



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ

ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ

ΔΙΚΤΥΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ

ΚΑΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΝ

SMALL CELLS ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 5G

ΜΙΧΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

A.M 5837

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΠΟΥΡΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	I
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	III
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	1
1.1.1 ΔΙΚΤΥΑ ΠΡΩΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (1G NETWORKS).....	2
1.1.2 ΔΙΚΤΥΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (2G NETWORKS)	3
1.1.3 ΔΙΚΤΥΑ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (3G NETWORKS).....	6
1.1.4 ΔΙΚΤΥΑ ΤΕΤΑΡΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (4G NETWORKS)	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ.....	10
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (5G NETWORKS)	10
2.2 Η ΒΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G	12
2.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G.....	14
2.4 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ 5G	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: SMALL CELLS.....	18
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ SMALL CELLS.....	18
3.2 ΤΥΠΟΙ SMALL CELLS	19

3.2.1 FEMTOCELLS	19
3.2.2 PICOCELLS	20
3.2.3 MICROCELLS	21
3.2.4 MACROCELLS	22
3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ SMALL CELLS.....	23
3.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	24
3.5 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟ ΏΡΑΜΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	27
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	30

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1G	First Generation
2G	Second Generation
2.5G	Two and a half Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
5G-PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
AP	Access Point
BSC	Base Station Controller
CoMP	Coordinated MultiPoint
C-RAN	Cloud Radio Access Network
DAS	Distributed Antenna System
D-AMPS	Digital Advanced Mobile Phone System
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service

GSM	Global System for Mobile Communications
HD	High Definition
HetNet	Heterogeneous Network
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High Speed Download Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
iDEN	Integrated Digital Enhanced Network
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
MMS	Multi Media Service
MSC	Mobile Switching Centre
NFV	Network Function Virtualization
OS	Operating System
PDC	Personal Digital Cellular

PNF	Physical Network Function
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
SDM-C	Software Defined Mobile Network Controller
SDM-X	Software Defined Mobile Network Coordinator
SDN	Software Defined Network
SMS	Short Message Service
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UX	User Experience
VoIP	Voice over Internet Protocol
VNF	Virtual Network Functions
VR	Virtual Reality
WAN	Wide Area Network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Αν γυρίζαμε μερικά χρόνια πίσω - και πιο συγκεκριμένα στον 20ό αιώνα - θα παρατηρούσαμε μια τεχνολογική έκρηξη ανακαλύψεων, καθώς οι ανεπτυγμένες τεχνολογικές ικανότητες των ανθρώπων της εποχής εκείνης να πειραματίζονται, να συλλέγουν δεδομένα, να αναλύουν τα αποτελέσματα και να διανέμουν τις πληροφορίες σε παγκόσμια κλίμακα, συνέβαλαν καθοριστικά στις τεχνολογικές ανακαλύψεις της εποχής εκείνης. Αρκεί να αναφέρουμε μονάχα μερικές από τις ανακαλύψεις που σημάδεψαν τον 20ό αιώνα, όπως για παράδειγμα την εφεύρεση του τηλεφώνου και του ραδιοφώνου, την ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την εγκαθίδρυση του *Internet*, για να καταλάβει κανείς την σημαντικότητα των εφευρέσεων αυτών για τον άνθρωπο [1].

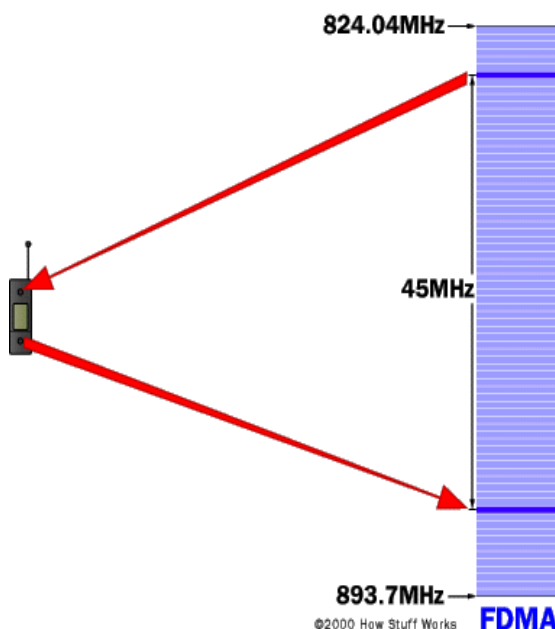
Βρισκόμαστε πια στον 21ο αιώνα και η τεχνολογική πρόοδος συνεχίζει να εξελίσσεται ραγδαία, βασιζόμενη πάνω στα επιτεύγματα του προηγούμενου αιώνα και για εμάς, αυτό σημαίνει ότι οφείλουμε να ενημερωνόμαστε συνεχώς για τα νέα της τεχνολογίας, καθώς και να ενσωματώνουμε τα νέα αυτά τεχνολογικά επιτεύγματα στην καθημερινή μας ζωή. Ως άνθρωποι, έχουμε την τάση να αναζητούμε συνεχώς κάτι παραπάνω από αυτό που πραγματικά χρειαζόμαστε, κάτι περισσότερο από αυτό που ήδη έχουμε και από αυτές μας τις ανάγκες δεν θα μπορούσαν να λείπουν και οι αυξημένες τεχνολογικές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα η επιθυμία για γρήγορες ταχύτητες στο *Internet* και η ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων ή επιπλοκών σε αυτό.

Επιχειρώντας να διευκολύνει ακόμα περισσότερο την καθημερινότητά μας, η επιστημονική κοινότητα προχώρησε στην ανάπτυξη και υλοποίηση μιας ιδέας που ονομάστηκε Διαδίκτυο των Πραγμάτων (*Internet of Things, IoT*). Το IoT αποτελεί μια συνολική και συντονισμένη προσπάθεια για ενσωμάτωση μιας πληθώρας ηλεκτρονικών συσκευών - από ένα κινητό τηλέφωνο έως και μια καφετιέρα ή ένα *smartwatch* - σε ένα ενιαίο δίκτυο, το οποίο θα επιτρέπει την άμεση διασύνδεση, επικοινωνία και εξυπηρέτηση ανθρώπων και ηλεκτρονικών συσκευών. Για να

υλοποιηθεί όμως μια τέτοια ιδέα, γίνεται αντιληπτό πως θα χρειαζόταν να αναπτυχθεί ένα αξιόπιστο δίκτυο, το οποίο θα είναι σε θέση να διαχειρίζεται με σχετική άνεση το σύνολο των οντοτήτων που είναι συνδεδεμένες σε αυτό, να παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και λήψης δεδομένων, αλλά και ισχυρή ασφάλεια δεδομένων [2].

1.1.1 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G Networks)

Η πρώτη προσπάθεια υλοποίησης ενός Δικτύου που θα προσέφερε τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά εμφανίστηκε το 1980. Το σύστημα λοιπόν που αναπτύχθηκε αποτελούσε την πρώτη γενιά ασύρματων Δικτύων που χρησιμοποίησε τεχνολογία κυψελών, βασισμένο στην τεχνική του *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*. Δηλαδή, υπήρχε ένα επικοινωνιακό δίκτυο το οποίο διαχώριζε την εκάστοτε γεωγραφική περιοχή που μπορούσε να καλύψει σε κυψέλες. Κάθε κυψέλη (εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής) χρησιμοποιούσε διαφορετικές συχνότητες από τις γειτονικές κυψέλες της, με αποτέλεσμα σε κάθε τηλεφωνική συσκευή να ανατίθεται διαφορετική συχνότητα, σε μια προσπάθεια να γίνει μετάδοση ήχου χωρίς επιπλοκές, δημιουργώντας έτσι μια εγγυημένη επικοινωνία [3] [4] [5].



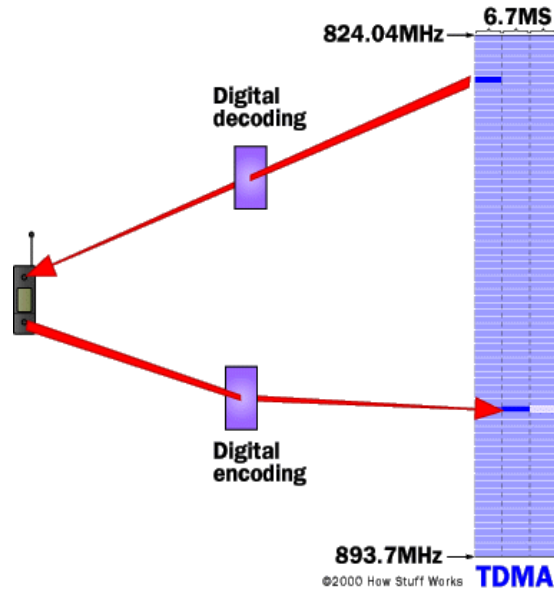
Εικόνα 1: Πρωτόκολλο *FDMA* [6].

Το δίκτυο αυτό, λόγω της πρώιμης μορφής του, ήταν ένα αναλογικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο και ονομάστηκε Δίκτυο Πρώτης Γενιάς (*First Generation Network, 1G Network*). Κάτω από ιδανικές συνθήκες, η μέγιστη ταχύτητα που μπορούσε να παρέχει ένα 1G Δίκτυο ήταν στα 14.4 Kbps, ταχύτητα η οποία όμως μπορούσε να πέσει μέχρι και στα 4.8 Kbps κάτω από κάκιστες συνθήκες. Εκτός όμως της χαμηλής ταχύτητας που προσέφερε, επιπλέον εμπόδια στην χρησιμοποίηση του Δικτύου αυτού ήταν οι μπαταρίες χαμηλής διάρκειας των κινητών τηλεφώνων που επικρατούσαν στην εποχή εκείνη, η έλλειψη ασφάλειας που μερικές φορές οδηγούσε μέχρι και στην κατάρρευση των κλήσεων, αλλά και η αδυναμία αποστολής και λήψης δεδομένων [5] [7].

