

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**
UNIVERSITY OF PATRAS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**Μελέτη και Βελτιστοποίηση της απόδοσης των 5G Small
Cell Δικτύων**

Συγγραφέας

Μίχος Ευάγγελος
Α.Μ. 235837

Υπεύθυνος Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Επιβλέπων

Βασίλειος Κόκκινος

ΠΑΤΡΑ, Ιούλιος 2019

© Copyright συγγραφέας Μίχος Ευάγγελος, 2019

© Copyright θέματος Χρήστος Μπούρας, Βασίλειος Κόκκινος

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.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια της προπτυχιακής φοίτησης στο τμήμα των Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι «Μελέτη και Βελτιστοποίηση της απόδοσης των 5G Small Cell Δικτύων».

Πριν όμως την παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου για το αντικείμενο που μελετήσαμε και των συμπερασμάτων στα οποία καταλήξαμε, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά το μέντορά μου, κ. Χρήστο Μπούρα, καθηγητή του ΤΜΗΥΠ στο Πανεπιστήμιο Πατρών και Επιστημονικό Υπεύθυνο της Μονάδας 6 του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων (ΙΤΥΕ). Η καθοδήγησή του ήταν καθοριστική, ενώ οι υποδείξεις και τα χρήσιμα σχόλιά του αναμφισβήτητα αποτέλεσαν πολύτιμα εφόδια κατά τη διάρκεια της συγγραφής της παρούσης εργασίας.

Επιπρόσθετα, επιθυμώ να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Δρ. Βασίλειο Κόκκινο, του οποίου οι πολύτιμες γνώσεις, οι συμβουλές και η πολυετής εμπειρία με βοήθησαν σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου και την αδερφή μου για την πολύμηνη στήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό τον καιρό. Αναμφίβολα, αν δεν είχα την συμβολή και την ουσιαστική στήριξή τους σε αυτή μου την προσπάθεια, τότε δεν θα είχα φτάσει με επιτυχία στην ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Πάτρα, Ιούλιος 2019

Μίχος Ευάγγελος

Περίληψη στα Ελληνικά

Τα Κινητά Δίκτυα Επόμενης Γενιάς αναμένεται να χαρακτηρίζονται από μια ετερογενή τοπολογία δικτύου που θα αποτελείται από τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις σταθμών βάσης *macrocell* σε συνδυασμό με τις νέες μορφές των σημείων πρόσβασης *small cells*, μια οικονομική προσέγγιση που έρχεται να δώσει λύση στο πρόβλημα των παρεμβολών στα σημερινά δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά αυξάνουν την γεωγραφική κάλυψη χρηστών, προσφέροντας σαφώς αυξημένες ταχύτητες, περισσότερες υποστηριζόμενες υπηρεσίες και διασύνδεση πολλαπλών κινητών συσκευών, ικανών να επικοινωνούν, να λαμβάνουν και στέλνουν δεδομένα μεταξύ τους, το λεγόμενο Διαδίκτυο των Πραγμάτων.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η έλευση των Δικτύων Πέμπτης Γενιάς θα πρέπει να συνοδεύεται από προσεκτική ανάπτυξη προς όφελος των χρηστών του δικτύου, στοχεύοντας όχι μόνο σε ταχύτητες και υπηρεσίες, αλλά και στην ασφάλεια των δεδομένων τους. Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η ουσιαστική μελέτη των τελευταίων εξελίξεων σε τεχνικές υπέρ-πύκνωσης του δικτύου από σημεία πρόσβασης *small cells* και με βάση τη θεωρητική μελέτη της εργασίας της επιστημονικής κοινότητας που ασχολείται με τα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς, να προταθεί και να αξιολογηθεί ένας αποδοτικός ως προς την χρησιμοποίηση του φάσματος συχνοτήτων αλγόριθμος κατανομής χρηστών εντός ενός ετερογενούς δικτύου.

Περίληψη στα Αγγλικά

Next Generation Mobile Networks are expected to be characterized by a heterogeneous network topology, consisting of existing macrocell base station installations combined with new forms of small cell access points, an economic approach that addresses the problem of interference in today's networks. Such networks increase the geographic coverage of users, offering significantly increased speeds, more supported services and interconnection of multiple mobile devices, capable of communicating, receiving and sending data to each other, the so-called Internet of Things.

It becomes clear that the coming of Fifth Generation Networks should be accompanied by careful development for the benefit of network users, aiming not only at speed and services, but also on the security of their data. The purpose of this diploma thesis is to study the latest developments in the techniques of network densification from small cell access points and based on the theoretical study coming from the scientific community that deals with Fifth Generation Networks, to propose and evaluate a spectrum-efficient user allocation algorithm inside a heterogeneous network.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
Κεφάλαιο 1. ΔΙΚΤΥΑ 5G.....	13
1.1 Ιστορική αναδρομή	13
1.2 Εισαγωγή στα Δίκτυα 5G.....	17
1.3 Πρότυπα και Τεχνικά Χαρακτηριστικά	17
1.4 Μελλοντικό Όραμα.....	22
1.5 Αρχιτεκτονική Δικτύου.....	23
1.6 Υποστηριζόμενες Εφαρμογές	27
Κεφάλαιο 2. SMALL CELLS	31
2.1 Εισαγωγή στα Small Cells	31
2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	32
2.3 Κατηγοριοποίηση των Small Cells	33
2.3.1 Femtocell.....	33
2.3.2 Picocell.....	35
2.3.3 Microcell	37
2.4 Προγενέστερες Αρχιτεκτονικές Δικτύων.....	39
2.5 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G	41
2.6 Η πρόκληση των παρεμβολών	43
2.7 Ανασκόπηση Ερευνητικής Περιοχής	44
Κεφάλαιο 3. ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 5G ΣΕ UPLINK/DOWNLINK.....	47
3.1 Το πρόβλημα των παρεμβολών.....	47
3.1.1 Παρεμβολές στο Downlink	47
3.1.2 Παρεμβολές στο Uplink	48
3.2 Η προσέγγιση μέχρι σήμερα	49
3.3 Πλεονεκτήματα Διαχωρισμού.....	50
3.3.1 Αυξημένο SNR στο UL και μειωμένη ισχύς μετάδοσης.....	50
3.3.2 Μειωμένες παρεμβολές στο UL δίκτυο	51
3.3.3 Αυξημένες ταχύτητες στο UL δίκτυο.....	52
3.3.4 Ελευθερία στη κατανομή φόρτου χρηστών στα DL/UL δίκτυα.....	53
3.3.5 Χαμηλό κόστος ενσωμάτωσης DUE μηχανισμού	54
3.4 Ανασκόπηση ερευνητικής περιοχής.....	55
Κεφάλαιο 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	58
4.1 Εισαγωγή	58

4.2	Μοντέλο Συστήματος Δικτύου	59
4.2.1	Μοντέλο Απώλειών Διαδρομής	60
4.2.2	Μοντέλο Ρυθμών Μετάδοσης	61
4.3	Αλγόριθμος κατανομής χρηστών	63
4.4	Παράμετροι και Περιβάλλον Εξομοίωσης	64
4.5	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	68
4.5.1	Σύνδεση συσκευής-σταθμού	68
4.5.2	Ταχύτητες στις τερματικές συσκευές	70
4.5.3	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα	72
Κεφάλαιο 5.	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	75
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	75
5.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	77
Κεφάλαιο 6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	83
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	84

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Χρονοδιάγραμμα Εκδόσεων 3GPP.....	16
Εικόνα 2. Χαρακτηριστικά Ασύρματων Δικτύων από το 1981 και μετά.....	16
Εικόνα 3. Εκμεταλλεύσιμο φάσμα συχνοτήτων από το πρότυπο 5G NR.....	19
Εικόνα 4. Υλοποίηση υπηρεσιών μέσω των network slices.....	24
Εικόνα 5. Αρχιτεκτονικές διαφορές μεταξύ δικτύων παρελθόντος και μέλλοντος.....	25
Εικόνα 6. Λειτουργικά Επίπεδα Αρχιτεκτονικής 5G.....	27
Εικόνα 7. Το μελλοντικό όραμα των 5G Δικτύων.....	28
Εικόνα 8. Ένα small cell εγκατεστημένο στη ταράτσα εντός κτηρίου.....	32
Εικόνα 9. Ένα femtocell της Verizon (μαύρο) δίπλα σε ένα femtocell της AT&T (άσπρο).....	34
Εικόνα 10. Το πρώτο picocell (μοντέλο RBS 6402) για εσωτερικούς χώρους από την Ericsson.....	37
Εικόνα 11. Αναπαράσταση ακτίνας κάλυψης macrocell και small cells.....	38
Εικόνα 12. Παραδοσιακή Αρχιτεκτονική και D-RAN Προσέγγιση.....	40
Εικόνα 13. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G.....	42
Εικόνα 14. Κατανάλωση ενέργειας των UEs στο UL επίπεδο για τρία διαφορετικά σενάρια.....	51
Εικόνα 15. Χρονικά Μεταβαλλόμενο SINR των συσκευών στο UL δίκτυο.....	52
Εικόνα 16. Κατανομή χρηστών στο UL επίπεδο με διαφορετικές τεχνικές.....	54
Εικόνα 17. Σενάριο Εξομοίωσης Δικτύου.....	65
Εικόνα 18. Γραφική Εξομοίωση Δικτύου (για 50 χρήστες).....	65
Εικόνα 19. Ποσοστά (%) Επιτυχημένων Συνδέσεων στο DL επίπεδο.....	69
Εικόνα 20. Ποσοστά (%) Επιτυχημένων Συνδέσεων στο DL επίπεδο.....	69
Εικόνα 21. Μέση Ταχύτητα Χρηστών στα επίπεδα DL/UL.....	71
Εικόνα 22. Συνολικές Ταχύτητες στα επίπεδα DL/UL.....	72

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Σύνοψη διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων σύμφωνα με το ITU.....	20
Πίνακας 2. Σύνοψη τεχνικών προδιαγραφών 5G Δικτύων σύμφωνα με το IMT-2020.....	22
Πίνακας 3. Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών μονάδων small cell και macrocell	38
Πίνακας 4. Πιθανότητες οι χρήστες να ζητήσουν δεδομένες ταχύτητες στο DL επίπεδο	66
Πίνακας 5. Πιθανότητες οι χρήστες να ζητήσουν δεδομένες ταχύτητες στο UL επίπεδο	66
Πίνακας 6. Τεχνικές Προδιαγραφές Εξομοίωσης.....	67
Πίνακας 7. Συνολικά Αποτελέσματα Εξομοίωσης στο DL επίπεδο.....	73
Πίνακας 8. Συνολικά Αποτελέσματα Εξομοίωσης στο UL επίπεδο.....	73

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεν αποτελεί είδηση ότι τα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (*Fifth Generation, 5G*) είναι πια πιο κοντά από ποτέ, με την επερχόμενη εδραίωσή τους να είναι η χρονιά 2019-2020. Τα 5G Δίκτυα αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς και στα πλεονεκτήματα που θα προσφέρουν συγκαταλέγονται αναφορικά τα σημαντικότερα, όπως η κατακόρυφη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, η παροχή επιπλέον χωρητικότητας μέσω φασματικών συχνοτήτων που μέχρι σήμερα έμεναν ανεκμετάλλευτες, η ελαχιστοποίηση της χρόνο-καθυστερήσης και του χρόνου απόκρισης, η δυνατότητα εκ νέου διαμόρφωσης των υποδομών του δικτύου μέσω του *network slicing*, αλλά και η απρόσκοπτη και ομοιόμορφη υποστήριξη πολλαπλάσια περισσότερων χρηστών του δικτύου σε σχέση με προγενέστερες γενιές δικτύων.

Όλες οι μορφές δικτύων που έχουμε συναντήσει μέχρι και σήμερα στον τομέα των Τηλεπικοινωνιών αποτελούνταν από δομές που βασίζονταν ουσιαστικά σε προσεκτική τοποθέτηση των σταθμών βάσεων από μακροκυψέλες (*macrocells*). Με τα επερχόμενα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς, αναμένεται η εγκατάσταση μικρότερων, ως προς το χώρο κάλυψης, κυψελών (*small cells*) να προσφέρει σαφώς μεγαλύτερη ελευθερία ως προς την εγκατάσταση, δίνοντας υπό ορισμένες προϋποθέσεις την δυνατότητα στον ίδιο κάτοχο της κυψέλης να την εγκαταστήσει μόνος του, χωρίς την συνδρομή ενδιάμεσου παρόχου. Η έλευση της τεχνολογίας των *small cells* θα μετατρέψει τα υπάρχοντα δίκτυα από ομογενή σε ετερογενή, αυξάνοντας ως φυσικό επακόλουθο την πολυπλοκότητά τους και την ανάγκη για ανάπτυξη αποδοτικών τεχνικών συντονισμού και μετάδοσης δεδομένων εντός του ετερογενούς πια δικτύου. Η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού από *small cells* εντός μιας ορισμένης γεωγραφικής περιοχής (*small cell densification*) αναμένεται μάλιστα να αποτελέσει ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των Δικτύων 5G, προσφέροντας έτσι επαυξημένη κάλυψη και ταχύτητες δεδομένων στους χρήστες εντός του δικτύου.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη μας τα παραπάνω, στόχος της διπλωματικής αυτής είναι να μελετήσει τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα του *small cell densification* και να αναπτύξει έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του, στοχεύοντας έτσι στην μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης (*Spectral Efficiency, SE*) και τη μείωση των παρεμβολών.

Στο Κεφάλαιο 1, θα ξεκινήσουμε κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, αναφέροντας συντόμως τα κυριότερα σημεία από τις προηγούμενες γενιές δικτύων, ξεκινώντας από τα Δίκτυα Πρώτης Γενιάς μέχρι και τα Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς. Θα συνεχίζουμε με την εισαγωγή στα Δίκτυα 5G και θα δούμε ποια είναι τα χαρακτηριστικά αυτά τα οποία τα καθιστούν τόσο αναγκαία στις μέρες μας. Θα μελετήσουμε τα οφέλη τους, την καινοτόμα αρχιτεκτονική πάνω στην οποία θα λειτουργούν αλλά και θα αντιμετωπίσουμε αντικειμενικά τα ζητήματα και τις προκλήσεις που τα χαρακτηρίζουν στο στάδιο ανάπτυξής τους.

Στο Κεφάλαιο 2, θα περιγράψουμε αναλυτικά την ανάγκη εισαγωγής των *small cells* στο υπάρχον δίκτυο, του οποίου θα δούμε ότι η υπάρχουσα προσέγγιση μόνο με σταθμούς βάσης *macrocells* είναι προβληματική. Θα αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά που τα διέπουν, τις κατηγοριοποιήσεις τις οποίες επιδέχονται και θα παρέχουμε μια συνολική εικόνα για το σύνολο των πλεονεκτημάτων, αλλά και μειονεκτημάτων που προσφέρουν. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, θα παραθέσουμε εργασίες από τον επιστημονικό χώρο που ασχολούνται με το παραπάνω ζήτημα.

Στο Κεφάλαιο 3, αρχικά θα δούμε το πρόβλημα των παρεμβολών που παρουσιάζεται στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Έπειτα, θα παραθέσουμε μια καινοτόμα τεχνική διαχωρισμού (*decoupling*) του υπάρχοντος ετερογενούς δικτύου σε δυο τελείως διαφορετικά δίκτυα, στο *downlink (DL)* και στο *uplink (UL)*. Θα μάθουμε πως ο διαχωρισμός αυτός θα πρέπει πια να θεωρείται αναπόσπαστο κομμάτι των ετερογενών δικτύων του μέλλοντος, θα αναλύσουμε μεθόδους με τις οποίες μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός και ξανά στο τέλος του κεφαλαίου θα παρουσιάσουμε το επιστημονικό υπόβαθρο του παραπάνω κλάδου.

Στο Κεφάλαιο 4 που αφορά την πειραματική προσομοίωση των όλων όσων προσπαθούμε να πετύχουμε, θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τον αλγόριθμο κατανομής χρηστών μέσα σε ένα περιβάλλον στο οποίο το Κεντρικό Δίκτυο (*Core Network, CN*) έχει διαχωριστεί σε *downlink* και *uplink*. Ο αλγόριθμος αυτός προϋποθέτει γνώση για τη ποιότητα σύνδεσης και τους διαθέσιμους πόρους των *macrocell* και *small cell* σταθμών βάσης και καθορίζει έναν αποδοτικό τρόπο σύνδεσης των χρηστών σε (πιθανότατα) διαφορετικούς σταθμούς βάσης του δικτύου στα διαχωρισμένα δίκτυα *UL* και *DL*, χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερο φάσμα συχνοτήτων και εξυπηρετώντας όσο το δυνατότερο περισσότερους χρήστες σε υπέρ-πυκνό δίκτυο (*Ultra-Dense Network, UDN*). Η προτεινόμενη υλοποίηση προσφέρει στους χρήστες μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από τις ταχύτητες που απαιτούσαν από το κεντρικό δίκτυο, διατηρώντας έτσι την Ποιότητα Υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*) στο 100% για όλους τους χρήστες τους οποίους το δίκτυο καλύπτει, ανεξάρτητα από το πλήθος των χρηστών.

Στο Κεφάλαιο 5, θα παραθέσουμε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μέσα από την εκτενή θεωρητική μελέτη και την πειραματική υλοποίηση, καθώς και νέα ανοικτά θέματα που αφορούν το πεδίο ενδιαφέροντός μας που αναμένεται να επεκταθούν και να αποτελέσουν αντικείμενο περαιτέρω μελέτης στη δική μας μελλοντική εργασία.

