μια εξέλιξη της τρίτης γενιάς κινητών δικτύων αποτελούσε η τεχνολογία HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) η οποία άνηκε στα πρότυπα HSPA (High-Speed Packet Access), γνωστά και ως 3.5G, 3G+ ή turbo 3G. Τα δίκτυα τα οποία ήταν βασισμένα στο UMTS είχαν τη δυνατότητα για μεγαλύτερη χωρητικότητα και αυξημένη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων χάρις στην τεχνολογία αυτή. Οι ταχύτητες λήψης κυμαίνονταν στα 1.8, 3.6, 7.2 και 14Mbit/s, ενώ για ακόμα πιο αυξημένες ταχύτητες υπήρχε η τεχνολογία HSPA+ (Evolved High-Speed Packet Access). [14]

2.2.4 Τέταρτη Γενιά Κινητών Δικτύων

Η γενιά που ακολούθησε μετά το 3G είναι η τέταρτη γενιά κινητών δικτύων (4G). Τα χαρακτηριστικά που κάνουν μια συσκευή να αναγνωρίζεται σαν συσκευή 4^{ης} γενιάς είναι, αρχικά, να βασίζεται στο IP πρωτόκολλο (Internet Protocol), καθώς και να εξυπηρετεί ταχύτητες 100Mbit/s για επικοινωνίες υψηλής κινητικότητας, όπως τα αυτοκίνητα, και 1Gbit/s για επικοινωνίες χαμηλής κινητικότητας, όπως οι πεζοί. Επιπλέον, η μετάδοση της φωνής και των πολυμέσων θα πρέπει να είναι σε ψηφιακή μορφή, ενώ όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, θα πρέπει να υπάρχουν συγκεκριμένοι τύποι ασφάλειας. [14], [16]

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα δίκτυα 4ης γενιάς με αυτά της 3^{ης}, είναι ότι οι τηλεφωνικές κλήσεις, καθώς και άλλα στοιχεία ήχου πλέον εξυπηρετούνται με τη μεταγωγή πακέτων μέσω Διαδικτύου. Σχετικά με το χρήστη, με το 4G υπάρχει η δυνατότητα για υποστήριξη μεγαλύτερων ταχυτήτων με αποτέλεσμα να επιτρέπεται στο χρήστη η πρόσβαση σε εφαρμογές και υπηρεσίες αρκετά πιο εξελιγμένες, οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερο φάσμα συχνοτήτων, σε λιγότερο χρονικό διάστημα. Ο χρήστης, ωστόσο, θα πρέπει να λάβει υπόψιν ότι κάποιες συσκευές 4G έχουν μικρότερη διάρκεια μπαταρίας σε σχέση με τις περισσότερες συσκευές 3G, όπως και ότι οι γεωγραφικές εκτάσεις που καλύπτουν τα

δίκτυα 4^{ης} γενιάς είναι επίσης μικρότερες σε σύγκριση με αυτές των δικτύων 3^{ης} γενιάς. [14]

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην τέταρτη γενιά δικτύων είναι οι Mobile WiMax, LTE (Long Term Evolution) και LTE Advanced. Το WiMax είναι τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης και επιτρέπει στο χρήστη την πρόσβαση στο Ίντερνετ. Το LTE προσφέρει υψηλές ταχύτητες για την ασύρματη επικοινωνία και τη δικτύωση των κινητών συσκευών και εμφανίστηκε το 2009 στο Όσλο και τη Στοκχόλμη. Αποτελεί φυσική εξέλιξη των τεχνολογιών GSM και UMTS. Τόσο το LTE όσο και το Mobile WiMax, αναφέρονται ως συστήματα 4^{ης} γενιάς κινητών τηλεφώνων από εταιρείες κινητής τηλεφωνίας, πράγμα που δεν ισχύει, καθώς δε φέρουν όλα τα βασικά χαρακτηριστικά των 4G που αναφέρονται παραπάνω. Από πολλές πηγές χαρακτηρίζονται ως προ-4G, συχνά και ως 3.9G. Αυτό αποτέλεσε το λόγο για την αναβάθμιση του LTE σε LTE Advanced ώστε να πληροί όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τον χαρακτηρισμό του ως 4G σύστημα. [17], [18]

Το LTE Advanced αποτελεί βελτίωση του LTE, με σκοπό να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις για 4G, και δεν πρόκειται για διαφορετική τεχνολογία. Χρησιμοποιεί τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων με το LTE και είναι συμβατό με τον εξοπλισμό του. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται και η δικαιοσύνη ανάμεσα στους χρήστες. Το LTE Advanced χρησιμοποιεί υπερευρωμένο εύρος ζώνης και υποστηρίζει πολύ υψηλά ποσοστά δεδομένων. [18]



Εικόνα 2.2.4: Η εξέλιξη των κινητών δικτύων – Από το 1G στο 4G [19]

2.3 Πέμπτη Γενιά Κινητών Δικτύων (5G)

Το δίκτυο 5G κατέχει ένα σημαντικό ρόλο σε διεθνές επίπεδο για την επιστημονική κοινότητα, καθώς και για την καθημερινότητα του ανθρώπου. Τα 5G



κινητά δίκτυα προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών και υπηρεσιών με πολύ υψηλές ταχύτητες και χαμηλό χρόνο απόκρισης.

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων 5G. Σε σύγκριση με την τεχνολογία 4G, το 5G αυξάνει τις ταχύτητες έως και 100 φορές, φτάνοντας σε ρυθμούς μετάδοσης τουλάχιστον 100Mbps. Ο χρήστης βέβαια είναι πιθανό να φτάσει και το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (Peak Rate) ο οποίος αγγίζει τα δεκάδες Gbps.

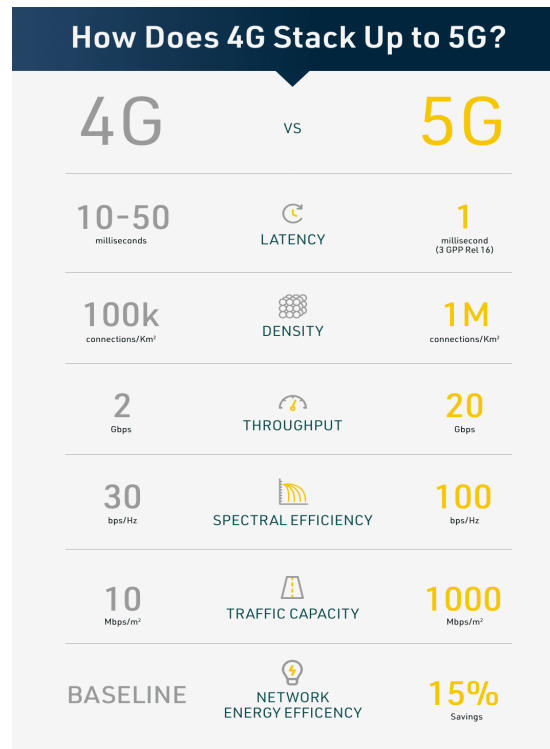
Ακόμη ένα χαρακτηριστικό του 5G είναι ο χρόνος απόκρισης. Στα 4G δίκτυα ο χρόνος απόκρισης είναι της τάξεως των 15ms. Παρόλο που αυτός ο χρόνος είναι αποτελεσματικός για πολλές συσκευές σήμερα, δεν πληροί τις ανάγκες κάποιων εφαρμογών 5G. Αυτός είναι και ο λόγος που το 5G υποστηρίζει χρόνο απόκρισης της τάξεως του 1ms. Άξια αναφοράς είναι, επίσης, και η χωρητικότητα του συστήματος 5G, η οποία έχει αυξηθεί έως και 1000 φορές σε σύγκριση με αυτή των συστημάτων 4G. Άλλο ένα χαρακτηριστικό που έχει αυξηθεί σε σχέση με τα 4G δίκτυα, είναι αυτό της φασματικής απόδοσης, η οποία είναι 10 φορές μεγαλύτερη, πράγμα που αυξάνει και το εύρος ζώνης συχνοτήτων με αποτέλεσμα να εξυπηρετούνται περισσότεροι χρήστες μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Με το 5G οι επιχειρήσεις έχουν την δυνατότητα να προχωρήσουν σε βελτίωση της απόδοσής τους και να εκμεταλλευτούν ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών και υπηρεσιών, όπως είναι το Internet of Things (IoT), η σύνδεση συσκευής με συσκευή, τα αυτόνομα οχήματα, το multiplayer gaming και ταυτόχρονα το streaming, η εικονική πραγματικότητα, με την οποία ο χρήστης αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο, καθώς και μεγαλύτερα projects, όπως είναι για παράδειγμα η δημιουργία μιας «έξυπνης» πόλης που θα λειτουργεί με ένα ψηφιακό οικοσύστημα το οποίο θα εξυπηρετεί τους πολίτες. Σημαντική απαίτηση για την πραγματοποίηση όλων αυτών των εφαρμογών αποτελεί η ασφάλεια, η οποία θα πρέπει να γίνεται όλο και πιο ισχυρή, λόγω όλων των διασυνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο του 5G που μπορεί να οδηγήσουν σε κάποια διαρροή δεδομένων και ενδεχομένως και σε περισσότερους και μεγαλύτερους κινδύνους.

Σχετικά με την ενέργεια που καταναλώνεται στα δίκτυα πέμπτης γενιάς, αυτή μειώνεται, καθώς, εφόσον αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων έως και 100 φορές, αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που καταναλώνεται μειώνεται μέχρι και 100 φορές. Κάποιες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση τόσο της ενέργειας, όσο και τους κόστους είναι, αρχικά, η μείωση των σταθμών βάσης ή ο σχεδιασμός αλγορίθμων για την απενεργοποίησή τους όταν κάποιες ώρες δεν έχουν ενεργούς χρήστες. Επιπλέον, για τη λειτουργία των σταθμών βάσης χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, με αποτέλεσμα όχι μόνο την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση κόστους, αλλά και τη μείωση της επιβάρυνσης στο περιβάλλον.

Αξιόλογο πλεονέκτημα των δικτύων 5G αποτελεί, ακόμη, η δημιουργία πολλών μικρών κυψελών μειώνοντας την απόσταση των σταθμών βάσης. Με αυτόν

τον τρόπο το δίκτυο έχει τη δυνατότητα κάθε χρονική στιγμή να εξυπηρετεί μεγαλύτερο αριθμό χρηστών. [20], [21]



Πίνακας 2.3: 4G vs 5G [22]

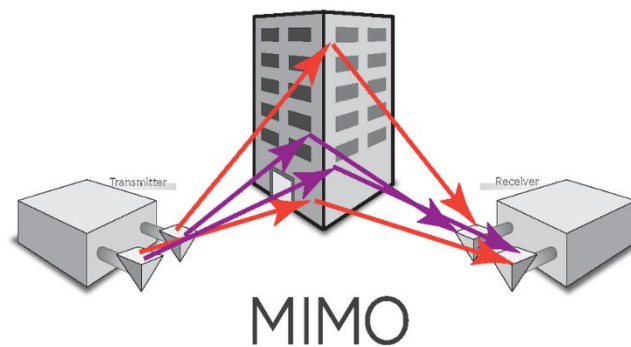
2.3.1 Τεχνολογία Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Η τεχνολογία MIMO θεωρείται μία από τις τεχνολογίες κλειδιά για την πέμπτη γενιά κινητών δικτύων. Το βασικό της μοντέλο αποτελείται από τις κεραιές που υπάρχουν δίπλα από τον πομπό και το δέκτη βελτιώνοντας την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους αλλά και όλες τις επικοινωνίες που πραγματοποιούνται στο δίκτυο. Η τεχνολογία MIMO έχει εμφανιστεί από την τρίτη γενιά κινητών δικτύων και είναι γνωστή για τη χρήση της στο σταθμό βάσης καλύπτοντας εξίσου την πηγή των πληροφοριών και τον προορισμό τους. Αναλόγως με τον αριθμό των κεραιών, η τεχνολογία ονομάζεται MIMO όταν περιλαμβάνει 4, 8 ή 16 κεραιές, ενώ όταν ο αριθμός τους έχει αυξηθεί ραγδαία, για παράδειγμα 64 ή 128 κεραιές, τότε πρόκειται για τη λεγόμενη τεχνολογία Massive MIMO, η οποία δημιουργήθηκε με στόχο να καλύψει τις απαιτήσεις του 5G.

Με τη Massive MIMO επιτυγχάνονται ενισχύσεις στη φασματική απόδοση, χωρίς την αύξηση των σταθμών βάσης και με την πιθανότητα απενεργοποίησης κάποιων από αυτών των ενισχύσεων, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτιστοποίηση στην αποδοτικότητα ισχύος. Επιπροσθέτως, ενισχύεται ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και ο χρόνος απόκρισης. Ακόμη, η τεχνολογία MIMO εκμεταλλεύεται την τεχνολογία έξυπνης κεραίας, η οποία

χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά κυκλώματά της με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και την αύξηση της ταχύτητας.

Ωστόσο, η τεχνολογία MIMO θα πρέπει να αντιμετωπίσει κάποια σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η ανάγκη για βελτιστοποίηση του εύρους ζώνης, οι αριθμοί κβαντισμού σε bits, καθώς και το κόστος που προκύπτει από τις κεραίες που προσθέτονται. [23], [24]



Εικόνα 2.3.1: Το βασικό μοντέλο της τεχνολογίας MIMO [25]

2.3.2 Τεχνολογία Software Defined Networking (SDN)

Η SDN αποτελεί μια τεχνολογία η οποία συνεισφέρει στην ανάπτυξη των 5G δικτύων και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του. Πρόκειται για μια τεχνολογία που διαχωρίζει το επίπεδο του δικτύου και το επίπεδο των δεδομένων, προσφέροντας έτσι μια πιο καθολική όψη του δικτύου. Η αρχιτεκτονική της χωρίζεται σε 3 διαφορετικά επίπεδα:

- Το επίπεδο Ελέγχου (Control Plane)
- Το επίπεδο Δεδομένων (Data Plane)
- Το επίπεδο Εφαρμογής (Application Plane)

Τα επίπεδα επικοινωνούν το ένα με το άλλο μέσω δύο διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών, του Southbound, με το οποίο επικοινωνούν τα επίπεδα δεδομένων και ελέγχου, και του Northbound, με το οποίο επικοινωνούν τα επίπεδα εφαρμογής και ελέγχου.

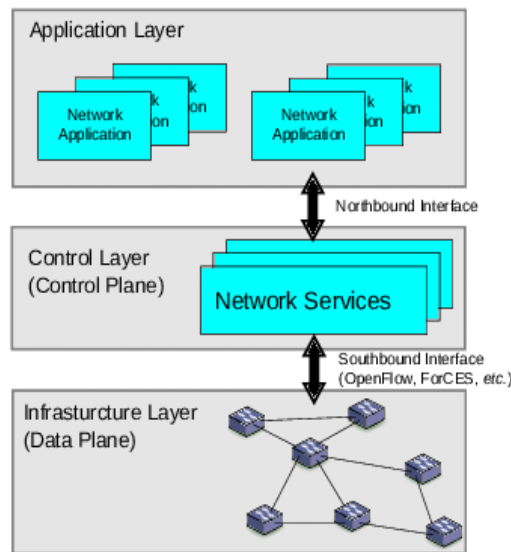
Το επίπεδο ελέγχου είναι το πιο σημαντικό επίπεδο στην αρχιτεκτονική του SDN και αντιπροσωπεύει όλες τις ικανότητες ευφυΐας και ενορχήστρωσης στο δίκτυο. Αποτελεί το διαχειριστή του δικτύου και μπορεί να αξιοποιήσει δεδομένα από τη χρήση του και να διανέμει καλύτερα τους πόρους του, όπως είναι το εύρος ζώνης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ενισχύσει τη συμπεριφορά του δικτύου, ειδικότερα σε



περιπτώσεις μεγάλου κυκλοφοριακού φόρτου, καθώς είναι σε θέση να προβλέψει τέτοιες καταστάσεις και έτσι να απελευθερώσει περισσότερους πόρους ή να τους διαχειριστεί αναλόγως. Το επίπεδο εφαρμογής αποτελεί το επίπεδο στο οποίο ορίζονται όλες οι υπηρεσίες, οι πολιτικές και τα χαρακτηριστικά. Οι εφαρμογές ζητούν από τις συσκευές δικτύου πληροφορίες, καθώς και την τοπολογία προκειμένου να ενεργήσουν σύμφωνα με αυτό. [26], [27], [28]

Υπάρχουν βέβαια σημαντικές προκλήσεις και απαιτήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η τεχνολογία αυτή σε επίπεδο ελέγχου, αξιοπιστίας, επεκτασιμότητας και κόστους. Κάποιες από αυτές είναι η τυποποίηση των διεπαφών ελέγχου, μέτρα για την αποφυγή υποβάθμισης της απόδοσης και η διατήρηση πληροφοριών του δικτύου ελέγχου, ενώ σε θέματα αξιοπιστίας έχει να διαχειριστεί την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και τη γρήγορη ανάκτηση σύνδεσης, την ασφάλεια του δικτύου μεταφοράς και δεδομένων και την ισορροπία μεταξύ απόδοσης, ασφάλειας και ευελιξίας. Επιπλέον, σε θέματα επεκτασιμότητας είναι σημαντική η δυνατότητα υποστήριξης τεχνολογίας και ετερογένειας συσκευών, η βελτιστοποίηση κανόνων ροής, η οποία οδηγεί σε καλύτερο διαμερισμό του δικτύου, όπως και τα μηνύματα ελεγκτή με απόδοση και δυνατότητα επιβίωσης έτσι ώστε να επιτυγχάνονται χαμηλά επίπεδα στην απώλεια πακέτων. Τέλος, κάποιες προκλήσεις όσον αφορά την απόδοση κόστους είναι η δυνατότητα υποστήριξης ενός εμπορικού μοντέλου πληρωμής για υπηρεσία, η αντικατάσταση του υλικού με εφαρμογές λογισμικού και η ανάπτυξη και απόκτηση μεταγωγέων εμπορευμάτων με στόχο την αντικατάσταση παλαιού υλικού. [29]

Ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία SDN είναι το OpenFlow. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιείται στα SDN δίκτυα για να διαχειρίζεται την επικοινωνία μεταξύ των διακοπών Ethernet και του ελεγκτή SDN. Ένας OpenFlow διακόπτης αποτελείται από 3 μέρη: τους πίνακες ή τον πίνακα ροής και ομάδας, το OpenFlow κανάλι και το OpenFlow πρωτόκολλο. Χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο OpenFlow, ένας ελεγκτής μπορεί να μάθει τις λεπτομέρειες υλικού των διακοπών Ethernet, την κατάσταση συνδεσιμότητας και την τοπολογία του δικτύου, ενώ παράλληλα “διοικεί” τη συμπεριφορά του πίνακα προώθησής του δίνοντας κανόνες ροής. [28]



Εικόνα 2.3.2: Αρχιτεκτονική τεχνολογίας SDN [30]

2.3.3 Τεχνολογία Network Function Virtualization (NFV)

Άλλη μια πολύτιμη τεχνολογία, που προσφέρει θεμελιώδεις ιδέες και έννοιες, είναι η NFV, η οποία αποτελεί συμπληρωματική έννοια της τεχνολογίας SDN. Με την NFV δίνεται η δυνατότητα εικονοποίησης λειτουργιών του δικτύου, οι οποίες ήταν συνδεδεμένες με το υλικό προτού εκτελεστούν σε κάποια υποδομή cloud. Συγκεκριμένα, στις συμβατικές αρχιτεκτονικές, ιδιόκτητες συσκευές αγοράζονται και εγκαθίστανται από τους χειριστές με σκοπό να αναπτύξουν κάθε λειτουργία δικτύου, ενώ όσον αφορά το εξειδικευμένο υλικό, αυτό είναι συνήθως πολύ ακριβό και δύσκολα διαμορφώνεται. Εξαιτίας αυτών των δυσκολιών, οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύων έχουν να αντιμετωπίσουν ζητήματα χαμηλής ευελιξίας. Το NFV, το οποίο αποτελεί μια σημαντική επινόηση στα συστήματα 5G, έχει ως κύριο ρόλο να αποσυνδέσει το φυσικό υλικό και τις υποκείμενες λειτουργίες δικτύου, ενώ οι λειτουργίες δικτύου έχουν, επίσης, τη δυνατότητα να εκτελούνται κεντρικά σε γενικούς διακομιστές cloud, πράγμα που ωφελεί τόσο την επεκτασιμότητα, όσο και την ευελιξία.

Τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται η αρχιτεκτονική του NFV είναι τέσσερα και είναι τα εξής:

- Η υποδομή NFV (NFV Infrastructure-NFVI)
- Οι λειτουργίες εικονικού δικτύου (Virtual Network Functions-VNFs)
- Οι Hypervisors
- Η διαχείριση και ενορχήστρωση NFV (NFV Management and Orchestration-NFV MANO)

Συγκεκριμένα, το κύριο συστατικό του NFV είναι τα VNFs που είναι εφαρμογές λογισμικού λειτουργιών δικτύου, που τρέχουν σε μια γενική υποδομή cloud. Τα VNFs



υπάρχουν στο NFVI, στο οποίο περιλαμβάνονται εικονικοί υπολογισμοί, εικονική αποθήκευση, καθώς και πόροι εικονικού δικτύου. Όσον αφορά αυτούς τους πόρους, παράγονται από τους hypervisors και αποδίδουν εικονικοποίηση μέσα στο δίκτυο μέσω φυσικών πόρων υλικού. Οι πόροι υλικού είναι δυνατό να εμπεριέχουν υποδομές δικτύωσης, υπολογιστών και αποθήκευσης. Επίσης, το πλαίσιο NFV MANO είναι αυτό που έχει τον έλεγχο για την παροχή των VNFs, τη διαμόρφωσή τους, καθώς και για την υποδομή την οποία αυτά υπηρετούν. Το πλαίσιο αυτό ακόμη, με σκοπό να εφαρμόσει μια υπηρεσία από άκρο σε άκρο, μπορεί να πραγματοποιήσει μια σύνδεση μεταξύ πολλών VNFs. [31]

Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύου, το NFV έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- μειωμένο κόστος εξοπλισμού
- βελτιωμένη λειτουργική απόδοση
- βελτιστοποιημένη διαμόρφωση δικτύου και κατανομή πόρων
- ευέλικτη ανάπτυξη λειτουργιών δικτύου και δυναμική λειτουργία
- μειωμένη κατανάλωση ενέργειας

Ωστόσο, το NFV μπορεί να περιέχει διάφορα ζητήματα ασφαλείας. Ένα παράδειγμα είναι οι ενορχηστρωτές, καθώς και οι hypervisors, οι οποίοι αποτελούν συστήματα στην αρχιτεκτονική του NFV. Τα συστήματα αυτά είναι ευάλωτα σε ενδεχόμενες απειλές, όπως επίσης και ο κοινόχρηστος χώρος αποθήκευσης και η δικτύωση. Ακόμη, υπάρχει η πιθανότητα διαφορετικοί προμηθευτές να παρέχουν τα VNFs, τους hypervisors και το υλικό, δημιουργώντας έτσι νέες απειλές για την ασφάλεια και πολυπλοκότητα στην ενοποίηση. [32]

Το Internet of Things (IoT) αποτελεί μια περίπτωση στην οποία χρησιμοποιείται το NFV. Συγκεκριμένα, καθώς το IoT και οι ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές του δημιουργούν έναν εκρηκτικό αριθμό συσκευών συνδεδεμένων στο δίκτυο, το NFV θα μειώσει πολύ το κόστος των συσκευών IoT μειώνοντας τις λειτουργίες στις συσκευές και εικονικοποιώντας αυτές τις λειτουργίες. Μια ακόμη χρήση του NFV είναι στα δίκτυα πυρήνα κινητής τηλεφωνίας στα οποία χρησιμοποιείται ιδιόκτητος εξοπλισμός, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται δαπανηρός, καθώς και χρονοβόρος επανασχεδιασμός δικτύου. Αντίθετα, το NFV μπορεί να κάνει τα βασικά δίκτυα πιο έξυπνα, επεκτάσιμα, ανθεκτικά και ευέλικτα, εικονικοποιώντας διάφορες οντότητες και εξαλείφοντας τους γεωγραφικούς περιορισμούς των αντίστοιχων υπηρεσιών. [31]

2.3.4 Τεχνολογία Millimeter Wave (MMWave)

Το φάσμα μεσαίας ζώνης (Mid-Band Spectrum) αποτελεί σημαντικό στοιχείο στις τηλεπικοινωνίες. Το 5G έχει μεγάλες απαιτήσεις για νέες υπηρεσίες στις οποίες δεν γίνεται να χρησιμοποιούνται χαμηλές ζώνες συχνότητας στο μέλλον. Έτσι, με σκοπό τη σωστή λειτουργία τους θα πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Το



MMWave είναι μια τεχνολογία που ανταποκρίνεται σε αυτές τις απαιτήσεις, αφού περιέχει όλες τις συχνότητες μεταξύ 30-300 GHz. Τα σήματα, βέβαια, σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων δεν μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλη απόσταση, καθώς η αποτελεσματική ακτίνα κυψέλης κυμαίνεται περίπου στα 220 μέτρα.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα του MMWave είναι, αρχικά, η σωστή διαχείριση των πρόσθετων ζωνών φάσματος. Επιπλέον, πρόκειται για μια τεχνολογία που εγγυάται υψηλές ταχύτητες δεδομένων, όπως, επίσης και μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων οι οποίες είναι ανθεκτικές στις διάφορες καιρικές συνθήκες. Ακόμη, η τεχνολογία MMWave προσφέρει πολιτική ταχείας αδειοδότησης χαμηλού κόστους. Παρόλα αυτά, η χρήση του MMWave παρουσιάζει κάποια εμπόδια, τα οποία οφείλονται κυρίως σε καιρικές συνθήκες όπως η βροχή, το χιόνι και η ατμοσφαιρική εξασθένηση, ενώ σημαντική είναι, επίσης, η μειωμένη διασπορά και η ισχύς θορύβου λόγω της χρήσης του υψηλού εύρους ζώνης.

Για την αντιμετώπιση των προηγούμενων προβλημάτων, το MMWave μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνολογίες όπως Massive MIMO, SDN και femtocells, τα οποία βοηθούν στην επίτευξη ενός βέλτιστου συστήματος, όπως για παράδειγμα το Massive MIMO και Beamforming, τα Ultra-Dense δίκτυα (ανάπτυξη των microcells) και μια γεωγραφική βάση δεδομένων, η οποία θα περιλαμβάνει πληροφορίες που σχετίζονται με το περιβάλλον κάθε γεωγραφικής περιοχής με στόχο να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα των λειτουργιών της κυψέλης, οι οποίες θα υποστηρίζουν τη δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας πληροφοριών που σχετίζονται με προηγούμενες ανακαλύψεις κυψελών. [34], [35]

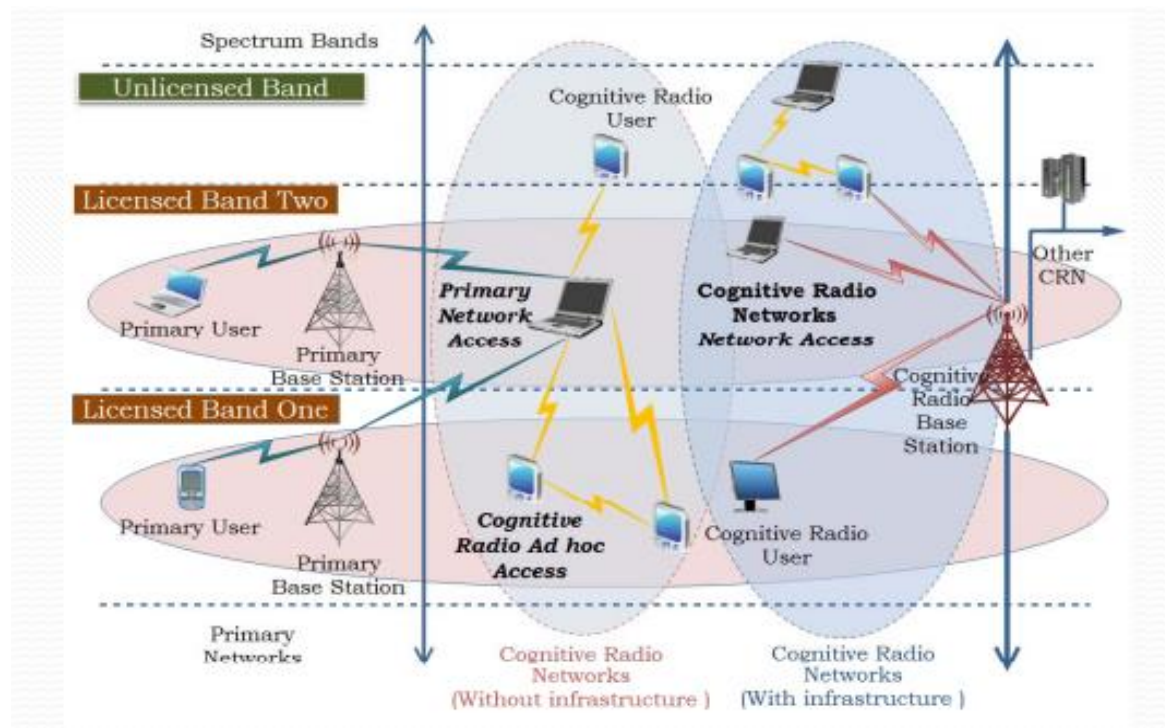
2.3.5 Τεχνολογία Cognitive Radio (CR)

Η τεχνολογία CR είναι χτισμένη στην κορυφή του Radio Access Network και επιτρέπει την έξυπνη διαμόρφωση του ραδιοφωνικού συστήματος έτσι ώστε να προσαρμόζεται στη στιγμιαία κατάσταση του φάσματος του περιβάλλοντος και σε απαιτήσεις πραγματικού χρόνου. Στο CR υπάρχουν διάφοροι τύποι φάσματος, όπως είναι οι full CR, licensed band CR, unlicensed band CR, ενώ όσον αφορά την ανίχνευση φάσματος, υπάρχει ο ανιχνευτής ενέργειας, η ανίχνευση με βάση την κυματομορφή, το cyclostationarity, καθώς και αντίστοιχες τεχνικές φιλτραρίσματος. Ο συνδυασμός με ετερογενή δίκτυα αποτελεί σημαντική λειτουργία του CR, ενώ ανιχνεύοντας το φάσμα μεταξύ των κόμβων του βελτιώνεται κατά πολύ και η αποτελεσματικότητα. Ο στόχος του CR είναι το ραδιοφάσμα να κατανέμεται έξυπνα και σωστά, ενώ σημαντικά πλεονεκτήματά του είναι η αλληλεπίδραση που έχει με τους αισθητήρες, τους χρήστες και τις εφαρμογές δικτύου, καθώς και οι δυνατότητες κοινής χρήσης φάσματος τις οποίες προσφέρει. Βασικό μειονέκτημα βέβαια αποτελεί η διαχείριση πόρων.

Σχετικά με τις αρχιτεκτονικές τις οποίες συναντούμε στο CR, αυτές περιέχουν δύο δίκτυα: ένα πρωτεύον και, πιθανώς, ένα δευτερεύον. Όσον αφορά το πρωτεύον δίκτυο, σε αυτό υπάρχουν κάποιοι χρήστες, οι Primary Users (PU), οι οποίοι έχουν άδεια να χρησιμοποιούν το φάσμα, λειτουργία η οποία συντονίζεται από τον κύριο σταθμό βάσης. Οι PU αλληλοεπιδρούν με τον πρωτεύοντα σταθμό βάσης και με

αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ τους. Στο δευτερεύον δίκτυο υπάρχουν οι Secondary Users (SU) καθώς και ένας δευτερεύων σταθμός βάσης.

Οι ζώνες συχνότητας χρησιμοποιούνται από τους PU και σε περίπτωση που οι PU εκπέμπουν ή οι ζώνες χρησιμοποιούνται, οι SU δεν έχουν τη δυνατότητα χρήσης τους. Εάν ένας SU εκπέμπει, αλλά ένας PU αρχίζει να εκπέμπει εκείνη τη στιγμή, ο SU πρέπει να αναγνωρίσει τη μετάδοση, να σταματήσει τη δική του, να βρει διαθέσιμη ζώνη και να ξεκινήσει τη μετάδοση εκεί. Όταν εκπέμπουν οι PU και υπάρχει ένας δευτερεύων σταθμός βάσης, τότε αυτός ενημερώνεται από τους SU ότι γίνεται μετάδοση από τους PU και στη συνέχεια αυτός με τη σειρά του εμποδίζει τη μετάδοση όλων των SU. [27]



Εικόνα 2.3.5: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής τεχνολογίας CR [36]

2.3.6 Internet of Things (IoT)

Το Internet of Things (IoT) είναι η βασική τεχνολογία που αλλάζει πολλά πράγματα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G. Το IoT είναι το δίκτυο καθημερινών φυσικών αντικειμένων, οχημάτων, συσκευών, κτιρίων κ.λπ. Μερικά παραδείγματα συσκευών οι οποίες αποτελούν μέρος του IoT είναι φούρνοι μικροκυμάτων, πλυντήρια ρούχων, έξυπνα ρολόγια κ.λπ. Οι συσκευές αυτές αντιλαμβάνονται κάποιες πληροφορίες, οι οποίες μεταβιβάζονται σε έναν απομακρυσμένο διακομιστή, κυρίως μέσω του Διαδικτύου. Ο διακομιστής με τη σειρά του, με σκοπό τον έλεγχο της συσκευής, μπορεί να εκδώσει εντολές εξ αποστάσεως. Οι πληροφορίες οι οποίες συλλέγονται στον διακομιστή, υπόκεινται σε επεξεργασία με στόχο την απόκτηση γνώσεων σχετικά με την υποκείμενη διαδικασία. Αυτές οι γνώσεις χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την κατασκευή εξυπνότερων συστημάτων όπως έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις, έξυπνα συστήματα μεταφορών, συστήματα υγειονομικής περίθαλψης κ.λπ.

Με εφαρμογές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, το IoT επιτρέπει σε μια πληθώρα συσκευών να συνδεθούν στο Διαδίκτυο. Λόγω του τεράστιου όγκου των συσκευών IoT που συνδέονται και της πληθώρας των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιούνται, οι συσκευές IoT έχουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των συστημάτων 5G και, με βάση τις απαιτήσεις του, σχεδιάζονται τα διάφορα μέρη του δικτύου 5G. [31]

Κάποιες από τις προκλήσεις του IoT είναι αρχικά η διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων που παράγονται από τις συσκευές, καθώς βρίσκονται σε συνεχή επικοινωνία με το δίκτυο. Επίσης, σημαντικό θέμα είναι και η αποθήκευση αυτών των δεδομένων. Τα συστήματα παράγουν μεγάλο όγκο πληροφοριών και υπάρχει η ανάγκη για μεγάλο αποθηκευτικό χώρο. Το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα και η μεγαλύτερη πρόκληση στο IoT είναι αυτή της ασφάλειας. Το IoT επεξεργάζεται μεγάλο όγκο προσωπικών δεδομένων που παράγονται από τις συνδεδεμένες συσκευές. Κάποιες από αυτές τις πληροφορίες είναι εξαιρετικά προσωπικές, όπως για παράδειγμα οι πληροφορίες υγείας, κάποιες βέβαια όχι και τόσο, όπως οι πληροφορίες στους έξυπνους λαμπτήρες. Αυτό το οποίο θα πρέπει να εξασφαλιστεί πάντως με σιγουριά είναι η ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων του χρήστη, ώστε να μην νιώθει αμφιβολίες και φόβο όταν μοιράζεται αυτές τις πληροφορίες με τη συγκεκριμένη τεχνολογία.

Η ζήτηση του IoT είναι πλέον τεράστια, αποτέλεσμα της μεγάλης χρησιμότητάς του στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Προσφέρει αυτονομία και έλεγχο σε βασικά πράγματα, όπως και σημαντικές λειτουργίες σε σημαντικά συστήματα, όπως αυτά της υγείας. Η χρήση του επεκτείνεται επίσης και στις επιχειρήσεις οι οποίες προσπαθούν να εκμεταλλευτούν αυτήν την τεχνολογία όσο το δυνατόν περισσότερο και να επωφεληθούν από τις τεράστιες λειτουργίες της. [60]

Internet of Things Uses By Industry



Εικόνα 2.3.6: Χρήσεις του Internet of Things [59]

2.4 Έκτη Γενιά Κινητών Δικτύων (6G)

Κάθε νέα γενιά κινητής τηλεφωνίας βασίζεται σε καινοτόμες εφαρμογές. Η έκτη γενιά κινητών δικτύων δεν αποτελεί εξαίρεση. Το 6G θα οδηγήσει σε μια εμφάνιση αξιοσημείωτων νέων εφαρμογών, καθώς και τεχνολογικών τάσεων,



πράγμα που θα διαμορφώσει τους στόχους απόδοσής του, ενώ θα επαναπροσδιορίσει ριζικά τις τυπικές υπηρεσίες 5G.

Ενώ οι παραδοσιακές εφαρμογές, όπως το live multimedia streaming, θα παραμείνουν στο επίκεντρο του 6G, οι νέοι τομείς εφαρμογής οι οποίοι θα καθορίσουν τους παράγοντες της απόδοσης του συστήματος, θα είναι τέσσερις:

1. Multisensory Extended Reality (XR) Applications

Το XR θα αποδώσει πολλές εφαρμογές για το 6G σε όλο το φάσμα του Augmented Reality (AR)/Mixed Reality (MR)/Virtual Reality (VR). Τα μεταγενέστερα συστήματα 5G ακόμα υστερούν στο να παρέχουν μια καθηλωτική εμπειρία XR η οποία καταγράφει όλες τις αισθητηριακές εισροές. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν χαμηλές καθυστερήσεις στις εφαρμογές XR με ένταση δεδομένων. Μια πραγματικά καθηλωτική εμπειρία AR/MR/VR θα πρέπει να έχει έναν σχεδιασμό που να στηρίζεται όχι μόνο στη μηχανική, αλλά και στην αντίληψη, η οποία θα πηγάζει από τη γνώση, τη φυσιολογία και κυρίως τις ανθρώπινες αισθήσεις.

2. Connected Robotics and Autonomous Systems (CRAS)

Για τα συστήματα 6G, πρωταγωνιστικό ρόλο θα έχει η πολύ αναμενόμενη ανάπτυξη του CRAS, το οποίο περιλαμβάνει συστήματα παράδοσης drone, αυτόνομα αυτοκίνητα, αυτόνομα σμήνη από drones, στόλους οχημάτων και αυτόνομη ρομποτική.

3. Wireless Brain-Computer Interactions (BCI)

Οι εφαρμογές BCI χρησιμοποιούνται περισσότερο στην υγειονομική περίθαλψη σε περιπτώσεις στις οποίες οι άνθρωποι ελέγχουν προσθετικά άκρα ή γειτονικές υπολογιστικές συσκευές με τη χρήση εμφυτευμάτων εγκεφάλου. Ωστόσο, πρόσφατα εμφανίστηκαν ασύρματα BCI και εμφυτεύματα, πράγμα που θα οδηγήσει στην ριζική μεταβολή σε αυτόν τον τομέα και στην εισαγωγή νέων σεναρίων χρήσης που απαιτούν 6G συνδεσιμότητα. Με τη χρήση ασύρματων BCI τεχνολογιών, αντί των smartphones, οι άνθρωποι θα αλληλεπιδρούν τόσο με το περιβάλλον τους, όσο και με τους άλλους ανθρώπους κάνοντας χρήση διακριτών συσκευών, άλλων εμφυτευμένων και άλλων ενσωματωμένων στον κόσμο γύρω τους.

4. Blockchain and Distributed Ledger Technologies (DLT)

Οι εφαρμογές Blockchain και DLT θεωρούνται ως οι επόμενης γενιάς κατανεμημένες υπηρεσίες ανίχνευσης, οι οποίες έχουν την ανάγκη για συνδεσιμότητα, απαιτώντας έτσι ένα μείγμα URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) και mMTC (massive Machine Type Communications) για την εγγύηση χαμηλής καθυστέρησης, αξιόπιστης συνδεσιμότητας και επεκτασιμότητας.