1.1.2 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G Networks)

Η βελτίωση των 1G Δικτύων ήταν ένα μείζον ζήτημα της εποχής και η ανάπτυξη ενός βελτιωμένου ασύρματου Δικτύου αποτελούσε επιτακτική ανάγκη. Ως αποτέλεσμα, το 1991 - 10 περίπου χρόνια μετά την ανάπτυξη των 1G Δικτύων - ανακοινώνεται και επίσημα η εμφάνιση των ασύρματων Δικτύων Δεύτερης Γενιάς (*Second Generation Networks, 2G Networks*). Τα Δίκτυα αυτά κατάφεραν να διαφοροποιηθούν αισθητά, καθώς επέτρεπαν την μεταφορά ψηφιακών αντί αναλογικών ραδιοκυμάτων, μετατρέποντας το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο σε ψηφιακό, σε αντίθεση με το αναλογικό δίκτυο των Δικτύων Πρώτης Γενιάς. Με τον τρόπο αυτό, κατάφεραν να προσφέρουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων, γεγονός που έμελλε να καθιερώσει τα 2G Δίκτυα ως την επικρατέστερη μορφή δικτύων για την εποχή εκείνη, εκτοπίζοντας τα 1G Δίκτυα [8].

Τα Δίκτυα 2G βασίστηκαν στο *Time Division Multiple Access (TDMA)* πρωτόκολλο, στο οποίο γίνεται συνδυασμός διαμοίρασης χρονικών πόρων και πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (*FDMA*). Δηλαδή, ο τηλεφωνικός σταθμός προσφέρει μια κοινόχρηστη συχνότητα λειτουργίας και μια πληθώρα χρονικών πόρων στις τηλεφωνικές συσκευές που βρίσκονται εντός του χώρου κάλυψης του σταθμού. Κατά συνέπεια, κάθε τηλεφωνική συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με τον σταθμό της, χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη κοινόχρηστη συχνότητα λειτουργίας αλλά και τον χρονικό πόρο που της έχει ανατεθεί [9].



Εικόνα 2: Πρωτόκολλο *TDMA* [6].

Με βάση το *TDMA* πρωτόκολλο, αναπτύχθηκαν πολλαπλές τεχνολογίες πάνω στα 2G Δίκτυα, με τις κυριότερες εξ' αυτών να είναι το *Global System for Mobile Communications (GSM)*, το *Personal Digital Cellular (PDC)*, το *Integrated Digital Enhanced Network (iDEN)* και τέλος το *Digital Advanced Mobile Phone System (D-AMPS)*. Ως επικρατέστερη τεχνολογία επιλέχθηκε το *GSM*, το οποίο μάλιστα από το 2014 και μετά όρισε τα standards για τις παγκόσμιες τηλεπικοινωνίες, έχοντας ήδη βάση λειτουργίας σε παραπάνω από 219 χώρες [8] [10]!

Παρόλο που αρχικά το *GSM* αποτελούσε μια τεχνολογία που βελτιστοποιούσε τον τομέα της τηλεφωνικής επικοινωνίας, με την πάροδο του χρόνου προστέθηκαν και επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας δεδομένων. Μια επίσης πολύ σημαντική προσθήκη ήταν το *High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD)*, το οποίο με κάποιο επιπλέον κόστος που επιβάρυνε τον χρήστη, επέτρεπε στο *GSM* μοντέλο να χρησιμοποιεί πολλαπλούς χρονικούς πόρους, όπου ο κάθε πόρος παρείχε έναν ρυθμό δεδομένων ίσο με 14.4 Kbps, αυξάνοντας συνεπώς τον μέγιστο ρυθμό δεδομένων που θα μπορούσε να χρησιμοποιεί ένας χρήστης τηλεφωνικής συσκευής στα 56 Kbps. Εναλλακτικά, οι χρήστες θα μπορούσαν να αρκестούν στις 14.4 Kbps ταχύτητες του απλού *GSM* μοντέλου, αποφεύγοντας τις επιπλέον χρεώσεις [9] [10].

Ένα απο τα σημαντικότερα επιτεύγματα των 2G Δικτύων ήταν το ότι για πρώτη φορά, υπήρχε η δυνατότητα μεταφοράς και λήψης δεδομένων, γεγονός που επέτρεπε την εναλλαγή μηνυμάτων κειμένου *SMS (Short Message Service)*, μηνυμάτων εικόνων ή ακόμα και μηνυμάτων δεδομένων *MMS (Multi Media Service)*, όπως για παράδειγμα δεδομένα κειμένου, συλλογή εικόνων, αρχεία ήχου, μικρά βίντεο και περιεχόμενα κινουμένων σχεδίων. Επιπρόσθετα, τα 2G Δίκτυα παρείχαν την δυνατότητα ψηφιακής κρυπτογράφησης δεδομένων, με αποτέλεσμα μόνο ο προοριζόμενος αποδέκτης να λαμβάνει και να διαβάζει το μήνυμα κειμένου, παρέχοντας αξιοπιστία και ασφάλεια στην μεταφορά δεδομένων [8] [11] [12].

Πριν κάνουμε την εισαγωγή στα 3G δίκτυα, θα ήταν παράλειψη αν δεν αναφέραμε τις αναβαθμίσεις που έγιναν πάνω στα 2G Δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης ενός εξελιγμένου δικτύου με τα χαρακτηριστικά των 2G δικτύων αναφέρεται ως Δίκτυο Δεύτερης και Μισής Γενιάς (*Two and a Half Generation Network* ή απλά *2.5G Network*), καθώς κατάφερε να υλοποιήσει ταυτόχρονα έναν τομέα μεταγωγής πακέτων και έναν τομέα μεταγωγής κυκλώματος. Για τις ανάγκες του δικτύου αυτού, χρησιμοποιήθηκε η *General Packet Radio Service (GPRS)* τεχνολογία, μια υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας πακέτων που αρχικά προσανατολίστηκε και μετέπειτα ενσωματώθηκε πλήρως στο GSM μοντέλο, η οποία αντί να χρεώνει ανά λεπτό συνδεσιμότητας στο δίκτυο, χρέωνε ανά ποσότητα δεδομένων που μεταφέρονταν [8] [13].

Εκτός όμως απο τα 2.5G Δίκτυα, την εμφάνισή τους έκαναν και τα 2.75G Δίκτυα, τα οποία βασίστηκαν στην τεχνολογία *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)*. Το μοντέλο EDGE χρησιμοποιούσε εξελιγμένες μεθόδους κωδικοποίησης και μετάδοσης δεδομένων με απώτερο σκοπό να παρέχει υψηλότερες ταχύτητες ανά ραδιοφωνικό κανάλι. Ως αποτέλεσμα, είχαμε την αύξηση κατά τρεις φορές της χωρητικότητας και της απόδοσης του δικτύου σε σχέση με τα μοντέλα GSM και GPRS [8] [14].

1.1.3 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (3G Networks)

Τα Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (*Third Generation Networks, 3G Networks*) πρωτοεμφανίστηκαν το 1998, 7 περίπου χρόνια μετά από την εμφάνιση των 2G Δικτύων, και αποτέλεσαν την επόμενη σημαντική εξέλιξη έπειτα από τα 2G Δίκτυα και τις αναβαθμίσεις τους (βλέπε 2G Δίκτυα με τεχνολογίες GPRS/EDGE). Τα 3G Δίκτυα έδωσαν έμφαση στην αύξηση των ταχυτήτων εντός του Δικτύου, με τεχνικές που όφειλαν να συνάδουν με τα πρότυπα και τις προδιαγραφές της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών-2000 (*International Telecommunication Union-2000, ITU-2000*) [15].

Τα 3G Δίκτυα ήταν τα πρώτα δίκτυα που υποστήριζαν την παγκόσμια περιαγωγή δεδομένων (*global roaming*) στο πεδίο της τηλεφωνίας και το γεγονός αυτό αποτελεί ένα κύριο παράγοντα, αν όχι τον κυριότερο, για τον οποίο ακόμη και σήμερα, η πλειοψηφία των χρηστών κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιεί 3G Δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά παρείχαν πρωτότυπες υπηρεσίες, όπως οι βίντεο κλήσεις (*video calls*), οι ζωντανές μεταδόσεις απευθείας από υπολογιστή (*video streaming*), καθώς και ταχύτερους ρυθμούς για κατέβασμα (*download*) και ανέβασμα (*upload*) δεδομένων. Οι αυξημένες ταχύτητες εντός του δικτύου βρίσκουν εφαρμογή τόσο σε Τοπικά Δίκτυα¹ (*Local Area Networks, LAN*), όσο και σε Δίκτυα Ευρείας Περιοχής² (*Wide Area Networks, WAN*). Σε Τοπικά Δίκτυα, οι ταχύτητες του Δικτύου εκτοξεύονται έως και τα 2.000 kbps (2 Mbps), ενώ σε Δίκτυα Ευρείας Περιοχής οι ταχύτητες ξεκινούν από 128 kbps και μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 384 kbps [16] [17] [18].

Όπως και με τα προγενέστερα δίκτυα που αναπτύχθηκαν, θα έπρεπε να οριστούν τα standards που θα διέπουν τις λειτουργίες του δικτύου. Συνεπώς, έρχεται στο φως το *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, μια υπηρεσία βασισμένη κατά κόρων στα standards του GSM. Το UMTS χρησιμοποιούσε μια

¹ LAN: σύνολο ηλεκτρονικών υπολογιστών συνδεδεμένων μεταξύ τους σε έναν μικρό γεωγραφικό χώρο, πχ οικιακό δίκτυο.

² WAN: τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, πχ μεγάλο εταιρικό δίκτυο.

τεχνική που ονομαζόταν *Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA)* για να προσφέρει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και απόδοση δικτύου [15] [19].

Την ανάληψη της ευθύνης τόσο για την ανάπτυξη, όσο και για την συντήρηση του παραπάνω εγχειρήματος ανέλαβε ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που έφερε το όνομα *3GPP (Third Generation Partnership Project)* και ο οποίος είχε ως αρχικό στόχο την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα υποστήριζαν τα 3G Δίκτυα, βασιζόμενα στα standards του GSM. Μετέπειτα, ο οργανισμός αυτός επεκτάθηκε σημαντικά, αναλαμβάνοντας την ανάπτυξη, την συντήρηση και την εξέλιξη όχι μόνο των 3G Δικτύων, αλλά και όλων των προγενέστερων και μεταγενέστερων Δικτύων, ξεκινώντας από τις υπηρεσίες των Δικτύων Δεύτερης Γενιάς και φτάνοντας μέχρι και τα υπό ανάπτυξη Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς [19] [20].