Κεφάλαιο 1. ΔΙΚΤΥΑ 5G

1.1 Ιστορική αναδρομή

Ζούμε σε μια εποχή όπου οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας αυξάνονται με εκθετικό ρυθμό, με αποτέλεσμα οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για πόρους να οδηγούν στην ανάγκη εγκαθίδρυσης μιας νέας γενιάς δικτύων κινητής τηλεφωνίας περίπου ανά δέκα (10) χρόνια. Αν δούμε με προσοχή τους αριθμούς, θα παρατηρήσουμε πως το 2012, ο συνολικός αριθμός των χρηστών του δικτύου είχε σταματήσει στα 4.5 δισεκατομμύρια, με τον μέσο όρο δεδομένων που μεταφερόταν να αναλογεί σε περίπου 10 GB ανά χρήστη, κάθε χρονιά. Μεταφερόμαστε στο 2020 και οι προβλέψεις μας λένε πως ξαφνικά έχουμε να αντιμετωπίσουμε 7.6 δισεκατομμύρια χρήστες και ανά χρονιά, κάθε χρήστης θα απαιτεί τον απίστευτο όγκο των 82 GB! Και αν οι παραπάνω απαιτήσεις χρηστών από το δίκτυο προκαλούν ίλιγγο, ας σκεφτούμε επίσης πως με την έλευση και την εγκαθίδρυση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (*Internet of Things, IoT*) στην καθημερινότητά μας, προβλέπεται πως περίπου πενήντα (50) εκατομμύρια συσκευές (ξεκινώντας από οικιακούς αισθητήρες και έξυπνα ψυγεία μέχρι αυτόνομα αυτοκίνητα και έξυπνα ρολόγια) θα είναι ταυτόχρονα συνδεδεμένες μεταξύ τους και θα είναι σε θέση να υποστηρίξουν αμφίδρομη επικοινωνία [1].

Πριν όμως μεταβούμε στη μελέτη των Δικτύων 5G και την απάντηση στο ερώτημα του γιατί είναι τόσο αναγκαία για τον άνθρωπο τη σήμερον ημέρα, θα ήταν παράλειψη αν δεν αναφερόμασταν στα δίκτυα προηγούμενων γενεών, κάτι που θα μας βοηθήσει να κατανοήσουμε την απίστευτη πρόοδο που έχουμε καταφέρει έως σήμερα. Τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας βασισμένα σε κυψέλες πρωτοεμφανίστηκαν στην αρχή της δεκαετίας του 1980 και έφεραν το όνομα Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (*First Generation Networks, 1G Networks*) και η τεχνολογία τους ήταν αναλογική, δηλαδή η τηλεφωνική επικοινωνία εντός του δικτύου γινόταν με την αποστολή αναλογικών φωνητικών ραδιοκυμάτων. Τα σημαντικότερα πρωτόκολλα που εμφανίστηκαν τη δεκαετία εκείνη ήταν το *Nordic Mobile Telephone (NMT)*, το *Advanced Mobile Phone System (AMPS)* και το *Total Access Communications System (TACS)*, όλα σε διαφορετικές χώρες και διαφορετικές ηπείρους.

Από την πρώτη έκδοση των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μέχρι και σήμερα, έχουν προταθεί, υλοποιηθεί και επεκταθεί πολλαπλά πρωτόκολλα και υπηρεσίες. Αυτό όμως που έμενε πάντα σταθερό ήταν η κυψελώδης μορφή του δικτύου. Με απλά λόγια, εφαρμοζόταν η μέθοδος του ‘διαίρει και βασίλευε’ στις γεωγραφικές περιοχές που το δίκτυο κάλυπτε, προσθέτοντας κυψέλες (*cells*) εντός της γεωγραφικής αυτής περιοχής. Ο διαχωρισμός αυτός του δικτύου σε πολλαπλάσιες κυψέλες έλυσε προσωρινά το πρόβλημα της τηλεφωνικής επικοινωνίας δίχως παρεμβολές ή/και επιπλοκές, μέσω ενός μηχανισμού ο οποίος ανέθετε διακριτές και διαφορετικές συχνότητες σε κάθε διαφορετική κυψέλη και άρα κάθε συσκευή τηλεφωνίας θα χαρακτηριζόταν από μια και μόνο διακριτή συχνότητα. Η παραπάνω λύση χαρακτηρίστηκε ως προσωρινή (μέχρι και ελλιπής) για τον πολύ απλό λόγο του ότι σε περίπτωση που το δίκτυο είχε

να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο αριθμό χρηστών, η πλειοψηφία εξ' αυτών δεν θα εξυπηρετούνταν ποτέ, λόγω του αλγορίθμου κατανομής συχνοτήτων σε συγκεκριμένους χρήστες οι οποίοι είχαν διαθέσιμη τη συχνότητα μέχρι την λήξη της ηχητικής συνομιλίας.

Η απαίτηση για ασφαλέστερη επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων δημιούργησε την ανάγκη ανάπτυξης των Δικτύων Δεύτερης Γενιάς (*Second Generation Networks, 2G Networks*), με την πρώτη παγκοσμίως γενιά δικτύων που υποστήριζαν ψηφιακή μετάδοση ήχου και δεδομένων να έρχεται στο φως το 1991. Τα Δίκτυα 2G προσέφεραν ασφάλεια κατά τη διάρκεια των ασύρματων τηλεφωνικών κλήσεων και εισήγαγαν καινοτόμες για την τότε εποχή υπηρεσίες αποστολής δεδομένων, όπως το *Short Message Service (SMS)* και το *Multimedia Messaging Service (MMS)*. Όσον αφορά τα πρωτόκολλα που υποστήριζε, ξεκίνησε με την ευρωπαϊκή ανάπτυξη του *Global System for Mobile Communications (GSM)* εισάγοντας για πρώτη φορά την έννοια της περιαγωγής, η οποία έδινε την δυνατότητα σε κινητές συσκευές να συνδεθούν σε διαφορετικές κυψέλες κατά την διάρκεια μιας κλήσης χωρίς να διακόπτεται η σύνδεση, τεχνική που ονομάστηκε *handover*¹. Παράλληλα, σε χώρες της Βόρειας Αμερικής και στη Νότια Κορέα, αναπτύχθηκε μια εναλλακτική έκδοση του *GSM* που ονομάστηκε *Code-Division Multiple Access (CDMA)* και επέτρεπε σε πολλαπλούς πομπούς να αποστέλλουν ταυτόχρονα δεδομένα, χρησιμοποιώντας όμως το ίδιο κανάλι επικοινωνίας με το δέκτη, ομαδοποιώντας έτσι τους χρήστες του δικτύου ανά σύνολα συχνοτήτων. Μελλοντικές τεχνολογικές επεκτάσεις των παραπάνω ήταν τα πρωτόκολλα *General Packet Radio Service (GPRS)* για το *GSM* και το *CDMA2000* για το *CDMA* που όρισαν την ενδιάμεση γενιά Δικτύων 2.5G, καθώς και το *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)* που όρισε την γενιά Δικτύων 2.75G [2].

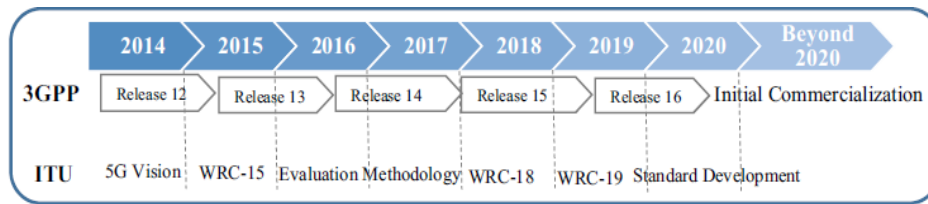
Όπως θα περίμενε κανείς, μια δεκαετία μετέπειτα (και πιο συγκεκριμένα το 2001), έρχονται στο φως τα ευρυζωνικά Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (*Third Generation Networks, 3G Networks*). Τα Δίκτυα 3G έδωσαν κυρίως έμφαση στη μεγιστοποίηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων εντός του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, θέτοντας ένα κάτω όριο στις ταχύτητες ίσο με 144 Kbps (τη στιγμή που τα Δίκτυα 2G αρκούσαν σε μέγιστες ταχύτητες που έφταναν μόλις τα 40 με 100 Kbps), ταχύτητες οι οποίες λίγα χρόνια μετά και μέσω επεκτάσεων βασικών πρωτοκόλλων, εκτοξεύτηκαν στα 10.000 Kbps ή απλά 10 Mbps. Τα βασικότερα πρωτόκολλα που εμφανίστηκαν ήταν η επέκταση του *GSM* που πια ονομαζόταν *Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS)* και η αντίστοιχη επέκταση – της εναλλακτικής έκδοσης όπως είδαμε προηγουμένως του *GSM* – του *CDMA*, λαμβάνοντας την ονομασία *Evolved-Data Optimized (EV-DO)*, πρωτόκολλα τα οποία και αυτά όπως ήταν αναμενόμενο, έδωσαν τη θέση τους σε πιο σύγχρονες επεκτάσεις και υλοποιήσεις, όπως το *Evolved High Speed Packet Access (HSPA+)* για τα Δίκτυα 3.5G και το *Mobile Worldwide Interoperability Microwave Access (WiMAX)* για τα Δίκτυα 3.75G αντίστοιχα.

¹ Ο όρος *handover* στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αναφέρεται στην ομαλή μεταφορά της ενεργής τηλεφωνικής κλήσης ή και γενικότερα της μεταφοράς δεδομένων από μια κυψέλη σε κάποια άλλη, ώστε να μην τερματιστεί η μεταφορά δεδομένων αν ο χρήστης βγει εκτός ορίων της αρχικής κυψέλης.

Τα Δίκτυα Τέταρτης Γενιάς (*Fourth Generation Networks, 4G Networks*) ανακοινώθηκαν το 2008, πρωτοεμφανίστηκαν το 2009 και μέχρι και σήμερα, αποτελούν την τελευταία γενιά κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεπικοινωνίας ευρέως διαθέσιμη στην αγορά. Η συνένωση των πρωτοκόλλων επέκτασης *HSPA+* και *EV-DO* επέφεραν το πρωτόκολλο *Long Term Evolution (LTE)*, πρωτόκολλο για το οποίο συνεχίζονται μέχρι και σήμερα να ανανεώνονται οι εκδόσεις του. Η πρώτη έκδοση ανακοινώθηκε το 2008 ως μια πρόωμη μορφή του *LTE* και ονομάστηκε *LTE Έκδοση 8* από τον οργανισμό *3GPP*², έκδοση η οποία όριζε τα 300 Mbps ως τη μέγιστη σε θεωρητικό επίπεδο ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί στο *downlink* μοντέλο αρχιτεκτονικής *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)* του δικτύου και 75 Mbps στο *uplink* μοντέλο αρχιτεκτονικής *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)*. Οι ταχύτητες που προσέφερε το πρότυπο *LTE* ήταν μεγαλύτερες από τους σε θεωρητικό επίπεδο επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε ένα *3G* Δίκτυο, αλλά ταυτόχρονα ανεπαρκείς για να θεωρηθεί ως πρότυπο για τα Δίκτυα *4G*. Ως αποτέλεσμα, το πρότυπο *LTE* εν τέλει έμεινε στην ιστορία ως πρότυπο Δικτύων *3.9G* [3].

Η σημαντικότερη επέκταση του παραπάνω προτύπου ήρθε το 2011 με την Έκδοση 10, η οποία συνέδεσε άρρηκτα το όνομά της με το *LTE-Advanced (LTE-A)* και αποτέλεσε το πρώτο επίσημα αποδεκτό πρότυπο για Δίκτυα *4G*. Έφερε στο προσκήνιο κυρίως δυνατότητες για επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων (1 Gbps στο *downlink* και 500 Mbps στο *uplink*), αλλά και τη μέθοδο που ακούει στο όνομα *Carrier Aggregation (CA)*. Η μέθοδος του *CA* προσέφερε τη δυνατότητα στους παρόχους του δικτύου να επαναχρησιμοποιούν συχνότητες του διαθέσιμου φάσματος των φορέων (*carriers*). Αυτό πρακτικά σήμαινε ότι αν η Έκδοση 8 έθετε ως ελάχιστη διαθέσιμη συχνότητα τα 1.4 MHz και μέγιστη τα 20 MHz, η μέθοδος *CA* μπορούσε να συνδυάσει μέχρι και πέντε (5) φορές το φορέα των 20 MHz και να προσφέρει 100 MHz διαθέσιμο εύρος ζώνης και κατά συνέπεια, αυξημένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων εντός του δικτύου. Οι επόμενες εκδόσεις αποτελούσαν απλές επεκτάσεις του *LTE-A* μέχρι και την *3GPP Έκδοση 14* (2017), η οποία αποτέλεσε την πρώτη έκδοση σχετική με την τεχνολογική τυποποίηση των *5G* Δικτύων στην καθημερινότητα. Μια διαγραμματική απεικόνιση των *3GPP* εκδόσεων αναφορικά με το *5G* παρατίθεται στην *Εικόνα 1*.

² Ο *Third Generation Partnership Project (3GPP)* είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που συνδέει διαφορετικούς οργανωτικούς οργανισμούς, προσφέροντας τις βάσεις πάνω στις οποίες ορίζονται οι τεχνικές προδιαγραφές για τεχνολογίες δικτύων *3GPP*. Ενώ αρχικός στόχος του οργανισμού ήταν η υλοποίηση τεχνολογιών για τα *3G* Δίκτυα, εξελίχθηκε έτσι ώστε οι εκδόσεις τεχνικών προδιαγραφών να είναι συμβατές και με προγενέστερες γενιές δικτύων (*backwards compatible*), αλλά και με μελλοντικές γενιές δικτύων (*forwards compatible*).



Εικόνα 1. Χρονοδιάγραμμα Εκδόσεων 3GPP [1]

Παράλληλα, τα Δίκτυα 4G εισήγαγαν πρώτα την τεχνική της πυκνοποίησης του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, σε γεωγραφικούς χώρους που αναμένεται να έχουν υπερβολικά πολλούς χρήστες συνδεδεμένους ταυτόχρονα στο δίκτυο μέσω των κινητών τους συσκευών, όπως π.χ. σε συναυλίες, κέντρα διασκέδασης ή εμπορικά κέντρα, οι υπάρχουσες υποδομές σταθμών βάσης αποτελούμενες από *macrocells* δεν είναι σε θέση να εξυπηρετήσουν όλους τους χρήστες του συνωστισμένου αυτού δικτύου. Τη λύση στο παραπάνω πρόβλημα προσφέρουν τα σημεία πρόσβασης *small cell*, μικρότερα αλλά οικονομικότερα σημεία πρόσβασης στο δίκτυο, τα οποία λειτουργούν με υποπολλαπλάσια μικρότερη κατανάλωση ισχύος σε σχέση με τα *macrocells* και είναι ικανά – ανάλογα με τον τύπο του *small cell* – να εξυπηρετήσουν ένα συγκεκριμένο αριθμό χρηστών, απαλλάσσοντας από το σταθμό βάσης *macrocell* τον φόρτο κάλυψης των χρηστών αυτών. Ουσιαστικά δηλαδή, προσφέρουν επιπλέον κάλυψη χρηστών του δικτύου σε σημεία όπου το λαμβανόμενο σήμα από το *macrocell* θα ήταν εξαιρετικά ασθενές, άρα ασθενής θα ήταν και οι σύνδεση και οι ταχύτητες της συσκευής και απαλλάσσουν το *macrocell* από το να χρειαστεί να εξυπηρετήσει όλους τους χρήστες μέσα στην ακτίνα λειτουργίας του, γεγονός που θα είχε αρνητικά αποτελέσματα ακόμα και για τους χρήστες σε σχετικά κοντινή απόσταση από αυτό.

Μια πιο συνοπτική έκδοση της ιστορικής αυτής αναδρομής παρουσιάζεται παρακάτω στην Εικόνα 2, όπου παρατηρούμε την εξέλιξη των κυβελωτών ασύρματων δικτύων τηλεπικοινωνίας από την αναλογική τους μορφή στις αρχές της δεκαετίας του 1980 μέχρι και την αναμενόμενη εισαγωγή των 5G Δικτύων σαράντα (40) χρόνια μετά.

1G	2G	3G	4G	? 5G
Date to Market: 1981	Date to Market: 1992	Date to Market: 2001	Date to Market: 2009	Date to Market: 2020
Standards Introduced: NMT, AMPS, and TACS	Standards Introduced: GSM and CDMA	Standards Introduced: UMTS and EV-DO	Standards Introduced: Long-Term Evolution (LTE)	Standards Introduced: TBD
Capabilities: • Analog voice services only	Capabilities: • Digital voice services • Encrypted communication • Limited roaming • SMS and MMS messaging	Capabilities: • Mobile Broadband • GPS and location services • Multimedia streaming • Seamless global roaming	Capabilities: • High speed Internet access • IP-based packet switching • MIMO • Carrier Aggregation • HD media streaming • Evolving throughput capabilities ("Categories") via ongoing Releases	Capabilities: • Enterprise connectivity • M2M versatility • IoT readiness • Expanded Carrier Aggregation • Millimeter wave support
Protocol Expansions: • GPRS (2.5G) • CDMA2000 (2.5G) • EDGE (2.75G)	Protocol Expansions: • HSPA+ (3.5G) • Mobile WiMAX (3.75G)	Protocol Expansions: • LTE-A (Cat 6, Rel. 10) • Release 11 (Cat 9 & 10) • LTE-M (Cat 0, Rel. 12) • Release 14 (Cat 1bis)	Protocol Expansions: • LTE-A (Cat 6, Rel. 10) • Release 11 (Cat 9 & 10) • LTE-M (Cat 0, Rel. 12) • Release 14 (Cat 1bis)	Cellular connectivity (mobile WAN) becomes as reliable and robust as wireline broadband.
Peak Download Rate (bps): 0.0024M (2.4k)	Peak Download Rate (bps): 0.064M (64k)	Peak Download Rate (bps): 2M	Peak Download Rate (bps): 100M	Peak Download Rate (bps): 35,460M (35G)
<small>©2017 Accelerated Concepts, Inc. www.accelerated.com</small>				

Εικόνα 2. Χαρακτηριστικά Ασύρματων Δικτύων από το 1981 και μετά [2]

1.2 Εισαγωγή στα Δίκτυα 5G

Όπως είδαμε και στην αρχή της ιστορικής μας αναδρομής, στις προηγούμενες γενιές δικτύων ασύρματης κινητής τηλεφωνίας, απαιτείται ένα αναμφίβολα ετερογενές δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με αυξημένη χωρητικότητα για να μπορέσει να ανταπεξέλθει και να καλύψει αποτελεσματικά την πληθώρα διαφορετικών συσκευών και τεχνολογιών. Τα Δίκτυα 5G υπόσχονται να προσφέρουν αυξημένες ταχύτητες σε υπερβολικά πολλαπλούς χρήστες του ίδιου δικτύου μέσω της αύξησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης με σχεδόν μηδαμινό χρόνο απόκρισης, χρησιμοποιώντας παράλληλα τεχνικές μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης εντός του δικτύου. Για να υλοποιηθούν όμως όλα τα παραπάνω, θα πρέπει να αναπτυχθούν οι κατάλληλες τεχνικές αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου με κοινό γνώμονα την αποδοτικότητα, την εξοικονόμηση ενέργειας και το απαιτούμενο κόστος.