Οι παραπάνω εφαρμογές οδηγούν σε ένα νέο σύστημα τάσεων που θα θέσουν τους στόχους για το 6G. Αρχικά, θα υπάρχει η ανάγκη για μεγαλύτερο φάσμα, περισσότερη αξιοπιστία και μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Επίσης, θα υπάρχουν έξυπνες επιφάνειες και περιβάλλοντα, ενώ σημαντική είναι και η τεράστια διαθεσιμότητα των small data. Επιπλέον, από τα αυτό-οργανώμενα δίκτυα θα περάσουμε στα αυτό-συντηρούμενα. Τέλος, θα υπάρξει μια σύγκλιση στις επικοινωνίες, τους υπολογισμούς, τον έλεγχο, τον εντοπισμό και την ανίχνευση, ενώ η εποχή των smartphones θα τελειώσει.

Η ανάπτυξη και πραγματοποίηση των λειτουργιών που αναφέρθηκαν, καθώς και η διασφάλιση της απόδοσής τους, απαιτεί μια ομάδα νέων τεχνολογιών που θα πρέπει να δημιουργηθούν και να ενσωματωθούν στο 6G. Η αύξηση των συχνοτήτων πάνω από 6GHz για το 6G, θα οδηγήσει στη δημιουργία των tiny cells, αφήνοντας πίσω τα small cells. Επίσης, πομποδέκτες με ενσωματωμένες ζώνες συχνοτήτων, επικοινωνία με μεγάλες έξυπνες επιφάνειες και η ανάπτυξη στην τεχνητή νοημοσύνη είναι κάποιες από τις τεχνολογίες κλειδιά για το 6G μαζί με τα ολοκληρωμένα επίγεια, αερομεταφερόμενα και δορυφορικά δίκτυα. [33]

	5G	Beyond 5G	6G
Application types	<ul style="list-style-type: none"> eMBB URLLC mMTC 	<ul style="list-style-type: none"> Reliable eMBB URLLC mMTC Hybrid (URLLC + eMBB) 	New applications: <ul style="list-style-type: none"> mBRLLC mURLLC HCS MPS
Device types	<ul style="list-style-type: none"> Smartphones Sensors Drones 	<ul style="list-style-type: none"> Smartphones Sensors Drones XR equipment 	<ul style="list-style-type: none"> Sensors and DLT devices CRAS XR and BCI equipment Smart implants
Spectral and energy efficiency gains ¹ with respect to today's networks	10x in bps/Hz/m ² /Joules	100x in bps/Hz/m ² /Joules	1000x in bps/Hz/m ³ /Joules (volumetric)
Rate requirements	1 Gb/s	100 Gb/s	1 Tb/s
End-to-end delay requirements	5 ms	1 ms	< 1 ms
Radio-only delay requirements	100 ns	100 ns	10 ns
Processing delay	100 ns	50 ns	10 ns
End-to-end reliability requirements	99.999 percent	99.9999 percent	99.99999 percent
Frequency bands	<ul style="list-style-type: none"> Sub-6 GHz MmWave for fixed acces. 	<ul style="list-style-type: none"> Sub-6 GHz MmWave for fixed access 	<ul style="list-style-type: none"> Sub-6 GHz MmWave for mobile acces Exploration of higher frequency and THz bands (above 300 GHz) Non-RF (e.g., optical, VLC, etc.)
Architecture	<ul style="list-style-type: none"> Dense sub-6 GHz small base stations with umbrella macro base stations. MmWave small cells of about 100 m (for fixed access). 	<ul style="list-style-type: none"> Denser sub-6 GHz small cells with umbrella macro base stations < 100 m tiny and dense mmWave cells 	<ul style="list-style-type: none"> Cell-free smart surfaces at high frequency supported by mmWave tiny cells for mobile and fixed access. Temporary hotspots served by drone-carried base stations or tethered balloons Trials of tiny THz cells.

¹ Here, spectral and energy efficiency gains are captured by the concept of area spectral and energy efficiency.

Πίνακας 2.4: Απαιτήσεις 5G vs. Beyond 5G vs. 6G [33]

3. ΕΙΔΗ ΚΥΨΕΛΩΝ

Στην κινητή τηλεφωνία οι απαιτήσεις στη συνδεσιμότητα αυξάνονται με ταχύτατους ρυθμούς. Υπάρχουν ήδη πάρα πολλές συσκευές οι οποίες βασίζονται σε ασύρματα δίκτυα, ειδικά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, με αποτέλεσμα οι φορείς δικτύων να πρέπει να εξασφαλίσουν υψηλότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τις παραδοσιακές επιλογές, εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς και καλύτερη αποτελεσματικότητα στη χρήση της.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών που χρησιμοποιούνται στην κινητή επικοινωνία, συμπεριλαμβανομένων των macrocells, microcells, picocells και femtocells. Οι κυψέλες διαφοροποιούνται με αυτόν τον τρόπο με βάση το εύρος που καλύπτουν και τη χωρητικότητα που έχουν. Τα macrocells έχουν τη μεγαλύτερη εμβέλεια, ενώ τα femtocells τη μικρότερη. Επομένως, τα macrocells είναι πιο κατάλληλα για αγροτικές περιοχές όπου απαιτείται κάλυψη σε πολύ μεγαλύτερη περιοχή. Όσον αφορά τα microcells, picocells και femtocells, αυτά ανήκουν στην κατηγορία των small cells τα οποία επιτρέπουν στους φορείς να αυξήσουν την απόδοση της συνδεσιμότητας δικτύου για τους καταναλωτές τους, πράγμα που συμβαίνει επειδή μικρότερες κυψέλες, αλλά σε μεγαλύτερη ποσότητα, είναι πιο αποτελεσματικές.

3.1 Macrocell

Το macrocell είναι ένας κυψελοειδής σταθμός βάσης, ο οποίος εκπέμπει και λαμβάνει ραδιοφωνικά σήματα χρησιμοποιώντας μεγάλους πύργους κινητής τηλεφωνίας, καθώς και κεραίες. Με αυτόν τον τρόπο, καλύπτει στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας αρκετά μεγάλες περιοχές πρόσβασης. Οι πύργοι κινητής τηλεφωνίας, ειδικότερα, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν κάλυψη για χιλιόμετρα και μπορούν να κυμαίνονται από 15 έως 60 μέτρα.

Με τον όρο macrocell περιγράφεται το ευρύτερο φάσμα μεγεθών των κελιών. Οι τοποθεσίες των macrocells κυμαίνονται από αγροτικές περιοχές μέχρι και αυτοκινητόδρομους. Οι κεραίες τους βρίσκονται σε στέγες κτιρίων, επίγειους ιστούς και άλλες κατασκευές, σε τέτοιο ύψος ώστε να μην εμποδίζονται από τα γύρω κτίρια. Με την αύξηση της απόδοσης του πομποδέκτη, αυξάνεται και η απόδοση των macrocells, ενώ όσον αφορά τους σταθμούς βάσης macrocell, αυτοί περιέχουν εξόδους με ισχύ που φτάνει συνήθως τα δεκάδες Watt. [41], [42]

Παρόλο που τα macrocells και τα small cells επιτρέπουν τη συνδεσιμότητα 5G, έχουν σημαντικές διαφορές, τόσο στη δυνατότητα διάδοσης σήματος, όσο και στη διείσδυση δόμησης. Η διάδοση του σήματος, δηλαδή η ακτίνα κάλυψης, είναι η βασική διαφορά μεταξύ macrocells και small cells. Τα macrocells, ενώ καλύπτουν αρκετά χιλιόμετρα, προσφέρουν χαμηλή συχνότητα, σε αντίθεση με τα small cells, που προσφέρουν υψηλή συχνότητα, αλλά καλύπτουν περίπου 91 μέτρα.



Η διείσδυση δόμησης αναφέρεται στη συνδεσιμότητα που παρέχεται στους εσωτερικούς χώρους και κατά πόσο αυτή λειτουργεί αποτελεσματικά. Στα macrocells, οι συχνότητες που είναι χαμηλότερες έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπονται αρκετά μακριά, χωρίς τα σήματα να εμποδίζονται από τοίχους, παράθυρα κλπ. Αντιθέτως, τα σήματα των small cells είναι πιθανό να εμποδίζονται από τέτοιου είδους εμπόδια σε εσωτερικούς χώρους, με συνέπεια να μην φτάνουν σε πολλά δωμάτια.

Το κόστος αποτελεί, επίσης, βασική διαφορά ανάμεσα στα macrocells και στα small cells. Το κόστος των small cells είναι πολύ μικρό σε σχέση με αυτό των macrocells, αφού ακόμα και στην περίπτωση που αναπτυχθεί 10 φορές ο αριθμός των small cells σε σχέση με τα macrocells, το κόστος τους και πάλι θα είναι σημαντικά μικρότερο. Τα small cells, γενικότερα, εμφανίστηκαν και έχουν αναπτυχθεί εξαιτίας πρώτον, του 5G και δεύτερον, της διαθεσιμότητας καναλιών πολύ υψηλής συχνότητας που προσφέρουν με την τεχνολογία και τη χρήση τους. [42]

3.2 Microcell

Το microcell αποτελεί έναν πομποδέκτη μικρής εμβέλειας, που πιο συχνά βρίσκεται εξωτερικά και υπάρχει η περίπτωση να αναπτύσσεται συνήθως με σκοπό να ενισχύσει την κάλυψη που προσφέρουν τα macrocells. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα microcells μπορεί να εγκατασταθούν και σε εσωτερικούς χώρους, βελτιώνοντας τόσο την κάλυψη, όσο και τη χωρητικότητα. Μπορούν να εγκατασταθούν σε έναν πόλο κοινής χρήσης ή την πλευρά ενός κτιρίου, καλύπτοντας μια περιορισμένη περιοχή, όπως ένα εμπορικό κέντρο, ένα ξενοδοχείο ή έναν συγκοινωνιακό κόμβο.

Ένα microcell μπορεί να χρησιμοποιήσει έλεγχο ισχύος με σκοπό τον περιορισμό της ακτίνας στην περιοχή κάλυψής του, η οποία μπορεί να είναι και μικρότερη από δύο χιλιόμετρα, σε αντίθεση με την εμβέλεια που έχουν οι τυπικοί σταθμοί βάσης, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 35 χιλιόμετρα. Ένα δίκτυο που αποτελείται από microcells ονομάζεται microcellular δίκτυο. Συχνά, σε περιστάσεις όπου είναι αναγκαία η επιπλέον χωρητικότητα, όπως για παράδειγμα σε μια αθλητική εκδήλωση, τα microcells μπορεί να αναπτυχθούν προσωρινά πριν την έναρξη, με στόχο να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις. Ακόμη, τα microcells απαιτούν επαγγελματική εγκατάσταση και συντήρηση, ενώ μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι και 200 χρήστες.

Υπάρχουν κάποια συστήματα κινητής τηλεφωνίας, όπως είναι τα PHS και DECT, στα οποία η κάλυψη που παρέχεται είναι μόνο microcellular. Τα συστήματα αυτά παρέχουν χαμηλό κόστος, ιδίως σε περιοχές όπου υπάρχει υψηλή πυκνότητα, όπως είναι οι μεγάλες πόλεις. Το PHS αναπτύσσεται σε μεγάλες πόλεις της Ιαπωνίας ως εναλλακτική λύση σε σχέση με τη συνηθισμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας. Πολλές επιχειρήσεις χρησιμοποιούν το DECT με σκοπό τη δημιουργία δικτύων που είναι microcellular και ιδιωτικά, κυρίως σε μεγάλες πανεπιστημιακές πόλεις, όπου τα

ενσύρματα συστήματα τηλεφωνίας δεν είναι τόσο χρήσιμα. Όντας ένα ασύρματο σύστημα τηλεφωνίας, μη δικτυωμένο, ιδιωτικό και με χαμηλή ισχύ, το DECT εξασφαλίζει ότι τα, επίσης DECT, κοντινά συστήματα δεν θα παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο. [43], [44]



Εικόνα 3.2: Ένας Microcell Πύργος [45]

3.3 Picocell

Όπως και τα microcells, τα picocells ανήκουν στα small cells και χρησιμοποιούνται είτε σε εσωτερικούς, είτε σε εξωτερικούς χώρους. Εσωτερικά, τα picocells έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν την χωρητικότητα, ενώ, όταν κάποια σήματα εξωτερικά δεν φτάνουν στους εσωτερικούς χώρους όπου υπάρχει η ανάγκη, τα picocells χρησιμοποιούνται για να επεκτείνουν την κάλυψη. Εξωτερικά, εξαφανίζουν και πάλι τυχόν κενά που μπορεί να υπάρχουν στην κάλυψη ή μπορεί να χρησιμοποιηθούν ώστε να αυξήσουν τη χωρητικότητα. Σε μια μεγάλη πόλη, με υψηλή πυκνότητα και κίνηση, χρησιμοποιούνται picocells, τα οποία είναι γνωστά και με τον όρο “metrocells”.

Το μέγεθος ενός picocell είναι μικρότερο από αυτό του microcell, όπως είναι και το μέγεθος του εξοπλισμού που περιλαμβάνει, ενώ η ισχύς της μετάδοσης που προσφέρει είναι πιο χαμηλή. Τα picocells χρησιμοποιούνται από διάφορους τύπους δικτύων τηλεπικοινωνιών, παρέχοντας υπηρεσίες σε δεκάδες χρήστες. Η συντήρηση και η λειτουργία των picocells πραγματοποιούνται από έναν μεγαλύτερο φορέα δικτύου, ενώ οι σταθμοί picocell μπορούν να λάβουν ένα σήμα από μεγαλύτερο δίκτυο και να το διανείμουν σε μια μικρή τοπική εμβέλεια, μια ρύθμιση που θυμίζει



τα δίκτυα LAN. Τα picocells, επίσης, προσφέρουν λύσεις οι οποίες απευθύνονται κυρίως σε εταιρείες και επιχειρήσεις.

Με σκοπό να μην υπάρχουν κενά κάλυψης, οι φορείς ασύρματων υπηρεσιών χρησιμοποιούν τα picocells σε περιοχές με υψηλή κίνηση καθημερινά, όπως για παράδειγμα σε πλατφόρμες μετρό, σε σιδηροδρομικούς σταθμούς και σε τερματικούς σταθμούς λεωφορείων. Τα εξωτερικά picocells είναι συχνά τοποθετημένα στο πλάι ενός κτιρίου, σε στύλους φώτων δρόμου, σε στύλους σημάτων κυκλοφορίας κ.λπ., ενώ υποστηρίζονται, συνήθως, και από συνδέσεις backhaul οπτικών ινών. Σχετικά με τα picocells που βρίσκονται εσωτερικά, αυτά χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίσουν τυχόν προβλήματα στην κάλυψη ή/και στην χωρητικότητα, ενώ υπάρχουν εγκατεστημένα και σε ξενοδοχεία, αεροδρόμια, εταιρικά γραφεία.

Το περιβάλλον ενός γραφείου μεγέθους 10 μέτρων αποτελεί ένα παράδειγμα περιοχής κάλυψης των picocells, ενώ η εγκατάσταση και η συντήρησή τους θα πρέπει να πραγματοποιείται από επαγγελματίες. Το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό των femtocells, οι συχνότητες που υποστηρίζουν είναι περιορισμένες και υποστηρίζουν, επίσης, και μόνο έναν φορέα ασύρματων υπηρεσιών ανά μονάδα. Ωστόσο, ένας ιστότοπος μπορεί να έχει πολλαπλά picocells που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση ενός ζητήματος κάλυψης ή χωρητικότητας. [44], [46]

3.4 Femtocell

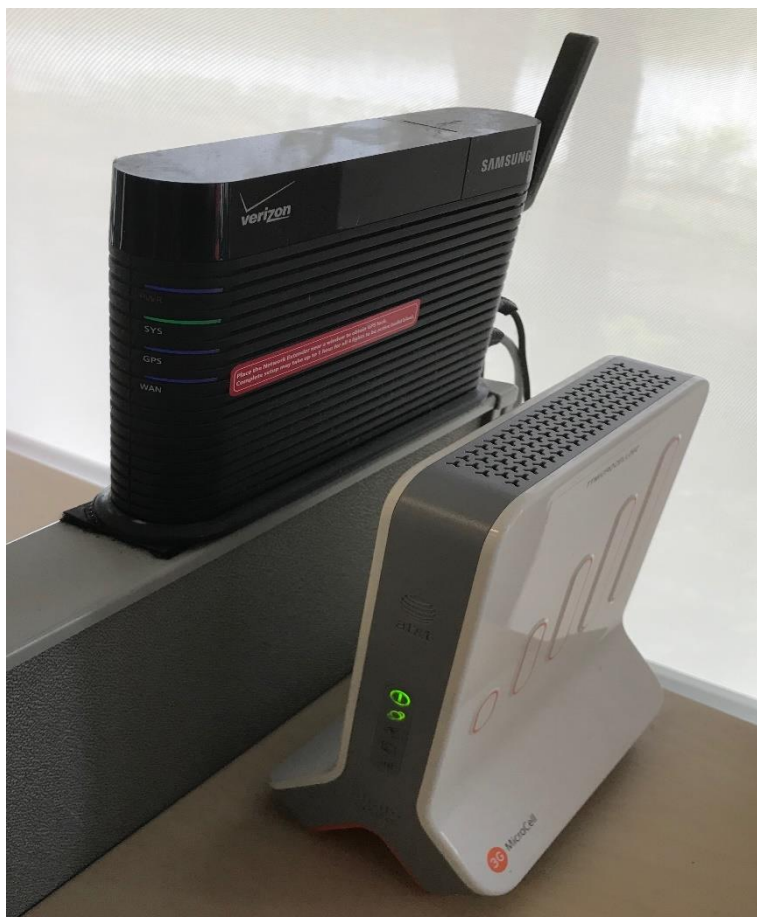
3.4.1 Χαρακτηριστικά

Το femtocell είναι μια μικρή και σταθερή τοποθεσία κυψέλης με χαμηλή ισχύ και μικρή κάλυψη, αφού ο σχεδιασμός τους απευθύνεται σε περιβάλλοντα όπως σπίτια και μικρά κτίρια γραφείων, στα οποία προσφέρουν μια αναβάθμιση στην ασύρματη λήψη. Σε ένα οικιακό περιβάλλον προσφέρουν 2-6 ενεργές συνδέσεις, ενώ σε ένα εταιρικό περιβάλλον 20 ή περισσότερες. Το femtocell, προκειμένου να συνδεθεί στο κεντρικό δίκτυο του ασύρματου χειριστή, χρησιμοποιεί τη διαδικτυακή σύνδεση του συνδρομητή.

Οικιακή χρήση, μικρές επιχειρήσεις και μεγάλες επιχειρήσεις είναι μερικές από τις χρήσεις που υποστηρίζονται από διάφορους τύπους femtocells. Για παράδειγμα, λύσεις femtocell προσφέρονται από τις Verizon Wireless και Sprint Nextel. Επιπλέον, είναι βασικό να αναφερθεί ότι ένα femtocell που υποστηρίζεται από κάποιο φορέα, δεν μπορεί να υποστηρίξει τη συσκευή ενός άλλου φορέα. Αυτός είναι και ο λόγος που σπίτια ή μικρές επιχειρήσεις, χωρίς μεγάλη κίνηση προσώπων, αναπτύσσουν τα femtocells. Σε ένα οικιακό περιβάλλον, ένα femtocell προσφέρει καλύτερη ασύρματη κάλυψη, ενώ σημαντικό είναι επίσης ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, δεν απαιτεί επαγγελματική εγκατάσταση.