Σε μια προσπάθεια να βελτιωθούν οι παρεχόμενες υπηρεσίες του UMTS, η 3GPP κοινότητα προχώρησε στην ανάπτυξη νέων standards, όπως το *High Speed Packet Access (HSPA)* και το *Evolved High Speed Packet Access (HSPA+)*. Το HSPA αποτελούσε συνένωση δύο πρωτοκόλλων, του *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)* και του *High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)*, βασίστηκε στις τεχνικές του W-CDMA πρωτοκόλλου και λειτουργούσε πάνω στις ίδιες συχνότητες με αυτό. Παρόλα αυτά, διαφοροποιήθηκε αισθητά καθώς κατάφερε να αυξήσει τις ταχύτητες κατεβάσματος δεδομένων στα 115 Mbps και ανεβάσματος (δεδομένων) στα 46 Mbps. Ταυτόχρονα, προσέφερε 5 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα συστήματος στο κατέβασμα και 2 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα στο ανέβασμα. Το HSPA+ βασίστηκε πάνω στο ήδη ανεπτυγμένο πρωτόκολλο του HSPA και προσέφερε ταχύτητες που άγγιζαν τα 1344 Mbps σε κατέβασμα δεδομένων και 176 Mbps στο ανέβασμα, ταχύτητες που όμως έμειναν σε θεωρητικό επίπεδο, καθώς ήταν πολύ σπάνιο να επιτευχθούν έξω από το δοκιμαστικό επίπεδο [15] [21] [22].

Τέλος, θα ήταν παράλειψη αν δεν αναφέραμε και το *CDMA2000* standard, το οποίο έκανε την πρώτη του εμφάνιση ένα χρόνο μετέπειτα από το UMTS (δηλαδή το 2002). Την ανάπτυξη του CDMA2000 ανέλαβε ξανά ο ίδιος κερδοσκοπικός οργανισμός (3GPP) που ήταν υπεύθυνος για την ανάπτυξη του UMTS, όμως αυτή τη φορά έφερε την ονομασία *Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2)*, καθώς ήταν υποχρεωτικό να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ της ανάπτυξης του UMTS και του CDMA2000, χωρίς αυτό να σημαίνει όμως ότι ο οργανισμός ήταν διαφορετικός [23].

1.1.4 Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (4G Networks)

Τα Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (*Fourth Generation Networks*) αποτέλεσαν την φυσική εξέλιξη των 3G Δικτύων και υποστήριζαν τηλεοράσεις υψηλής ευκρίνειας (*High Definition, HD*), τηλεφωνία με βάση το Διαδικτυακό Πρωτόκολλο (*Internet Protocol telephony, IP telephony*), καθώς και βελτιωμένες εμπειρίες στο διαδίκτυο λόγω των πολύ υψηλών παρεχόμενων ταχυτήτων. Το 2008, το *International Telecommunication Union (ITU)* αποφασίζει να θεσπίσει το *International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced)*, ένα σύνολο απαιτήσεων πάνω στις οποίες θα τεθούν τα θεμέλια των 4G Δικτύων, όπως all-IP λύσεις που αφορούν τηλέφωνα, *laptops* και άλλες συσκευές, υποστήριξη διαδικτυακών παιχνιδιών και δυνατότητες για έναν μέσο χρήστη του δικτύου να κάνει ζωντανές μεταδόσεις (*live streaming*) [24] [25].

Για τα 4G Δίκτυα, θα μας απασχολήσουν δύο κύρια πρωτόκολλα εφαρμογής. Το πρώτο πρωτόκολλο για το δίκτυο αυτό εμφανίστηκε το 2009 με όνομα *Long Term Evolution (LTE)*. Βασιζόμενο πάνω στις προγενέστερες υλοποιημένες τεχνολογίες όπως GSM/EDGE και UMTS/HSPA, αποσκοπούσε στην παροχή υψηλών ταχυτήτων εντός του ασύρματου δικτύου και την ευθύνη της ανάπτυξής του ανέλαβε ο 3GPP οργανισμός. Το δεύτερο πρωτόκολλο ονομάστηκε *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)* και επέτρεπε την ευρυζωνική σύνδεση πολλαπλών φορητών συσκευών μεταξύ χωρών μέσω συγκεκριμένων συσκευών καθώς και τον συνδυασμό υπηρεσιών, όπως η ταυτόχρονη παροχή δεδομένων, τηλεπικοινωνιών μέσω Διαδικτυακού Πρωτοκόλλου (*Voice over Internet Protocol, VoIP*) και τηλεόρασης μέσω Διαδικτυακού Πρωτοκόλλου (*Internet Protocol Television, IPTV*) [26] [27].

Επιστρέφοντας πίσω στο *IMT-Advanced*, μια από τις απαιτήσεις που τέθηκαν αφορούσαν τις ταχύτητες των 4G Δικτύων, οι οποίες θα έπρεπε να φτάνουν έως και τα 100 Mbit/s για ταχεία διερχόμενες συσκευές συνδεδεμένες στο δίκτυο και τα 1000 Mbit/s (1 Gbit/s) για σταθερές συσκευές. Δυστυχώς, καμία από τις τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν (LTE και WiMAX) δεν κατάφεραν να αγγίξουν σε τόσο υψηλές ταχύτητες. Μάλιστα, παρόλο που τα πρωτόκολλα αυτά δεν καλύπτουν πλήρως τα προαπαιτούμενα του *IMT-Advanced*, θεωρούνται ως έγκυρα 4G πρωτόκολλα. Για να καλυφθούν οι απαιτήσεις του *IMT-Advanced*, χρειάστηκε η μετέπειτα ανάπτυξη δύο επιπλέον τεχνολογιών, του *WiMAX Release 2* και του *LTE Advanced (LTE-A)* [24].

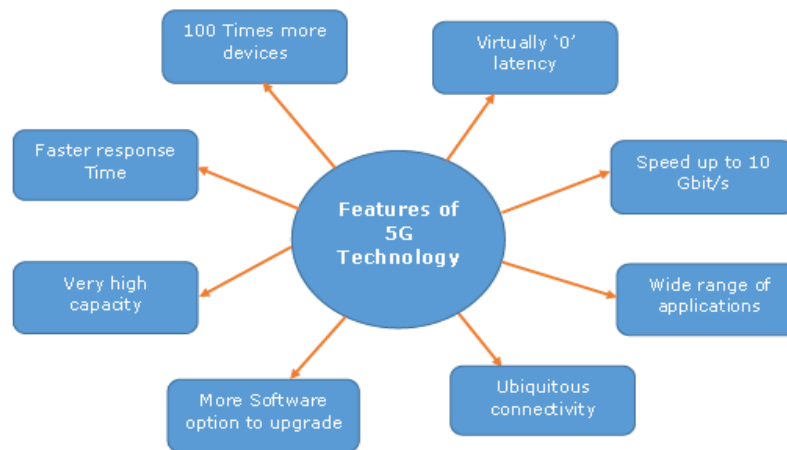
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή στα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G Networks)

Η ανάπτυξη των ασύρματων Δικτύων Πέμπτης Γενιάς (*Fifth Generation Networks, 5G*) προχωράει με γοργούς ρυθμούς, χάρη σε μια πρωτοβουλία που εμπλέκει την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και την Ευρωπαϊκή Βιομηχανία Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών και φέρει το όνομα *5G Infrastructure Public Private Partnership (5G-PPP)*, αφήνοντας πίσω τα μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενα Δίκτυα Τρίτης και Τέταρτης Γενιάς. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα, το οποίο χρηματοδοτείται οικονομικά από τους παραπάνω οργανισμούς, θεωρείται απο πολλούς το μεγαλύτερο σε ολόκληρο τον κόσμο στον τομέα των 5G Δικτύων και έχει ως σκοπό να προσφέρει όσο το δυνατόν καλύτερες και αποτελεσματικότερες λύσεις σε θέματα που αφορούν τις αρχιτεκτονικές, τις τεχνολογίες και τα standards πάνω στα οποία θα βασιστούν τα 5G Δίκτυα [28].

Η οργάνωση 5G-PPP, ξεκινώντας από το 2015, κατάφερε με την σειρά της να χρηματοδοτήσει και να διανέμει ένα σύνολο απο 19 projects που ανήκουν στην Πρώτη Φάση της οργάνωσης αυτής (*5G-PPP Phase 1 Projects*). Τα projects αυτά έχουν ως χρονικό ορίζοντα ολοκλήρωσης το τέλος του 2017 και σκοπό την εγκαθίδρυση των βάσεων και των προδιαγραφών για τα 5G Δίκτυα του μέλλοντος, καθώς θα πρέπει να ανταποκριθούν σε ένα σύνολο εφαρμογών, υπηρεσιών και απαιτήσεων που αυξάνονται εκθετικά, μέσα σε μια πλήρως τεχνολογικά συνδεδεμένη κοινωνία [29] [30].

Η τεχνολογία των 5G Δικτύων αποσκοπεί στην παροχή πολλαπλών χαρακτηριστικών, κατά πολύ βελτιωμένων από αυτά που προσέφεραν στην κοινωνία οι προγενέστερες γενιές ασύρματων δικτύων. Οι σημαντικότερες εξ' αυτών συνοψίζονται στην Εικόνα 3, η οποία παρουσιάζει τα μελλοντικά χαρακτηριστικά που θα προσφέρουν τα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς [31].



Εικόνα 3: Χαρακτηριστικά των μελλοντικών Δικτύων 5G [31].

Τα 5G Δίκτυα, όπως αναφέραμε και παραπάνω, θα χρειαστεί να ενσωματωθούν και να χρησιμοποιηθούν σε μια πληθώρα τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύουν στην ανάπτυξη και υλοποίηση μιας ενιαίας πλατφόρμας βασιζόμενης στον αυτοματισμό, η οποία θα εμπεριέχει ένα σύνολο διαφόρων επιχειρηματικών πλάνων και θα είναι ευέλικτη ως προς την ενσωμάτωση νέων επιχειρηματικών μοντέλων και υπηρεσιών. Για παράδειγμα, τα 5G Δίκτυα θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύπτουν επιχειρηματικούς τομείς και θέματα μείζονος σημασίας όπως η ενέργεια, η υγεία, οι έξυπνες συσκευές κλπ [30].

Ταυτόχρονα, θα πρέπει να μπορούν να υποστηρίζουν τις ταχύτατα εξελισσόμενες ανθρωποκεντρικές ανάγκες για τεχνολογία, όπως πχ η υποστήριξη 4K *Video Streaming* και η βελτίωση στον τομέα της Εικονικής Πραγματικότητας (*Virtual Reality, VR*). Επιπρόσθετα, οφείλουν να ωθήσουν την κοινωνία σε έναν αυστηρό τεχνολογικά αυτοματισμό, στοχεύοντας στην προστασία, στην διευκόλυνση και στην βελτίωση της ποιότητας της ζωής του ανθρώπου σε τομείς της καθημερινότητας, όπως για παράδειγμα ο αυτοματισμός των έξυπνων αυτοκινήτων [30].