Προφανώς όμως, δεν υπάρχει ακόμα κάποιο καθολικά αποδεκτό πρότυπο σχετικά με το τι επακριβώς να αναμένουμε από το 5G, πάρα μόνο μια πληθώρα διαφορετικών υλοποιήσεων από διαφορετικούς οργανισμούς. Αν και υπήρχαν διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς την κατεύθυνση προς την οποία τα Δίκτυα 5G θα έπρεπε να κινηθούν, στο μόνο που όλοι συμφωνούσαν ήταν εν τέλει ότι τα δίκτυα αυτά θα είναι ετερογενή σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην χαρακτηρίζονται πλήρως από μια και μόνο τεχνική πρόσβασης, αλλά από έναν αποδοτικό διαχωρισμό των τεχνικών αυτών σε διαφορετικά επίπεδα μέσα στο δίκτυο (άλλα εικονικά, άλλα φυσικά), προσφέροντας καθολική συνδεσιμότητα και καλύπτοντας ένα αρκετά ευρύ φάσμα απαιτητικών εφαρμογών που καθορίζουν τις ανάγκες της τεχνολογικής μας καθημερινότητας.

1.3 Πρότυπα και Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Η Έκδοση 16 του οργανισμού 3GPP αναμένεται να αποτελέσει την πρώτη πλήρη έκδοση τεχνικών χαρακτηριστικών για τα Δίκτυα 5G μέσα στο 2020 (βλέπε *Εικόνα 1*). Πριν όμως καταλήξει η επιστημονική κοινότητα σε πρότυπα για τα 5G Δίκτυα, ακόμα και αν όντως προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες μεγαλύτερες από το αποδεκτό άνω όριο για να χαρακτηριστεί το δίκτυο ως 4G, απώτερος σκοπός θα πρέπει να είναι η απόλυτη ανεξαρτησία του δικτύου και ο τεχνολογικός διαχωρισμός του από τα Δίκτυα 4G. Αλλωστε, κανείς δεν στοχεύει στο να οριστούν ενδιάμεσα δίκτυα μεταξύ της Τέταρτης και της Πέμπτης Γενιάς, αλλά τα Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς να αποτελούν καθολικά πρωτοποριακές υποδομές.

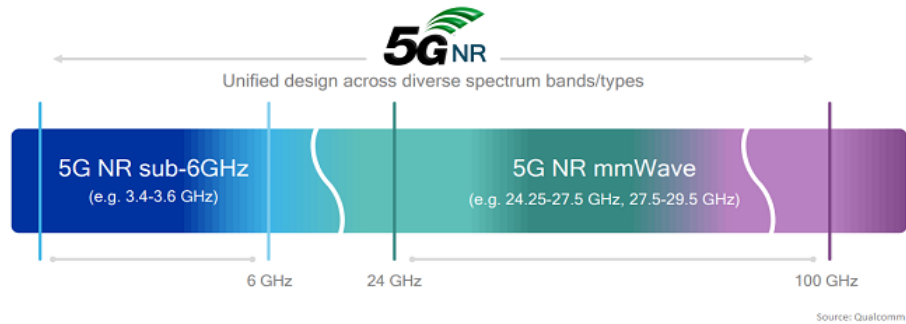
Ως αποτέλεσμα, πριν τη δημοσιοποίηση της Έκδοσης 16, έχει αποφασιστεί πως η Έκδοση 15 θα περιέχει μια αρχική περιγραφή των 5G Δικτύων για εμπορικούς σκοπούς και χαρακτηρίζεται και ως Πρώτη Φάση των τεχνικών χαρακτηριστικών για τα δίκτυα αυτά, με χρονικό ορίζοντα τον Απρίλιο του 2019. Ως φυσικό επακόλουθο, η Έκδοση 16 θα ονομάζεται Δεύτερη Φάση για τα ίδια χαρακτηριστικά με το χρονικό ορίζοντα ολοκλήρωσης να ορίζεται ακριβώς ένα χρόνο μετά, δηλαδή τον Απρίλιο του 2020. Αν και εφόσον οι τελικές προδιαγραφές των Δικτύων Επόμενης Γενιάς πληρούν τα κριτήρια του προτύπου που έχει τεθεί από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (*International Telecommunication Union, ITU*) και ακούει στο όνομα *International*

Mobile Telecommunication System-2020 ή απλούστατα *IMT-2020*, τότε θα μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι τα δίκτυα αυτά είναι όντως αυτόνομα *5G* Δίκτυα, ικανά να καλύψουν πολλαπλές ετερογενείς συσκευές ταυτόχρονα συνδεδεμένες στο ίδιο δίκτυο [4].

Το πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας (*Air Interface*) για τα *5G* Δίκτυα, ξεκινώντας από την Έκδοση 15, θα ονομάζεται *5G New Radio (5G NR)* και αναμένεται να αποτελέσει το διεθνές πρότυπο σε επίπεδο επικοινωνίας με μέσο διάδοσης τον αέρα. Στο τεχνικό σκέλος, το *5G NR* θα περιέχει χαμηλές συχνότητες κάτω των 6 GHz και υψηλές συχνότητες άνω των 24 GHz, προσφέροντας συνολικά αυξημένες ταχύτητες, βελτιωμένη αποδοτικότητα και δυνατότητες επεκτασιμότητας του δικτύου. Πιο αναλυτικά, η τεχνολογία *5G NR* θα επιδέχεται τις εξής δύο κατηγοριοποιήσεις, τις οποίες αναλύουμε στις παρακάτω παραγράφους.

Το Εύρος Συχνοτήτων 1 (*Frequency Range 1, FR1*) ορίζεται ως το σύνολο όλων φασματικών συχνοτήτων κάτω των 6 GHz και το μέγιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης καναλιού ορίζεται στα 100 MHz. Οι περιορισμοί προκύπτουν από το γεγονός πως αρκετά από τα διαθέσιμα εύρη συχνοτήτων πιθανότητα χρησιμοποιούνται από προγενέστερες γενιές δικτύων (και αν θέλουμε να είμαστε αυστηρά τυπικοί, από προγενέστερα πρωτοκόλλα), με αναπόφευκτο αποτέλεσμα τις συγκρούσεις μεταξύ τους. Ταυτόχρονα, παρόλο που πολλές από τις συχνότητες που ανήκουν στο *FR1* ταυτίζονται με προγενέστερα πρωτόκολλα, έρευνες έχουν δείξει πως για κρίσιμες μετρικές, όπως η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και η καθυστέρηση απόκρισης του δικτύου, η χρησιμοποίηση των συχνοτήτων του *FR1* σε προσομοιώσεις *5G* Δικτύων οδηγεί σε ελάχιστες βελτιώσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρικές στα *4G* Δίκτυα [5] [6].

Το Εύρος Συχνοτήτων 2 (*Frequency Range 2, FR2*) ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο ως το σύνολο των φασματικών συχνοτήτων άνω των 24 GHz, συχνότητες οι οποίες είναι ικανές να προσφέρουν αυξημένο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Για αυτό όμως το εύρος συχνοτήτων, το εύρος ζώνης καναλιού θα μπορεί να κυμαίνεται από τα 50 έως και τα 400 MHz, εκμεταλλευόμενο την υποστήριξη της τεχνικής *CA* για δύο ταυτόχρονα κανάλια, όπως αυτή ορίζεται στην Έκδοση 15. Η αιτιολόγηση έγκειται στο γεγονός πως μιλάμε πια για συχνότητες που μέχρι και σήμερα έμεναν αχρησιμοποίητες, καθώς δεν είχαν αναπτυχθεί οι απαιτούμενες τεχνολογίες από τον ευρύ επιστημονικό κλάδο ώστε να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το ελεύθερο αυτό φάσμα συχνοτήτων, με αποτέλεσμα τον κορεσμό και την εξαντλητική εκμετάλλευση των συχνοτήτων κάτω των 6 GHz, σε σημείο πια που να είναι επιτακτική ανάγκη η μετάβαση σε αρκετά πιο υψηλές συχνότητες. Μια πιο επεξηγηματική αναπαράσταση του εκμεταλλευόμενου φάσματος συχνοτήτων από το *5G NR* παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3* μέσω κάποιων παραδειγμάτων περί χρησιμοποίησης ορισμένων συχνοτήτων από το πρότυπο, όπου το σύνολο των συχνοτήτων κάτω των 6 GHz αναφέρεται στο *FR1* και το σύνολο συχνοτήτων από τα 24 GHz έως τα 100 GHz αποτελεί (υπό)σύνολο του *FR2*.



Εικόνα 3. Εκμεταλλεμένο φάσμα συχνοτήτων από το πρότυπο 5G NR [6]

Είναι πλέον προφανές πως για να έχουν τα 5G Δίκτυα ένα λαμπρό μέλλον και να καταφέρουν να θεωρηθούν επιτυχημένα, οφείλουμε να μελετήσουμε ενδελεχώς τις συχνοτήτες του FR2. Μάλιστα, το εύρος των συχνοτήτων είναι τόσο μεγάλο που σε περίπτωση που βρεθούμε στο εύρος συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz, τότε μεταβαίνουμε στις Εξαιρετικά Υψηλές Συχνότητες (*Extreme High Frequencies, EHF*), στις οποίες τα μεταδιδόμενα ραδιοκύματα έχουν μήκος κύματος μόλις 1 έως 10 χιλιοστά (*mm*) και ως αποτέλεσμα, η ζώνη συχνοτήτων ονομάζεται ζώνη χιλιοστών και η ακτινοβολία θα παίρνει την ονομασία χιλιοστομετρικά κύματα (*mmWave*). Το πλεονέκτημα που κερδίζουμε όταν βρισκόμαστε σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων είναι πως εξαιτίας της υψηλής ατμοσφαιρικής απόσβεσης των ραδιοκυμάτων, η απορρόφηση των αερίων εμποδίζει μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις. Ως συνέπεια, το αυξημένο εύρος ζώνης ωφελεί μόνο για μεταδόσεις σε μικρές αποστάσεις, όπου το πολύ μικρό μήκος κύματος αφήνει μεγαλύτερα περιθώρια για τεχνικές επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων.

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει όλες τις διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων, όπως αυτές ορίζονται από το ITU, ώστε να γίνουν πιο κατανοητές οι κλίμακες για τις οποίες μιλάμε. Όπως παρατηρούμε, η αποδοτική εκμετάλλευση του εύρους ζώνης EHF θα αποτελέσει τις βάσεις για το μέλλον, αφού εξαιρετικά αυξημένες ανάγκες χρηστών συνήθως συνεπάγονται και αυξημένες ανάγκες για ταχύτητες δικτύου, άρα για χωρητικότητα δικτύου³, άρα για διαθέσιμο εύρος ζώνης. Μάλιστα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπομπής που θα εκπέμπεται από τα Δίκτυα 5G θα συνεχίσει (όπως ήταν μέχρι και σήμερα στα προγενέστερα δίκτυα) να είναι μη ιονίζουσα, δηλαδή μη ικανή να συμβάλει σε ιοντισμό των μορίων και να διασπάσει χημικούς δεσμούς σε οργανικά κύτταρα, γεγονός με πολύ απλά λόγια μεταφράζεται σε μη επιβλαβείς επιπτώσεις σε ζωντανούς οργανισμούς που θα βρίσκονται εντός εμβέλειας των 5G Δικτύων.

³ Από το Θεώρημα Χωρητικότητας Καναλιού (ή Δεύτερο Θεώρημα του Shannon), ο Ρυθμός Μετάδοσης R θα πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος της Χωρητικότητας Καναλιού C για μετάδοση δεδομένων στο κανάλι χωρίς σφάλματα, και άρα η Χωρητικότητα Καναλιού εκφράζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης σε κανάλι μετάδοσης.

Πίνακας 1. Σύνοψη διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων σύμφωνα με το ITU [8]

Συχνότητα	Ονομασία	Ακρωνύμιο	Εφαρμογές	Ακτινοβολία
300 Hz – 3 KHz	Ultra Low Frequency	ULF	Ραδιοεπικοινωνία Υποβρυχίων	Μη Ιονίζουσα
3 KHz – 30 KHz	Very Low Frequency	VLF	Ραδιοεπικοινωνία Υποβρυχίων	Μη Ιονίζουσα
30 KHz – 300 KHz	Low Frequency	LF	Μακρά Κύματα	Μη Ιονίζουσα
300 KHz – 3 MHz	Medium Frequency	MF	Ραδιοφωνία AM & Μεσαία Κύματα	Μη Ιονίζουσα
3 MHz – 30 MHz	High Frequency	HF	Βραχέα Κύματα	Μη Ιονίζουσα
30 MHz – 300 MHz	Very High Frequency	VHF	Ραδιοφωνία FM & Τηλεόραση	Μη Ιονίζουσα
300 MHz – 3GHz	Ultra High Frequency	UHF	Κινητή Τηλεφωνία, Ασύρματα LAN δίκτυα & Τηλεόραση	Μη Ιονίζουσα
3 GHz – 30 GHz	Super High Frequency	SHF	Μικροκύματα, Ραντάρ & Δορυφορική Μετάδοση	Μη Ιονίζουσα
30 GHz – 300 GHz	Extremely High Frequency	EHF	Ραδιοαστρονομία & Συστήματα Ασφαλείας	Μη Ιονίζουσα

Κλείνοντας λοιπόν το κομμάτι της ανάλυσης της τεχνολογίας 5G NR για μετάδοση μέσω αέρα, επιστρέφουμε στο επίσημο πρότυπο τεχνικών προδιαγραφών IMT-2020, το οποίο θα ορίζει 3 διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης, στις οποίες τα Δίκτυα 5G οφείλουν να ανταπεξέλθουν για την επόμενη δεκαετία. Οι περιπτώσεις χρήσης αναλύονται στις παρακάτω παραγράφους.

Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται *Enhanced Mobile Broadband (eMBB)* και αναφέρεται στη μελέτη περιπτώσεων χρήσης αναφορικά με την παροχή πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης σε ευρυζωνικά Δίκτυα Επόμενης Γενιάς. Η υπηρεσία αυτή, για να καταφέρει να προσφέρει τις υποσχόμενες ταχύτητες, θα βασίζεται σε δύο βασικούς πυλώνες, όπως αυξημένη χωρητικότητα δικτύου και βελτιωμένη κάλυψη δικτύου. Εφόσον το πεδίο ενδιαφέροντος είναι τα δίκτυα στα οποία παρατηρείται συχνά συνωστισμός κινητών συσκευών, επιπλέον κάλυψη και ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων μπορούν να προέλθουν μόνο μέσω της αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου (η αιτιολόγηση του ισχυρισμού αυτού έχει ήδη δοθεί προηγουμένως από το Θεώρημα

Χωρητικότητας Καναλιού). Όσον αφορά στη κάλυψη του δικτύου, οι αυξημένες δυνατότητες πια θα επιτρέπουν την επιτυχημένη κάλυψη παντού εντός του ευρυζωνικού ετερογενούς δικτύου και κυρίως για περιπτώσεις όπου οι χρήστες θα μετακινούνται με υψηλές ταχύτητες εντός του δικτύου, όπως π.χ. σε τρένα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες και άρα η διαδικασία του *handover* θα πρέπει να γίνεται με ελάχιστη χρόνο-καθυστέρηση σε σημείο όπου να μην είναι αντιληπτό από τον οδηγό ή τους επιβαίνοντες του οχήματος [9].

Προφανώς, κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες εφαρμόζεται για διαφορετικές ανάγκες, δηλαδή για διαφορετικά σενάρια χρήσης. Για παράδειγμα, χρήστες του δικτύου που κινούνται με σχετικά χαμηλή ταχύτητα και διανύουν μικρές αποστάσεις λόγω του συνωστισμού του περιβάλλοντός τους (π.χ. σε μια συναυλία) χαρακτηρίζονται από ανάγκες αναφορικά με τη χωρητικότητα του δικτύου και όχι από την υποστήριξη κάλυψης ταχύτατα κινούμενων χρηστών. Από την άλλη πλευρά, επιβαίνοντες οχημάτων επιδιώκουν πρωτίστως την ευρεία κάλυψη από το δίκτυο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους και δευτερευόντως την παροχή υψηλών ταχυτήτων από το δίκτυο.

Το δεύτερο σενάριο χρήσης του *IMT-2020* αναφέρεται σε *Ultra Reliable Low Latency Communications (URLCC)*, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου είναι ύψιστης σημασίας η απρόσκοπτη και αδιάλειπτη λειτουργία της εφαρμογής. Μετρικές όπως η χρόνο-καθυστέρηση και η πιστότητα χαρακτηρίζουν πλήρως το παραπάνω σενάριο χρήσης. Στα παραδείγματα της καθημερινότητάς μας για τα οποία το σενάριο χρήσης *URLCC* είναι επιτακτική ανάγκη συγκαταλέγονται οι ιατρικές εγχειρίσεις εξ' αποστάσεως, τα αυτόνομα έξυπνα αυτοκίνητα και η αυτονομία σε μαζικές εργοστασιακές παραγωγές.

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο χρήσης ονομάζεται *Massive Machine Type Communications (mMTC)* με πεδίο ενδιαφέροντος περιπτώσεις στις οποίες στο δίκτυο θα εφαρμόζεται η τεχνολογία *IoT*. Ως φυσικό επακόλουθο, θα έχουμε υποστήριξη πολλαπλών διαφορετικών ασύρματων συσκευών εντός του δικτύου, από έξυπνα ψυγεία και έξυπνα ρολόγια (*smartwatches*) μέχρι ασύρματα κινητά τηλέφωνα που θα υποστηρίζουν το *5G* Δίκτυο και θα χαρακτηρίζονται από τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, άρα θα επωφελούνται από την επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του κινητού.