Τα femtocells είναι μικρά και ζυγίζουν λίγο περισσότερο από ένα κιλό. Οι συσκευές που υποστηρίζονται από τα femtocells είναι από 4 έως και 20, ενώ η

κάλυψη που παρέχουν σε ένα οικιακό, για παράδειγμα, περιβάλλον είναι συνήθως έως 464,5 τετραγωνικά μέτρα. Η Verizon Wireless καλύπτει τόσο την οικιακή χρήση, όσο και τις μικρές επιχειρήσεις πουλώντας δύο συσκευές femtocell, η καθεμία για μια χρήση από αυτές. Το κόστος της οικιακής συσκευής είναι περίπου 250\$, ενώ δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης σύνδεσης έξι φωνητικών κλήσεων ταυτόχρονα. [44]



Εικόνα 3.4.1: Συσκευές Femtocell [47]

3.4.2 Ιστορική Αναδρομή

Το femtocell αναπτύχθηκε από την ιδέα ενός «μικρού σταθμού βάσης UMTS» που σχεδιάστηκε από μηχανικούς της Motorola το 2002. Στα επόμενα έτη, υπήρχε μεγάλη εκδήλωση ενδιαφέροντος για την ιδέα, χωρίς όμως την πραγματοποίησή της, καθώς δεν υπήρχε κάποιο πρότυπο. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία του Femto Forum το 2007, το οποίο είχε ως στόχο την προώθηση της τεχνολογίας femtocell, καθώς και τη δημιουργία ενός προτύπου.



Το 2009 μια συνεργασία που δημιουργήθηκε ανάμεσα στο Femto Forum, το 3GPP και το Broadband Forum ανήγγειλε το πρότυπο Femtocell, το οποίο δημοσίευσε η 3GPP. Οι τέσσερις βασικοί τομείς που κάλυπτε το συγκεκριμένο πρότυπο είναι:

- Η αρχιτεκτονική του δικτύου
- Οι πτυχές ραδιοφώνου και παρεμβολών
- Η διαχείριση/παροχή femtocell και
- Η ασφάλεια.

Η Έκδοση 8 του 3GPP περιλάμβανε το πρότυπο αυτό, το οποίο αποτέλεσε την αφετηρία για τη διαλειτουργικότητα του εξοπλισμού Femtocell. [48]

3.4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Κάποια από σημαντικότερα πλεονεκτήματα των femtocells είναι, αρχικά, η εξασφαλισμένη κάλυψη κινητής τηλεφωνίας στο κτίριο και οι υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων. Επίσης, υπάρχει καλύτερη εμπειρία χρήστη εντός του κτιρίου, ενώ το κόστος backhaul είναι χαμηλό μέσω ευρυζωνικού δικτύου συνδρομητών. Ακόμη, τα femtocells δίνουν την ευκαιρία για νέες ροές εσόδων, έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε φορητές συσκευές και προσφέρουν τοπικές υπηρεσίες, καθώς υπάρχει ένα αποκλειστικό οικιακό υποδίκτυο που αναπτύσσεται γύρω από το femtocell. Επιπλέον, ένα πλεονέκτημα είναι η εκφόρτωση κυκλοφορίας από το δίκτυο μακροεντολών με αποτέλεσμα την εκφόρτωση από το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης σε femtocell. Τέλος, ο χειριστής έχει τη δυνατότητα τοποθέτησης της κάλυψης ή της χωρητικότητας ακριβώς εκεί όπου υπάρχει η ζήτηση, δηλαδή εκεί όπου τα έσοδα είναι μεγαλύτερα. [48]

Ωστόσο, κάποιοι περιορισμοί των femtocells είναι ότι υποστηρίζουν επί του παρόντος μόνο μία τεχνολογία από έναν πάροχο ασύρματων υπηρεσιών. Τα femtocells μπορούν γενικά να μεταδώσουν μια πηγή RF στο macrocellular δίκτυο, αλλά δεν μπορούν να παραδώσουν το σήμα RF από το macrocellular δίκτυο στο femtocell. Αυτό έχει ως συνέπεια η τεχνολογία να λειτουργεί μονόδρομα στο δίκτυο και να είναι πολύ δύσκολη η προσαρμογή του σε αυτό. Η ισχύς και το backhaul στο ασύρματο δίκτυο παρέχεται από τον συνδρομητή χρησιμοποιώντας μια συνδρομητική ενσύρματη ευρυζωνική σύνδεση. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι αριθμοί τηλεφώνου στους οποίους γίνεται επιτρεπτή η πρόσβαση στο δίκτυο του φορέα ασύρματης σύνδεσης μέσω του femtocell πρέπει να καταχωρηθούν από τον ίδιο τον συνδρομητή. [44]



4. ULTRA-DENSE ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Το δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα και ελκυστικά ερευνητικά θέματα και έχει πρωταγωνιστικό ρόλο τόσο στις εταιρείες τηλεπικοινωνιών, όσο και στην ακαδημαϊκή κοινότητα. Σε πρώτο πλαίσιο, εμφανίστηκε η τεχνολογία MIMO, η οποία οδήγησε στην τεράστια βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος των συστημάτων 5G. Σε δεύτερο πλαίσιο, έκανε την εμφάνισή της η τεχνολογία MMWave, με την οποία επεκτάθηκε η μετάδοση του εύρους ζώνης για τα συστήματα κινητής επικοινωνίας 5G. Επιπλέον, η ιδέα των small cells φαίνεται να αυξάνει την απόδοση και την εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας στα σενάρια κινητής τηλεφωνίας. Με σκοπό την ικανοποίηση της απρόσκοπτης κάλυψης, θα πρέπει να υπάρξει μια πυκνή ανάπτυξη των small cells για τα 5G δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ως εκ τούτου, το ultra-dense κυψελοειδές δίκτυο φαίνεται να είναι από τις σημαντικότερες τεχνολογίες και να αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελοειδών δικτύων 5G.

Στα κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G), η πύκνωση των σταθμών βάσης macrocell είχε ως στόχο τη βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης σε επιμέρους περιοχές, όπως έγινε με την ανάπτυξη των σταθμών βάσης macrocell σε αστικές περιοχές. Για την αποφυγή παρεμβολών σε γειτονικούς σταθμούς macrocell, η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας και διάφορες τεχνολογίες σταθμών αναπτύχθηκαν για την πύκνωση των macrocell, όπου η πυκνότητα των σταθμών ήταν περίπου 4–5 BSs/km².

Στα 4G δίκτυα, όπως τα Long Term Evolution-Advanced (LTE-A) συστήματα κινητής επικοινωνίας, η ανάπτυξη των σταθμών βάσης microcell (π.χ., BS hotspot και BS femtocell) έγινε με σκοπό την ικανοποίηση μετάδοσης υψηλής ταχύτητας σε συγκεκριμένες περιοχές, στις οποίες οι σταθμοί microcell έχουν πυκνότητα περίπου 8–10 BS/km². Ακόμη, η σύνδεση των παραπάνω σταθμών με gateways γίνεται άμεσα, ενώ σύνδεσμοι οπτικών ινών ή το Διαδίκτυο προωθούν όλη την κίνηση backhaul. Στα 3G και 4G δίκτυα, η πύκνωση των σταθμών έχει σκοπό σε κάποιες περιοχές να βελτιώσει το ρυθμό ασύρματης μετάδοσης. Ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια που έχει να αντιμετωπίσει η πύκνωση σταθμών είναι να συντονίζει τις παρεμβολές για τα κυψελωτά δίκτυα. [37]

Οι τεχνολογίες των small cells γίνονται μεγάλες επιχειρήσεις, καθώς οι εμπορικοί πάροχοι ασύρματων υπηρεσιών αναπτύσσουν μια ποικιλία λύσεων με small cells για να συμβαδίζουν με την αυξημένη ζήτηση από τους τελικούς χρήστες να συνδέονται μεταξύ τους και να έχουν πρόσβαση στο περιεχόμενο όταν θέλουν, όπου θέλουν και όπως προτιμούν. Οι τεχνολογίες των small cells επιτρέπουν ισχυρότερα κυψελωτά σήματα στοχεύοντας περιοχές με ανεπαρκή κάλυψη, συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών κτιρίων και μεγάλων δημόσιων χώρων, και θα προσθέσουν χωρητικότητα δεδομένων σε υπάρχουσες περιοχές κάλυψης. [38]

Τα small cells και οι τεχνολογίες τους αποτελούν σημαντικό μέσο για την επίτευξη των απαιτήσεων του 5G. Αρχικά, αποφέρουν πολύ καλή απόδοση ενέργειας και έχουν εμφανιστεί ως μια πράσινη τεχνολογική επίτευξη. Επιπροσθέτως, με τις τεχνολογίες αυτές, το macrocellular δίκτυο αποφορτίζεται, ενώ επιτρέπουν να ανακατανέμεται καλύτερα το διαθέσιμο φάσμα σε ένα περιβάλλον περιορισμένου χώρου. Τέλος, ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι το εξαιρετικά χαμηλό κόστος. Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη, η τεχνολογία αυτή είναι αναμφισβήτητα μια από τις καλύτερες λύσεις που πετυχαίνει ταυτόχρονα στοχευμένη χωρητικότητα, κάλυψη και απόδοση σε ανεκτή τιμή. [39]

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G θα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στην παροχή μεθόδων για ευέλικτους μηχανισμούς τιμολόγησης και οι τεχνολογίες των small cells αποτελούν μια πρόταση που προσφέρει πολλές δυνατότητες. Θεωρείται ότι η τεχνολογία ultra-dense πληροί θεμελιώδεις απαιτήσεις των 5G συστημάτων, όπως:

- 50 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα (ικανή φασματική απόδοση, ευρύτερο διαθέσιμο φάσμα).
- Μέγιστες ταχύτητες δεδομένων άνω των 10 Gbit/s.
- Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση κάτω από 1msec. [40]

Type	Antenna sets	Coverage Radius	Max. users	Output Power	Backhaul Type	Cost	Note
Femtocells	2X2 or 4X4 MIMO Most common:4X4 MIMO	10-100 m	1-30	0.001-0.25 W	Wired	Low	Originally referred to the cells for private residential <i>indoor</i> uses, now may also be referred to some high capacity units deployed in enterprise areas.
Picocells		100-200 m	30-100	0.25-1 W		Low	Utilized mainly in <i>indoor</i> public areas and enterprise.
Microcells	Below 16X16 MIMO; Most common:4X4	200-2000 m	100-2000	1-10 W		Medium	Predominantly built <i>outdoors</i> to improve signal coverage in the areas where macro base stations do not cover or have limited coverage.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των Small cells [53]

4.2 Δομή και Λειτουργία

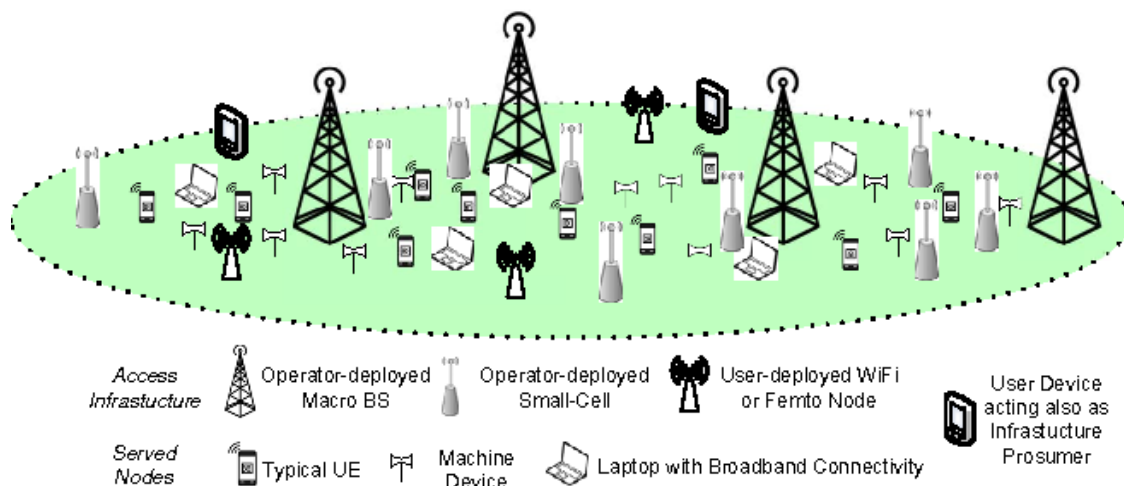
Η εξέλιξη των φορητών συσκευών και των εφαρμογών έχουν δημιουργήσει μια νέα εικόνα για τα ασύρματα δίκτυα. Το σενάριο των ultra-dense δικτύων αποτελεί μια πρωτοπόρα τεχνολογία για τα μελλοντικά δίκτυα. Η βασική ιδέα είναι οι κόμβοι πρόσβασης να έρθουν όσο το δυνατόν πιο κοντά στους τελικούς χρήστες. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η ιδέα, θα πρέπει να υπάρξει μια πυκνή ανάπτυξη των μικρών κυψελών στα hotspots στα οποία δημιουργείται πολύ μεγάλη κίνηση. Οι μικρές αυτές κυψέλες αποτελούν κόμβους πρόσβασης, οι οποίοι έχουν μικρή ισχύ



μετάδοσης, με αποτέλεσμα να έχουν και μικρή κάλυψη. Οι πελάτες και οι πάροχοι έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν τις κυψέλες στις εγκαταστάσεις τους ή στους δρόμους (π.χ., σε φανοστάτες, δέντρα και τοίχους) και σε hotspots (π.χ., αεροδρόμια, σταθμούς μετρό/ τρένου και αγορές), αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενός Ultra-Dense δικτύου (Ultra-Dense Network-UDN) οδηγεί σε ένα διαφορετικό περιβάλλον κάλυψης στο οποίο κάθε χρήστης βρίσκεται κοντά σε πολλά κελιά. [49]

Η πυκνωση της κυψελοειδούς δομής εφαρμόστηκε από τα συστήματα δεύτερης γενιάς, προκειμένου να ενισχυθεί η χωρητικότητα ή η απόδοση ενός ήδη εγκατεστημένου συστήματος μέσω διαχωρισμού κυψελών και τμηματοποίησης. Το ultra-density για μελλοντικά δίκτυα έχει πιο σημαντικό ρόλο, ενώ παρέχει μια υψηλή και με επίκεντρο τον χρήστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης του συστήματος στον χωρικό τομέα και βελτιώνει τις συνθήκες διάδοσης μειώνοντας την απόσταση μεταξύ του τελικού χρήστη και του σταθμού βάσης. Επίσης, λαμβάνει υπόψη στοιχεία υποδομής που αναπτύσσονται από τον χειριστή, καθώς και κόμβους πρόσβασης που αναπτύσσονται από τον χρήστη και φορητές συσκευές χρήστη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2, όπου πολλαπλοί τύποι χρηστών και μηχανών λειτουργούν ως εξυπηρετούμενοι κόμβοι και οι συσκευές λειτουργούν ως προμηθευτές. Για μια δεδομένη περιοχή, ο αριθμός των κόμβων εξυπηρέτησης και χρήστη είναι της ίδιας τάξης. Αυξημένη χωρική επαναχρησιμοποίηση των πόρων του συστήματος, μεγάλη πυκνότητα κόμβου και ακανόνιστη ανάπτυξη είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά που παρέχει το UDN. [50]

Η ultra-dense τεχνολογία είναι μια από τις πιθανές απαντήσεις στις αυξανόμενες απαιτήσεις των 5G δικτύων. Οι ultra-dense υλοποιήσεις παρέχουν αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν πολλά γειτονικά κελιά και προκαλούν την ανακατανομή του υπάρχοντος εύρους ζώνης, ενώ αποτελούνται από πολλά μικρά κελιά μέσα στο συνολικό macrocell. Για παράδειγμα, εάν ένα macrocell καλύπτει μια συγκεκριμένη περιοχή, είναι δυνατή η εισαγωγή πολλών μικρότερων κυψελών σε αυτήν την περιοχή για να αυξηθεί η συνδεσιμότητα σε σημεία με υψηλή συμφόρηση της macrocellular περιοχής. Εκτός από αυτό, θεωρούνται ως μια backwards συμβατή λύση, αφού μπορούν να συνδυαστούν με άλλες προηγούμενες τεχνολογίες όπως η 802.11 κ.λπ. [39]



Εικόνα 4.2: UDN δομή [51]

4.3 Πλεονεκτήματα

Η τεχνολογία ultra-dense προσφέρει πολλά σημαντικά οφέλη για τους συνδρομητές και τους φορείς δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας σημαντική πρόοδος είναι η μετάβαση από τις παραδοσιακές κυψέλες, οι οποίες παρέχουν μεγάλη κάλυψη, σε ακόμα μικρότερες κυψέλες, φτάνοντας τελικά σε διατάξεις εξαιρετικά πυκνές. Η τεχνολογία ultra-dense οδηγεί το σταθμό βάσης πολύ κοντά στο χρήστη και προσφέρει τα παρακάτω οφέλη:

- Η απόδοση γίνεται πολύ μεγαλύτερη, ενώ οι καθυστερήσεις είναι πολύ χαμηλότερες.
- Στους εσωτερικούς χώρους βελτιώνεται κατά πολύ η κάλυψη, καθώς αναπτύσσονται εσωτερικοί σταθμοί βάσης.
- Η μεταφορά από εξωτερικούς χώρους (macrocellular access) σε εσωτερικούς (small cell access) και αντίστροφα, γίνεται ανεμπόδιστα.
- Υπάρχει πρόσβαση σε κλειστή ομάδα χρηστών. Αντίθετα, η πρόσβαση στην ανοιχτή ομάδα χρηστών επιτρέπει την επιλογή προκαθορισμένης ομάδας χρηστών ή συσκευών που θα έχουν πρόσβαση σε ένα συγκεκριμένο κελί.
- Τα πρωτόκολλα ασφαλείας και οι αλγόριθμοι γίνονται πιο αυστηρά.

Εκτός από τα οφέλη που προσφέρει στους χρήστες, η ultra-dense τεχνολογία προσφέρει εξίσου σημαντικά οφέλη και στους φορείς κινητής τηλεφωνίας, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Οι δαπάνες που γίνονται για τη λειτουργία του συστήματος είναι πολύ μικρότερες.
- Το δίκτυο macrocell αποσυμφορείται με επαναχρησιμοποίηση του φάσματος από την οπτική γωνία των small cells.



- Η ανακατανομή του φάσματος αυξάνει τη χωρητικότητα του δικτύου.
- Τα small cells αποτελούν ένα πράσινο τεχνολογικό επίτευγμα με αποτέλεσμα, τόσο η κατανάλωση ενέργειας, όσο και το κόστος της να μειώνονται.
- Προβλήματα και νομικά και διοικητικά ζητήματα, που προκύπτουν από τη χρήση των macrocells, απλουστεύονται.

Τα προτερήματα της ultra-dense τεχνολογίας είναι σπουδαία και αφορούν τόσο τους χρήστες, όσο και τους φορείς κινητής τηλεφωνίας. Η ασφάλεια που παρέχει αυτή η microcellular τεχνολογία με τις δυσκολίες που δημιουργεί στην πρόσβαση από τρίτους, οδήγησε στη λύση του προβλήματος της παράδοσης. Όλα αυτά τα σημαντικά οφέλη ξεχωρίζουν την τεχνολογία από τις υπόλοιπες, τις οποίες ανταγωνίζεται με επιτυχία, και την καθιστούν ως την πιο ελκυστική ιδέα και υπηρεσία. [40]

4.4 Τεχνολογίες Κλειδιά του UDN

Στο UDN υπάρχουν πολλές βασικές τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να εισαχθούν για να παρέχουν υψηλό QoE (Quality of Experience), υψηλή απόδοση φάσματος και χαμηλό κόστος.

Αρχικά, κάποιες τεχνολογίες αποτελούν τεχνολογίες κλειδιά για την ανάπτυξη του UDN, χάρις στην ευελιξία δικτύωσης που διαθέτουν. Με το ultra-density, το UDN θα αντιμετωπίσει τεράστιες προκλήσεις σχετικά με την αυτο-εγκατάσταση, την αυτόματη διαμόρφωση του physical layer Identifier (ID), τις αυτόματες σχέσεις γειτόνων (Automatic Neighbor Relations-ANR), την Mobile Load Balancing (MLB) κ.λπ. Ακόμη, τα access points (APs) υποστηρίζεται ότι έχουν ιδανικό ενσύρματο backhaul το οποίο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, πράγμα που δεν θα υφίσταται για πάντα. Μια λύση, λοιπόν, είναι τα APs να έχουν ασύρματο backhaul, το οποίο δεν μπορεί να λείπει από το UDN. Το Backhauling θα περιλαμβάνει μηχανισμούς multi-hop backhaul, multi-connectivity backhaul, καθώς και ασύρματες διεπαφές ανάμεσα στα APs.