2.2 Η βάση λειτουργίας των Δικτύων 5G

Τα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς του μέλλοντος θα είναι σε θέση να ενσωματώσουν πολλαπλά δίκτυα από διάφορους τομείς σε μια ενιαία πλατφόρμα. Για να το καταφέρουν αυτό, θα χρειαστεί να τμηματοποιήσουν το ενιαίο δίκτυο σε επιμέρους τμήματα δικτύου (*network slice*³). Η τμηματοποίηση αυτή θα δίνει την δυνατότητα στον εκάστοτε φορέα της υποδομής του δικτύου να προσφέρει πόρους που αντιπροσωπεύουν εικονικά δίκτυα (*virtual networks*). Κάθε πόρος εικονικού δικτύου θα εμπεριέχει τις απαιτούμενες λειτουργίες της εκάστοτε υπηρεσίας ή τις εφαρμογές που επιζητάει ο πελάτης του δικτύου. Δηλαδή, ο τεμαχισμός του ενιαίου δικτύου φυσικής υποδομής επιτρέπει την δημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων, όπου κάθε επιμέρους εικονικό δίκτυο θα προσφέρει τις δικές του υπηρεσίες που ανταποκρίνονται στην εκάστοτε ανάγκη, ανεξάρτητα από τις παρεχόμενες υπηρεσίες και εφαρμογές των υπολοίπων εικονικών δικτύων [30] [32].

Έχοντας αναφερθεί πολύ γενικά στην έννοια του *network slice*, οφείλουμε να εμβαθύνουμε και να επεξηγήσουμε με σαφήνεια τον τρόπο λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα λοιπόν, το εκάστοτε *network slice* θα περιέχει ένα ανεξάρτητο (από τα υπόλοιπα *network slices*) σύνολο λειτουργιών και εφαρμογών που θα είναι σε θέση να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εκάστοτε υπηρεσίας στην οποία έχει ανατεθεί. Όσον αφορά στο λειτουργικό κομμάτι, κάθε *network slice* θα έχει την δική του αρχιτεκτονική διάταξη, τον δικό του τρόπο λειτουργίας και μεθόδους εξυπηρέτησης αιτημάτων και θα λειτουργεί υπό τις οδηγίες είτε ενός διαχειριστή, είτε ενός πελάτη, ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις. Η ανεξαρτησία κάθε *network slice* έχει καθαρά θετικές συνέπειες στο σύστημα του δικτύου, καθώς αφενός μια τυχόν επίθεση στην ασφάλεια του δικτύου δεν θα εξαπλωθεί στα άλλα εικονικά δίκτυα και αφετέρου διευκολύνει την ενσωμάτωση δοκιμαστικών τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών που θα επιδρούν μονάχα στο αυτόνομο *network slice* [32].

³ Network Slice: σύνολο ικανοποιητικά διαμορφωμένων λειτουργιών και εφαρμογών δικτύου που συνδυάζονται με απώτερο σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων μιας συγκεκριμένης περίπτωσης χρήσης (*use case*) του δικτύου, όπως πχ το εύρος ζώνης, η αξιοπιστία και η ασφάλεια, σε συνδυασμό με ένα επιχειρηματικό πλάνο.

Η τεχνική αυτή του τεμαχισμού του δικτύου επιτελεί έναν πολύ σημαντικό ρόλο στα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς, καθώς ο τεμαχισμός αυτός θα χρησιμοποιηθεί τόσο για την οργανωτική τμηματοποίηση και την βέλτιστη διαχείριση του κεντρικού φυσικού δικτύου, όσο και την παροχή πολλαπλών ασύρματων δικτύων, άμεσα προσπελάσιμων από υποστηριζόμενες τεχνολογικές συσκευές που ανήκουν στο ΙοΤ [32].

Για να γίνουμε πιο κατανοητοί, ας θεωρήσουμε ένα τηλεκατευθυνόμενο drone που υποστηρίζει την δυνατότητα πλήρους αυτονομίας στην παράδοση παραγγελιών από καταστήματα σε οικίες. Στην περίπτωση που θέλουμε το drone να κινείται με ταχύτητα στον εναέριο χώρο και να φτάσει όσο το δυνατόν γρηγορότερα στον προορισμό του, θα μπορούσαμε να αναθέσουμε ένα network slice του φυσικού δικτύου, το οποίο θα ήταν υπεύθυνο για την διαχείριση και παροχή υψηλής απόδοσης (στο drone). Στην περίπτωση όμως που θέλουμε το drone να προσγειωθεί με ασφάλεια για να παραδώσει το προϊόν μπροστά στην οικία και να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα, δεν θα επιλέγαμε να χρησιμοποιήσουμε το παραπάνω network slice που προσφέρει απόδοση έναντι ασφάλειας. Θα επιλέγαμε να αναθέσουμε ένα νέο network slice, το οποίο θα ήταν αποκλειστικά υπεύθυνο για την ασφάλεια της προσγείωσης και την αποφυγή πρόσκρουσης σε φυσικά εμπόδια εκτός της οικίας.

Βλέπουμε λοιπόν ότι με μια ενιαία πλατφόρμα δικτύου, μπορούμε με την τεχνική του network slicing να βελτιστοποιήσουμε την απόδοση των εκάστοτε συσκευών του ΙοΤ που είναι συνδεδεμένες στο φυσικό δίκτυο, παραχωρώντας ένα ή παραπάνω εικονικά δίκτυα στην συσκευή, ανάλογα με τις ανάγκες της [32].

2.3 Αρχιτεκτονική Δικτύων 5G

Παρακάτω, θα περιγράψουμε αναλυτικά την αρχιτεκτονική των 5G Δικτύων, η οποία αποφασίστηκε να βασιστεί στην έννοια του network slicing που αναφέραμε παραπάνω.

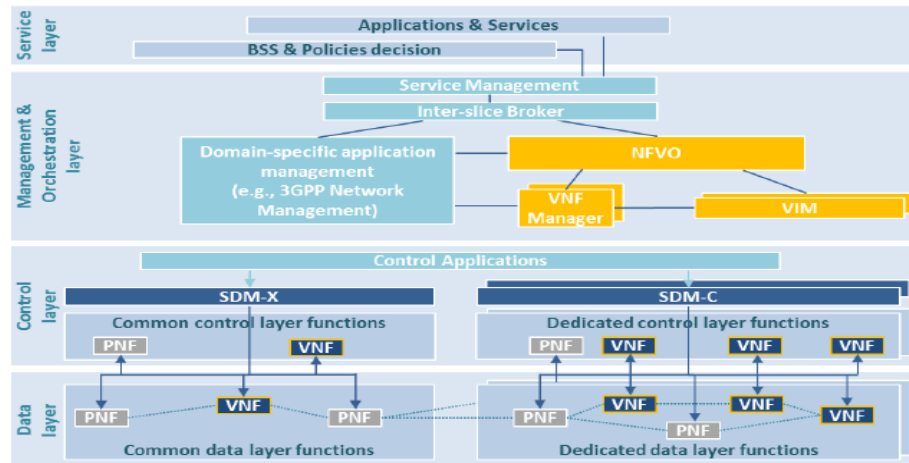
- Ξεκινάμε την ανάλυσή μας από το ανώτερο επίπεδο αρχιτεκτονικής το οποίο ονομάζεται **Επίπεδο Υπηρεσίας** (*Service Layer*). Στο επίπεδο αυτό εμπλέκονται τόσο ο επιχειρηματικός κλάδος που προσφέρει τις υπηρεσίες του, όσο και οι κάθε λογής πάροχοι υπηρεσιών και εφαρμογών [30].
- Προχωρώντας προς το αμέσως κατώτερο επίπεδο, βρισκόμαστε αντιμέτωποι με το **Επίπεδο Οργάνωσης και Διαχείρισης** (*Management and Orchestration Layer*). Όπως προδίδει και το όνομα του επιπέδου, παρέχονται διάφορες υπηρεσίες διαχείρισης δικτύου με μεθόδους εικονικοποίησης δικτύου (*Network Function Virtualization⁴, NFV*). Ταυτόχρονα, θα υπάρχει μεσολαβητής (*Inter-slice Broker*), υπεύθυνος για την παροχή ικανοποιητικού πλήθους πόρων στα network slices, ο οποίος θα επικοινωνεί με την Υπηρεσία Διαχείρισης (*Service Management*), μια λειτουργία που βρίσκεται τοποθετημένη ακριβώς ανάμεσα στο **Επίπεδο Υπηρεσίας** και στον μεσολαβητή και είναι υπεύθυνη για την μετατροπή των περιγραφών των υπηρεσιακών αναγκών που παρουσιάζουν οι καταναλωτές σε περιγραφές για υπηρεσιακές ανάγκες σε πόρους και αντίστροφα. Στο επίπεδο αυτό, υπάρχει επίσης η δυνατότητα προσθήκης και εφαρμογών διαχείρισης υπηρεσιών από διαφορετικούς οργανισμούς [30] [33].
- Το **Επίπεδο Ελέγχου** (*Control Layer*) είναι το τρίτο κατά σειρά επίπεδο αρχιτεκτονικής και χρησιμοποιείται από εφαρμογές ελέγχου του δικτύου. Σε αυτό το επίπεδο, παρατηρούμε την συνύπαρξη δύο ελεγκτών δικτύου, του *Software Defined Mobile Network Controller (SDM-C)* και του *Software Defined Mobile Network Coordinator (SDM-X)*, ελεγκτές οι οποίοι συντελούν

⁴ Το NFV αποτελεί μια τεχνολογία με δυνατότητα εικονικοποίησης στοιχείων του δικτύου σε εικονικές μονάδες, με σκοπό την συνένωσή μεταξύ τους ή τον συνδυασμό με άλλα τεχνολογικά στοιχεία του δικτύου.

στην μετατροπή-μετάφραση εντολών ελέγχου σε εντολές αναγνωρίσιμες από μεθόδους εικονικοποίησης δικτύου ή μεθόδους φυσικού δικτύου. Θα ήταν παράλειψη αν δεν αναφέραμε το γεγονός πως οι εφαρμογές SDM-C και SDM-X ακολουθούν την προκαθορισμένη τεχνολογία Καθορισμού Δικτύου μέσω Λογισμικού (*Software Defined Network⁵, SDN*). Μάλιστα, το SDM-C είναι υπεύθυνο για τις αποκλειστικές μεθόδους δικτύου, σε αντίθεση με το SDM-X που είναι υπεύθυνο για τις διαμοιραζόμενες ή κοινές μεθόδους δικτύου [30] [34] [35].