Αρχικά, η υπηρεσία *eMBB* θα αποτελέσει επέκταση των υπηρεσιών που προσφέρονται από τα υπάρχοντα Δίκτυα *4G* και θα βρίσκονται στην Έκδοση 15 ως μια υπηρεσία που θα χαρακτηρίζει την Πρώτη Φάση των Δικτύων Επόμενης Γενιάς στη καθημερινότητά μας. Στο μέλλον όμως, αναμένουμε να δούμε τη Δεύτερη Φάση των δικτύων αυτών να αποτελείται όχι μόνο από *eMBB* υπηρεσίες, αλλά και από ένα συνδυασμό υπηρεσιών *URLLC* και *mMTC*, υπηρεσίες οι οποίες αναμένεται να εμπεριέχονται στην Έκδοση 16.

1.4 Μελλοντικό Όραμα

Οι στόχοι των Δικτύων 5G είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με το πρότυπο με το οποίο θα συμβαδίζουν και άρα θα απορρέουν από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του *IMT-2020*. Έχουμε ήδη αναφέρει επιγραμματικά μερικούς από τους στόχους των 5G Δικτύων, στους οποίους συγκαταλέγονται η αυξημένη χωρητικότητα δικτύου και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, η υποστήριξη πολλαπλών ετερογενών συσκευών σε ένα δίκτυο και ο ουσιαστικός μηδενισμός της χρονικής αναμονής απόκρισης με χρόνους μικρότερους από το 1 ms. Συγκεντρωτικά, ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις κυριότερες τεχνικές προδιαγραφές που ορίζονται από το *IMT-2020*.

Πίνακας 2. Σύνοψη τεχνικών προδιαγραφών 5G Δικτύων σύμφωνα με το *IMT-2020* [10]

Παράγοντας	Στόχος	Σενάριο Χρήσης
Μέγιστος Ρυθμός Δεδομένων	20 Gbit/s	eMBB
Ρυθμός δεδομένων σε hotspot περιοχή	1 Gbit/s	eMBB
Ρυθμός δεδομένων σε κανονική περιοχή	100 Mbit/s	eMBB
Χρόνος απόκρισης	1 ms	URLCC
Μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα χρήστη	500 km/h	eMBB/URLCC
Πλήθος χρηστών σε γεωγραφική περιοχή	$10^6/\text{km}^2$	mMTC
Ενεργειακή Αποδοτικότητα	Ομοίως με 4G	eMBB
Κίνηση ανά περιοχή κάλυψης	$1000 (\text{Mbit/s})/\text{m}^2$	eMBB
Φασματική Απόδοση ⁴	3 ή 4 φορές καλύτερη από τα 4G	eMBB

Συγκριτικά με τα 4G Δίκτυα και τις όποιες εξελίξεις τους ορίζονται (βλέπε πρότυπο *LTE-A*) παρατηρούνται απίστευτα μεγάλες διαφοροποιήσεις στους στόχους που είχαν και έχουν τεθεί εκατέρωθεν. Προφανώς, για τη σύγκριση των δικτύων δεν υπάρχει καλύτερο παράδειγμα από τη σύγκριση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να επιτύχουν οι τελικοί χρήστες. Οντως, αν τα Δίκτυα 4G ακολουθούσαν τις τεχνικές προδιαγραφές του τότε προτύπου *IMT-Advanced* (όπως αυτό καθορίστηκε από το *ITU-R*) και όριζαν το 1 Gbit/s ως το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε δίκτυα τα οποία οι χρήστες παρέμεναν σε γενικές γραμμές σταθεροί και κινούνταν με σχετικά μικρές ταχύτητες, τότε τα Δίκτυα 5G με βάση το *IMT-2020* ορίζουν τα 20 Gbit/s ως μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αντίστοιχα. Αν τα Δίκτυα 4G

⁴ Η Φασματική Απόδοση (*SE*) αναφέρεται στο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων κάτω από ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης και ουσιαστικά αντικατοπτρίζει το πόσο αποδοτικά χρησιμοποιείται γίνεται η μετάδοση πληροφορίας χρησιμοποιώντας ένα δοσμένο φάσμα συχνοτήτων.

προσέφεραν διαθέσιμο εύρος ζώνης καναλιού από 5 έως και 20 MHz, τα Δίκτυα 5G προσφέρουν αντίστοιχο εύρος ζώνης καναλιού από 50 έως 400 MHz (βλέπε FR1 και FR2). Αν ο χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθεί επιτυχημένα ένα πακέτο από έναν αποστολέα στον εκάστοτε παραλήπτη (*latency*) στα Δίκτυα 4G ανερχόταν στα 30 έως 70 ms, στα 5G Δίκτυα ο χρόνος αυτός θα πρέπει να θεωρείται αμελητέος, καθώς αγγίζει μόλις το 1 ms [11]!

Σε αυτό το σημείο πλέον, ο καθένας μπορεί να κατανοήσει τις απίστευτες ικανότητες των 5G Δικτύων συγκριτικά με τις προγενέστερες γενιές δικτύων. Βέβαια, μέχρι στιγμής έχουμε αναλύσει μόνο τα πρότυπα στα οποία βασίζονται τα 5G Δίκτυα και τις δυνατότητές τους, αλλά δεν έχουμε δει ακόμα το πεδίο εφαρμογής τους σε αναλυτικό επίπεδο. Συνεπώς, στο επόμενο υπό-κεφάλαιο, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση του ευρύ συνόλου εφαρμογών που θα εξυπηρετούνται από τα Δίκτυα 5G.

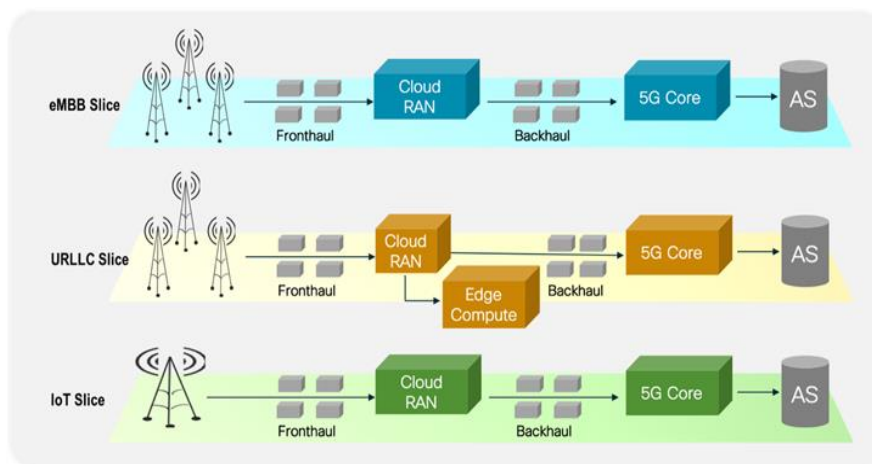
1.5 Αρχιτεκτονική Δικτύου

Η ετερογένεια που θα πρέπει να χαρακτηρίζει τα 5G Δίκτυα προϋποθέτει την ενσωμάτωση μιας πληθώρας διαφορετικών υποδομών, ελεγχόμενων από μια ενιαία πλατφόρμα. Για να υπάρχει πλήρης έλεγχος και ασφάλεια σε κάθε διαφορετική υποδομή ενός Δικτύου 5G, απαιτείται ο διαχωρισμός του δικτύου σε πολλαπλά λογικά τμήματα δικτύου (*network slice*). Κάθε λογικό *network slice* θα επιτελεί αυτόνομες λειτουργίες και θα είναι ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα, θα χαρακτηρίζεται από αυτόνομη αρχιτεκτονική, πρωτόκολλα, ασφάλεια και λειτουργικότητα, ανάλογα με το τι ορίζουν οι απαιτήσεις. Δηλαδή, κάθε *network slice* θα διαχειρίζεται διαφορετικούς πόρους, θα διακατέχεται από διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες πρόσβασης (*Radio Access Technology, RAT*) και θα συνδέεται είτε με φυσική σύνδεση, είτε με εικονική, στο ενιαίο δίκτυο. Κατά συνέπεια, ο εκάστοτε διαχειριστής του *network slice* θα μπορεί να προσφέρει άμεσες λύσεις στις εκάστοτε ανάγκες που παρουσιάζονται, είτε από καταναλωτές, είτε από επιχειρήσεις μέσω του *network slice* που διαχειρίζεται και προσφέρει ως υπηρεσία [11] [13].

Για να κατανοήσουμε πλήρως το κέρδος που απορρέει από το διαχωρισμό του δικτύου σε *network slices*, ας θεωρήσουμε ένα απλό παράδειγμα αυτόνομου αυτοκινήτου που θα παραδίδει παραγγελίες σε κατοικίες. Σε γενικό πλαίσιο, έχουμε δύο περιπτώσεις χρήσεις και άρα δύο πιθανά *network slices*. Η μια περίπτωση είναι να προγραμματίσουμε το *Global Positioning System (GPS)* του αυτοκινήτου ώστε να επιλέγει διαδρομές στις οποίες ο συνωστισμός οχημάτων είναι μειωμένος μέσω πραγματικού χρόνου επικοινωνίας με έξυπνους αισθητήρες στους δρόμους και άρα θα δίνεται έμφαση από τον πάροχο του *network slice* στην παροχή υψηλής επίδοσης του αυτοκινήτου. Σε πυκνό-κατοικημένες περιοχές όμως, μια τέτοια προσέγγιση είναι άκρως επικίνδυνη, οπότε θα ορίζαμε ένα διαφορετικό *network slice*, το οποίο θα έδινε έμφαση στην οδήγηση με μέγιστη ασφάλεια και όχι με μέγιστη επίδοση, για την αποφυγή τυχόν ατυχημάτων σε τέτοιους δρόμους.

Η επέκταση του παραπάνω παραδείγματος είναι και η θεμελιώδης αρχή στην οποία θα βασιστεί η αρχιτεκτονική των Δικτύων 5G και κατά συνέπεια, το σύνολο των

κυριότερων προσφερόμενων υπηρεσιών μπορεί να υλοποιηθεί μέσω διαχώρισης του ενιαίου δικτύου στα εκάστοτε *network slices*. Ο ισχυρισμός αυτός φαίνεται παρακάτω στην *Εικόνα 4*, όπου υπηρεσίες όπως *eMBB*, *URLLC* και *IoT* εξυπηρετούνται από διαφορετικά *network slices*, του ίδιου όμως ενιαίου δικτύου. Όπως φαίνεται στην εικόνα, ένα *network slice* θεωρείται πως λειτουργεί από άκρο σε άκρο (*end-to-end*), δηλαδή τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε υπηρεσίας που διατελεί βρίσκονται στους τελικούς κόμβους του δικτύου, ανεξάρτητα από το περιεχόμενο των ενδιάμεσων κόμβων. Σε καθαρή ετυμολογία δικτύων, το παραπάνω μεταφράζεται ως εξής: ένα *network slice* θα ξεκινάει από το άκρο των σταθμών βάσης ασύρματης μετάδοσης, θα διατρέχει τα τμήματα *fronthaul* και *backhaul* του επιπέδου μεταφοράς του δικτύου και θα καταλήγει στο κεντρικό δίκτυο.

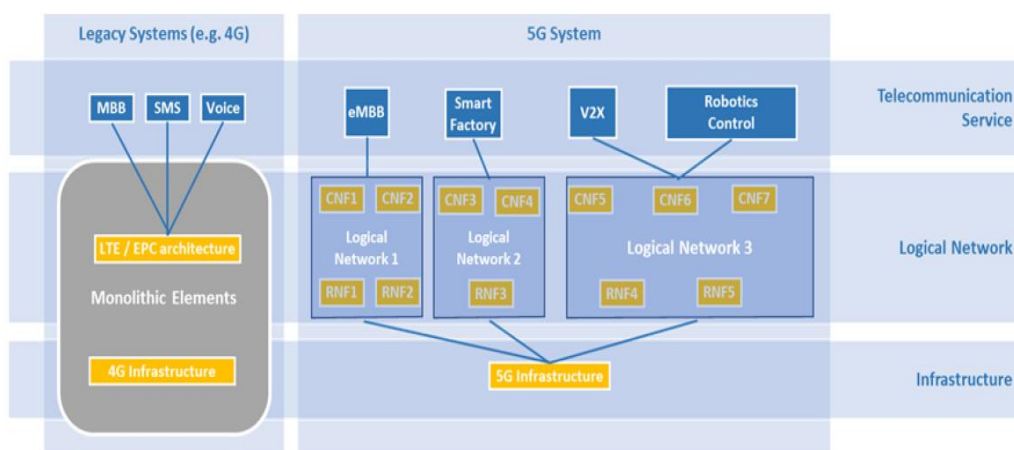


Εικόνα 4. Υλοποίηση υπηρεσιών μέσω των network slices [11]

Προγενέστερες υποδομές τηλεπικοινωνιακών δικτύων όπως τα *4G*, ορίζονταν κάτω από την ίδια αρχιτεκτονική δικτύου ανάλογα με το πρωτόκολλο το οποίο ακολουθούσαν (π.χ. *LTE*) και μπορούσαν να παρέχουν στους καταναλωτές του δικτύου υπηρεσίες μετάδοσης και λήψης δεδομένων ήχου και δεδομένων (π.χ. *SMS*), αλλά και άλλες ευρυζωνικές υπηρεσίες (π.χ. τηλεδιασκέψεις πολλαπλών χρηστών εξ' αποστάσεως). Τα *5G* Δίκτυα διαφοροποιούνται ρητά από μια τέτοια προσέγγιση και μέσω του διαχωρισμού του δικτύου σε λογικά *network slices*, δημιουργούνται πολλαπλά ανεξάρτητα λογικά δίκτυα, όπου το καθένα από αυτά εξειδικεύεται στην αποδοτική εξυπηρέτηση της υπηρεσίας για την οποία είναι υπεύθυνο (π.χ. *eMBB*, *URLLC*, *mMTC*).

Μια άλλη σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των προγενέστερων γενιών ασύρματων δικτύων και των *5G* Δικτύων είναι ο τρόπος με τον οποίο επικοινωνούν τα αντικείμενα εντός του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, προηγούμενες μορφές δικτύων ακολουθούσαν ένα πρότυπο στο οποίο κάθε λειτουργικό αντικείμενο του δικτύου είχε συγκεντρωτικό *software* και *hardware*. Αντιθέτως, η προσέγγιση των *5G* Δικτύων ορίζει το διαχωρισμό (*decoupling*) των λειτουργιών του δικτύου που αφορούν το κομμάτι του *software* από το κομμάτι του *hardware* μέσω της υλοποίησης τεχνικών

διαμοιρασμού και διαχείρισης πόρων και από τις δύο πλευρές. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως φυσικές τεχνολογίες σαν την πολυπλεξία θα λειτουργούν σε πλήρη συνεργασία με τεχνολογίες κώδικα, όπως *Network Function Virtualization (NFV)*⁵ και *Software Defined Networking (SDN)*⁶ και εκεί που η πολυπλεξία επέτρεπε το διαμοιρασμό της *hardware* υποδομής του δικτύου χωρίς καμία δυνατότητα εικονικοποίησης της υποδομής, η χρησιμοποίηση των *NFV* και *SDN* ως ανεξάρτητες *software* τεχνολογίες θα επιτρέπει πρόσβαση και διαμοιρασμό της *hardware* υποδομής, παρόλο που οι υποδομές *software* και *hardware* θα είναι σε πλήρη διαχωρισμό. Οι διαφορές των παλαιότερων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων και των επερχόμενων 5G Δικτύων συνοψίζονται διαγραμματικά στην *Εικόνα 5*.



Εικόνα 5. Αρχιτεκτονικές διαφορές μεταξύ δικτύων παρελθόντος και μέλλοντος [13]

Με γνώμονα λοιπόν όλα τα παραπάνω, τα λειτουργικά επίπεδα (τέσσερα στο σύνολό τους) της αρχιτεκτονικής των Δικτύων Επόμενης Γενιάς ορίζονται ως εξής:

- **Επίπεδο Δεδομένων (*Data Layer*):** Αποτελεί το κατώτερο επίπεδο ιεραρχίας και περιλαμβάνει το ευρύ σύνολο τεχνικών εικονικοποίησης δικτύου (*Virtual Network Functions, VNF*) και τεχνικών φυσικού δικτύου (*Physical Network Functions, PNF*). Στο επίπεδο αυτό, κύριο μέλημα είναι η απρόσκοπτη μεταφορά και επεξεργασία των εισερχόμενων και εξερχόμενων δεδομένων.
- **Επίπεδο Ελέγχου (*Control Layer*):** Λειτουργεί σε υψηλότερο σε ιεραρχία επίπεδο από το Επίπεδο Δεδομένων. Όπως προδίδει και το ίδιο το όνομα του επιπέδου, εδώ αναμένουμε να συναντήσουμε τεχνικές

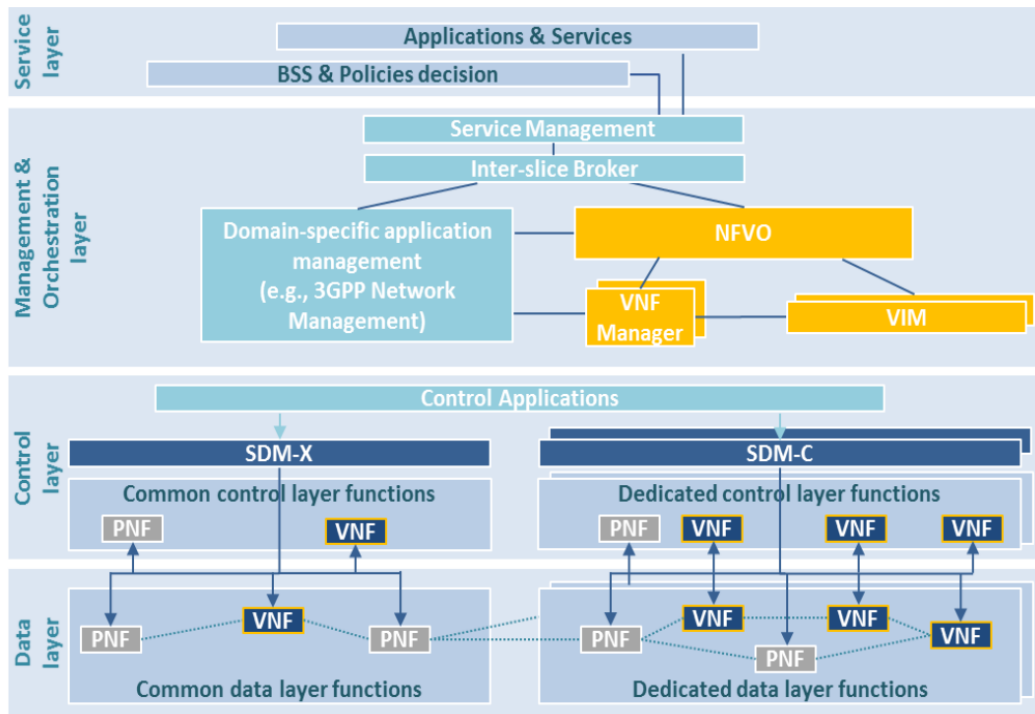
⁵ Το *NFV* αποτελεί μια δικτυακή αρχιτεκτονική, η οποία μετατρέπει λειτουργικούς κόμβους του δικτύου σε εικονικούς, η ένωση των οποίων δημιουργεί δικτυακές υπηρεσίες, εκμεταλλευόμενη τις διαθέσιμες τεχνολογίες εικονικοποίησης.