Στα δίκτυα 4G και 5G υπάρχουν τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης, οι οποίες συνυπάρχουν με την ultra-dense τεχνολογία. Κάποιες σημαντικές δυσκολίες που θα πρέπει να επιλυθούν είναι ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν και συντηρούνται τα πολλαπλά δίκτυα αποτελεσματικά, το κόστος συντήρησης το οποίο θα πρέπει να μειωθεί, καθώς και το θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας. Το Multi-RAT, που θα πρέπει να ενσωματωθεί αυστηρά σε αυτά τα δίκτυα, αποτελεί μια σημαντική λύση στο μέλλον για τα πεδία τυποποίησης ασύρματων επικοινωνιών. Ακόμη, κυρίαρχο ρόλο έχει και η διαχείριση κινητικότητας σε ένα UDN, η οποία περιλαμβάνει την αρχιτεκτονική στο UDN και τη διαχείριση κινητικότητας με επίκεντρο το χρήστη.

Επίσης, στο ultra-dense δίκτυο, με σκοπό να καλυφθεί η απαίτηση υψηλής απόδοσης, βασική είναι η διαχείριση παρεμβολών με μικρές αποστάσεις μεταξύ των



τοποθεσιών. Για να αυξηθούν οι δυνατότητες πρόσβασης, μπορεί να υιοθετηθεί η πολυπλεξία πόρων, η οποία οδηγεί και σε πολλές προκλήσεις για τον έλεγχο των παρεμβολών. Τέλος, η διαχείριση ραδιοφάσματος (Radio Resource Management) στο UDN αντιμετωπίζει νέες προκλήσεις από το περίπλοκο περιβάλλον επικοινωνίας και τις αυξανόμενες απαιτήσεις απόδοσης. Η ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service-QoS) θα έχει αρκετές νέες απαιτήσεις σε πολλές υπηρεσίες, με κάποιες από αυτές να περιλαμβάνουν τη μειωμένη επιβάρυνση σήματος και κατανάλωση ενέργειας, καθώς και το μικρότερο χρόνο εγκατάστασης και καθυστέρησης. [52]

4.5 Προκλήσεις και Προβλήματα

Καθώς η πύκνωση των κυψελών γίνεται αυξάνεται έντονα, προκύπτουν ορισμένες προκλήσεις όπως:

- Διατήρηση των αναμενόμενων κερδών διαχωρισμού κυψελών καθώς κάθε BS γίνεται πιο ελαφρά φορτωμένο, ιδιαίτερα οι κόμβοι χαμηλής ισχύος.
- Καθορισμός των κατάλληλων συσχετίσεων μεταξύ των χρηστών και των BS σε τεχνολογίες πολλαπλής ραδιοπρόσβασης (RATs), που είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση του ρυθμού αιχμής.
- Υποστήριξη της κινητικότητας μέσω ενός εξαιρετικά ετερογενούς δικτύου.
- Κάλυψη του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και backhaul. [20]

Επίσης, οι υλοποιήσεις ultra-dense αντιμετωπίζουν και κάποιες άλλες προκλήσεις, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η αυτοοργάνωση του δικτύου, καθώς ο συμβατικός σχεδιασμός του δεν θα μπορεί να εκτελείται από τους χειριστές σε υλοποιήσεις ultra-dense.
- Οι κυψέλες θα παρεμβαίνουν η μία στην άλλη, καθώς υπάρχει η βαθμίδα του femtocell πάνω από την ήδη υπάρχουσα δομή macrocellular.
- Λόγω της πιθανής αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας, προκύπτουν προκλήσεις που αφορούν την ενεργειακή απόδοση.
- Με στόχο την υψηλή επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων φάσματος, θα πρέπει να εξεταστούν οι λειτουργίες φασματικής απόδοσης.
- Το κόστος το οποίο θα προκύψει και κατά πόσο μπορεί να αυξηθεί στις διάφορες ultra-dense υλοποιήσεις. [40]



	UDN	Traditional cellular network
Deployment scenarios	Indoor, hotspot	Wide coverage
Access point density	Comparable to the user density	Much lower than user density
Access point types	Small cell, pico femto, UE relay, relay	Macro/micro base station (BS)
Typical coverage	Around 10 m	Several hundred meters and more
Coverage characteristics	Heterogeneous, irregular	Single layer, regular cell
User density	High	Low/medium
Backhaul	Ideal/non-ideal, wired/wireless	Ideal, wired
User mobility	Low mobility	High mobility
Data rate requirement	High	Low/medium
Spectrum bands	Higher, wider	Lower, limited

Πίνακας 4.5: UDN vs. Παραδοσιακό κυψελοειδές δίκτυο [54]



5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

5.1 Εισαγωγή

Τα μελλοντικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αναμένεται να έχουν πολύ υψηλές απαιτήσεις και με σκοπό την επιτυχία τους, σημαντικοί συντελεστές θα είναι, μεταξύ άλλων, η επέκταση των ετερογενών δικτύων και οι ultra-dense υλοποιήσεις. Με στόχο την επίτευξη της στοχευμένης χωρητικότητας, της καθυστέρησης μετ' επιστροφής και των ρυθμών δεδομένων, το ultra-density στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα των μελλοντικών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας. [55]

Το ενδιαφέρον των επιστημόνων όσον αφορά τα τεχνοοικονομικά έχει αυξηθεί, ιδιαίτερα για την τεχνολογία ultra-dense, της οποίας οι τεχνοοικονομικές πτυχές δεν έχουν αναλυθεί επαρκώς. Γενικότερα, οι τεχνολογίες χρησιμοποιούνται από τα τεχνοοικονομικά μοντέλα με στόχο να διερευνηθούν, από οικονομική άποψη. Οικονομικά και τιμολογιακά στοιχεία των τεχνολογιών, καθώς και των λύσεων που προσφέρουν, παρέχονται από τα μοντέλα και έτσι βοηθούν στο να καθοριστούν πολιτικές χρηματοδότησης, όπως και τιμολόγησης, αποσκοπώντας έτσι σε καλύτερες οικονομικά διατάξεις. Κάποιες παράμετροι που λαμβάνουν υπόψιν οι μελετητές για να ορίσουν τα τεχνοοικονομικά μοντέλα τους είναι τα υλικά, η επένδυση, η κάλυψη, καθώς και η χωρητικότητα. Επιπλέον, τα μοντέλα συνήθως περιλαμβάνουν και πληθώρα παραδειγμάτων μελέτης περιπτώσεων, όπως, επίσης και τα αποτελέσματα από διεξαγόμενα πειράματα. Όλα αυτά επιτρέπουν στο μελετητή να κάνει μια αποτελεσματική ανάλυση, διεξάγοντας στο τέλος τα σωστά συμπεράσματα για τις οικονομικές πτυχές της συγκεκριμένης τεχνολογίας, στον συγκεκριμένο τομέα. [40]

Σχετικά με την ultra-dense τεχνολογία, το συνολικό κόστος της (Total Cost of Ownership-TCO) βασίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Στις κεφαλαιακές δαπάνες (Capital Expenditure-CAPEX)
- Στις λειτουργικές δαπάνες (Operational Expenditure-OPEX)

Σχεδόν κάθε στοιχείο της τεχνολογίας επηρεάζει τις παραπάνω κατηγορίες κόστους. Γι' αυτό το λόγο, μια ανάλυση κόστους βοηθά ενδιαφερόμενους, όπως ερευνητές τηλεπικοινωνιών και επιχειρήσεων, παρέχοντας ενδεχόμενες λύσεις για τη μείωση των υψηλότερων δαπανών, καθώς και αποκαλύπτοντας, ίσως, ποια στοιχεία μπορεί να επηρεάζουν το τελικό κόστος και τον υπολογισμό του. Ο σταθμός βάσης της ultra-dense τεχνολογίας, η λειτουργία της, ο εξοπλισμός της, το backhaul κλπ., αποτελούν κάποιες πτυχές που μπορεί να επηρεάσουν τις δαπάνες. [39], [55]

Οι δύο κατηγορίες κόστους είναι διαφορετικές και προκειμένου να αποφευχθούν αδυναμίες που μπορεί να προκύψουν λόγω αυτών των διαφορών και να επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα, θα πρέπει να οριστεί μια μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί κατά τη διάρκεια της ανάλυσης κόστους.



5.2 Μεθοδολογία

Οι κεφαλαιακές δαπάνες (CAPEX) αποτελούν τα χρηματικά ποσά τα οποία ένας φορέας ξοδεύει με στόχο την απόκτηση, διατήρηση και αναβάθμιση του εξοπλισμού του ή των τοποθεσιών του κ.λπ. Όσον αφορά τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX), αυτές αντιπροσωπεύουν τα συνολικά έξοδα που γίνονται ολόκληρο το χρόνο και αφορούν τόσο τη συντήρηση, όσο και τη λειτουργία. Τέλος, το συνολικό κόστος (TCO) είναι αυτό που βοηθά τους φορείς να κάνουν μια συνολική οικονομική εκτίμηση όλων των δαπανών τους και να έχουν μια καλύτερη εικόνα για τα άμεσα και έμμεσα κόστη των υπηρεσιών τους. Από όλα αυτά καταλαβαίνει κανείς πόσο βασικές είναι αυτές οι δαπάνες και την αναγκαιότητα που υπάρχει για τον υπολογισμό τους ετησίως.

Η ανάλυση κόστους για τις λειτουργικές δαπάνες είναι σχετικά απλή, σε σχέση με τις κεφαλαιακές. Γι' αυτό το λόγο, για το CAPEX λαμβάνεται υπόψιν μια υπόθεση στην οποία το CAPEX θεωρείται μια επένδυση. Σε αυτήν την επένδυση, το κεφάλαιο αποκτήθηκε μέσω δανείου, το οποίο έχει κάποιο κόστος ετησίως και εξοφλείται με ετήσιες δόσεις που περιλαμβάνουν και την εγκατάσταση και ανάπτυξη νέου εξοπλισμού.

Το κεφάλαιο για το δάνειο, με το οποίο γίνεται η ετήσια αποπληρωμή του, υποθέτουμε ότι αντιπροσωπεύεται από το P. Επίσης, το ποσό που απαιτείται για την εξόφληση παρουσιάζεται με την πληρωμή των δόσεων ετησίως, η οποία αναπαρίσταται από το A και έτσι οδηγούμαστε στον παρακάτω τύπο:

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

όπου το r εκφράζει το περιοδικό επιτόκιο και το n τον αριθμό των πληρωμών, δηλαδή τη διάρκεια που έχει το πρόγραμμα των δόσεων σε έτη. [40], [55]

5.3 Ultra-dense Υλοποιήσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κεφαλαιακές δαπάνες που αντιμετωπίζουν οι συνδρομητές ή οι χειριστές που επιλέγουν την τεχνολογία ultra-dense σε ένα δίκτυο και εφαρμόζουν τις ultra-dense υλοποιήσεις.

5.3.1 Κεφαλαιακές Δαπάνες

Αρχικά, σε αυτήν την περίπτωση το CAPEX περιλαμβάνει έξοδα τα οποία πηγάζουν από το σταθμό βάσης, καθώς και τους δρομολογητές, οι οποίοι απαιτούνται με σκοπό να ελέγχεται η κυκλοφορία του δικτύου. Ακόμη, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ένα κόστος που προέρχεται από την εταιρεία κινητής τηλεφωνίας και το κεντρικό της δίκτυο. Εφόσον οι δαπάνες αυτές έχουν αρκετά υψηλές τιμές, δεν λαμβάνονται υπόψιν άλλες δαπάνες, οι οποίες είναι πιο φθηνές, όπως για



παράδειγμα τα έξοδα για το Evolved Packet Core (EPC). Επιπλέον, η παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης από κάποιον φορέα δικτύου κινητής τηλεφωνίας υποθέτουμε ότι υφίσταται ήδη. Γι' αυτό το λόγο, στη συγκεκριμένη εκτίμηση δεν περιλαμβάνονται τα έξοδα ευρυζωνικού εξοπλισμού και εξοπλισμού backhaul. Το CAPEX, λοιπόν, με βάση και τον τύπο (1) και εφόσον το κόστος του σταθμού βάσης εκφράζεται από το C_{HeNB} και το κόστος της διεπαφής που απαιτείται για τη διαχείριση του δικτύου εκφράζεται από το $C_{i/f}$, τότε το κόστος που χρειάζεται ετησίως για την εγκατάσταση μιας ultra-dense υλοποίησης, που αποτελείται από N eNBs, εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{dense}^{CX} = N (C_{HeNB} + C_{i/f}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} \quad (2)$$

Το C_{dense}^{CX} εκφράζει το ετήσιο συνολικό κόστος CAPEX και το N τον αριθμό των eNBs από τα οποία αποτελείται η ultra-dense υλοποίηση. [40]

5.3.2 Λειτουργικές Δαπάνες

Σχετικά με τις λειτουργικές δαπάνες, σε αυτές δεν υπολογίζονται οι εξής δαπάνες:

- Δεδομένου ότι στην ιδιοκτησία του συνδρομητή έχουν εγκατασταθεί οι σταθμοί βάσης, τα έξοδα για τη μίσθωση της τοποθεσίας δεν λαμβάνονται υπόψιν, πράγμα που σημαίνει ότι ο συνδρομητής είναι υπεύθυνος για την πληρωμή τους.
- Ο συνδρομητής, επίσης, πληρώνει την κατανάλωση του ρεύματος, η οποία είναι σχεδόν μηδαμινή, αφού η κυψέλη έχει μικρό μέγεθος και χρησιμοποιούνται τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον.
- Ο φορέας που παρέχει τις ευρυζωνικές υπηρεσίες, μαζί με το χρήστη, είναι αυτοί που επωμίζονται το κόστος για τη συντήρηση και την υποστήριξη. Εφόσον ο συνδρομητής αποκτά το small cell, σε περίπτωση καταστροφής του έχει την υποχρέωση για την αντικατάστασή του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, στο OPEX των ultra-dense υλοποιήσεων υπολογίζεται μόνο μια ομάδα κόστους, αυτή του εξοπλισμού διαχείρισης δρομολόγησης του δικτύου. Ένα κόστος, το οποίο θεωρείται αντίστοιχο του CAPEX, είναι αυτό της συντήρησης. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου κόστους, λοιπόν, συμβολίζεται ως CAPEX πολλαπλασιαζόμενο με έναν συντελεστή, τον f_{st} . Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το εύρος ζώνης και το κόστος τοποθεσίας εξαιτίας των δραστηριοτήτων συντήρησης. Το OPEX εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση: [40]

$$C_{dense}^{OX} = f_{st} N C_{i/f} \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} \quad (3)$$

5.3.3 Συνολικό Κόστος

Το TCO είναι το συνολικό κόστος της ανάπτυξης των ultra-dense υλοποιήσεων, το οποίο προκύπτει ετησίως από τον φορέα του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C^{\text{TCO}}_{\text{dense}} = N (C_{\text{HeNB}} + C_{i/f} + f_{\text{st}} C_{i/f}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} \quad (4)$$

Η εξίσωση αυτή είναι βασισμένη στις εξισώσεις (2) και (3). Το n δηλώνει τη διάρκεια του προγράμματος των δόσεων σε χρόνια. [40]

5.4 Macrocellular Διατάξεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες δαπάνες τις οποίες περιλαμβάνει μια macrocellular διάταξη. Όπως και προηγουμένως, οι δαπάνες χωρίζονται στις δύο ίδιες κατηγορίες.

5.4.1 Κεφαλαιακές Δαπάνες

Στις κεφαλαιακές δαπάνες των macrocellular αναπτύξεων περιλαμβάνεται το κόστος του σταθμού βάσης του δικτύου, το οποίο εκφράζεται ως: $C_{\text{eNB}} + C_{\text{EPC}}$, καθώς καλύπτει πλήρως το eNB και το EPC. Το C_{eNB} περιλαμβάνει το κόστος του εξοπλισμού και της υλοποίησης του eNB, καθώς επίσης και πρόσθετες δαπάνες που μπορεί να προκύψουν για την κατασκευή του και το backhaul. Οι δαπάνες του κεντρικού δικτύου, όπως αυτή της δρομολόγησης της κίνησής του, αντιπροσωπεύονται από το C_{EPC} . Στις macrocellular διατάξεις υπάρχουν N σταθμοί βάσης, οπότε το συνολικό κόστος τους είναι: $N(C_{\text{eNB}} + C_{\text{EPC}})$. Λαμβάνοντας υπόψιν και την εξίσωση (1), το macrocellular CAPEX είναι:

$$C^{\text{CX}}_{\text{macro}} = N (C_{\text{eNB}} + C_{\text{EPC}}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} \quad (5)$$

όπου το $C^{\text{CX}}_{\text{macro}}$ εκφράζει το ετήσιο συνολικό κόστος του CAPEX. [40]

5.4.2 Λειτουργικές Δαπάνες

Για τις λειτουργικές δαπάνες λαμβάνεται υπόψιν, αρχικά, το κόστος λειτουργίας ετησίως για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Το κόστος αυτό εκφράζεται με το συντελεστή C_{run} και περιλαμβάνει τα κόστη για την τροφοδοσία, την υποστήριξη και τη συντήρηση εντός και εκτός τοποθεσίας. Ακόμη, το κόστος του backhaul, με οποιοδήποτε υλικό αυτό περιλαμβάνει, εκφράζεται με το συντελεστή C_{bh} . Έτσι, το ετήσιο κόστος OPEX εκφράζεται με την εξής εξίσωση:

$$C^{\text{OX}}_{\text{macro}} = N (C_{\text{run}} + C_{\text{bh}}) \quad (6)$$

Οι δαπάνες της συντήρησης της τοποθεσίας μπορούν να εκφραστούν ως το CAPEX επί το συντελεστή f_m , ο οποίος περιλαμβάνει τις λειτουργικές δαπάνες, ενώ όλες οι υπόλοιπες δαπάνες της τοποθεσίας, εκφράζονται από το c_{st} . Συνεπώς, η ποσότητα $N C_{run}$ μπορεί να εκφραστεί ως: $f_m C_{macro}^{CX} + N c_{st}$. Όσον αφορά το συντελεστή C_{bh} , αυτός, εκτός από το ότι περιλαμβάνει το κόστος backhaul, είναι, επίσης, γραμμικά ανάλογος με το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης BW πολλαπλασιαζόμενο με έναν συντελεστή f_{BW} . Έτσι λοιπόν, με βάση και όλα αυτά, το OPEX εκφράζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{macro}^{OX} = f_m C_{macro}^{CX} + N c_{st} + f_{BW} BW \quad (7)$$

Αντικαθιστώντας το C_{macro}^{CX} από την (5), έχουμε: [40]

$$C_{macro}^{OX} = f_m N (C_{eNB} + C_{EPC}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + N c_{st} + f_{BW} BW \quad (8)$$

5.4.3 Συνολικό Κόστος

Με βάση όλα τα παραπάνω, το συνολικό κόστος (TCO) ετησίως για τον φορέα δικτύου κινητής τηλεφωνίας είναι:

$$C_{macro}^{TCO} = 1 + f_m N (C_{eNB} + C_{EPC}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + N c_{st} + f_{BW} BW \quad (9)$$

όπου το C_{macro}^{TCO} είναι το TCO για έναν macrocellular σταθμό βάσης. [40]

5.5 Μοντέλα Τιμολόγησης

Στις υπηρεσίες small cell υπάρχουν δύο βασικά μοντέλα τιμολόγησης που χρησιμοποιούν οι φορείς. Αρχικά, στο πρώτο μοντέλο, το οποίο είναι και το πιο δημοφιλές στους φορείς δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ορίζεται ένα πάγιο εξυπηρέτησης για τη δυνατότητα πρόσβασης στα small cells. Κάποιες εταιρείες προσφέρουν δωρεάν υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας στους συνδρομητές που έχουν μηνιαίο συμβόλαιο πάνω από ένα καθορισμένο όριο.