- Το τέταρτο και κατώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής των Δικτύων 5G ονομάζεται **Επίπεδο Δεδομένων (Data Layer)** και εμπεριέχει ως εφαρμογές τόσο τις μεθόδους εικονικοποίησης δικτύου (*Virtual Network Functions, VNF*), όσο και τις μεθόδους φυσικού δικτύου (*Physical Network Functions, PNF*). Οι εφαρμογές αυτές είναι υπεύθυνες για την ασφαλή και χωρίς απώλειες μεταφορά και επεξεργασία των δεδομένων των καταναλωτών του εκάστοτε δικτύου [30].

Διαγραμματικά, η αρχιτεκτονική ιεραρχία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική Δικτύων Πέμπτης Γενιάς [30].

⁵ Το SDN αποτελεί μια τεχνολογία δυναμικής και ευκόλως προσαρμοζόμενης διαχείρισης του δικτύου με προγραμματιστικές μεθόδους, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητά του. Η αρχιτεκτονική πάνω στην οποία είναι βασισμένο επιτρέπει τον προγραμματισμό του δικτύου διακόπτοντας τις λειτουργίες ελέγχου δικτύου και μεθόδων προώθησης πακέτων.

2.4 Ασφάλεια Δικτύων 5G

Αν επιχειρήσουμε μια χρονολογική αναδρομή στις υλοποιήσεις τόσο των 3G, όσο και των 4G Ασύρματων Δικτύων και εμβαθύνουμε στον τομέα της ασφάλειας που προσέφερε η αρχιτεκτονική τους, πολύ σύντομα θα παρατηρήσουμε την έλλειψη υποστήριξης υπηρεσιών, όπως ο ελεύθερος προγραμματισμός δικτύου, η εικονικοποίηση του, η οργάνωση και διαχείριση πολλαπλών εσωτερικών τομέων του δικτύου και η άμεση αντιμετώπιση απειλών στον κυβερνοχώρο. Τέτοια ζητήματα μείζονος σημασίας στην σημερινή κοινωνία καλούνται να λύσουν τα Δίκτυα 5G. Υπεύθυνο για την ασφάλεια των Δικτύων έναντι σε οποιοσδήποτε επιθέσεις και την γρήγορη αντιμετώπιση κενών ασφαλείας επιλέχθηκε να είναι ένα από τα projects της 5G-PPP που ονομάζεται *5G-Ensure*. Σύμφωνα με το παραπάνω project, οι τεχνικές που θα καλούνται να προστατεύσουν τα 5G Δίκτυα δεν χρειάζεται να αναπτυχθούν από το μηδέν. Αντιθέτως, αποφασίστηκε οι τεχνικές ασφαλείας να βασιστούν κατά κόρον πάνω στις ήδη ανεπτυγμένες μεθόδους των προγενέστερων δικτύων 3G και 4G και να αναπτυχθούν περαιτέρω, καλύπτοντας τους εξελιγμένους τομείς και ζητήματα ασφαλείας που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα Δίκτυα 5G [30].

Πιο συγκεκριμένα, τα Δίκτυα 5G θα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζονται με ασφάλεια πολλαπλούς τομείς ή κόμβους του δικτύου, απόρροια του τεμαχισμού του δικτύου σε πολλαπλά network slices. Θα πρέπει επίσης να διασφαλίζουν την συνεχή λειτουργία του δικτύου και να παρέχουν τα εκάστοτε διαπιστευτήρια για τα τμήματα που διαχειρίζεται. Ταυτόχρονα, οφείλουν να αντιμετωπίζουν και να επιλύουν τις όποιες επιθέσεις σε κενά ασφαλείας του δικτύου, επιλύοντας το ζήτημα προγραμματίζοντας δυναμικά την υποδομή του δικτύου ή ακόμα και αφαιρώντας με ευελιξία το εκάστοτε προβληματικό network slice. Για να θεωρηθεί το δίκτυο έμπιστο και ικανό να υποστηρίξει τις τεχνολογικές απαιτήσεις των καταναλωτών, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη ορισμού σημείων ελέγχου ασφαλείας σε κομβικά σημεία εντός του δικτύου, δημιουργώντας κατά συνέπεια ένα ισχυρά προστατευμένο δίκτυο. Αντιμέτωπα με μια διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση και ανάπτυξη καινοτόμων πρωτοκόλλων ασφαλείας, τα Δίκτυα 5G καλούνται να βρίσκονται σε μια συνεχόμενη κατάσταση επαγρύπνησης για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό των κατάλληλων μεθόδων και τεχνικών προστασίας που αποφέρουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εμπιστοσύνη τόσο τους χρήστες του δικτύου, όσο και στους διαχειριστές του [30].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: SMALL CELLS

3.1 Εισαγωγή στα Small Cells

Ένα *small cell* εντός ενός Ασύρματου Τηλεπικοινωνιακού Δικτύου ορίζεται ως ένας κόμβος ασύρματης πρόσβασης σε κυψελοειδές δίκτυο που αποσκοπεί στην αύξηση της ταχύτητας, της απόδοσης και της χωρητικότητας των Δικτύων. Σε θεωρητικό επίπεδο, κάθε *small cell* υπόσχεται την πλήρη κάλυψη μιας φυσικής απόστασης που μπορεί να ξεκινάει από τα 10 μέτρα και να αγγίζει μέχρι και μερικά χιλιόμετρα, χρησιμοποιώντας συνεχώς κατ' επανάληψη τις ίδιες ραδιοσυχνότητες λειτουργίας [36] [37].

Η κύρια και βασικότερη χρήση των *small cells* θα είναι η παροχή ασύρματων υπηρεσιών στους χρήστες του δικτύου, υπηρεσίες τις οποίες θα εκμεταλλεύονται οι πάροχοι και οι φορείς της κινητής τηλεφωνίας, με απώτερο σκοπό να αυξήσουν την απόδοση του δικτύου και να επεκτείνουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις εφαρμογές των Δικτύων Πέμπτης Γενιάς. Όπως άλλωστε αναφέραμε και σε προηγούμενο σημείο της αναφοράς, τα υπό-ανάπτυξη Δίκτυα 5G δεν αποσκοπούν σε καμία περίπτωση στην αλλοτρίωση των χαρακτηριστικών που προσέφεραν προγενέστερες γενιές όπως τα Δίκτυα 4G. Το ακριβώς αντίθετο μάλιστα, στοχεύουν στην εγκαθίδρυση των χαρακτηριστικών των Δικτύων 4G, επεκτείνοντας και εξελίσσοντας τις δυνατότητες των υπηρεσιών και εφαρμογών εντός του Δικτύου [37].

Παράλληλα, οι παρεχόμενες υπηρεσίες οφείλουν να είναι ανεξάρτητες από την φυσική γεωγραφική θέση του χρήστη (οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται είτε εντός ενός κτηρίου εργασίας, είτε σε εξωτερικό χώρο) και να καλύπτουν ικανοποιητικά το σύνολο των αναγκών των καταναλωτών. Ας μην ξεχνάμε άλλωστε πως με την Πρώτη Φάση των Projects του οργανισμού 5G-PPP να οδεύει γοργά προς την ολοκλήρωσή της, οι τεχνολογικές απαιτήσεις ολοένα και θα αυξάνονται και κατά συνέπεια, η τεχνολογία στην οποία θα βασιστούν τα 5G Δίκτυα οφείλει να παρακολουθεί τις καθημερινές εξελίξεις της κοινωνίας, καθώς και να είναι ευέλικτα προσαρμόσιμη σε αυτές [36] [37].

3.2 Τύποι Small Cells

Θα ξεκινήσουμε την περαιτέρω ανάλυση σε βάθος των small cells, με σημείο εκκίνησης τους διάφορους τύπους από τους οποίους μπορεί να συμπληρωθεί ένα small cell. Τα small cells μπορεί να αποτελούνται από τέσσερις διαφορετικούς τύπους κυψελών, τα *femtocells*, τα *picocells*, τα *microcells* και τα *macrocells* [36].

3.2.1 Femtocells

Αποτελούν την πιο κοινή και συνηθισμένη μορφή κελίων ασύρματου δικτύου. Αρχικά, σχεδιάστηκαν με ορίζοντα την οικιακή χρήση και σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούσαν να εισαχθούν ακόμη και σε μικρό-μεσαίες επιχειρήσεις, κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Με την πάροδο του χρόνου, τόσο το εύρος ζώνης, όσο και η χωρητικότητά τους ξεκίνησαν μια ραγδαία αύξηση, με αποτέλεσμα την εξέλιξη τους στον τομέα της απόδοσης και την μετέπειτα καθιέρωσή τους ως την βασικότερη μορφή των small cells [36].

Ένα femtocell θεωρείται κόμβος ασύρματης πρόσβασης σε κυψελοειδές δίκτυο και μπορεί να το συναντήσουμε και με την ονομασία *femto Access Point (AP)*. Σε ότι αφορά στο τομέα της λειτουργικότητας, (τα femtocells) συνδέονται ενσύρματα ή ασύρματα με τον εκάστοτε πάροχο του δικτύου, επιτρέποντάς έτσι την ευρεία επέκταση των παρεχόμενων υπηρεσιών μέσω της υπέρ-πύκνωσης του δικτύου, όπως η κάλυψη σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, σε χώρους δηλαδή όπου οι προγενέστερες γενιές δικτύων αντιμετώπιζαν προφανείς δυσκολίες. Παράλληλα, μπορούν να προσφέρουν ακόμα και υπηρεσίες προστασίας των καταναλωτών. Από την πλευρά του καταναλωτή, ένα femtocell παρέχεται είτε επί πληρωμή, είτε με δανεισμό και συνδέεται στην ευρυζωνική γραμμή του, χωρίς την ανάγκη μεσάζοντα στην εγκατάστασή του. Μετέπειτα, το femtocell αυτό, εφόσον ο καταναλωτής επιθυμεί, μπορεί να συνδεθεί σε προκαθορισμένους αριθμούς κινητής τηλεφωνίας και κατά συνέπεια, όλες οι επικοινωνίες για τους αριθμούς αυτούς θα περνούν αυτόματα μέσω του femtocell [38].