⁶ Η *SDN* τεχνολογία επιτρέπει ευέλικτη επεξεργασία των πολλαπλών τμημάτων του δικτύου, συγκεντρώνοντας τη διαχειριστική δύναμη σε ένα μοναδικό δικτυακό στοιχείο, προσφέροντας έτσι αποδοτική παρακολούθηση και διαχείριση του συνολικού δικτύου.

διαχείρισης του δικτύου. Πράγματι, το επίπεδο αυτό χαρακτηρίζεται από δύο κεντρικούς ελεγκτές. Ο ελεγκτής *Software Defined Mobile Network Controller (SDM-C)* περιορίζεται στις ανεξάρτητες λειτουργίες του δικτύου και μετατρέπει τις εισερχόμενες εντολές ελέγχου σε αποδεκτές εντολές από τεχνικές *VNF* ή *PNF*. Ο δεύτερος ελεγκτής ονομάζεται *Software Defined Mobile Network Coordinator (SDM-X)* και σε γενικές γραμμές επιτελεί την ίδια λειτουργία με τον *SDM-C*. Η ειδοποιός διαφορά τους είναι πως ο *SDM-C* διαχειρίζεται τις ανεξάρτητες λειτουργικότητες του δικτύου σε αντίθεση με τον *SDM-X*, ο οποίος διαχειρίζεται διαμοιραζόμενες λειτουργίες εντός του δικτύου.

- **Επίπεδο Οργάνωσης και Διαχείρισης (*Management and Orchestration Layer*):** Αναφερόμαστε στο αμέσως υψηλότερο επίπεδο από το Επίπεδο Ελέγχου, όπου διαθέσιμες τεχνικές *NFV* υπάρχουν για τη διευκόλυνση της διαχείρισης του δικτύου, με υποστήριξη μάλιστα και από διαφορετικούς και ανεξάρτητους οργανισμούς. Για να προσφερθεί ο απαραίτητος αριθμός πόρων στα λογικά *network slices*, ορίζουμε ένα μεσολαβητή μεταξύ τους (*Inter-slice broker*), υπεύθυνο για αυτή ακριβώς τη λειτουργία. Ο μεσολαβητής αυτός θα χρειάζεται κάθε φορά να βρίσκεται σε ανοικτό δίαυλο επικοινωνίας με την Υπηρεσία Διαχείρισης (*Service Management*), ώστε να μεταφραστούν οι καταναλωτικές ανάγκες σε ανάγκες για πόρους και το ανάποδο.
- **Επίπεδο Υπηρεσίας (*Service Layer*):** Προφανώς, από τα τέσσερα συνολικά λειτουργικά επίπεδα, το Επίπεδο Υπηρεσίας βρίσκεται στην κορυφή της ιεραρχίας. Σε αυτό το επίπεδο βρίσκεται το ευρύ σύνολο παρόχων δικτύου σε συνδυασμό με επιχειρηματικούς φορείς του κλάδου.

Η *Εικόνα 6* παρουσιάζει μια πλήρη περιγραφή των τεσσάρων λειτουργικών επιπέδων της αρχιτεκτονικής των *5G* Δικτύων, εφόσον προφανώς παραμείνει βασισμένη στην έννοια του τεμαχισμού του δικτύου σε λογικά *network slices*.

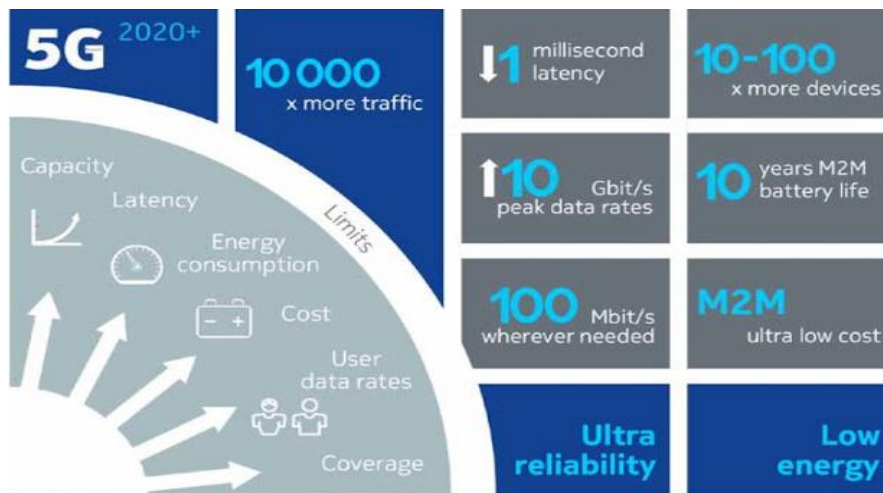


Εικόνα 6. Λειτουργικά Επίπεδα Αρχιτεκτονικής 5G [13]

1.6 Υποστηριζόμενες Εφαρμογές

Τα Δίκτυα 5G αναμένεται να προσφέρουν βελτιωμένες, σε σχέση με τις προγενέστερες γενιές ασύρματων δικτύων, εφαρμογές στους χρήστες σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, το όραμα για χρησιμοποίηση χιλιοστομετρικών κυμάτων στο μη εξουσιοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz θα προσφέρει επαυξημένες ταχύτητες στους χρήστες, πολλαπλάσιων των 10 Gbps, ταχύτητες τόσο υψηλές που η ασύρματη ανταλλαγή δεδομένων θα είναι πια ισοδύναμη με τη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικών ινών. Σε συνδυασμό μάλιστα με το *latency* της τάξης του 1 ms, όπου η επικοινωνία εντός του δικτύου θα γίνεται οριακά με μηδαμινή χρόνο-καθυστερήση, δίνεται η δυνατότητα σε οποιαδήποτε συσκευή εντός του δικτύου να υποστηρίζει υπηρεσίες με σχετική πια άνεση. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι οι ταχύτητα εξελισσόμενες τεχνολογίες, όπως η Εικονική Πραγματικότητα (*Virtual Reality, VR*), η Επαυξημένη Πραγματικότητα (*Augmented Reality, AR*) και η παρακολούθηση Ροής Βίντεο (*Video Streaming*) σε ανάλυση 4K και παραπάνω. Θα μπορούμε πια να παρακολουθούμε κανάλια Υψηλής Ευκρίνειας (*High Definition, HD*) και να συμμετέχουμε σε διαδικτυακά παιχνίδια VR με βελτιστοποιημένη Ποιότητα Εμπειρίας (*Quality of Experience, QoE*) [14].



Εικόνα 7. Το μελλοντικό όραμα των 5G Δικτύων [14]

Παράλληλα, η υποστήριξη τεχνολογιών όπως το *IoT* θα βελτιστοποιήσει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (*Device-to-Device, D2D*) εντός του ευρυζωνικού δικτύου. Το δίκτυο πλέον θα χαρακτηρίζεται όχι μόνο από ασύρματες συσκευές, όπως τα κινητά, αλλά από ένα ευρύ σύνολο ετερογενών συσκευών, όπως οικιακές συσκευές, έξυπνα αυτοκίνητα και αισθητήρες. Από τεχνολογικής άποψης, το *IoT* μπορεί να υποστηριχτεί ικανοποιητικά, με βάση τα σημερινά δεδομένα, μόνο από Δίκτυα 5G, καθώς οι ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες επεξεργασίας υπερβολικά μεγάλου όγκου δεδομένων μπορεί να προέλθει μόνο μέσω από δίκτυα που χαρακτηρίζονται από ευελιξία, αποδοτικότητα, ασφάλεια και μπορούν να τεθούν σε εφαρμογή με σχετικά χαμηλό οικονομικό κόστος.

Η υποστήριξη του *IoT* από τα Δίκτυα 5G θα επιφέρει καινοτόμες λύσεις για τα έξυπνα σπίτια του μέλλοντος, στα οποία οι συσκευές θα επικοινωνούν ασύρματα μεταξύ τους και θα ελέγχονται απομακρυσμένα (π.χ. θα μπορεί ο ιδιοκτήτης του σπιτιού αυτού, μέσω μιας απλής εφαρμογής στο κινητό του τηλέφωνο, να παρακολουθεί οποιαδήποτε στιγμή σε πραγματικό χρόνο βίντεο μέσα από τις κάμερες ασφαλείας του σπιτιού του). Με την ίδια ακριβώς λογική, το *IoT* επεκτείνει την εμβέλειά του σε ολόκληρη τη πόλη, προσφέροντας ολοκληρωμένες λύσεις για τις πόλεις του μέλλοντος. Για παράδειγμα, ένα από τα οράματα της *IoT* τεχνολογίας για τις έξυπνες πόλεις είναι ο έλεγχος της κυκλοφορίας των αυτοκινήτων σε πραγματικό χρόνο μέσω ειδικών καμερών με τεχνολογίες ανάλυσης βίντεο για την άμεση ενημέρωση σε περιπτώσεις μποτιλιαρίσματος, ατυχημάτων κτλ. Ένα άλλο μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας είναι η τοποθέτηση αισθητήρων σε χώρους (εσωτερικούς ή/και εξωτερικούς) για την αλλαγή του φωτισμού από έντονο (*bright mode*) σε αχνό (*dim mode*) σε περιπτώσεις που δεν ανιχνεύεται κίνηση. Η ενεργειακή κατανάλωση θα μπορούσε να ελαττωθεί και μέσω μετρητών εντός των (πολύ)κατοικιών, ενημερώνοντας τους υπαλλήλους ή τους κάτοικους αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας και προτείνοντας μέτρα που θα στοχεύουν στην εξοικονόμηση της. Η αυτονομία των αυτοκινήτων του μέλλοντος επίσης θα απαιτεί την ύπαρξη μιας *IoT* υποδομής για την επικοινωνία του αυτοκινήτου με τους οποιουδήποτε αισθητήρες γύρω από αυτό.

Οι εφαρμογές των 5G Δικτύων βέβαια δεν σταματούν εδώ. Τομείς οι οποίοι έως σήμερα φάνταζαν λειτουργικοί χωρίς την άμεση ανάγκη της τεχνολογίας θα μπορούν να επωφεληθούν από τις καινοτομίες των 5G Δικτύων. Η κτηνοτροφία μπορεί να μετατραπεί σε έξυπνη κτηνοτροφία, εάν η παρακολούθηση και ο άμεσος εντοπισμός των ζώων γίνεται μέσω αισθητήρων *RFID* (*Radio Frequency Identification*) και προγραμμάτων *GPS*. Σε καθαρά τεχνολογικούς τομείς, όπως στον τομέα της ιατρικής, οι γιατροί θα έχουν πια τη δυνατότητα σύνδεσης με τους ασθενείς οποιαδήποτε στιγμή εξ' αποστάσεως και εξαλείφεται η ανάγκη φυσικής συνάντησης, η οποία πάντοτε χαρακτηριζόταν από μεγάλα χρονικά διαστήματα καθυστερήσεων. Οι χειρουργοί δεν θα χρειάζεται καν να είναι στον περιβάλλοντα χώρο του νοσοκομείου κατά τη διάρκεια της εγχείρησης του ασθενή και θα απαιτείται απλά μια απομακρυσμένη σύνδεση μηδενικής καθυστέρησης και πραγματικού χρόνου (εξ' ορισμού δηλαδή ένα 5G Δίκτυο), ώστε ο χειρουργός να ελέγχει απομακρυσμένα τις όποιες έξυπνες ιατρικές συσκευές απαιτούνται. Ασθενείς που διακατέχονται από επικίνδυνες παθήσεις (π.χ. οποιαδήποτε πάθηση εμπεριέχει το σύμπτωμα της απώλειας μνήμης) θα χρησιμοποιούν πλέον ειδικές ετικέτες σε κάποιο σημείο του σώματός τους και θα εξαλειφθούν περιπτώσεις, όπου η παρακολούθηση και ο εντοπισμός τέτοιων ατόμων ήταν πολύ δύσκολος.

Κεφάλαιο 2. SMALL CELLS

2.1 Εισαγωγή στα Small Cells

Αν κάποιος μας ζητούσε να εξηγήσουμε γιατί τα *small cells* αποτελούν επιτακτική ανάγκη για την επιτυχημένη ανάπτυξη των 5G Δικτύων, η πιο απλή και εύστοχη απάντηση θα ήταν πως πάντα οι μεγάλες αλλαγές θα μεταφράζονται σε πολλαπλές μικρές αλλαγές. Πράγματι, η καθολική επίτευξη των στόχων και κατά συνέπεια η ολοκλήρωση του οράματος των δικτύων επόμενης γενιάς μπορεί να ολοκληρωθεί μέσω της ενσωμάτωσης των *small cells* στις δικτυακές υποδομές, βελτιώνοντας τις ταχύτητες δεδομένων και την κατανάλωση ενέργειας. Η ιδέα αυτή έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας που ασχολείται με την αποδοτική ανάπτυξη και υλοποίηση υποδομών 5G Δικτύων, με σκοπό την σαφή βελτίωση της κάλυψης χρηστών και την παροχή νέων, βελτιστοποιημένων υπηρεσιών τόσο σε εσωτερικούς χώρους, όσο και σε πυκνές από χρήστες περιοχές.

Η βασική ιδέα, όπως θα δούμε και αναλυτικότερα στη συνέχεια του Κεφαλαίου 2, έγκειται στον πολλαπλασιασμό των σταθμών βάσης, απόρροια των αυξημένων αναγκών από τους πολλαπλούς χρήστες του δικτύου. Ενώ όμως η εγκατάσταση πολλαπλών σταθμών βάσης αποτελούμενων από *macrocells* αποτελεί μια αρκετά κοστοβόρα λύση, η προσπάθεια στρέφεται προς την ανάπτυξη και εγκατάσταση σταθμών βάσης αποτελούμενων από *small cells*. Οι παραπάνω σταθμοί βάσης, αφενός μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες κάλυψης χρηστών σε σημεία του δικτύου που τα *macrocells* λόγω συνωστισμού προσφέρουν κάκιστη κάλυψη (για παράδειγμα, σε περιοχές κοντά στα όρια της περιοχής κάλυψης ενός *macrocell* σταθμού), αφετέρου βελτιώνουν τις ταχύτητες αποστολής και λήψης δεδομένων των χρηστών με σχετικά χαμηλό οικονομικό κόστος, προσφέροντας όμως μικρότερες περιοχές κάλυψης. Σε συνδυασμό μάλιστα με την υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα που τα χαρακτηρίζει, χρήστες που θα συνδέονται σε *small cell* σταθμό βάσης θα βρίσκονται σίγουρα πολύ κοντά στο σταθμό και άρα θα επιδέχονται ελάχιστες μειώσεις στην ισχύ του σήματος (για τον ίδιο χρήστη, μια απευθείας σύνδεση προς το σταθμό βάσης *macrocell* θα επέφερε υψηλή εξασθένιση σήματος).

Στη συνέχεια του τρέχοντος κεφαλαίου, θα αναλύσουμε τις προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν τα *small cells*, θα δούμε τις κατηγοριοποιήσεις που επιδέχονται και τις προϋποθέσεις ώστε να ανήκουν σε κάποια από τις διαθέσιμες κατηγορίες. Μετέπειτα, θα παρουσιάσουμε τα υπέρ και τα κατά της *small cell* προσέγγισης ως βασική υποδομή των 5G Δικτύων και τέλος, θα αναφερθούμε σε μελέτες της επιστημονικής κοινότητας που ασχολούνται με το παραπάνω ζήτημα.

2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Ένα *small cell* μπορεί να οριστεί ως ένας προσβάσιμος δικτυακός κόμβος ραδιοεπικοινωνίας χαμηλής κατανάλωσης, με εύρος περιοχής κάλυψης που ξεκινάει μόλις από τα 10 μέτρα και εκτείνεται μέχρι και μερικά χιλιόμετρα. Μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε σαφώς λιγότερους χρήστες από ότι ένα *macrocell* λόγω της μικρής εμβέλειας που το διέπει, ενώ για την ικανοποιητική κάλυψη των χρηστών εντός της γεωγραφικής περιοχής που καλύπτουν, προβαίνουν σε επαναχρησιμοποίηση των ίδιων ραδιοσυχνοτήτων επαναληπτικά. Σκοπός ενός *small cell* δεν είναι άλλος πέρα από την παροχή ικανοποιητικών υπηρεσιών σε χρήστες του δικτύου, οι οποίοι πιθανότητα θα επιδέχονταν κάκιστες υπηρεσίες, είτε λόγω της συγκέντρωσης και της σύνδεσης όλων των χρηστών σε ένα και μόνο *macrocell* (άρα διαμοιρασμός των πόρων, άρα μικρότερες ταχύτητες), είτε λόγω της μεγάλης απόστασης και άρα της υψηλής εξασθένησης του σήματος εάν βρίσκονταν αρκετά μακριά από το σταθμό βάσης. Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να λύσει με οικονομικό τρόπο το εκάστοτε *small cell* που θα τοποθετηθεί στην υπάρχουσα υποδομή του δικτύου και θα υποστηρίξει το ετερογενές δίκτυο, παρέχοντας αυξημένη χωρητικότητα, ρυθμούς μετάδοσης, τεχνικές μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης και συνολικά βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου [15] [16].