Σχετικά με το δεύτερο μοντέλο τιμολόγησης, υπάρχει και πάλι χρέωση ενός παγίου εξυπηρέτησης, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση η χρέωση ορίζεται αναλόγως με το μηνιαίο συμβόλαιο κινητής τηλεφωνίας των συνδρομητών για την πρόσβαση macrocell που έχουν. Αυτό το μοντέλο, βέβαια, δεν προτιμάται ιδιαίτερα από τους πάροχους κινητής τηλεφωνίας.

Έστω j ο συνδρομητής και p_j η χρέωσή του για το πρόγραμμα υπηρεσιών που έχει επιλέξει. Τότε, για U χρήστες, το διάνυσμα $p = (p_j : j \in U)$ περιλαμβάνει για όλους τους συνδρομητές όλα τα δεδομένα χρέωσης. Άρα, τα συνολικά έσοδα R του φορέα είναι:



$$R = \sum_{j \in U} p_j \quad (10)$$

Επίσης, ισχύει ότι

$$p_j \in \{p_m, p_s\}, \forall j \in U$$

όπου p_m είναι η τιμή για τη βασική συνδρομή της macrocellular υπηρεσίας και p_s είναι η τιμή για την macrocellular πρόσβαση και για την πρόσβαση μέσω ενός small cell που ανήκει στο συνδρομητή. Έστω ότι N_m και N_s εκφράζουν τον αριθμό των macrocellular και small cell συνδρομών αντίστοιχα, τότε το R αντιπροσωπεύεται επίσης και έτσι:

$$R = N_m p_m + N_s p_s \quad (11)$$

όπου $N_m + N_s = j$.

Ακόμη, παρακάτω ορίζεται μια συνάρτηση που ποσοτικοποιεί τη χρησιμότητα, συνδέοντας τη χρησιμότητα με την απόδοση και την τιμή ως εξής:

$$u_j = \gamma f(T_j) - p_j \quad (12)$$

Το πόσο διατεθειμένος είναι ο συνδρομητής να πληρώσει για την απόδοση T_j εκφράζεται από το γ . Η σχέση μεταξύ του επιπέδου απόδοσης T_j και ενός αντικειμενικού μέτρου της αποτίμησης της απόδοσης αντιπροσωπεύεται από τη συνάρτηση f . Για υψηλότερα επίπεδα απόδοσης, οι αλλαγές στην τιμή της δεν επηρεάζουν τόσο την αποτίμησή της, οπότε η f αντιπροσωπεύει μια κοίλη συνάρτηση. Έτσι, ακόμα και αν η πρώτη παράγωγος της f είναι θετική, όσον αφορά τη δεύτερη παράγωγο, αυτή θα πρέπει να είναι πάντα αρνητική. Σχετικά με την απόδοση T_j , αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα την ταχύτητα του χρήστη, την τοποθεσία του, τις συνθήκες του δικτύου, κ.λπ.

Για να επιλέξει ένας χρήστης ένα πλάνο που προσφέρει small cell υπηρεσίες, θα πρέπει $u_s > u_m$. Με τη βοήθεια και της εξίσωσης (12), αυτό σημαίνει ότι η παρακάτω έκφραση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μηδενός:

$$\gamma (f(T_s) - f(T_m)) - p_s + p_m \quad (13)$$

Έστω ότι η έξοδος της συνάρτησης f είναι γραμμική με την απόδοση. Τότε, εκφράζοντας και την αντίστοιχη σταθερά αναλογικότητας με το κ , η παραπάνω έκφραση γίνεται:

$$\gamma \kappa (T_s - T_m) - p_s + p_m = \gamma \kappa T_{\text{enB}} - p_s + p_m \quad (14)$$

Το T_{eNB} εκφράζει την απόδοση που διασφαλίζεται για το χρήστη μέσα στο σπίτι του, χρησιμοποιώντας το HeNB του και έχοντας υιοθετήσει small cell υπηρεσίες. Αντιθέτως, όταν ο χρήστης βρίσκεται έξω από το σπίτι του, λαμβάνεται η ίδια απόδοση T_m που λαμβάνεται και από έναν συνδρομητή της macrocellular υπηρεσίας. Επίσης, η απόδοση T_{eNB} εξαρτάται κυρίως από την ευρυζωνική σύνδεση του χρήστη και αλλαγές στην απόδοση λόγω της θέσης του μέσα στο σπίτι θεωρούνται μηδαμινές. Έτσι, η T_{eNB} μπορεί εύκολα να ποσοτικοποιηθεί. Η τιμή της ποσότητας γ_k στην εξίσωση (14) εξαρτάται από την αποτίμηση της απόδοσης από τον χρήστη και θα πρέπει να οριστεί η τιμή κατωφλίου της. [56]

5.6 Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis-SA)

Η ανάλυση ευαισθησίας μελετά κατά πόσο επηρεάζεται η τελική βέλτιστη λύση από διάφορες μεταβολές στις παραμέτρους του προβλήματος. Στην προκειμένη περίπτωση, η ανάλυση ευαισθησίας διερευνά ποια στοιχεία των small cells επηρεάζουν περισσότερο το τελικό κόστος. Έτσι, οδηγεί σε σημαντικά συμπεράσματα ώστε να αποφασιστεί ποιες από τις παραμέτρους και τις μεταβλητές θα πρέπει να μειωθούν ώστε να οδηγήσουν σε πιο βελτιωμένες υπηρεσίες με χαμηλότερες τιμές. Η ανάλυση ευαισθησίας προσφέρει μια πρόβλεψη του κόστους που περιλαμβάνει μια δικτυακή υποδομή. Συνεισφέρει με τρόπο τέτοιο ώστε να βοηθά τις επιχειρήσεις στη λήψη αποφάσεων για μια τεχνολογική ή άλλη πρόταση, υποδεικνύοντας προς ποια κατεύθυνση πρέπει να σημειωθεί κάποια πρόοδος ώστε να γίνει περικοπή κάποιων εξόδων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μια ανάλυση SWOT στην οποία περιλαμβάνονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά και οι αδυναμίες των small cells στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, τα οποία θα πρέπει να εξεταστούν. Επίσης, σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι υπάρχουν δύο κατηγορίες αναλύσεων ευαισθησίας, οι οποίες είναι:

- Η One-Way SA, η οποία περιλαμβάνει τη μελέτη μιας μόνο μεταβλητής ή παραμέτρου και τον τρόπο που αυτή επηρεάζει το συνολικό αποτέλεσμα.
- Η Multi-Way SA, η οποία περιλαμβάνει τη μελέτη πολλαπλών μεταβλητών και παραμέτρων που πιθανώς να επηρεάζουν και η μία την άλλη.

Η ultra-dense τεχνολογία επηρεάζεται, μεταξύ άλλων, από μια ποσότητα που ονομάζεται throughput density. Γενικά, η throughput density υπολογίζει τον αριθμό των small cells και των κεραιών που υπάρχουν σε μια περιοχή. Με βάση τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα small cell, αποφασίζεται και ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούνται στη συγκεκριμένη περιοχή. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, παρακάτω παρουσιάζεται μια SA της throughput density για τα small cells, η οποία υπολογίζεται σε περιοχές με έκταση 1km^2 . Τα small cells καλύπτουν από 10, 12 έως 40m και κάθε κυψέλη μπορεί να καλύψει 2 χρήστες ταυτόχρονα. [39]



Strengths	Weaknesses
<ol style="list-style-type: none">1. Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί συνδυασμό στατιστικής, οικονομίας και δικτύωσης κινητής τηλεφωνίας.2. Τα small cells είναι πιθανές εφαρμόσιμες υλοποιήσεις.3. Τα small cells ανακατανέμουν το εύρος ζώνης, το οποίο αποτελεί βασική απαίτηση του 5G.4. Τα small cells αποτελούν λύσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.5. Σε ultra-dense υλοποιήσεις, πραγματοποιούνται αυτόματοι έλεγχοι κυψελών.	<ol style="list-style-type: none">1. Δυσκολία επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων και μεταβλητών.2. Ανάγκη για πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης δεδομένων/δικτύων.3. Περιορισμένη περιοχή κάλυψης των small cells.4. Επενδυτικά κεφάλαια για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας.
Opportunities	Threats
<ol style="list-style-type: none">1. Επόμενη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας.2. Εξέλιξη και έρευνα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.3. Αύξηση των απαιτήσεων του 5G.4. Αύξηση των απαιτήσεων των χρηστών (ενεργειακή απόδοση, εξελιγμένες υπηρεσίες).5. Αύξηση των απαιτήσεων των παρόχων (χαμηλότερο CAPEX και OPEX).	<ol style="list-style-type: none">1. Κυριαρχία άλλων ασύρματων τεχνολογιών.2. Υλοποίηση για επιχειρηματικούς σκοπούς.3. Περιορισμός κατανάλωσης ενέργειας και διασφάλιση ενεργειακής απόδοσης.4. Εμφάνιση κινδύνων και απειλών για την υγεία.5. Νομικά ή γραφειοκρατικά εμπόδια.

Πίνακας 5.6: Ανάλυση SWOT της ανάλυσης ευαισθησίας στον τομέα τηλεπικοινωνιών [39]



6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην πειραματική ανάλυση που ακολουθεί, αρχικά, προσδιορίζονται οι παράμετροι με τις συνιστώμενες τιμές τους και μια σύντομη περιγραφή. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται τα μοντέλα, τα οποία παρουσιάστηκαν στην ανάλυση κόστους. Με στόχο τη βέλτιστη λύση, οι παράμετροι τιμολόγησης προσαρμόζονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας.

Παράμετροι	Περιγραφή	Τιμή
C_{eNB}	Κόστος κεφαλαίου για το eNB	1000€
C_{EPC}	Κόστος κεφαλαίου του βασικού δικτύου για την ανάπτυξη ενός ενιαίου eNB	*
i	Ετήσιο επιτόκιο	6%
f_m	Γραμμικός συντελεστής που συσχετίζει το κόστος συντήρησης του χώρου με τις κεφαλαιακές δαπάνες	0.8
C_{st}	Κόστος τοποθεσίας εκτός από το κόστος συντήρησης, π.χ. παροχή ρεύματος, υποστήριξη εντός και εκτός τοποθεσίας	3100€
BW	Εύρος ζώνης Backhaul για τη διασύνδεση ενός ιστότοπου	10 Gbps
f_{BW}	Γραμμικός συντελεστής που συσχετίζει το ετήσιο κόστος backhaul του ιστότοπου με το παρεχόμενο εύρος ζώνης – εκφρασμένο σε €/Gbps	1170
n	Διάρκεια προγράμματος δόσεων ενός χώρου σε χρόνια	10 yrs
$C_{i/f}$	Κόστος κεφαλαίου για τη διασύνδεση ενός small cell	110€

*: Περιλαμβάνεται στο παραπάνω κόστος (C_{eNB})

Πίνακας 6.1: Παράμετροι κόστους και μεταβλητές συστήματος [56]

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί το κόστος ενός small cell, όπως επίσης και ενός macrocell σταθμού βάσης, από τις εξισώσεις (4) και (9). Επίσης, οι συγκεκριμένες παράμετροι είναι αυτές που σχετίζονται με την χρηματοδότηση.

Όσον αφορά την τιμολόγηση, οι παράμετροι που σχετίζονται με αυτήν, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετροι	Περιγραφή	Τιμή
T_{eNB}	Εσωτερική απόδοση που παρέχεται το HeNB	15 Mbps
γ	Συντελεστής συσχέτισης της απόδοσης με την προθυμία του πελάτη να πληρώσει – εκφρασμένος σε €/Mbps	2.8
κ	Συντελεστής που συσχετίζει την απόδοση με την αποτίμησή του	**
ρ_m	Τιμή για τη βασική macrocellular υπηρεσία	295€
ρ_s	Τιμή για ιδιωτική πρόσβαση σε small cell πάνω από την macrocellular	60€

** : Περιλαμβάνεται στον παραπάνω συντελεστή (γ)

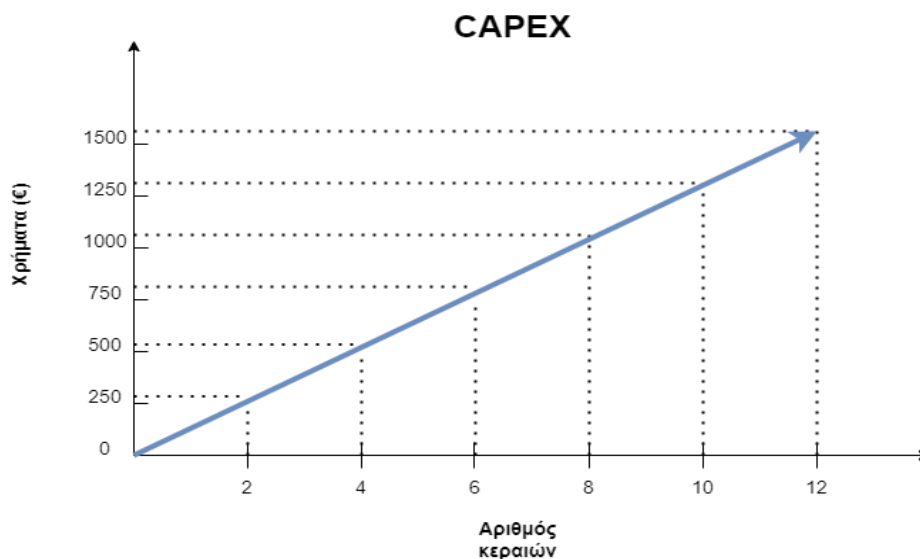
Πίνακας 6.2: Παράμετροι τιμολόγησης και μεταβλητές συστήματος [56]

Με τις τιμές αυτές θα προσδιοριστεί η τιμή που είναι διατεθειμένος ένας συνδρομητής να πληρώσει για μια πρόσθετη υπηρεσία small cell. Το τελικό ετήσιο κόστος προκύπτει από την (4). Έτσι, έχουμε:

$$c_{macro} = 15045\text{€} \text{ και } c_{small} = 27\text{€} [56]$$

Με τα παραπάνω δεδομένα από τους πίνακες και με τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί κανείς να υπολογίσει τις σημαντικότερες δαπάνες, δηλαδή τα CAPEX, OPEX και TCO. Όσον αφορά την ultra-dense τεχνολογία, αξιοποιώντας τις παραμέτρους και τις αντίστοιχες τιμές τους από τους πίνακες, προκύπτουν κάποιες γραφικές παραστάσεις.

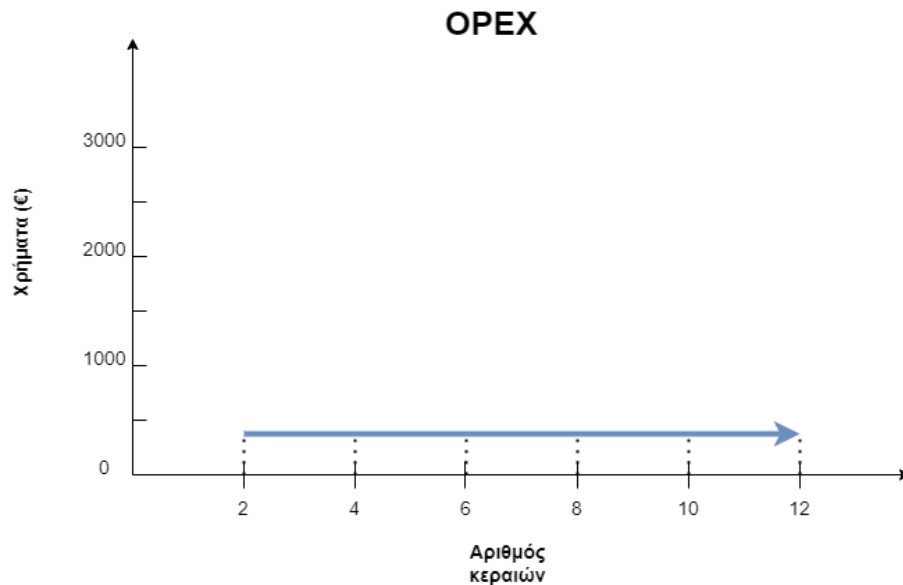
Αρχικά, παρουσιάζεται το κόστος κεφαλαίου της ultra-dense σε συνάρτηση με τον αριθμό των κεραιών του συστήματος, με τη βοήθεια της εξίσωσης (2).



Εικόνα 6.3: Κόστος κεφαλαίου της ultra-dense τεχνολογίας συναρτήσει του αριθμού κεραιών

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το κόστος κεφαλαίου της ultra-dense τεχνολογίας αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του αριθμού των κεραιών, με τις τιμές του να κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες μέχρι λίγο παραπάνω από 1500€.

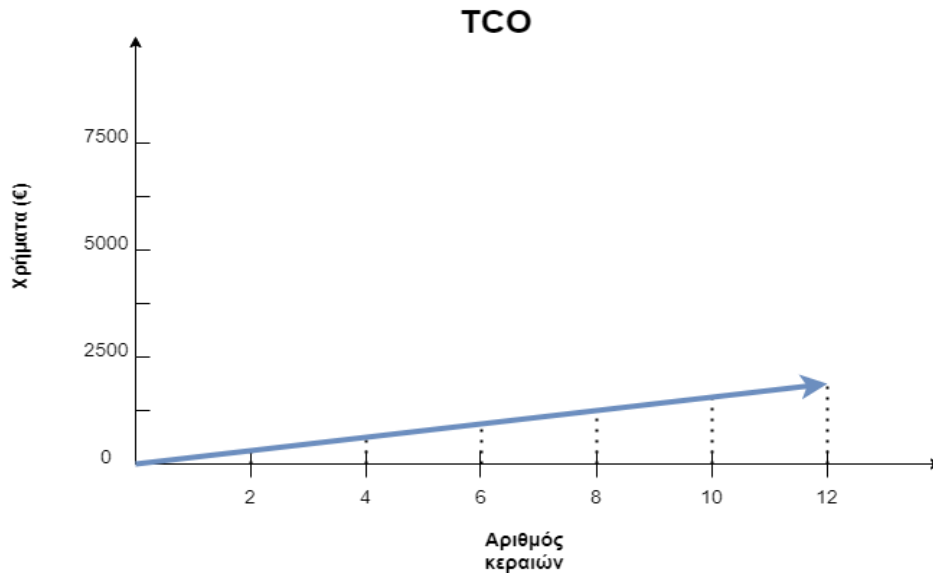
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το λειτουργικό κόστος της τεχνολογίας, το οποίο είναι εξίσου σημαντικό για μια επιχείρηση, αξιοποιώντας την εξίσωση (3).



Εικόνα 6.4: Λειτουργικό κόστος της ultra-dense τεχνολογίας συναρτήσει του αριθμού κεραιών

Είναι φανερό ότι το λειτουργικό κόστος είναι πολύ χαμηλό, μόλις μερικές εκατοντάδες ευρώ και το σημαντικότερο είναι ότι διατηρείται σταθερό, ανεξάρτητα από την αύξηση του αριθμού των κεραιών.