3.2.2 Picocells

Ένα picocell, ομοίως με το femtocell, θεωρείται κόμβος ασύρματης πρόσβασης σε κυψελοειδές δίκτυο, που όμως καλύπτει όχι μονάχα μικρές γεωγραφικές περιοχές, όπως πχ ένας σταθμός τραίνου ή ένα εμπορικό κέντρο, αλλά και τα αεροπλάνα. Η κύρια χρήση τους είναι η ευρεία υποστήριξη και παροχή ασύρματου δικτύου σε εσωτερικούς χώρους που με προγενέστερες τεχνολογίες, η ισχύς του δικτύου θα ήταν αδύναμη. Παράλληλα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την επέκταση της χωρητικότητας ενός δικτύου, όπου αυτό κριθεί αναγκαίο [39].

Σε αντίθεση με τα femtocells, όπου η εγκατάστασή τους μπορούσε να γίνει από τον καταναλωτή και απαιτούσαν λιγότερο απομακρυσμένο έλεγχο από τον εκάστοτε πάροχο του δικτύου, για τα picocells είναι εξ' ολοκλήρου υπεύθυνος ο πάροχος δικτύου. Με άλλα λόγια, ο πάροχος του δικτύου ευθύνεται για την εγκατάσταση και συντήρηση των picocells, για την καλωδίωση, την παροχή επαρκούς ενέργειας μέχρι και την ενοικίαση κατάλληλου ιστοτόπου. Θεωρητικά, το εύρος ζώνης ενός picocell είναι κατά μέγιστο 200 μέτρα, ενώ του femtocell αγγίζει μόλις τα 10 μέτρα! Ένα picocell, όταν βρίσκεται τοποθετημένο εντός ενός οικοδομικού συμπλέγματος, συνδέεται με τον Ελεγκτή Σταθμού Βάσης (*Base Station Controller, BSC*) μέσω ενσύρματης *Ethernet* καλωδίωσης. Ο BSC ασχολείται με τον διαμοιρασμό ραδιοφωνικών πόρων και παράλληλα διαχειρίζεται το σύνολο των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας που επρόκειτο να οδηγηθούν είτε στο Κέντρο Μεταγωγής Κινητού Τηλεφώνου (*Mobile Switching Centre, MSC*), είτε στον GPRS Κόμβο Υποστήριξης Πύλης (*Gateway GPRS Support Node, GGSN*). Σε πλήρη αντιδιαστολή με την ενσύρματη καλωδίωση, για την επίτευξη ασύρματης σύνδεσης με αεροπλάνα και τον διαμοιρασμό δεδομένων, χρησιμοποιούνται μέθοδοι που περιέχουν συνδέσμους μέσω δορυφόρων [39] [40].

Η συνένωση όλων των μικροσκοπικών αυτών picocells στο υπέρ-πυκνωμένο δίκτυο και η τμηματοποίηση τους σε γειτονίες κυψελών έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα χρησιμοποίησης μιας γειτονικής κυψέλης κατά την διάρκεια μιας τηλεφωνικής συνομιλίας χωρίς να διακοπεί η κλήση, σε περίπτωση που η τρέχουσα κυψέλη παρουσιάσει κάποιο απρόσμενο σφάλμα. Στα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα picocells έρχεται να προστεθεί και η σαφής βελτίωση της ποιότητας των τηλεφωνικών επικοινωνιών [39].

3.2.3 *Microcells*

Το microcell είναι το τρίτο κατά σειρά ισχύος small cell που υπάρχει. Συνήθως, το μέγεθός τους ξεπερνά το μέγεθος ενός picocell, με το υποστηριζόμενο εύρος ζώνης τους να εκτοξεύεται στα 2 χιλιόμετρα, μια αρκετά σημαντική βελτίωση έναντι των 10 μέτρων που προσφέρουν τα femtocells και των 200 μέτρων που προσφέρουν τα picocells. Βρίσκονται τοποθετημένα εντός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας και μπορούν να καλύψουν αρκετά μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές, όπως για παράδειγμα ένα ολόκληρο ξενοδοχείο ή ένα εμπορικό κέντρο. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, χρησιμοποιούνται προσωρινά και για μεγάλες εκδηλώσεις ή μπορούμε να τα εντοπίσουμε ακόμη και σε φανάρια. Υπεύθυνος για την εγκατάστασή τους στο εκάστοτε δίκτυο είναι ο πάροχος της κινητής τηλεφωνίας και όχι ο τελικός χρήστης (του δικτύου) [41] [42].

Για να αποφευχθούν τυχόν παρενέργειες ή παρεμβολές από την συγκέντρωση όλων των picocells σε ένα υπέρ-πυκνωμένο σύνολο και τον μετέπειτα διαχωρισμό τους σε γειτονικές μαζικές κυψέλες, χρησιμοποιούνται Ελεγκτές Ισχύος (*Power Controls*), οι οποίοι λειτουργούν και διαχειρίζονται τις ψηφιακές μορφές των δικτύων. Κατά συνέπεια, συνδυάζοντας τις τεχνικές διαχωρισμού των κυψελών σε γειτονικές ομάδες και τις μεθόδους προσθήκης επιπλέον κυψελών, ο χειριστής του δικτύου έχει την δυνατότητα αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου για την κάλυψη περιοχών υψηλής συμφόρησης χρηστών [41].

Η σκοπός ύπαρξής τους είναι κοινός με αυτός των femtocells και picocells. Στοχεύουν στην επιπλέον παροχή χωρητικότητας δικτύου για περιοχές, όπου αυτό κριθεί επιτακτική ανάγκη, μέσω της υπέρ-πύκνωσης του δικτύου με κυψέλες. Το μικρό τους μέγεθος και η ευελιξία που προσφέρουν αποτελούν τον κινητήριο μοχλό για την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων, ξεκινώντας από τα Δίκτυα 2G και φτάνοντας μέχρι και τα υπό-ανάπτυξη Δίκτυα 5G [42].

3.2.4 Macrocells

Ένα macrocell θεωρείται το μεγαλύτερο και ταυτόχρονα ισχυρότερο small cell που έχει αναπτυχθεί έως ώρας. Προσφέρει αρκετά μεγαλύτερη κάλυψη από το microcell και η ορολογία του χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψουμε το σύνολο όλων των υπαρκτών κυψελών. Το υποστηριζόμενο εύρος ζώνης ξεκινάει από τα 8 και μπορεί να εκτοξευτεί μέχρι και τα 30 χιλιόμετρα, δημιουργώντας μια χαοτική διαφορά έναντι των προγενέστερων μορφών small cells. Βρίσκει εφαρμογή συνήθως μόνο σε αρκετά μεγάλες εξωτερικές γεωγραφικές περιοχές και για την υποστήριξή τους, οι ράδιο-κεραίες τοποθετούνται σε οικιακές στέγες ή εναλλακτικά σε μέρη με αρκετά υψηλή υψομετρική διαφορά που καλύπτει την πλειοψηφία των πολυκατοικιών. Οι δυνατότητές τους να προσφέρουν βελτιωμένη κάλυψη εντός ενός τεράστιου δικτύου με αρκετά υψηλό βαθμό συμφόρησης χρηστών, όπως για παράδειγμα σε μια αστική περιοχή ή έναν αυτοκινητόδρομο, έχουν συμβάλει καθοριστικά στο να θεωρούνται δικαίως η πιο ισχυρή μορφή small cell, αλλά όχι η πιο συνηθισμένη [37] [43].

Στην Εικόνα 5, φαίνεται συγκεντρωμένη η κατηγοριοποίηση όλων των χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων small cells. Όπως παρατηρούμε, ο κάθε τύπος small cell διαφέρει όσον αφορά στη παρεχόμενη ισχύ, στη περιοχή κάλυψης και στο πλήθος χρηστών των οποίων τις απαιτήσεις μπορεί να καλύψει. Προφανώς, η σωστή επιλογή τύπου small cell εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως πχ η γεωγραφική περιοχή για την οποία προορίζεται να χρησιμοποιηθεί.

Cell Type	Output Power (W)	Cell Radius (km)	Users	Locations
Femtocell	0.001 to 0.25	0.010 to 0.1	1 to 30	Indoor
Pico Cell	0.25 to 1	0.1 to 0.2	30 to 100	Indoor/Outdoor
Micro Cell	1 to 10	0.2 to 2.0	100 to 2000	Indoor/Outdoor
Macro Cell	10 to >50	8 to 30	>2000	Outdoor

Εικόνα 5: Ικανότητες Τύπων Small Cell [37].

3.3 Πλεονεκτήματα των Small Cells

Όπως αναφέρθηκε κατ' επανάληψη στα παραπάνω εδάφια, τα small cells προσφέρουν δυνατότητες επέκτασης της χωρητικότητας του δικτύου με πυκνή εξυπηρέτηση συσκευών ασύρματης τηλεφωνίας, απόρροια του μικρού μεγέθους τους και της ευελιξίας που προσφέρουν. Έως ώρας, υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνικές για την αύξηση της χωρητικότητας ενός δικτύου. Ο πρώτος τρόπος είναι η αγορά επιπλέον φάσματος συχνοτήτων, λύση όμως που καθίσταται κοστοβόρα για τον τηλεπικοινωνιακό φορέα του εκάστοτε δικτύου. Εναλλακτικά, θα μπορούσαμε να βελτιστοποιήσουμε το φάσμα συχνοτήτων και κατά συνέπεια να αυξήσουμε την αποδοτικότητά του. Η τρίτη και μάλλον επικρατέστερη επιλογή είναι η μέθοδος πυκνοποίησης του δικτύου (*Network Densification*), δηλαδή η προσθήκη επιπλέον μικροσκοπικών κυψελών στο ήδη πυκνό από υπάρχουσες κυψέλες φυσικό δίκτυο, αυξάνοντας κατ' επέκταση την χωρητικότητά του και προσφέροντας καλύτερη εξυπηρέτηση σε δίκτυα με υψηλή συμφόρηση χρηστών [44].