Εικόνα 8. Ένα *small cell* εγκατεστημένο στη τάρτασα εντός κτηρίου [15]

Η τοποθέτηση ενός *small cell* προϋποθέτει μια υπάρχουσα δικτυακή υποδομή, έτσι ώστε οι παρεχόμενες υπηρεσίες να είναι εκμεταλλεύσιμες από τους παρόχους και τους φορείς του δικτύου αυτού (άλλωστε, όσο μεγάλος και να είναι ο αριθμός των *small cells* σε μια γεωγραφική περιοχή, ο ρόλος τους είναι καθαρά υποστηρικτικός και σε κανένα ενδεχόμενο δεν προβλέπεται να αντικαταστήσουν πλήρως τη *macrocell* υποδομή). Η παραπάνω προσέγγιση οδηγεί στη συνειδητοποίηση πως πρακτικά, οι υποδομές των (ακόμα) υπό-ανάπτυξη 5G Δικτύων δεν προβλέπεται να είναι εξολοκλήρου αυτόνομες και ανεξάρτητες από τις υπάρχουσες υποδομές προηγούμενων γενεών (δηλαδή, από τα 4G Δίκτυα). Αντίθετα, η εγκατάσταση των *small cells* σε ήδη υπάρχουσες υποδομές συμβαδίζει με την ιδέα πως τα 5G Δίκτυα θα εκμεταλλευτούν τις υπάρχουσες υποδομές, εξειδικεύοντας και βελτιστοποιώντας τις υπηρεσίες εντός του δικτύου, ώστε να ικανοποιείται το αυξημένο πλήθος χρηστών και συσκευών. Θα μπορούσε λοιπόν κανείς να θεωρήσει τα *small cells* ως το συνδετικό κρίκο μεταξύ των δικτύων 4G που λειτουργούν κάτω από το LTE-A πρότυπο και των υπό-ανάπτυξη 5G δικτύων, αφού πέραν της γνωστής αύξησης της χωρητικότητας δεδομένων που παρέχουν, συμβάλουν στην εύκολη, οικονομική και ευέλικτη εγκατάσταση σε ταράτσες, αλλά και στην αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, αφού η σύνδεση σε σταθμό βάσης σε πολύ κοντινή απόσταση που εκπέμπει με χαμηλή κατανάλωση μειώνει και την κατανάλωση ενέργειας της κινητής συσκευής.

Η πρώτη επίσημη εμφάνιση των *small cells* ήταν στο μακρινό 2008, κάτω από την 3GPP Έκδοση 9, αλλάζοντας ριζικά την έως τότε προσέγγιση ως προς την δικτυακή υποδομή και προσφέροντας τις βάσεις για την ιδέα της υπέρ-πύκνωσης του δικτύου. Με πολύ απλά λόγια, αντί ο πάροχος του δικτύου να προσφέρει έναν κεντρικό κορμό σύνδεσης για όλες τις ασύρματες συσκευές του δικτύου, μπορεί πια να εκμεταλλευτεί τις πολλαπλές διακλαδώσεις που δημιουργούνται από την τοποθέτηση *small cells* και να προσφέρει εξειδικευμένες υπηρεσίες, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Ένα *small cell* λοιπόν είναι σε θέση να υποστηρίξει τα διάφορα πρωτόκολλα προηγούμενων γενιών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, όπως τα πρωτόκολλα GSM, CDMA2000, TD-SCDMA (*Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*), W-CDMA (*Wideband Code-Division Multiple Access*), LTE και WiMAX, γεγονός που αποκαλύπτει πως η ευελιξία ενός *small cell* το καθιστά εφικτή λύση όχι μόνο για τα δίκτυα του μέλλοντος, αλλά ακόμη και για προγενέστερα δίκτυα.

2.3 Κατηγοριοποίηση των Small Cells

Ένα *small cell* είναι σε θέση να καλύψει μια σχετικά μικρή γεωγραφική περιοχή – συγκριτικά πάντα με ένα τυπικό *macrocell* – και με βάση την έκταση της περιοχής κάλυψης, ορίζονται οι παρακάτω κατηγοριοποιήσεις.

2.3.1 Femtocell

Το *femtocell* είναι το μικρότερο (ως προς την περιοχή κάλυψης) *small cell* και ταυτόχρονα το πιο σύνθηες στην καθημερινότητα μας. Πολλές φορές μπορεί να το συναντήσουμε και με μια εναλλακτική ορολογία ως *femto Access Point (AP)*. Όταν

πρωτοεμφανίστηκε, κύριος σκοπός του ήταν η βελτίωση της κάλυψης του δικτύου εντός του σπιτιού, καθώς το εξερχόμενο σήμα από το σταθμό βάσης *macrocell* εξασθενούσε κάθε φορά που συναντούσε ως εμπόδια τους τοίχους κάθε κατοικίας. Ένα *femtocell* μπορεί να εγκατασταθεί εντός της οικίας και από τον ίδιο το χρήστη, χωρίς την άμεση ανάγκη μεσολάβησης του εκάστοτε παρόχου, ενώ η αγορά γίνεται είτε με άμεση πληρωμή, είτε μέσω κάποιου διακανονισμού για το δανεισμό του. Μάλιστα, η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για βελτιωμένη εσωτερική κάλυψη οδήγησε εν τέλει στην εγκαθίδρυσή του *femtocell* ως την πλέον βασική μορφή *small cell* μέχρι και σήμερα [17].



Εικόνα 9. Ένα *femtocell* της Verizon (μαύρο) δίπλα σε ένα *femtocell* της AT&T (άσπρο) [17]

Προφανώς, ένα *femtocell* δεν επιφέρει θετικά αποτελέσματα μόνο για τους καταναλωτές. Σίγουρα, πέραν από τους αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ο καταναλωτής σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επωφεληθεί από ευνοϊκή τιμολόγηση για τις δικτυακές υπηρεσίες που έχει και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κινητού αυξάνεται λόγω της σαφώς κοντινότερης απόστασης από το *femtocell* (σε σχέση με το *macrocell*). Ο πάροχος του δικτύου επωφελείται και αυτός από τη δική του πλευρά, αφού σύνδεση των καταναλωτών στο οικιακό *femtocell* μεταφράζεται σε αποσυμφόρηση χρηστών από τα υπάρχοντα κελία του δικτύου και τη σύνδεσή τους στο *femtocell* και ως αποτέλεσμα, ο πάροχος του δικτύου βλέπει μια επέκταση στην περιοχή κάλυψης του δικτύου του. Μάλιστα, η λύση του *femtocell* στο πρόβλημα του

συνωστισμού των χρηστών στις υπάρχουσες δικτυακές υποδομές έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον εταιριών κολοσσών στον τομέα των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, εταιρίες όπως η *AT&T*, η *Verizon*, η *T-Mobile US*, η *O2* και η *Vodafone* έχουν ήδη επενδύσει στην παροχή υπηρεσιών *femtocell*, αφενός απαντώντας στις ανάγκες των επιχειρήσεων, αφετέρου παρέχοντας λύση σε απλούς καταναλωτές.

Στο τεχνικό σκέλος, ένα *femtocell* χρησιμοποιείται κυρίως σε κατοικίες για επέκταση και βελτίωση της δικτύωσης που προσφέρει ο πάροχος, όπου ο αριθμός των ταυτόχρονων συνδέσεων ασύρματων κινητών συσκευών κυμαίνεται από τέσσερις (4) έως και οχτώ (8). Βέβαια, σε ορισμένες περιπτώσεις και κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μια εταιρική εγκατάσταση, περιορίζοντας πάλι όμως τον αριθμό ταυτόχρονων συσκευών ασύρματης κινητής τηλεφωνίας από οχτώ (8) έως και δεκαέξι (16). Η περιοχή κάλυψης ενός *femtocell* είναι καθορισμένη για καθαρά εσωτερικούς χώρους, καλύπτοντας έτσι τα κενά στο δίκτυο και εξαλείφοντας της εξασθένηση του σήματος εντός του κτηρίου. Με κατανάλωση ενέργειας που ξεκινάει από το 1 mW μέχρι και τα 250 mW, μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά μια περιοχή η οποία ξεκινάει από τα 10 μέτρα και φτάνει μέχρι και τα 100 μέτρα. Ανάλογα με τις διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές τις οποίες ακολουθούν οι *femtocell* συσκευές, ως μέγιστος αριθμός συνδέσεων χρηστών σε ένα *femtocell* ορίζονται οι τριάντα (30) χρήστες.

Στο λειτουργικό σκέλος, συνηθίζεται ο κάτοχος του *femtocell* να προκαθορίζει (αρκεί να γίνει μια φορά) τους αριθμούς τηλεφώνων οι οποίοι επιθυμεί να καλύπτονται από το *femtocell* και άρα, όταν η εκάστοτε συσκευή φτάσει εντός εμβέλειας, διακόπτεται η σύνδεση με το *macrocell* και συνδέεται άμεσα με το *femtocell*, δηλαδή με τεχνολογικούς όρους γίνεται *handover*. Αντίστοιχα, απομάκρυνση της συσκευής, η οποία έχει δικαιώματα πρόσβασης στις υπηρεσίες ενός *femtocell*, από την περιοχή κάλυψης οδηγεί στην αντίστροφη διαδικασία *handover*, όπου η συσκευή δεν καλύπτεται πια από το *femtocell*, αλλά από το *macrocell*. Ο κάτοχος και ο πάροχος του *femtocell* είθισται να βρίσκονται σε διαρκή, αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ τους. Για παράδειγμα, ο κάτοχος θα μπορεί να ενημερώνεται όταν μια συσκευή εισέρχεται στην περιοχή κάλυψης και εξυπηρετείται από το *femtocell*. Αν και η εγκατάστασή τους θεωρείται αρκετά εύκολη και εύελκτη (*Plug and Play, PnP*), μόνο ο πάροχος μπορεί να ορίσει τη συμπεριφορά της συσκευής σε περίπτωση αλλαγής της θέσης του από την αρχική εγκατάσταση.

2.3.2 Picocell

Το *picocell* αποτελεί την αμέσως επόμενη κατηγορία *small cell* στην ιεραρχία, καθώς η περιοχή κάλυψής του δεν περιορίζεται μόνο εντός κατοικιών, αλλά επεκτείνεται και σε περιοχές-συγκροτήματα, όπως π.χ. ένα εμπορικό κέντρο ή ένα σιδηροδρομικό σταθμό, ενώ τα τελευταία χρόνια, στις περιοχές κάλυψης έχει προστεθεί και το εσωτερικό τμήμα ενός αεροσκάφους. Ο ρόλος τους παραμένει ίδιος με το ρόλο κάθε τύπου *small cell*: παροχή ικανοποιητικής κάλυψης σε χρήστες του δικτύου που βρίσκονται σε περιοχές απομακρυσμένες από τους παραδοσιακούς σταθμούς βάσης *macrocell*, όπου η προσέγγιση του προβλήματος με εκ' νέου

εγκατάσταση επιπλέον *macrocells* θα ήταν δαπανηρή, κοστοβόρα και σίγουρα όχι ευέλικτη. Ένα *picocell* προσφέρει με πολύ χαμηλό κόστος και με μεγάλη ευελιξία, επαυξημένη χωρητικότητα στο δίκτυο του παρόχου, βελτιωμένους ρυθμούς μετάδοσης και λήψης δεδομένων στις ασύρματες κινητές συσκευές των συνδρομητών, καθώς και καλύτερη ενεργειακή απόδοση, αφού αυξάνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών [18].

Όμως, η αύξηση της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης ενός *picocell* δεν μπορεί να έρθει χωρίς επιπτώσεις σε άλλους τομείς, και πιο συγκεκριμένα, στον τομέα της ενεργειακής κατανάλωσης. Πράγματι, ένα *picocell* μπορεί να καλύψει μια ευρύτερη περιοχή που ξεκινάει από τα εκατό (100) μέτρα μέχρι και τα διακόσια (200) μέτρα, με αποτέλεσμα την αύξηση των πιθανών συνδρομητών του από τους τριάντα (30) έως και τους εκατό (100). Για να το κάνει αυτό, θα πρέπει ισχύς του να αυξηθεί σε σχέση με την αντίστοιχη ισχύ που είδαμε στο *femtocell* και να φτάσει το εύρος 250 mW – 1 W, δηλαδή να αυξηθεί η κατανάλωση ενέργειας του. Τα παραπάνω σημαίνουν πως η διάρκειας ζωής της μπαταρίας κάθε κινητής συσκευής που συνδέεται σε ένα *picocell* θα είναι σίγουρα μικρότερη από την ίδια συσκευή που θα μπορούσε να συνδεθεί σε ένα *femtocell*, αλλά ταυτόχρονα και πολύ μεγαλύτερη από το να συνδεόταν στο *macrocell* (αφού μικρότερη απόσταση προς το σταθμό μεταφράζεται σε μικρότερες ανάγκες σε ισχύ εκπομπής, άρα σε αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας). Επιπρόσθετα, ενώ ένα *femtocell* μπορεί να εγκατασταθεί από τον ίδιο τον κάτοχο της μονάδας χωρίς την ανάγκη να παρέμβει ο πάροχος, στην περίπτωση του *picocell* κάτι τέτοιο παύει να ισχύει, καθώς για την εγκατάστασή του, εξολοκλήρου υπεύθυνος για την ασφαλή τοποθέτηση, λειτουργία και συντήρηση είναι ο πάροχος του δικτύου.

Όσον αφορά τη συνδεσιμότητα, κάθε *picocell* ως μονάδα συνδέεται με το λεγόμενο ελεγκτή σταθμού βάσης (*Base Station Controller, BSC*), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση ραδιοσυχνοτήτων και τη δρομολόγηση των δεδομένων που συλλέγονται, είτε στο κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (*Mobile Switching Centre, MSC*), είτε στο δικτυακό κόμβο υποστήριξης πύλης (*Gateway GPRS Support Node, GGSN*). Συνολικά, πολλαπλές κεφαλές των εκάστοτε *picocell* μονάδων συνδέονται στον *BSC* εκμεταλλευόμενες τις υπάρχουσες κτηριακές καλωδιώσεις, δηλαδή μέσω *Ethernet* καλωδίωσης. Εξαιρεση στον κανόνα προφανώς είναι τα *picocell* που τοποθετούνται στα αεροσκάφη, στα οποία η αμφίδρομη επικοινωνία επιτελείται μέσω δορυφόρων.

Όπως και με την περίπτωση του *femtocell*, ένα *picocell* υποστηρίζει πολλαπλές τεχνολογίες και πρότυπα, συμπεριλαμβανομένων του *GSM*, του *CDMA*, του *UMTS* και του *LTE*. Ορισμένες από τις πιο γνωστές εταιρίες στο τομέα των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών, όπως η *ip.access*, η *ZTE*, η *Huawei* και η *Airwalk*, έχουν έμπρακτα δηλώσει το ενδιαφέρον τους σχετικά με την ανάπτυξη μονάδων *picocell*. Ιστορικά, η εταιρία-κολοσσός της *Ericsson* ανέπτυξε το πρώτο *picocell*, σχεδιασμένο για εσωτερική χρήση, δίνοντας του το όνομα *RBS 6402* (βλέπε *Εικόνα 10*). Οι τεχνικές προδιαγραφές όριζαν, σύμφωνα με το πρότυπο *LTE*, μέγιστο όριο ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων τα 300 Mbps μέσω τεχνικών *CA* και γεωγραφική κάλυψη εντός του κτηρίου έως και πέντε (5) χιλιάδες τετραγωνικά μέτρα. Με σκοπό την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των συνδρομητών,

το μοντέλο αυτό ήταν σε θέση να υποστηρίξει πολλαπλά πρότυπα και με ευέλικτο τρόπο μπορούσε να λειτουργήσει σε δέκα (10) διαφορετικές συχνοτικές ζώνες [19].



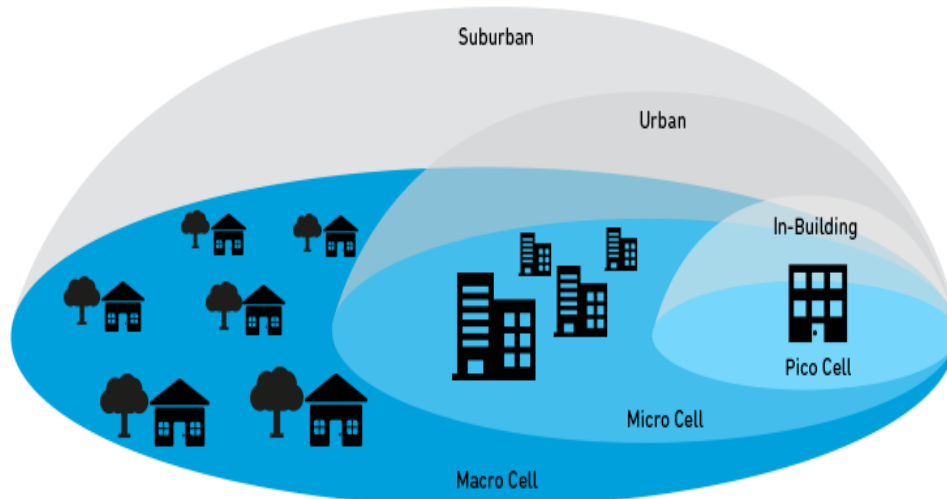
Εικόνα 10. Το πρώτο picocell (μοντέλο RBS 6402) για εσωτερικούς χώρους από την Ericsson [19]

2.3.3 Microcell

Το *microcell* είναι το μεγαλύτερο ως προς την περιοχή κάλυψης διαθέσιμο *small cell*. Η περιοχή που εξυπηρετεί συνήθως είναι μεγάλα σε έκταση συγκροτήματα, όπως π.χ. ένα ξενοδοχείο, ένας σταθμός τρένου ή ένα εμπορικό κέντρο. Το γεγονός αυτό αναπόφευκτα πολλές φορές οδηγεί σε μια σύγχυση μεταξύ των μονάδων *picocell* και *microcell* (λόγω ταυτόσημων γεωγραφικών συγκροτημάτων που καλύπτουν), με αποτέλεσμα το *microcell* να διαθέτει τεχνικές για διαχείριση της ισχύος εκπομπής ώστε να περιορίζεται το γεωγραφικό πλάτος κάλυψης. Η ακτίνα κάλυψης μιας μονάδας *microcell* ξεκινάει από τα διακόσια (200) μέτρα και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα δύο (2) χιλιόμετρα. Κάτι τέτοιο μεταφράζεται σε ενεργειακή ανάγκη λειτουργίας μεταξύ 1 – 10 W, ενώ το σύνολο των χρηστών που μπορούν να εκμεταλλευτούν τις παρεχόμενες υπηρεσίες της μονάδας κυμαίνονται από εκατό (100) έως και δύο (2) χιλιάδες [20].