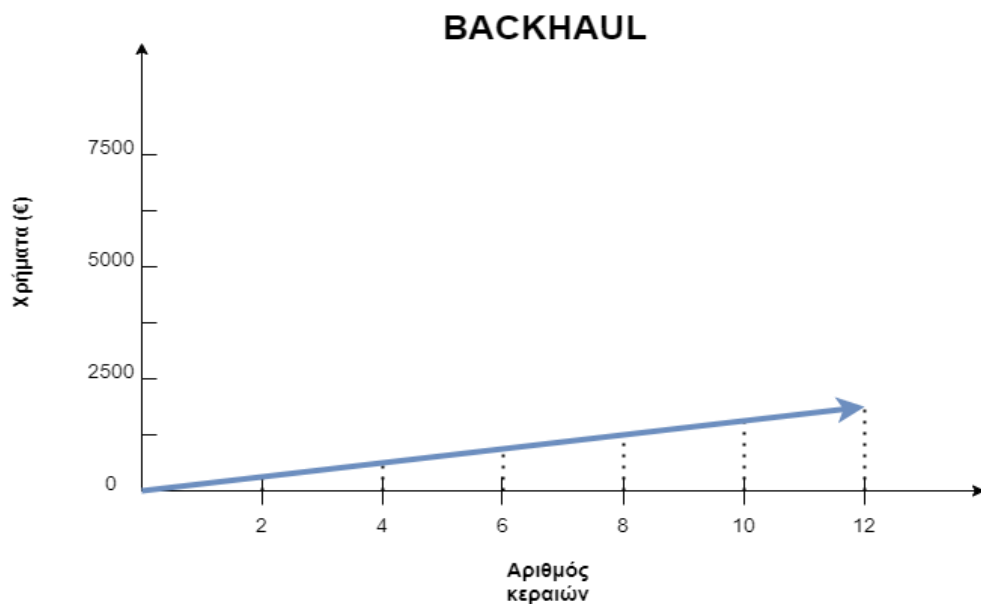
Τέλος, εφαρμόζοντας τον τύπο (4), προκύπτει το συνολικό κόστος της τεχνολογίας ultra-dense, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω:



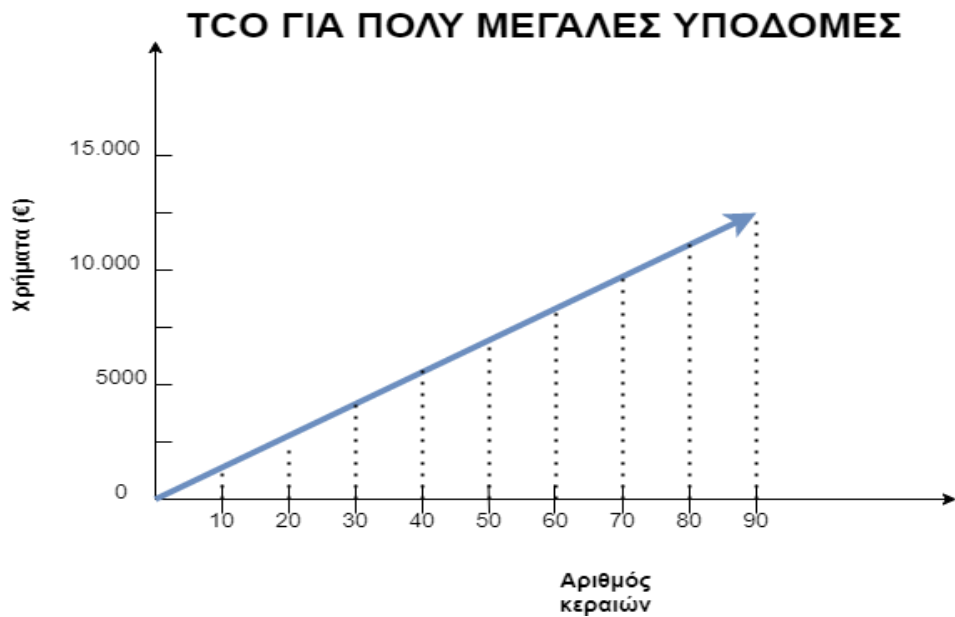
Εικόνα 6.5: Συνολικό κόστος της ultra-dense τεχνολογίας

Παρατηρείται ότι το συνολικό κόστος έχει γραμμική αύξηση με την αύξηση του πλήθους των κεραιών, χωρίς όμως να ξεπερνά και πάλι τις μερικές εκατοντάδες ευρώ.

Σημαντικό είναι επίσης να παρουσιαστεί το συνολικό κόστος για τις backhaul τεχνολογίες, όπως επίσης και για πολύ μεγάλες υποδομές, με πολύ υψηλότερο αριθμό κεραιών.



Εικόνα 6.6: Συνολικό κόστος ultra-dense υλοποιήσεων για backhaul τεχνολογίες



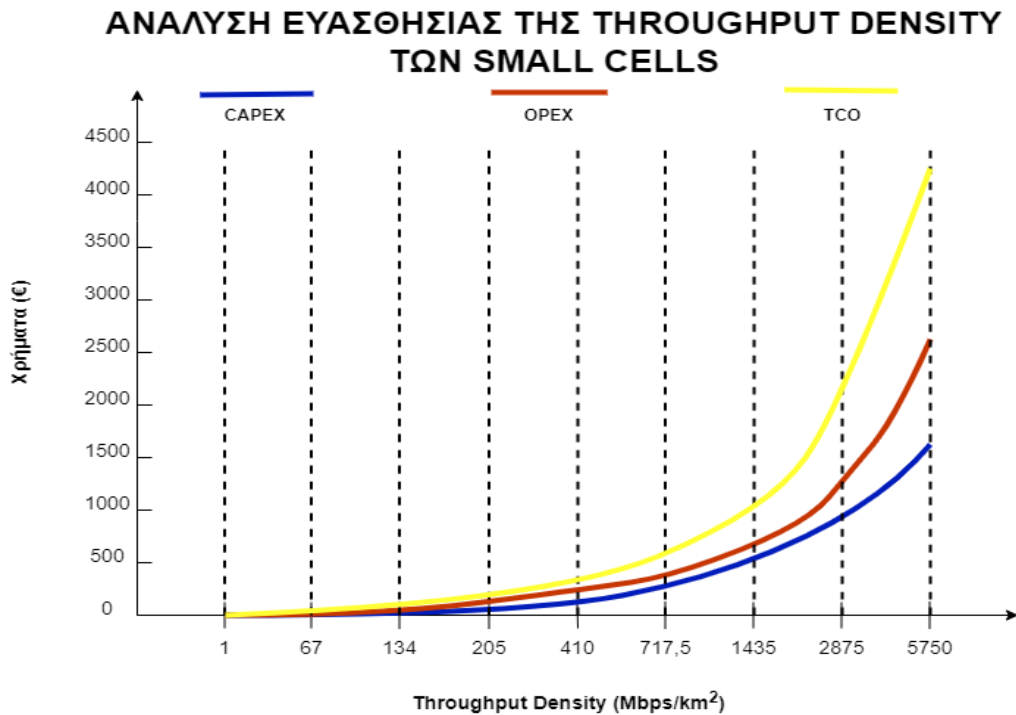
Εικόνα 6.7: Συνολικό κόστος ultra-dense υλοποιήσεων για πολύ μεγάλες υποδομές

Και στις δύο περιπτώσεις, το συνολικό κόστος είναι γραμμικά ανάλογο με τον αριθμό των κεραιών που προστίθενται στο σύστημα. [40]

Οι δαπάνες CAPEX, OPEX και TCO της ultra-dense τεχνολογίας αυξάνονται με την throughput density. Επομένως, η throughput density και ο αριθμός των small cells που υπάρχουν σε μια μεγάλη περιοχή είναι ουσιαστικής σημασίας για τον υπολογισμό των δαπανών των small cells. Ο Πίνακας 6.8 περιλαμβάνει τον αριθμό των small cells που υπάρχουν ανά km² στην Ευρώπη σύμφωνα με την ανάλυση [39] και την throughput density σε διάφορες περιοχές. Στη συνέχεια, απεικονίζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα.

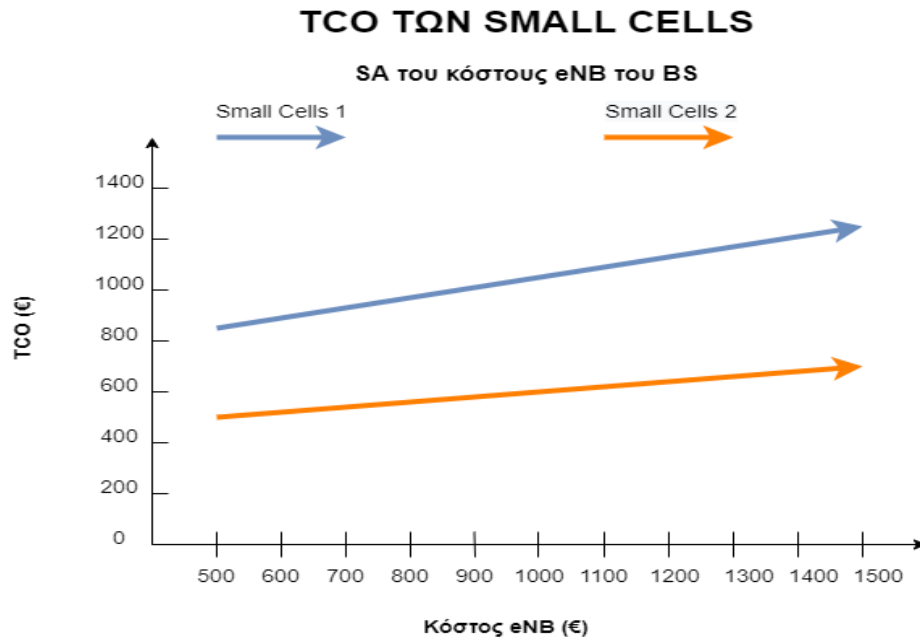
Περιοχή κάλυψης	Αριθμός των small cells ανά km ²
Downtown	2875 ή 5750
Urban	717,5 ή 1435
Suburban	205 ή 410
Rural	67 ή 134

Πίνακας 6.8: Throughput density σε διάφορες περιοχές

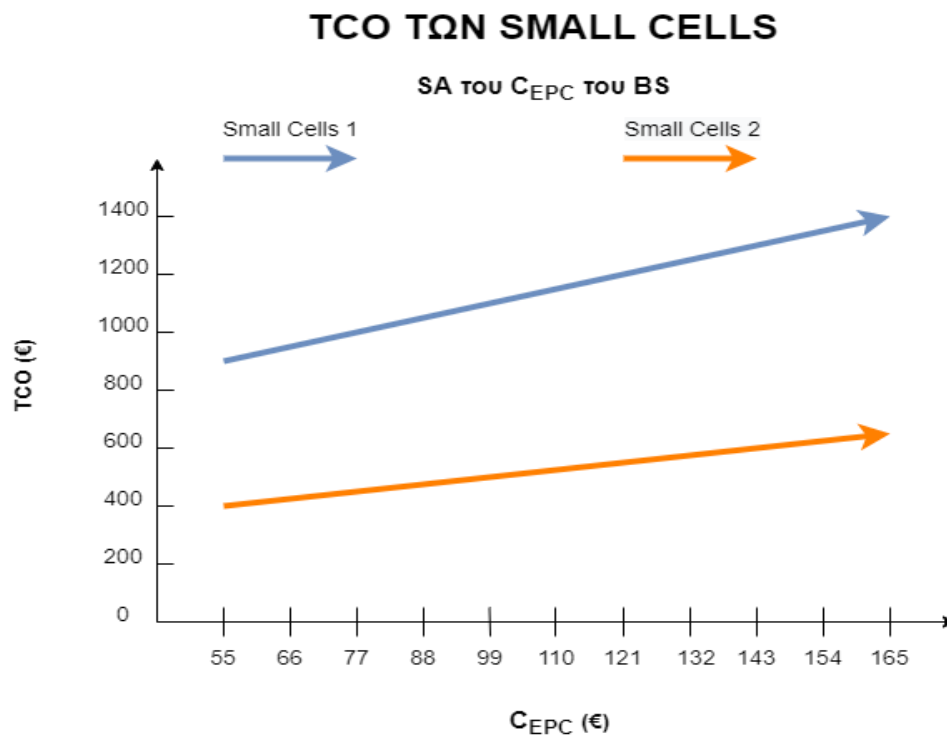


Εικόνα 6.9: Ανάλυση ευαισθησίας της throughput density για τα small cells

Η One-Way SA βοηθά στο να εξετάσουμε πώς ένα συγκεκριμένο μηχάνημα, εξοπλισμός κ.λπ. επηρεάζει το συνολικό κόστος του δικτύου. Στον Πίνακα 6.8 φαίνεται ότι εξετάζονται 2 περιπτώσεις urban throughput density, αυτές των 1435 και 717,5 χρηστών ανά km², καθώς οι περισσότερες Ευρωπαϊκές πόλεις είναι πυκνοκατοικημένες. Τις πρωινές ώρες εργασίας, η κίνηση του δικτύου είναι μεγαλύτερη στους κεντρικούς δρόμους, στα μέσα μεταφοράς και στους χώρους εργασίας, όπως πανεπιστήμια, δημόσιοι οργανισμοί, γραφεία, επιχειρήσεις κ.λπ. Αντιθέτως, όσον αφορά τις βραδινές ώρες, η περισσότερη κίνηση δεδομένων γίνεται στα σπίτια και στα διαμερίσματα. Στα παρακάτω διαγράμματα, όταν πρόκειται για την throughput density των ultra-dense υλοποιήσεων, το Small Cells 1 αντιπροσωπεύει τους 1435 και το Small Cells 2 τους 717,5 χρήστες ανά km².



Εικόνα 6.10: TCO των small cells για το κόστος eNB του BS



Εικόνα 6.11: TCO των small cells για το C_{EPC} του BS

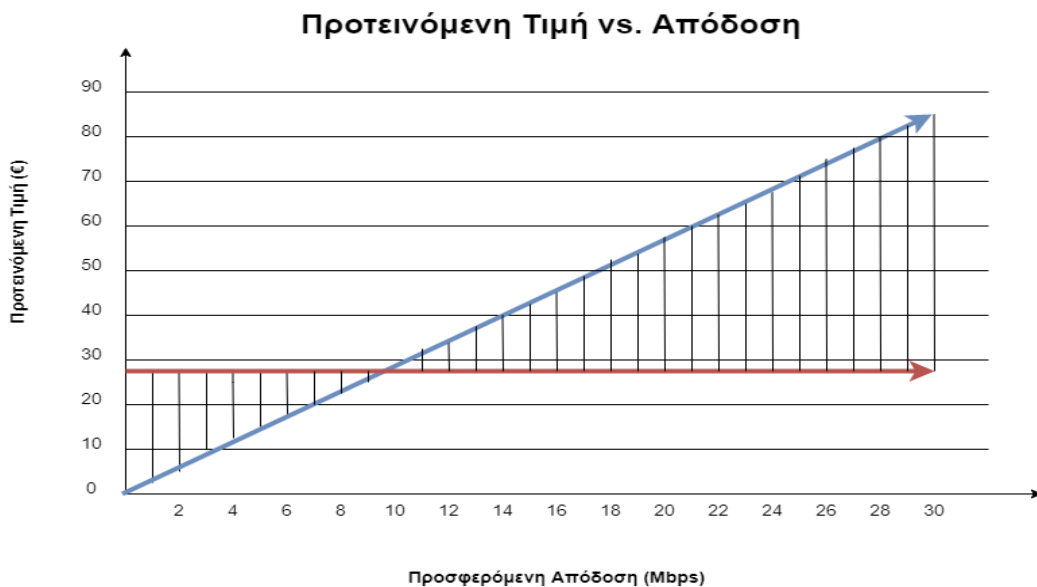
Στην Εικόνα 6.10 παρουσιάζεται μια ανάλυση ευαισθησίας του κόστους eNB του BS. Το συνολικό κόστος έχει γραμμική αύξηση σε σχέση με την αύξηση του κόστους του BS για τις ultra-dense υλοποιήσεις. Από την άλλη μεριά, στην Εικόνα 6.11

παρουσιάζεται μια ανάλυση ευαισθησίας του κόστους C_{EPC} του BS, στην οποία το συνολικό κόστος αυξάνεται και πάλι γραμμικά ανάλογα με την αύξηση του C_{EPC} για τις ultra-dense υλοποιήσεις. [39]

Για τα τελικά συμπεράσματα, είναι αναγκαία η σύγκριση των ultra-dense υλοποιήσεων με αυτές των macrocellular. Η παρακάτω σχέση βασίζεται στον Πίνακα 6.2 και θα πρέπει να ισχύει έτσι ώστε ο πελάτης να επιλέξει για τη συνδρομή του την υπηρεσία small cell:

$$p_s < 2.8 * T_{eNB} \quad (15)$$

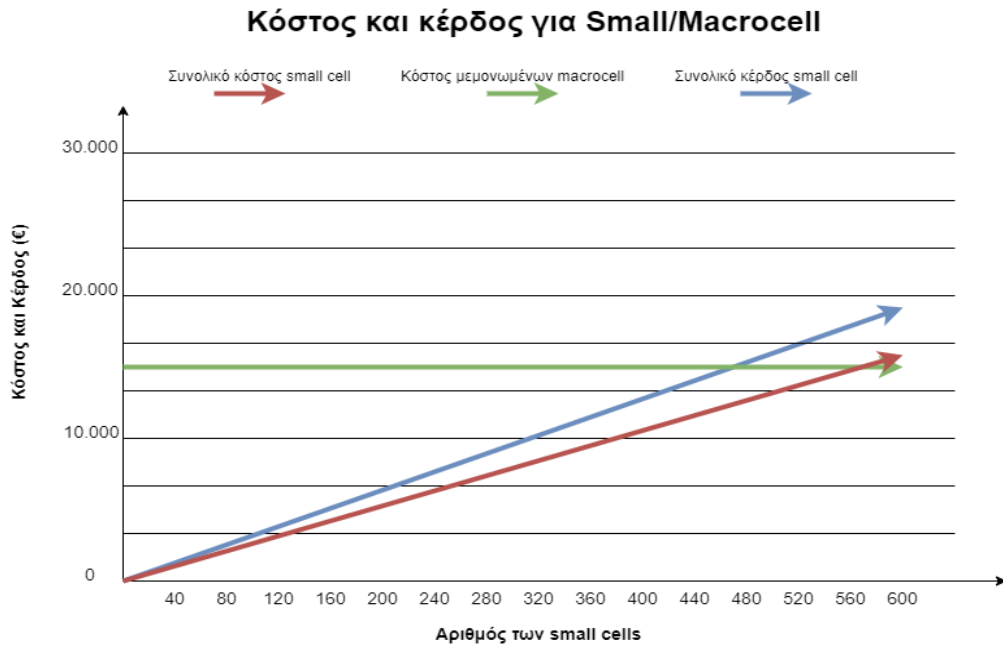
Σχετικά με τη χρηματοδότηση, από τον Πίνακα 6.1, προκύπτει το παρακάτω κόστος για έναν macrocellular σταθμό βάσης σε συνάρτηση με την απόδοση:



Εικόνα 6.12: Προτεινόμενη τιμή με βάση την προσφερόμενη απόδοση

Το παραπάνω σχήμα βασίζεται στη σχέση (15) και παρέχει μια επισκόπηση της μέγιστης τιμής έναντι της προσφερόμενης πρόσθετης απόδοσης. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει το σταθερό ετήσιο κόστος των υπηρεσιών small cell, οπότε γίνεται ξεκάθαρο ότι η παροχή αυτών των υπηρεσιών είναι αρκετά επικερδής για τους παρόχους. [56]

Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται το ετήσιο κόστος μιας διάταξης από small cells σε σύγκριση με το κόστος ενός macrocellular σταθμού βάσης.



Εικόνα 6.13: Κόστος και κέρδος των *small cells* σε σχέση με το *macrocellular* κόστος και τα *small cells* που αναπτύσσονται

Το κόστος για ένα μόνο *macrocell* είναι ίσο με το συνολικό ετήσιο κόστος σχεδόν 550 *small cells*, το οποίο απαιτείται από τους χειριστές. Ακόμη, απεικονίζεται το συνολικό κέρδος για τους χειριστές, για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιήθηκε η τιμή του p_s από τον Πίνακα 6.2. [56]



7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ύστερα από κάθε ανάλυση και μελέτη, είναι αναγκαίο να εξάγονται κάποια συμπεράσματα για τα στοιχεία, τις μεθόδους και τις τεχνολογίες που παρουσιάζονται. Ανάλογα με τον τομέα της μελέτης, τα στοιχεία ποικίλλουν και κρίνεται κατά πόσο σημαντικά είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την έρευνά τους για τη λήψη σημαντικών αποφάσεων.