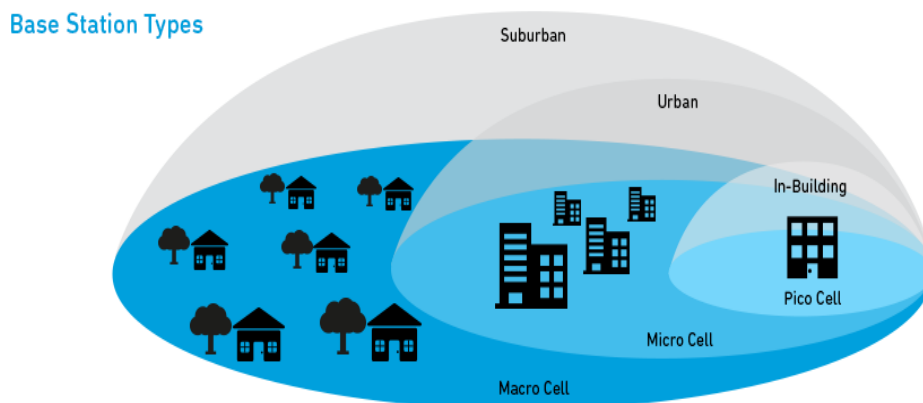
Στα πλεονεκτήματα των small cells έρχεται να προστεθεί η περαιτέρω κάλυψη και βελτιστοποίηση της εμπειρίας του χρήστη που βρίσκεται εντός του δικτύου (*User Experience*⁶, *UX*), αυξάνοντας τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ένα επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό που δεν είχαμε αναφέρει έως ώρας είναι η σαφής βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας μιας συσκευής ασύρματης τηλεφωνίας, καθώς τα small cells έχουν μειωμένες απαιτήσεις στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας. Σε συνδυασμό με την χαμηλή τιμή στην οποία προσφέρονται, τα small cells θεωρούνται ως η πλέον αποδοτικότερη και συμφέρουσα λύση στην οποία θα βασιστούν και θα αναπτυχθούν τα Δίκτυα 5G [42] [44] [45].

⁶ Το User Experience αναφέρεται στο σύνολο των εμπειριών στις οποίες γίνεται δέκτης ένας χρήστης μιας εκάστοτε υπηρεσίας ή εφαρμογής και περιλαμβάνει τα συναισθήματα και τις εντυπώσεις που αποκομίζει, αλλά και τις αντιλήψεις του όσον αφορά σε μετρικές όπως η αποδοτικότητα, η ευκολία χρήσης και η χρησιμότητα.

3.4 Προκλήσεις και Προβλήματα

Στο σημείο αυτό, θα ήταν εύλογο να αναρωτηθεί κανείς που κρύβεται η 'παγίδα', μέσα σε όλο αυτό το πλήθος των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η λύση των small cells εντός του δικτύου.

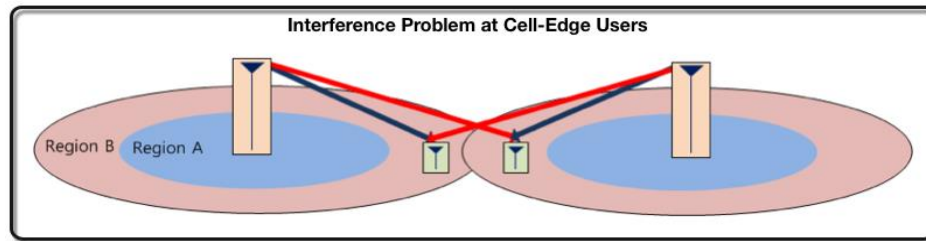
Ας θεωρήσουμε το παρακάτω σενάριο: Ένας χρήστης κινητής τηλεφωνίας μένει σε μια περιοχή των προαστίων (*Suburban Area*). Κάθε πρωί λοιπόν, χρειάζεται να κάνει ένα ταξίδι και να μετακινηθεί από τα προάστια σε μια αστική περιοχή (*Urban Area*), ώστε να πάει στην δουλειά του. Ο χώρος εργασίας του βρίσκεται εντός μιας πολυκατοικίας μερικών ορόφων (*In-Building Area*). Μάλιστα, για να κατανοήσουμε καλύτερα το σκεπτικό του παραδείγματος, θα το αναπαραστήσουμε εικονικά, όπως και γίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6: Περιοχές Αξιοποίησης των Small Cells [37].

Για τον παραπάνω χρήστη λοιπόν, που μετακινείται από περιοχή σε περιοχή, αλλάζει η γεωγραφική του θέση και συνεπώς (αλλάζει) και το ασύρματο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας το οποίο τον καλύπτει. Άρα, αλλάζει και το περιβάλλον των small cells και οι υπηρεσίες που τον εξυπηρετούν. Η αλλαγή του προφίλ του δικτύου για τον χρήστη αυτόν θα πρέπει να γίνεται άμεσα και να μην επιβαρύνεται περαιτέρω από μια κακή διαχείριση του δικτύου, όπως για παράδειγμα θα γινόταν με την διατήρηση της απομακρυσμένης σύνδεσης με τα προηγούμενα προφίλ δικτύου, γεγονός που θα επιβάρυνε την μπαταρία της συσκευής κινητής τηλεφωνίας του χρήστη και θα μείωνε αισθητά την ποιότητα των υπηρεσιών (*Quality of Service, QoS*) [46].

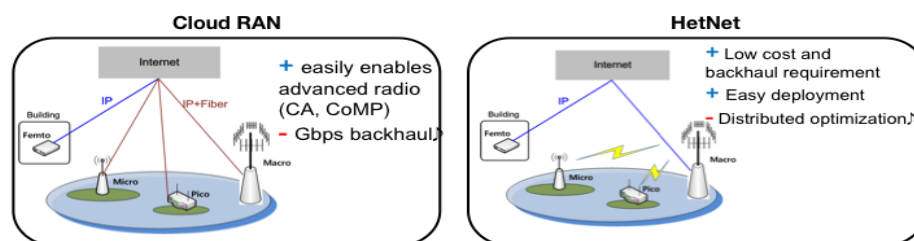
Το παράδειγμα που αναφέραμε αποκαλύπτει το σοβαρότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα κυψελοειδή Δίκτυα: τις παρεμβολές (interference).



Εικόνα 7: Το πρόβλημα των παρεμβολών σε κυψελοειδή δίκτυα [47].

Στην Εικόνα 7, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τους χρήστες που βρίσκονται εντός ενός ασύρματου κυψελοειδούς δικτύου κάλυψης, εκτός από το επιθυμητό οδηγούμενο σήμα (αναπαρίσταται με **μπλε** ακμή στην Εικόνα 7), έχουν και εισερχόμενο σήμα παρεμβολής μεγάλης ισχύος από εξωτερικά κύτταρα (αναπαρίσταται με **κόκκινη** ακμή). Μάλιστα, για κάθε κυψέλη, η απόδοση στις μακρινές περιοχές κάλυψης υπερισχύει έναντι των περιοχών αρκετά κοντά στην κυψέλη, καθώς η περιοχή κοντά στο τέλος της κάλυψης της κυψέλης (*Region B*) είναι σαφώς μεγαλύτερη από την περιοχή κοντά στο κέντρο της κυψέλης (*Region A*) [47].

Η λύση των small cells αρχικά φάνταζε ιδανική. Μικροί σταθμοί βάσης που με την υπέρ-πύκνωση του δικτύου από small cells θα προσέφεραν ομοιόμορφη απόδοση σε όλες τις περιοχές κάλυψης ενός κυττάρου. Η λύση αυτή όμως δεν έλυσε ποτέ το θέμα των παρεμβολών, απλά το μετέτρεψε σε ένα άλλο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, τα macro cells χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους συχνότητας και χρόνου με τα υπόλοιπα small cells, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ τους. Οι δύο σημαντικότερες λύσεις που προτάθηκαν για την αντιμετώπιση αυτών των παρεμβολών εντός δικτύου ήταν το *Cloud Radio Access Network* (Cloud-RAN ή ακόμη και *C-RAN*) και η θέσπιση ενός Ετερογενούς Δικτύου (*Heterogeneous Network, HetNet*) [47].



Εικόνα 8: Cloud RAN εναντίον HetNet

C-RAN: Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια κεντριοποιημένη υπηρεσία, βασισμένη στις αρχές του *Cloud Computing*, με αρχιτεκτονική που υποστηρίζει πρόσβαση σε δίκτυα Δεύτερης, Τρίτης αλλά και Τέταρτης Γενιάς. Θεωρείται ως η εξέλιξη των πρωταρχικών Δικτύων Ασύρματης Πρόσβασης (*Radio Access Networks, RAN*), με υπηρεσίες που την κάνουν να ξεχωρίζει από προγενέστερες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα η υποστήριξη μεγάλου πεδίου εφαρμογής οπτικών ινών (*Fiber*) και η ικανότητα ζωντανής εικονικοποίησης του δικτύου (*Real-time virtualization*). Τόσο τα *macrocells*, όσο και οι σταθμοί βάσης θα συνδέονται ενσύρματα με οπτικές ίνες στο δίκτυο και συνεπώς θα χρησιμοποιούνται εφαρμογές που κατά κόρων αξιοποιούν ικανοποιητικά τις κυψέλες του. Ένα παράδειγμα αποτελεί η υπηρεσία *Coordinated MultiPoint (CoMP)*, η οποία βασίστηκε στην τεχνολογία LTE-A των Δικτύων 4G και προσέφερε ικανοποιητικά γρηγορότερους χρόνους απόκρισης μεταξύ ράδιο-σταθμών. Στα αρνητικά της τεχνολογίας του C-RAN συγκαταλέγεται το αρκετά υψηλό κόστος παρεμβολών *Backhaul*⁷ [47] [48] [49].

HetNet : Το HetNet αποτελεί ένα ετερογενές δίκτυο, από την άποψη του ότι συμπεριλαμβάνει κόμβους, όπως για παράδειγμα έναν υπολογιστή ή μια συσκευή κινητής τηλεφωνίας, που όμως κάθε κόμβος λειτουργεί κάτω από διαφορετικό Λειτουργικό Σύστημα (*Operating System, OS*) και πιθανότατα διαφορετικό πρωτόκολλο. Μια τέτοια λύση στο πρόβλημα των παρεμβολών θα σήμαινε ότι θα συνεχιζόταν η απρόσκοπτη λειτουργία των *small cells* ασύρματα και όχι ενσύρματα όπως στο C-RAN. Το κόστος υλοποίησης και οι αρχιτεκτονικές απαιτήσεις θα ήταν σχετικά μικρές, ενώ εύκολη θεωρείται ότι θα ήταν και η ανάπτυξη αυτής της ιδέας για το συνολικό σύστημα του δικτύου. Όμως, οι παρεμβολές ακόμα θα ήταν παρούσες έως κάποιο βαθμό και το πρόβλημα ακόμη χωρίς λύση [47] [50].