Τις περισσότερες φορές, συνηθίζεται να τοποθετούνται προσωρινά *microcells* σε χώρους στους οποίους αναμένεται σύντομα να υπάρξει συνωστισμός χρηστών, ώστε να εξυπηρετηθούν επαρκώς όλοι οι παρευρισκόμενοι μέσω της αύξησης της χωρητικότητας του δικτύου. Ταυτόχρονα, η ευελιξία τους όσον αφορά τη διαχείριση ισχύος συμβάλει στη μείωση των παρεμβολών από γειτονικές μονάδες-κυψέλες, ενώ η μέθοδος της διαίρεσης μιας πυκνής από χρήστες γεωγραφικής περιοχής σε πολλαπλές μονάδες συμβάλει στη βελτίωση της φασματικής απόδοσης στο δίκτυο.

Στην *Εικόνα 11* φαίνονται κάπως πιο ξεκάθαρα οι *small cell* γεωγραφικές κατηγοριοποιήσεις που αναφέραμε παραπάνω. Θυμίζουμε πως ένα *femtocell* ενδείκνυται για εσωτερική χρήση (π.χ. εντός μιας οικίας), ένα *picocell* προορίζεται για εσωτερική/εξωτερική κάλυψη (π.χ. σταθμός τρένου) και ένα *microcell* βρίσκει εφαρμογή σε περιοχές ακόμα μεγαλύτερης ακτίνας (π.χ. συγκρότημα ξενοδοχείων).



Εικόνα 11. Αναπαράσταση ακτίνας κάλυψης macrocell και small cells [16]

Ο *Πίνακας 3* παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τεχνικές προδιαγραφές των *femtocells*, *picocells* και *microcells*, ενώ ταυτόχρονα συνοψίζει και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός σταθμού βάσης *macrocell*. Προφανώς, κάθε διαφορετικός τύπος *small cell* χαρακτηρίζεται από διαφορετική παρεχόμενη ισχύ εκπομπής, ακτίνα κάλυψης, εξυπηρέτηση συνδρομητών και προσφερόμενες υπηρεσίες (π.χ. διαχείριση ισχύος εκπομπής για ελαχιστοποίηση παρεμβολών). Κατά συνέπεια, η επιλογή του κατάλληλου *small cell* για εγκατάσταση στο υπάρχον δίκτυο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και η σωστή επιλογή του είναι κρίσιμης σημασίας για την αποδοτική λειτουργία του δικτύου και την απρόσκοπτη εξυπηρέτηση των χρηστών ενός υπέρ-πυκνού ετερογενούς δικτύου.

Πίνακας 3. Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών μονάδων small cell και macrocell [16]

Μονάδα	Ισχύς Λειτουργίας (W)	Ακτίνα Κυψέλης (km)	Πλήθος Χρηστών	Κάλυψη
Femtocell	0.001 – 0.25	0.010 – 0.1	1 – 30	Εσωτερική
Picocell	0.25 – 1	0.1 – 0.2	30 – 100	Εσωτερική/ Εξωτερική
Microcell	1 – 10	0.2 – 2	100 – 2000	Εσωτερική/ Εξωτερική
Macrocell	10 – 50	8 – 30	> 2000	Εξωτερική

2.4 Προγενέστερες Αρχιτεκτονικές Δικτύων

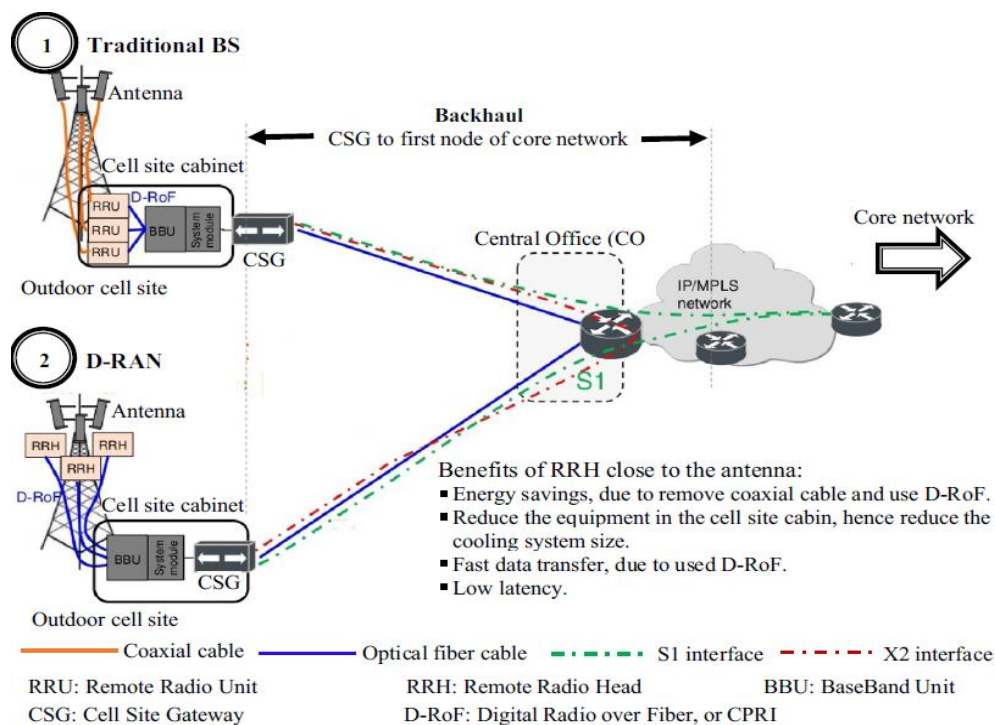
Στην παραδοσιακή προσέγγιση του δικτύου, η κάλυψη των χρηστών προερχόταν μέσω της συνένωσης πολλαπλών *macrocell* σταθμών βάσης, όπου κάθε σταθμός βρισκόταν στο κέντρο της κυψέλης που όριζε, επικοινωνούσε απευθείας με τους χρήστες και μετέφερε τις πληροφορίες και τα δεδομένα στο κεντρικό δίκτυο μέσω μιας *backhaul* σύνδεσης. Ταυτόχρονα, ο κάθε σταθμός βάσης αναγκαζόταν να “κουβαλάει” πάνω του όχι ένα, αλλά πολλαπλά συστήματα, όπως συστήματα διαχείρισης, ψύξης και εφεδρικής μπαταρίας και η αναπόφευκτη επαναχρησιμοποίηση των ίδιων συχνοτήτων από τους παρόχους λόγω έλλειψης πόρων μπορούσε να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα, όπως παρεμβολές με γειτονικές μονάδες κυψέλων. Άρα, η ανάγκη για διαφορετική προσέγγιση ως προς τη μελέτη και τοποθέτηση των σταθμών βάσης άρχισε σιγά σιγά να φαντάζει επιτακτική.

Από τον ερχομό των 3G Δικτύων και μετά, επήλθε και η εισαγωγή μιας ολοκαίνουργιας ως προς τη κυψελωτή μορφή των δικτύων αρχιτεκτονικής, υπό το όνομα *Distributed-Radio Access Network (D-RAN)*. Η προσέγγιση αυτή διαχωρίζει τη μονάδα που ήταν υπεύθυνη για τη λειτουργία των ραδιοσυχνοτήτων και ονομαζόταν *Remote Radio Head (RRH)* από την ψηφιακή λειτουργική μονάδα που ονομαζόταν *BaseBand Unit (BBU)*, καθώς η παραδοσιακή προσέγγιση τα συγκέντρωνε στην καμπίνα του σταθμού βάσης. Το πλεονέκτημα της τοποθέτησης του *RRH* στην κορυφή του σταθμού βάσης (δηλαδή πολύ κοντά στην κεραία του) είναι πως παρατηρείται δραστηκή μείωση της εξασθένισης του μεταδιδόμενου και λαμβανόμενου ραδιοσήματος, αφού δεν χρειάζεται πια το σήμα να διατρέχει το ομοαξονικό καλώδιο που ενώνει την καμπίνα του σταθμού με την κεραία του, με τις όποιες εξασθενίσεις σήματος αυτό προσθέτει. Η επιλογή αυτή μεταφράζεται σε βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, αφενός λόγω της απουσίας ομοαξονικών καλωδίων και αφετέρου λόγω του γεγονότος ότι για τη μετάδοση των ψηφιακών σημάτων βασικής ζώνης στα *RRH* χρησιμοποιείται η τεχνολογία *Digital Radio over Fiber (D-RoF)*. Η τεχνολογία αυτή συνδέει τα *RRH* και *BBU* μέσω οπτικών ινών, προσφέροντας ευελιξία στην τοποθέτησή τους και ταχύτατη μετάδοση σήματος χωρίς αποσβέσεις.

Έως ώρας, δεν έχουμε δει καμία προσέγγιση να έρχεται χωρίς μειονεκτήματα και η παραπάνω αρχιτεκτονική δυστυχώς δεν αποτελεί εξαίρεση. Ναι μεν, η προσέγγιση *D-RAN* όπως είδαμε τοποθετεί τα *RRH* κοντά στην κεραία του σταθμού και άρα επωφελομάστε από εξοικονόμηση ενέργειας, από μεταφορά δεδομένων σε πολύ υψηλές ταχύτητες, από χαμηλό χρόνο απόκρισης και σχεδόν μηδαμινές αποσβέσεις στην ισχύ του σήματος και από μικρότερες ανάγκες χωρητικότητας στην καμπίνα του σταθμού. Αλλά η προβληματική πλευρά κρύβεται στην καμπίνα του σταθμού βάσης και αυτό επειδή η μονάδα *BBU* παραμένει εντός της καμπίνας. Κάθε σταθμός βάσης εξυπηρετεί έναν αριθμό χρηστών, οι οποίοι βρίσκονται πολλές φορές σε κίνηση και άρα υπάρχουν χρονικές στιγμές στις οποίες μπορεί η ανάγκη για πόρους από το σταθμό να είναι μετριασμένες λόγω έλλειψης χρηστών. Ο σταθμός βάσης όμως δεν είναι σε θέση να διαμοιραστεί τους διαθέσιμους πόρους του με άλλους σταθμούς βάσης που μπορεί να χρειαστεί τις ίδιες χρονικές στιγμές να ανταπεξέλθουν σε αυξημένο αριθμό χρηστών στη δική τους ακτίνα κάλυψης. Ως αποτέλεσμα, οι ελεύθεροι πόροι κάθε σταθμού βάσης παραμένουν ανεκμετάλλευτοι, γεννώντας την

ανάγκη για την ανάπτυξη διαφορετικής αρχιτεκτονικής δικτύου, που προφανώς θα πρέπει να ακολουθεί μια προσέγγιση που θα εκμεταλλεύεται βέλτιστα τους δικτυακούς πόρους και θα μπορεί να ωθεί τους σταθμούς βάσης σε αποδοτικότερη λειτουργικότητα σε περιπτώσεις αναμονής (*idle mode*).

Στην *Εικόνα 12* απεικονίζονται τόσο η παραδοσιακή προσέγγιση ως προς τη δικτυακή αρχιτεκτονική (*Traditional BS*), όσο και η αρχιτεκτονική που συνόδεψε τα Δίκτυα 3G (*D-RAN*). Όπως βλέπουμε στην παραδοσιακή προσέγγιση, η μονάδα *Remote Radio Unit (RRU)* βρισκόταν στην καμπίνα μαζί με τη *BBU* μονάδα και μεταξύ τους επικοινωνούσαν με οπτικές ίνες (τεχνολογία *D-RoF*), ενώ για την επικοινωνία με την κεραία χρησιμοποιούνταν ομοαξονικά καλώδια για τη μετάδοση του σήματος. Στην *D-RAN* αρχιτεκτονική, οι κεφαλές *RRH* τοποθετούνται (για τους λόγους που προαναφέραμε) κοντά στην κεραία του σταθμού, με την επικοινωνία *RRH* και *BBU* να συνεχίζεται να επιτελείται μέσω των οπτικών ινών της τεχνολογίας *D-RoF*, χωρίς όμως να υπάρχουν απώλειες στο σήμα, αφού η προσέγγιση αυτή δεν προβλέπει τη χρησιμοποίηση ομοαξονικών καλωδίων. Και οι δύο προσεγγίσεις συνδέονται μέσω της πύλης (*gateway*) στον πρώτο δικτυακό κόμβο του κεντρικού δικτύου που είναι το κεντρικό δίκτυο (*Central Office, CO*) (*backhaul* σύνδεση) και έπειτα στο κεντρικό δίκτυο.



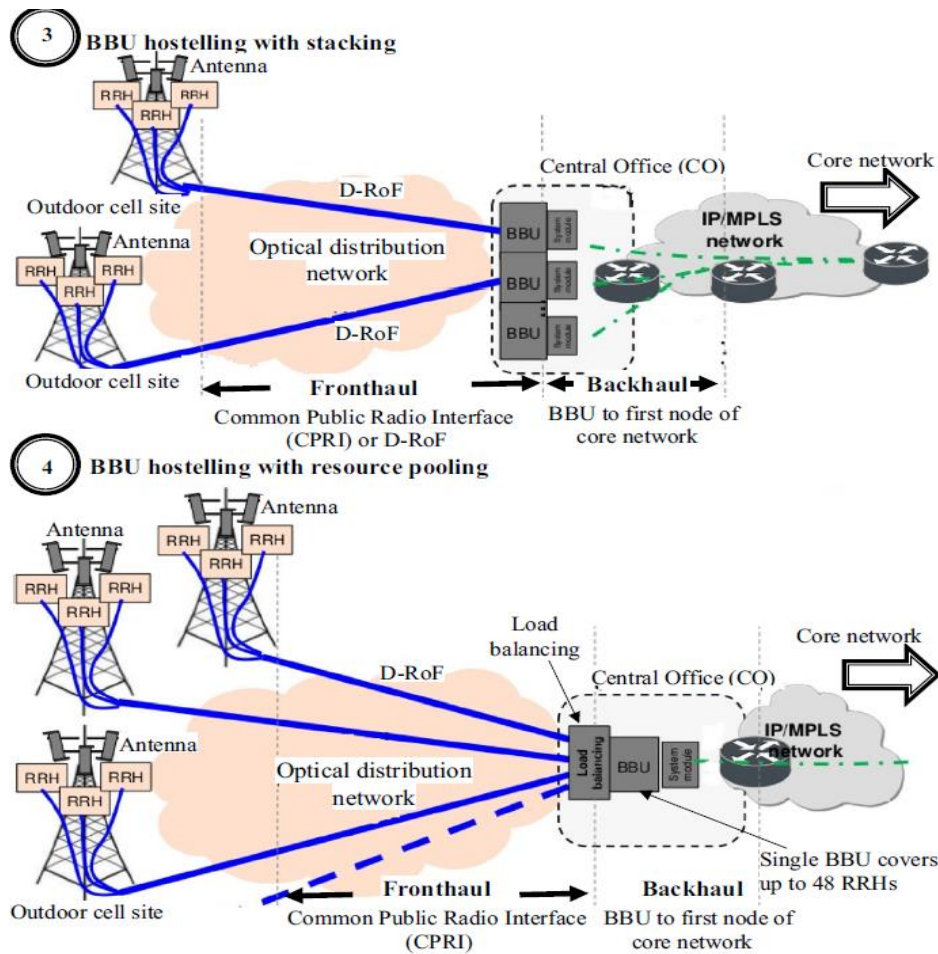
Εικόνα 12. Παραδοσιακή Αρχιτεκτονική και D-RAN Προσέγγιση [1]

2.5 Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G

Η αρχιτεκτονική δικτύου που έχει προταθεί για τα Δίκτυα 5G ονομάζεται *Cloud-Radio Access Network (C-RAN)*, αν και πολλές φορές ο ορισμός δίνεται και ως *Centralized-Radio Access Network*. Εμφανίστηκε για πρώτη φορά εννιά (9) χρόνια πριν (το 2010), όπου προτάθηκε στην Κίνα από το Ερευνητικό Ινστιτούτο Κινητής Τηλεφωνίας της Κίνας (*China Mobile Research Institute*) και είναι σε θέση να υποστηρίξει όχι μόνο τα δίκτυα επόμενης γενιάς, αλλά και τα ψηφιακά κυψελωτά δίκτυα προηγούμενων γενεών (*backwards compatibility*). Το όνομα προέκυψε από το C-RAN σύστημα, το οποίο βασιζόταν σε τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ήταν “*Clean, Centralized processing, Collaborative radio, and a real-time Cloud Radio Access Network*”, δηλαδή Καθαριότητα, Κεντρική Επεξεργασία, Συνεργασία ραδιοσυχνότητων και ένα Δίκτυο Πρόσβασης στο Σύννεφο πραγματικού χρόνου [21].

Η αρχιτεκτονική C-RAN ορίζει ένα ομαδοποιημένο δίκτυο στο οποίο οι μονάδες BBU πια συγκεντρώνονται σε ένα ασύρματο σύννεφο (*wireless cloud*) στο κεντρικό γραφείο, ενώ το σύνολο των κεφαλών RRH διαμοιράζονται σε διακριτούς σταθμούς βάσης. Η ομαδοποίηση των BBU προσφέρει επακριβώς τη δυνατότητα που δε μπορούσε να προσφέρει η C-RAN αρχιτεκτονική, δηλαδή τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας των μονάδων BBU, και μάλιστα με χαμηλότερη καθυστέρηση και ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Για να καταφέρουν οι κεφαλές RRH να συνδεθούν με το ασύρματο σύννεφο, απαιτείται ένα *fronthaul* δίκτυο με καλωδίωση οπτικών ινών (τεχνολογία *D-RoF*) ή πρότυπο *Common Public Radio Interface (CPRI)*. Ουσιαστικά δηλαδή, η συνολική προσπάθεια για συγκέντρωση όλων των μονάδων σε ένα κεντροποιημένο δίκτυο επιτρέπει σε πολλαπλές μονάδες RRH να συνδέονται στη συλλογή με τα BBU και παράλληλα τα BBU να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους με υψηλές ταχύτητες (τουλάχιστον μεγαλύτερες από τα 10 Gbit/s).