Στην προκειμένη περίπτωση, πραγματοποιήθηκε μια τεχνοοικονομική ανάλυση με πρωταγωνιστή την ultra-dense τεχνολογία και τη σύγκρισή της με macrocellular διατάξεις. Παρουσιάστηκαν κάποιες σχέσεις, εξισώσεις και δεδομένα με τις αντίστοιχες τιμές τους με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της οικονομικής ανάλυσης αυτών των τεχνολογιών και την αποδοτικότερη σύγκρισή τους. Επιπλέον, η εφαρμογή κάποιων ενδεικτικών δεδομένων και τιμών στις εξισώσεις, οδήγησε στην δημιουργία των παραπάνω διαγραμμάτων με τα βασικότερη κόστη, αυτά των CAPEX, OPEX και TCO. Ειδικότερα για το τελευταίο, παρουσιάστηκαν διαγράμματα για διαφορετικές περιπτώσεις, όπως οι backhaul τεχνολογίες, η διαφοροποίηση αυτού του κόστους σε πολύ μεγάλα κτίρια, καθώς και σε συνάρτηση με το κόστος του σταθμού βάσης και το κόστος EPC. Ακόμη, σχεδιάστηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν τα κόστη και τα κέρδη των δύο τεχνολογικών αναπτύξεων.

Επιπροσθέτως, παρουσιάστηκαν και εξετάστηκαν τα οφέλη των small cells και των υπηρεσιών που προσφέρουν, τόσο για τους παρόχους δικτύου κινητής τηλεφωνίας, όσο και για τους συνδρομητές τους. Αυτό επιτεύχθηκε με την ανάλυση της χρηματοδότησης και της τιμολόγησης των small cells, όπως επίσης και με τα μοντέλα υπολογισμού των κεφαλαιακών και λειτουργικών δαπανών. Παρατηρείται ότι το κόστος κεφαλαίου αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση των κεραιών, οδηγώντας και στην γραμμική αύξηση του συνολικού κόστους. Από τις εξισώσεις φαίνεται ότι δεν υπάρχουν πολλοί παράγοντες κόστους, οπότε μια τέτοια αύξηση δεν ήταν αναμενόμενη. Ο αυξανόμενος αριθμός κεραιών, λοιπόν, πυροδοτεί και την αύξηση στο κεφαλαιακό κόστος.

Οι ultra-dense υλοποιήσεις εξαρτώνται από την throughput density, το περιοδικό επιτόκιο και το κόστος του σταθμού βάσης. Επομένως, η αύξηση αυτών των παραμέτρων οδηγεί στην αύξηση του TCO γραμμικά και ανάλογα με το σύνολο των small cells. Η διαφοροποίηση του κόστους του σταθμού βάσης, δηλαδή το κόστος για τον κόμβο eNB και το κόστος για τον EPC, επηρεάζει κυρίως το συνολικό κόστος των small cells, καθώς είναι γνωστό ότι τα small cells αποτελούν αναπόσπαστα μέρη των δικτύων, από το LTE και μετά.

Σχετικά με το λειτουργικό κόστος, μπορεί να παραμένει σταθερό, αλλά θα πρέπει να βρεθούν λύσεις ώστε να μειωθεί, οδηγώντας έτσι και σε ετήσια μείωση των συνολικών δαπανών. Υπάρχουν κάποιες λύσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση κάποιων δαπανών, όπως για παράδειγμα, η μείωση στο κόστος του σταθμού βάσης ή η χρήση εναλλακτικής πηγής ενέργειας για να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος και, ως εκ τούτου, το ετήσιο λειτουργικό κόστος.

Παρόλα αυτά, δεν παύει να είναι η πιο συμφέρουσα οικονομικά τεχνολογία για μικρές εγκαταστάσεις, τόσο για τους παρόχους, όσο και για τους συνδρομητές. Το κόστος κεφαλαίου αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του αριθμού των κεραιών, παραμένει όμως να είναι σχετικά οικονομικό σε σχέση με άλλες διατάξεις. Το λειτουργικό κόστος παραμένει χαμηλό και σταθερό και τέλος, αυτά οδηγούν στο συνολικό κόστος που είναι επίσης χαμηλό. Τα small cells βέβαια, είναι κατάλληλα για μικρές υποδομές, όπως οι οικίες και μικροί χώροι εργασίας, οι οποίοι απασχολούν 9-10 εργαζόμενους. Γι' αυτό το λόγο, οι ενδιαφερόμενοι είναι κυρίως μικρές επιχειρήσεις και οικίες για καλύτερη κάλυψη σε όλους τους χώρους και καλύτερη λειτουργία των έξυπνων συσκευών του σπιτιού. Δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις εγκατάστασης και συντήρησης και αποτελούν μια οικονομική λύση με μεγάλη απόδοση. Εν κατακλείδι, το κέρδος των small cells είναι μεγαλύτερο από το κόστος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.13.

Το network densification θεωρείται ότι είναι ο κύριος παράγοντας για την ασύρματη πρόσβαση 5G. Τα σενάρια δικτύων στο μέλλον περιλαμβάνουν τεράστιους όγκους δεδομένων ανά συσκευή χρήση, αποτελώντας έτσι πρόκληση για κάθε προσέγγιση για την εξέλιξη των κυψελοειδών δικτύων. Το παράδειγμα UDN φιλοδοξεί να φέρει επανάσταση στα δίκτυα αξιοποιώντας αποτελεσματικά τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι νέες επικοινωνίες και τεχνολογίες. Ωστόσο, πρέπει να το κάνει κάτω από ένα εξαιρετικά απαιτητικό περιβάλλον παρεμβολών. [62]

Επιπλέον, με σκοπό να κατανοηθούν πλήρως οι παράμετροι ελέγχου για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός πυκνού (dense) δικτύου, απαιτούνται περαιτέρω έρευνες σε βάθος. Οι αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών μετρήσεων απόδοσης, όπως η φασματική απόδοση περιοχής, η ενεργειακή απόδοση, η πιθανότητα κάλυψης/διακοπής και η απόδοση δικτύου απαιτούν την κατανόηση της μεμονωμένης επίδρασης των παραμέτρων ελέγχου, συγκεκριμένα την πυκνότητα των BS, τον αριθμό των κεραιών ανά BS, την ισχύ μετάδοσης και τις δυνατότητες κατάστασης αδράνειας. [49]

Συνολικά, κάθε τεχνοοικονομική ανάλυση είναι χρήσιμη για την αντιμετώπιση προβλημάτων που μπορεί να επιφέρουν τέτοιες τεχνολογίες. Η εξαγωγή συμπερασμάτων από τα παραπάνω στοιχεία, βοηθά στην καλύτερη και αποδοτικότερη λήψη αποφάσεων που αφορά το κάθε δίκτυο, ανάλογα με τις ανάγκες που αυτό έχει. Επιπλέον, οι ενδιαφερόμενοι έχουν μια καλύτερη εικόνα για την επιλογή της πιο συμφέρουσας τεχνολογίας για το δίκτυό τους και τον καλύτερο υπολογισμό των δαπανών του.



8. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Οι απαιτήσεις και οι ανάγκες στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας όλο και αυξάνονται. Μελλοντικά, θα πρέπει να προτείνονται όλο και περισσότερες ιδέες και έρευνες, οι οποίες θα ανταπεξέρχονται και θα συμβαδίζουν με την εξέλιξη των δικτύων. Θα πρέπει, επίσης, να καλύπτονται και προβλήματα και δυσκολίες, που θα εμφανίζονται συνεχώς, τόσο στους χρήστες όσο και στους παρόχους δικτύων, και θα συνοδεύουν κάθε τεχνολογική ανάπτυξη.

Είναι σημαντικό να μελετηθούν εξ ολοκλήρου όλες οι τεχνολογίες 5G και ο πιθανός συνδυασμός τους. Τα small cells, τα οποία αποτελούν τη βασική τεχνολογία στο 5G δίκτυο και την αφετηρία για το 6G, αναδεικνύονται τεχνολογία κλειδί από οικονομική άποψη. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να γίνει περαιτέρω ερευνητική δραστηριότητα για όλες τις παραπάνω τεχνολογίες, όπως και πολλές δοκιμές για τη χρησιμοποίηση συνδυασμών τους, ώστε να υπάρχει μια καλύτερη εικόνα για την πιο συμφέρουσα κάθε φορά επιλογή.

Η 5^η γενιά κινητών δικτύων μας έχει προσφέρει πολύ υψηλές ταχύτητες με αρκετά χαμηλό κόστος. Το δίκτυο έχει γίνει πιο ισχυρό και αποτελεσματικό, ενώ σημαντική είναι και η εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται. Επιπλέον, η χρήση της οπτικής ίνας έχει ενισχύσει κατά πολύ την ταχύτητα και προσφέρει πάρα πολύ γρήγορες και αποδοτικές δικτυακές υπηρεσίες. Σε αυτό το υπάρχον δίκτυο λοιπόν, θα πρέπει να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η ultra-dense τεχνολογία και οι δυνατότητές της, ενώ θα πρέπει να διευρυνθούν και οι έρευνες για τη χρήση της στην 6^η γενιά κινητών δικτύων.

Οι πάροχοι δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως κάθε επιχείρηση, έχουν στόχο την αύξηση των κερδών τους με χαμηλό κόστος. Για να επιτευχθεί αυτό, ειδικά στον τομέα τον τηλεπικοινωνιών, θα πρέπει να αυξάνουν τις υπηρεσίες τους, να τις εξελίσσουν, να προτείνουν το συνδυασμό τους και γενικά να αναβαθμίσουν την επιχείρησή τους διατηρώντας όμως χαμηλές τιμές για τους συνδρομητές τους και χαμηλό κόστος για τους ίδιους. Θα πρέπει λοιπόν να μελετηθούν διάφορες μέθοδοι που να οδηγούν σε χαμηλές δαπάνες με αύξηση τους κέρδους και να ερευνηθούν οι τεχνολογίες ώστε να εφαρμοστούν μοντέλα που ανταπεξέρχονται στις εκάστοτε απαιτήσεις.

Οι πράσινες τεχνολογίες έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στις μέρες μας. Είναι σημαντικό, αρχικά, να επιτευχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η εξοικονόμηση ενέργειας και να βρεθούν τρόποι να διατηρείται περισσότερο η ενέργεια στα κινητά, χωρίς να επηρεάζεται τόσο από διάφορες ενέργειες του χρήστη, όπως η σύνδεση στο διαδίκτυο. Επίσης, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι τα δίκτυα δεν προκαλούν περιβαλλοντική επιβάρυνση και στην περίπτωση που συμβαίνει αυτό, να εξαλειφθεί με κάθε δυνατό τρόπο. [57]

Το κόστος του σταθμού βάσης είναι ακόμη ένα θέμα που πρέπει να επιλυθεί, καθώς ο σταθμός βάσης αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα ενός δικτύου. Παράλληλα με το κόστος του, θα πρέπει να εξεταστούν και άλλα θέματα, όπως η πιθανή



ενσωμάτωση τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον, η αποδοτικότερη αντιμετώπιση σφαλμάτων και επιδιόρθωση βλαβών, καθώς και η αντιμετώπιση προβλημάτων κάλυψης. Οι ultra-dense υλοποιήσεις, αφού εξαρτώνται κυρίως από το κόστος του σταθμού βάσης και το περιοδικό επιτόκιο, θα ήταν πιο αποδοτικές αν περιορίζονταν οι δαπάνες για το κόστος υλοποίησης του σταθμού βάσης, καθώς και αν εξασφαλιζόταν ο περιορισμός του περιοδικού επιτοκίου. Σε κάθε περίπτωση πάντως, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να εκμεταλλευτούν τις παραπάνω σχέσεις και εξισώσεις εφαρμόζοντας κάθε φορά τις κατάλληλες τιμές και να οδηγηθούν σε σημαντικά συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και τις οικονομικές δαπάνες των δύο τεχνολογικών διατάξεων που παρουσιάζονται. [58]

Η διερεύνηση καινοτομιών και μεθόδων οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν στην κάλυψη νέων απαιτήσεων και να ανταγωνιστούν τις ήδη υπάρχουσες λύσεις, είναι εξαιρετικά σημαντική. Οι τεχνολογίες, και κυρίως ο συνδυασμός τους, παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην κάλυψη των όλο και αυξανόμενων απαιτήσεων και αναγκών και υπόσχονται καινοτόμες λύσεις σε περίπλοκα ζητήματα.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Εμμανουήλ Βαρβαρίος, “Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών-Μέρος Β”
- [2]https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%B5%BB%CF%89%CF%84%CF%8C_%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF&oldid=z8053607
- [3] “Κυψελωτή δομή του δικτύου κινητών επικοινωνιών.”
https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Antennas_EMR/health/BaseStationRdt/Network/
- [4] Α. Δ. Παπατσώρης, “Κινητές Επικοινωνίες”
<http://teachers.cm.ihu.gr/papatsoris/Mobile%20Communications.pdf>
- [5] Χρήστος Ι. Μπούρας, “09_Kin_dikt_epik.pdf.”, Δίκτυα Δημόσιας χρήσης και Διασύνδεση Δικτύων. Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών, Πάτρα 2017
https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/CEID1064/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CF%82/09_Kin_dikt_epik.pdf
- [6] Xoxzo Official Blog, “A brief history of 1G mobile communication technology”
<https://blog.xoxzo.com/en/2018/07/24/history-of-1g>
- [7] Σπανούδη Ευαγγελία, “Ιστορική Αναδρομή της Τεχνολογίας Κυψελοειδούς Δικτύου 1G-5G.”, Πάτρα 2017
- [8]https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Global_System_for_Mobile_Communications&oldid=8982574
- [9] <https://artsandculture.google.com/asset/motorola-dynatac-8000x-motorola/fwGWZ6vwEf5LKA>
- [10]https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Advanced_Mobile_Phone_System&oldid=1052371575
- [11]https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nordic_Mobile_Telephone&oldid=1036793095
- [12] Λύκου Άννα Αικατερίνη, “Οι Γενιές των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας και Παρουσίαση των Συστημάτων 4ης Γενιάς LTE και LTE-Advanced.”, Λάρισα 2014
- [13] <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=3G&oldid=1053098617>



- [14] Πεντεδήμος Φώτης, “Διαδικτυακό Πληροφορικό Σύστημα Αξιολόγησης Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας από Πλευράς Χρηστών.”, Θεσσαλονίκη 2015
- [15] https://www.researchgate.net/figure/UMTS-Network-Structure_fig3_228874285
- [16] <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=4G&oldid=8068740>
- [17] <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=WiMAX&oldid=8681096>
- [18] <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=LTE&oldid=8587225>
- [19] Μπούγας Νικόλαος, “Κινητά Δίκτυα 4G”, Πάτρα 2016
- [20] Jeffrey G. Andrews, Fellow, IEEE, Stefano Buzzi, Senior Member, IEEE, Wan Choi, Senior Member, IEEE, Stephen Hanly, Member, IEEE, Angel Lozano, Fellow, IEEE, Anthony C.K. Soong, Fellow, IEEE, Jianzhong Charlie Zhang, Senior Member, IEEE, "What Will 5G Be?", IEEE jsac special issue on 5g wireless communication systems, May 2014
- [21] Christos Bouras, Paraskevi Fotakopoulou, Anastasia Kollia, “5G Networks: Advancement and Challenges”, ICWMC 2019: The Fifteenth International Conference on Wireless and Mobile Communications
- [22] <https://www.telit.com/blog/4g-vs-5g-new-technology-will-change-everything/>
- [23] Christos Bouras, Stylianos Kokkalis, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “Techno-economic comparison of MIMO and DAS cost models in 5G networks”, 27 June 2018
- [24] Christos Bouras, Stylianos Kokkalis, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “Techno-economic analysis of MIMO & DAS in 5G”, The Proceedings of the 2018 11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)
- [25] <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
- [26] Christos Bouras, Anastasia Kollia, “Techno-Economic Analysis for Programmable Networks”, 2019



- [27] Christos Bouras, Anastasia Kollia, Eleftheria Maligianni, “Techno-Economic Comparison of Cognitive Radio and Software Defined Network (SDN) Cost Models in 5G Networks”, 15 May 2020
- [28] Abdalla Taha, “Software Defined Networking and its Security”, 4.08.2014
- [29] Christos Bouras, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “SDN & NFV in 5G: Advancements and Challenges”
- [30] https://www.researchgate.net/figure/A-three-layer-software-defined-networking-SDN-architecture_fig1_284696928
- [31] Ian F. Akyildiz, Shuai Nie, Shih-Chun Lin, Manoj Chandrasekaran, “5G roadmap: 10 key enabling technologies”, 14 June 2016
- [32] Wei Yang and Carol Fung, “A Survey on Security in Network Functions Virtualization”, 2016
- [33] Walid Saad, Mehdi Bennis and Mingzhe Chen, “A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies and Open Research Problems”, 2020
- [34] Christos Bouras and Anastasia Kollia, “Techno-Economic Analysis of MMWave vs Mid-Band Spectrum in 5G Networks”, 2020
- [35] Christos Bouras, Fotios Kaisoudis, Anastasia Kollia, “Comparison of Techno-Economic Solutions for 5G Networks and beyond”
- [36] <https://www.engineersgarage.com/cognitive-radio/>
- [37] Xiaohu Ge, Song Tu, Guoqiang Mao, Cheng-Xiang Wang, Tao Han, “5G Ultra Dense Cellular Networks”, February 2016
- [38] Tracy Ford, “Implications of Small Cells”, Mission Critical, August 2014
- [39] Christos Bouras, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “Dense Deployments and DAS in 5G: A Techno-Economic Comparison”, 16 September 2016
- [40] Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “Analyzing Small-Cells and Distributed Antenna Systems from Techno-Economic Perspective”, 2017



- [41] <https://en.wikipedia.org/wiki/Macrocell>
- [42] Michaela Goss, “Macrocell vs. small cell vs. femtocell: A 5G introduction”, August 2020
- [43] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcell>
- [44] HetNet Forum, “Distributed Antenna Systems (DAS) and Small Cell Technologies Distinguished”, February 2013
- [45] <https://www.landmarkdividend.com/microcells-technology-what-is-it-and-how-does-it-work/>
- [46] <https://www.techopedia.com/definition/16860/picocell>
- [47] <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell>
- [48] CELLULAR ASSET MANAGEMENT, “Femtocells-Benefits, Challenges and Deployment Scenarios”, 2010
- [49] Mahmoud Kamel, Walaa Hamouda, Amr Youssef, “Ultra-Dense Networks: A Survey”, 2016 IEEE
- [50] Sanae El Hassani, Abdelfatteh Haidine, Hayat Jebbar, “Road to 5G: Key Enabling Technologies”, Journal of Communications Vol.14, No.11, November 2019
- [51] <https://www.semanticscholar.org/paper/UltraDense-Networks%3A-The-New-Wireless-Frontier-for-Gotsis-Stefanatos/abb3e7a0f19eb1d56ea8f5dd49397058f9beb8b7>
- [52] Shanzhi Chen, Fei Qin, Bo Hu, Xi Li, Jiamin Liu, “Ultra-Dense Network Architecture and Technologies for 5G”
- [53] <https://www.idtechex.com/en/research-report/5g-small-cells-2021-2031-technologies-markets-forecast/825>
- [54] <https://www.semanticscholar.org/paper/User-centric-ultra-dense-networks-for-5G%3A-and-Chen-Qin/c0efed27a3d790cc63dc20ea9fcaee743dacbece>
- [55] Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “Techno-economic Analysis of Ultra-dense and DAS Deployments in Mobile 5G”, IEEE 2015



[56] Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Andreas Papazois, “Financing and Pricing Small Cells in Next-Generation Mobile Networks”, 2014

[57] European Technology Platform for Communications Networks and Services, “5G: Challenges, Research Priorities, and Recommendations”, September 2014

[58] Christos Bouras, Anastasia Kollia, Andreas Papazois, “Sensitivity Analysis of Small Cells and DAS Techno-economic Models in Mobile 5G”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2016)

[59] <https://www.reachabovemediamedia.com/how-iot-is-changing-the-business-world/>

[60] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%B4%CE%AF%CE%BA%CF%84%CF%85%CE%BF_%CF%84%CF%89%CE%BD_%CF%80%CF%81%CE%B1%CE%B3%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD

[61] Akhil Gupta, Rakesh Kumar Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies”, IEEE

[62] Antonis G. Gotsis, Stelios Stefanatos, Angeliki Alexiou, “ULTRADENSE NETWORKS”, “The New Wireless Frontier for Enabling 5G Access”, 1 April 2016