⁷ *Backhaul* : Ομαδοποιημένο τμήμα δικτύου, ιεραρχικής αρχιτεκτονικής, που εμπεριέχει το πλήθος των συνδέσμων μεταξύ του κεντρικού δικτύου και του συνόλου των υπό-δικτύων στο κατώτερο επίπεδο του ιεραρχικού δικτύου.

3.5 Μελλοντικό Όραμα και Τεχνολογίες

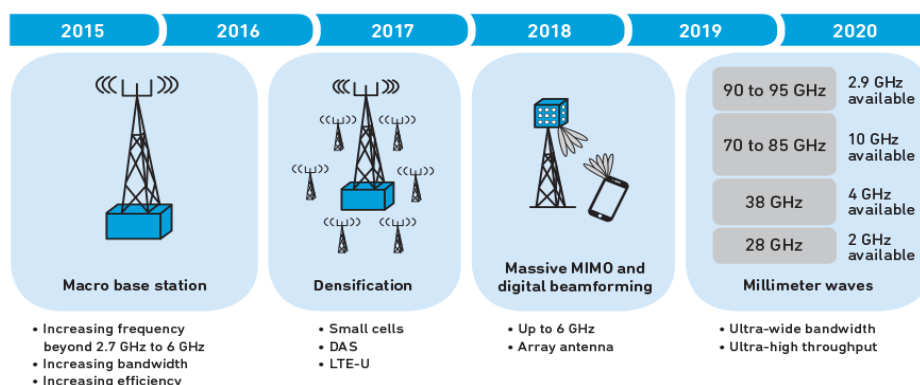
Γνωρίζουμε ήδη ότι τα small cells αποτελούν την προσωρινή και πρακτική λύση που συμβαδίζει με τα Δίκτυα 4G για την παροχή αυξημένης ταχύτητας και χωρητικότητας σε δίκτυα που παρατηρείται μεγάλη συμφόρηση χρηστών, έως ότου τα Δίκτυα 5G εξέλθουν από το στάδιο ανάπτυξης και τεθούν σε δημόσια χρήση [46].

Τα small cells τοποθετούνται μέσα στο δίκτυο για το οποίο προορίζονται και αρχικά, έχει αποφασιστεί να λειτουργούν ουσιαστικά ως μικροσκοπικοί σταθμοί βάσης, αυξάνοντας το εύρος ζώνης του δικτύου και την αποδοτικότητά του. Με τα Δίκτυα 5G να αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς, τα small cells θα συνοδεύουν μετέπειτα από Διανεμημένα Συστήματα Κεραίας (*Distributed Antenna Systems, DAS*) που θα χρησιμοποιούν την μέθοδο του Network Densification, υπέρ-πυκνώνοντας το δίκτυο με κυψέλες και στοχεύοντας στην αισθητή βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών προς του χρήστες του δικτύου [46].

Το *QoS* θα βελτιωθεί ακόμη περισσότερο όταν αναπτυχθούν εξελιγμένες τεχνολογίες πάνω στα συστήματα κεραιών, με την σημαντικότερη εξ' αυτών να είναι η μέθοδος *Massive Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO)*. Η μέθοδος αυτή μεταδίδει ένα πλήθος ξεχωριστών data streams πάνω στις ίδιες συχνότητες επαναληπτικά, χρησιμοποιώντας τις κεραίες τόσο των χρηστών, όσο και των σταθμών βάσης του δικτύου. Σήμερα, ο αριθμός των κεραιών μπορεί να ποικίλει από 8 έως και 128, αλλά στο προσεχές μέλλον αναμένεται να αυξηθεί κατακόρυφα, εφόσον επιτραπεί η χρησιμοποίηση συχνοτήτων έως τα 6 GHz. Η τεχνολογία αυτή αναμένεται να βελτιώσει τις υπηρεσίες του δικτύου, καθώς αφενός η τεχνική της χώρο-χρονικής πολυπλεξίας που αναφέραμε παραπάνω θα βελτιώσει τον ρυθμό εναλλαγής δεδομένων εντός του δικτύου, αφετέρου μέσω του *beamforming*⁸, μας δίνεται η δυνατότητα να εστιάσουμε ένα ποσοστό ενέργειας πάνω στην συνδεδεμένη συσκευή του δικτύου για την επεξεργασία και βελτίωση της σύνδεσης [46] [51] [52].

⁸ Το *beamforming* αποτελεί τεχνική επεξεργασίας για μεταδιδόμενα ράδιο-σήματα ή ηχητικά σήματα, σύμφωνα με την οποία μας δίνεται η δυνατότητα συγκέντρωσης της ισχύος του σήματος σε μια πολύ συγκεκριμένη περιοχή. Η επιλεκτική αυτή συγκέντρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην εκπομπή, όσο και στην λήψη ενός σήματος.

Προς το τέλος της Πρώτης Φάσης των Projects του 5G-PPP οργανισμού, αναμένουμε την κατακόρυφη αύξηση των διαθέσιμων συχνοτήτων, κατά πολύ πάνω από τα 6 GHz, με την είσοδο μεθόδων που περιλαμβάνουν χιλιοστομετρικά κύματα (*millimetre waves*) στις συχνότητες. Με τις τεχνολογικές απαιτήσεις των χρηστών κινητής τηλεφωνίας να αυξάνονται συνεχώς, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη χρησιμοποίησης συχνοτήτων κατά πολύ παραπάνω από τα 6 GHz, συχνότητες οι οποίες μάλιστα δεν είχε χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν ποτέ στο παρελθόν, καθώς τα εκάστοτε δίκτυα δεν είχαν αναπτυχθεί τεχνολογικά σε βαθμό που να υποστηρίζουν τέτοιες υψηλές συχνότητες. Όμως, με την πρωτοποριακή είσοδο και χρήση των χιλιοστομετρικών κυμάτων, ξεφεύγουμε για πρώτη φορά από τα Δίκτυα 4G και θα είμαστε σε θέση να εκμεταλλευτούμε τις νέες αυτές ζώνες συχνοτήτων, εφόσον βέβαια αναπτυχθούν και οι κατάλληλες τεχνικές αξιοποίησής τους [51].



Εικόνα 9: Μελλοντική Εξέλιξη Τεχνολογιών των Δικτύων 5G [37].

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 9), φαίνεται η αναμενόμενη εξέλιξη των Δικτύων 5G, μαζί με τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες που θα τα συνοδεύουν. Οι απαιτήσεις των χρηστών τεχνολογικών συσκευών αυξάνονται μέρα με την μέρα, ο 5G-PPP οργανισμός δουλεύει πυρετωδώς στην ανάπτυξη των Δικτύων 5G και το όραμα για μια παγκόσμια τεχνολογική ενότητα μέσω του IoT φαντάζει πιο κοντά από ποτέ. Μάλλον, οφείλουμε να είμαστε αρκετά αισιόδοξοι για το τι μας επιφυλάσσει τελικά το προσεχές μέλλον στο τομέα της ασύρματης κινητής τηλεφωνίας και όχι μόνο...

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall, "Δίκτυα Υπολογιστών", 2011, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- [2] Jacob Morgan, "A simple Explanation of 'The Internet Of Things'", May 2014.
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_network
- [5] <http://etutorials.org/Mobile+devices/mobile+vpn/Part+I+Wireless+Data+Fundamentals/Chapter+3+Wireless+Systems+Overview+A+Radio+Interface+Perspective/1G+Cellular+Systems/>
- [6] Marshall Brain, Jeff Tyson, Julia Layton, "How Cell Phones Work", November 2000.
- [7] <https://www.lifewire.com/1g-vs-2g-vs-2-5g-vs-3g-vs-4g-578681>
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/2G>
- [9] <http://etutorials.org/Mobile+devices/mobile+vpn/Part+I+Wireless+Data+Fundamentals/Chapter+3+Wireless+Systems+Overview+A+Radio+Interface+Perspective/2G+Cellular+Systems/>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/GSM>
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Multimedia>
- [12] Michelle Robinson, "2G Speeds: Why You Should Care", March 2017.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/General_Packet_Radio_Service
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_Data_Rates_for_GSM_Evolution
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/3G>

[16] Nadeem Unuth, "*What is the Definition of 3G Wireless Technology*",
October 2017.

[17] https://en.wikipedia.org/wiki/Local_area_network

[18] https://en.wikipedia.org/wiki/Wide_area_network

[19] <https://en.wikipedia.org/wiki/UMTS>

[20] <https://en.wikipedia.org/wiki/3GPP>

[21] https://en.wikipedia.org/wiki/High_Speed_Packet_Access

[22] https://en.wikipedia.org/wiki/Evolved_High_Speed_Packet_Access

[23] https://en.wikipedia.org/wiki/3rd_Generation_Partnership_Project_2

[24] <https://en.wikipedia.org/wiki/4G>

[25] https://en.wikipedia.org/wiki/IMT_Advanced

[26] [https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_\(telecommunication\)](https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_(telecommunication))

[27] <https://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX>

[28] <https://5g-ppp.eu/>

[29] <https://5g-ppp.eu/5g-ppp-phase-1-projects/>

[30] 5G-PPP, "*5G-PPP Revised Architecture Paper for Public Consultation*",
July 2017.

[31] https://www.tutorialspoint.com/5g/5g_introduction.htm

[32] <https://5g.co.uk/guides/what-is-network-slicing/>

[33] https://en.wikipedia.org/wiki/Network_function_virtualization

[34] https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking

[35] <https://www.opennetworking.org/sdn-definition/>

[36] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell

[37] Tuan Nguyen, "*Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1)*",
May 2017.

[38] <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell>

[39] <https://en.wikipedia.org/wiki/Picocell>

- [40] David Chambers, "*What's the difference between picocells and femtocells?*", January 2008.
- [41] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcell>
- [42] Phillip Tracy, "*Small Cells: Backhaul difficulties and a 5G future*", July 2016
- [43] <https://en.wikipedia.org/wiki/Macrocell>
- [44] Phillip Tracy, "*What is network densification and why is it needed for 5G*", November 2016
- [45] https://en.wikipedia.org/wiki/User_experience
- [46] Tuan Nguyen, "*Small Cells Help Keep 5G Connected*", May 2016
- [47] http://ais.unist.ac.kr/?page_id=800
- [48] <https://en.wikipedia.org/wiki/C-RAN>
- [49] [https://en.wikipedia.org/wiki/Backhaul_\(telecommunications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Backhaul_(telecommunications))
- [50] https://en.wikipedia.org/wiki/Heterogeneous_network
- [51] ARCEP, "5G: Issues & Challenges", March 2017
- [52] <https://en.wikipedia.org/wiki/Beamforming>