Η αρχιτεκτονική C-RAN προσφέρει και δυνατότητες εικονικοποίησης πραγματικού χρόνου, απόρροια του γεγονότος πως η ανάπτυξη είναι βασισμένη πάνω σε ανοικτή πλατφόρμα (*open platform*). Πιο συγκεκριμένα, η υλοποίηση του συνόλου των BBU δεν επιτελείται όπως παλαιότερα πάνω σε ιδιόκτητο υλικό που προσέφεραν οι προμηθευτές. Η ανάπτυξη γίνεται πάνω σε ανοικτό υλικό και με μονάδες διεπιφάνειας που χειρίζονται καλωδιώσεις οπτικών ινών επιτρέπουν εικονικοποίηση σε πραγματικό χρόνο με απώτερο σκοπό τη δυναμική διαχείριση των δικτυακών πόρων και τον αποδοτικό διαμοιρασμό τους στους σταθμούς βάσης.



Εικόνα 13. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική Δικτύου 5G [1]

Η επιλογή της *C-RAN* αρχιτεκτονικής ως την κυρίαρχη αρχιτεκτονική για τα 5G δίκτυα προσφέρει μια πληθώρα πλεονεκτημάτων. Παρακάτω, παρουσιάζουμε τα σημαντικότερα εξ' αυτών.

- Ενσωμάτωση της τελευταίας έκδοσης του προτύπου *CPRI*.
- Ενσωμάτωση της τεχνικής Πολυπλεξίας Διαχωρισμού Μήκους Κύματος (*Wavelength-Division Multiplexing, WDM*), μιας ευρέως διαδεδομένης τεχνολογίας που προσφέρει τη δυνατότητα πολυπλεξίας (πολλαπλασιασμού) πολλαπλών σημάτων οπτικών φορέων (*optical carrier*) πάνω σε μια μοναδική οπτική ίνα πάνω σε διαφορετικά μήκη κύματος. Ως αποτέλεσμα, αυξάνεται η χωρητικότητα και υποστηρίζεται η αμφίδρομη μετάδοση και λήψη πληροφορίας μέσω πολλαπλών ινών, συνδεδεμένες σε μια δέσμη [22].
- Ενσωμάτωση επεκτάσεων του *WDM*, όπως της *Coarse Wavelength-Division Multiplexing (CWDM)* τεχνολογίας πολυπλεξίας, η οποία επιτρέπει μετάδοση με μητροπολιτική κάλυψη, χρησιμοποιώντας δεκαοχτώ (18) κανάλια με μήκη κύματος από 1270 nm έως και 1610 nm μέσω λέιζερ χαμηλού κόστους. Η δεύτερη ενσωματωμένη επέκταση ονομάζεται *Dense Wavelength-Division*

Multiplexing (DWDM), η οποία τεχνολογία μεταδίδει περισσότερα δεδομένα από την *CWDM* λόγω μικρής απόστασης μεταξύ των καναλιών (περίπου 0.8 – 0.4 nm), όμως τα μήκη κύματος που παρέχει μεταξύ 1530 nm και 1625 nm είναι πολύ ακριβότερα λόγω της απαίτησης να υπάρχουν πιο περίπλοκοι και αποδοτικοί δέκτες [22].

- Ενσωμάτωση Οπτικού Δικτύου Μεταφοράς (*Optical Transport Network, OTN*⁷) και Παθητικού Οπτικού Δικτύου (*Passive Optical Network, PON*⁸).
- Υποστήριξη *mm-waves* για μετάδοση σημάτων βασικής ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις.
- Εφαρμογή τεχνολογίας Κέντρου Δικτύου Δεδομένων (*Data Centre Network*), προσφέροντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, χαμηλούς χρόνους απόκρισης, ασφάλεια στο δίκτυο που περιβάλλει το σύνολο των *BBU*.

2.6 Η πρόκληση των παρεμβολών

Έως ώρα, ξέρουμε πως η τοποθέτηση σημείων πρόσβασης *small cells* στο δίκτυο προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα, τα σημαντικότερα των οποίων παραθέτουμε παρακάτω:

- Η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου είναι αποτέλεσμα της προσθήκης *small cells* στο δίκτυο σε σημεία που η κάλυψη των *macrocells* ήταν κάκιστη προς τους χρήστες.
- Βελτιώνεται η φασματική απόδοση (*SE*) του δικτύου και οι χρήστες έχουν κατά μέσο όρο πιο ισχυρή σύνδεση (λόγω βελτιωμένου *Signal-to-Interference-plus-noise ratio, SINR*) ως προς το σταθμό με τον οποίο συνδέονται, άρα και αυξημένες ταχύτητες.
- Η λύση της προσθήκης πολλαπλών *small cells* είναι σαφώς οικονομικότερη, πιο ευέλικτη και πιο φιλική προς το περιβάλλον από την προσθήκη επιπλέον *macrocells* για καλύτερη κάλυψη δικτύου.

⁷ Ένα Οπτικό Δίκτυο Μεταφοράς μπορεί να οριστεί ως η ομαδοποίηση πολλών Στοιχείων Οπτικού Δικτύου (*Optical Network Elements, ONE*) που συνδέονται μέσω οπτικών ινών και υποστηρίζουν σημαντικότερες για το δίκτυο λειτουργίες, όπως λειτουργία μεταφοράς, πολυπλεξίας, μεταγωγής, διαχείρισης, ελέγχου και βιωσιμότητας των καναλιών [23].

⁸ Ένα Παθητικό Οπτικό Δίκτυο προσφέρει μέσω της προσέγγιση ενός σημείου προς πολλαπλά σημεία τη δυνατότητα σε μια και μόνο οπτική ίνα να χρησιμοποιείται σε πολλαπλούς τερματικούς κόμβους του δικτύου και αποτελεί μια αρκετά διαδεδομένη λύση για εξυπηρέτηση του τελικού καταναλωτή [24].

- Η σύνδεση μιας ασύρματης κινητής συσκευής σε κοντινή μονάδα *small cell* επιφέρει μειωμένη κατανάλωση και κατά συνέπεια, αυξημένη διάρκεια ζωής μπαταρίας της συσκευής αυτής.

Όμως, το κυριότερο μειονέκτημα που ακολουθεί οποιαδήποτε μορφή κυψέλης σε ένα δίκτυο αναμφισβήτητα είναι οι παρεμβολές.

2.7 Ανασκόπηση Ερευνητικής Περιοχής

Δεν χωράει αμφιβολία πως η έλευση των *small cells* στα ετερογενή δίκτυα επόμενης γενιάς προσελκύουν το ερευνητικό ενδιαφέρον με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους προς όφελος τόσο των παρόχων, όσο και των τελικών καταναλωτών. Κατά συνέπεια, με βάση κυρίως τα όσα αναπτύξαμε στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού, θα επιχειρήσουμε να κάνουμε μια ανασκόπηση της ερευνητικής περιοχής που καλύπτει την αποδοτική εγκατάσταση των *small cells* σε ετερογενή δίκτυα.

Γνωρίζουμε πως είναι προς όφελός μας τα *small cells* να τοποθετούνται κοντά στις άκρες της ακτίνας κάλυψης του σταθμού βάσης *macrocell* για να συμπληρώσουν τα κενά που δημιουργούνται από την κάλυψη του κεντρικού σταθμού βάσης και να προσφέρουν βελτιωμένη κάλυψη, ταχύτητες και εμπειρία στον τελικό καταναλωτή. Η βέλτιστη τοποθέτηση των *small cells* στο ήδη υπάρχον δίκτυο, όπως θα δούμε στις επόμενες παραγράφους, έχει μελετηθεί σε βάθος, με τους συγγραφείς των επιστημονικών εργασιών να βασίζονται στην πλειοψηφία τους σε διαφορετικές μετρικές,

Στην εργασία που παρουσιάζεται στο [26], οι συγγραφείς ερεύνησαν το πρόβλημα της αποδοτικής τοποθέτησης *small cells* στο δίκτυο, επιδιώκοντας να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των χρηστών με όσο το δυνατόν οικονομικότερο τρόπο. Αφού οι συγγραφείς κατάφεραν στο πρώτο σκέλος της εργασίας να μοντελοποιήσουν το ετερογενές δίκτυο, στη συνέχεια ανέπτυξαν μηχανισμούς οι οποίοι στόχο είχαν τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης (*SE*) στο δίκτυο, σε συνδυασμό με την εξάλειψη πιθανών παρεμβολών από γειτονικούς σταθμούς *small cells*. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απέφεραν σημαντικότερες μειώσεις στη λειτουργική πολυπλοκότητα, αλλά και στην ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου.

Άλλες επιστημονικές έρευνες έδωσαν έμφαση στις ταχύτητες που παρέχονται στους τελικούς χρήστες του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία στο [27] προτείνει έναν αλγόριθμο τοποθέτησης *small cells* χαμηλής ισχύος σε κόμβους (*Low Power Node, LPN*), ο οποίος προϋποθέτει γνώση της ισχύος του σήματος, της διαθεσιμότητας πόρων των *macrocell* σταθμών βάσης και του πλήθους χρηστών στο δίκτυο και καταφέρνει να καλύψει σχεδόν τέλεια ολόκληρη την περιοχή χρηστών, αλλά και να προσφέρει τουλάχιστον 50% καλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων συγκριτικά με έναν τυχαίο *LPN* μηχανισμό.

Στην εργασία στο [28], μελετήθηκε αναλυτικά η βέλτιστη εγκατάσταση σταθμών *picocell* σε ετερογενή δίκτυα με *hotspots*. Ο μηχανισμός που αναπτύχθηκε

βασίζεται σε ευέλικτες τεχνικές διαχωρισμού συχνοτήτων και συσχέτιση χρηστών και σταθμών πρόσβασης μέσω του αντιλαμβανόμενου *SINR* και υπόσχεται βελτιώσεις στις ταχύτητες που βλέπουν οι χρήστες του ετερογενούς δικτύου.

Οι συγγραφείς στο [29], βασιζόμενοι σε ένα στοχαστικό γεωμετρικό μοντέλο που ανέπτυξαν με παράγοντα τη μετρική του *SINR*, προσομοίωσαν ένα αρκετά πυκνό δίκτυο χρηστών. Τα αποτελέσματα διαφορετικών τοπολογιών τοποθέτησης συνολικά έδειξαν πως οι ταχύτητες των χρηστών συγκλίνουν σε μια μέση συμπεριφορά και εξαλείφεται το χάσμα μεταξύ επιδόσεων χρηστών εντός ενός πυκνού δικτύου. Οι συγγραφείς κατέληξαν πως από οικονομικής άποψης, η τυχαία εγκατάσταση ευέλικτων και οικονομικών σημείων πρόσβασης (*APs*) από *small cells* μπορεί να προβεί αποδοτική, εάν και εφόσον οι απώλειες στις επιδόσεις των *small cells* αντισταθμιστούν από μηχανισμούς/αλγορίθμους διαχείρισης, εξαλείφοντας τις απαιτήσεις για αναλυτική μελέτη ως προς την τοποθέτηση των *small cells*.

Η εργασία των συγγραφέων στο [30] χρησιμοποίησε τρία (3) διαφορετικά σενάρια οικονομικής εγκατάστασης *small cells* στο δίκτυο. Το πρώτο σενάριο προέβλεπε την τυχαία τοποθέτησή τους στο υπάρχον δίκτυο, το δεύτερο εμπεριείχε την εγκατάστασή τους σε κοντινές αποστάσεις από τους χρήστες που είχαν τη χειρότερη κάλυψη δικτύου (με βάση το ληφθέν σήμα του χρήστη αυτού από το σταθμό βάσης *macrocell*) και η τρίτη περίπτωση αφορούσε τοποθέτηση επακριβώς στα όρια της περιοχής κάλυψης των *macrocell* σταθμών. Μέσω των πειραμάτων εξομοίωσης, παρατηρήθηκε πως από τη μια πλευρά, ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών που συνδέονταν σε *small cells* επέφερε και βελτιώσεις στο μέσο όρο επιδόσεων των χρηστών του δικτύου, από την άλλη πλευρά όμως οι χρήστες έρχονταν αντιμέτωποι με παρεμβολές μεταξύ των υφιστάμενων *small cells* και κατά συνέπεια, δυσχεραίνεται η κάλυψη του δικτύου για το 10% των καλύτερων (ως προς το λαμβανόμενο σήμα) και το 10% των χειρότερων (ομοίως) χρηστών. Εν τέλει, ως καλύτερη προσέγγιση αποδείχτηκε η προσέγγιση η οποία τοποθετεί τα *small cells* επακριβώς στα όρια της περιοχής κάλυψης των *macrocell* σταθμών.

Προφανώς, δεν έχει συγκεντρωθεί όλο το επιστημονικό ενδιαφέρον της εγκατάστασης *small cells* σε ετερογενή δίκτυα μονάχα πάνω στην αποδοτικότερη τοποθέτησή τους στο δίκτυο. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς της εργασίας στο [31] πήραν ως δεδομένη την ύπαρξη σημείων πρόσβασης *small cell* στο δίκτυο σε συνδυασμό με σταθμούς βάσης *macrocell*. Βασιζόμενοι στο γεγονός πως ενώ η ενεργειακή κατανάλωση ενός *macrocell* είναι δυναμική και εξαρτάται άμεσα από το πλήθος χρηστών που εξυπηρετεί, η κατανάλωση του *small cell* είναι σταθερή και ανεξάρτητη των συνδεδεμένων χρηστών του, ανέπτυξαν ένα δυναμικό μηχανισμό διαχείρισης ισχύος στο δίκτυο. Ο μηχανισμός αυτός έχει δικαίωμα δυναμικής διαχείρισης της κατάστασης λειτουργίας των *small cells* μέσω εναλλαγών μεταξύ ενεργής λειτουργίας (*on mode*) και τερματισμού λειτουργίας (*off mode*), επιλέγοντας να απενεργοποιεί τα *small cells* που βρίσκονται πιο κοντά στα *macrocells*. Προς αποφυγή τυχόν αποτυχιών εξυπηρέτησης χρηστών εκτός περιοχής κάλυψης των *small cells*, τα *macrocells* θα πρέπει να συνεχίσουν να είναι ανοικτά και να λειτουργούν συνεχόμενα. Συνολικά, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι το συνολικό δίκτυο επωφελείται ενεργειακά από τον προτεινόμενο δυναμικό μηχανισμό.

UPLINK/DOWNLINK

3.1 Το πρόβλημα των παρεμβολών

Σε οποιοδήποτε ασύρματο σύστημα τηλεπικοινωνιών (και ειδικότερα σε συστήματα *LTE*), υπάρχουν τριών ειδών τύποι παρεμβολών οι οποίοι έχουν άμεση και σημαντικότερη επίδραση στη συνολική συμπεριφορά και επίδοση του δικτύου [24].

Αρχικά, η πιο εύκολα ανιχνεύσιμη μορφή παρεμβολής είναι η παρεμβολή από το θόρυβο. Είναι πρακτικά αδύνατο να κατασκευαστεί τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που να χαρακτηρίζεται από μηδενικές απώλειες από θόρυβο και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, οι προσπάθειες δεν επικεντρώνονται στην κατασκευή αθόρυβου συστήματος, αλλά στην ανάπτυξη αποδοτικών αλγορίθμων και μηχανισμών ελαχιστοποίησης παρεμβολών.

Η δεύτερη μορφή παρεμβολών που μπορεί να συναντήσουμε είναι οι παρεμβολές μεταξύ συστημάτων (*Intersystem interference*). Δημιουργούνται από γειτονικά δίκτυα τα οποία λειτουργούν κάτω από το ίδιο πρότυπο δικτύου (π.χ. *LTE*) και αναμίβωλα, απαιτείται προσεκτικός έλεγχος στην επιλογή των κυρίων μετρικών του εκάστοτε δικτύου (π.χ. καθορισμός ζωνών συχνοτήτων, γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης) κατά τη διάρκεια της σχεδίασης του δικτύου.

Η επόμενη κατηγορία παρεμβολών που μπορεί να συναντήσουμε είναι οι παρεμβολές εντός του ίδιου του συστήματος (*Intrasystem interference*). Οι παρεμβολές εντός του τηλεπικοινωνιακού δικτύου είναι ο κυριότερος παράγοντας υποβάθμισης της απόδοσης του δικτύου και η μείωσή τους θα πρέπει να αποτελεί πρωταρχικό στόχο κατά το σχεδιασμό του δικτύου.

Οι παραπάνω μορφές παρεμβολών παρουσιάζονται στα παρακάτω υποκεφάλαια, ανάλογα με το διαχωρισμένο δίκτυο στο οποίο θα ανήκουν.

3.1.1 Παρεμβολές στο Downlink

Εξ' ορισμού, το *downlink* (*DL*) στις ψηφιακές τηλεπικοινωνίες ορίζεται ως το μονοπάτι μετάδοσης που ξεκινάει από το σταθμό βάσης και καταλήγει στη κινητή συσκευή. Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα έγκειται στις παρεμβολές από γειτονικές κυψέλες στην ίδια γεωγραφική περιοχή κάλυψης. Δηλαδή, μια οποιαδήποτε κινητή συσκευή (*User Equipment, UE*) που βρίσκεται οριακά πάνω στις άκρες κάλυψης του σταθμού βάσης της, δέχεται εξίσου ισχυρό σήμα και από τον εκάστοτε γειτονικό σταθμό βάσης (κάνουμε τη σύμβαση πως όλοι οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν στην ίδια ισχύ, χρησιμοποιώντας τον ίδιο αριθμό από διαθέσιμους φασματικούς πόρους, τα λεγόμενα *Resource Blocks, RBs*). Αυτό προφανώς προϋποθέτει πως ο

γειτονικός σταθμός βάσης εκείνη τη δεδομένη χρονική στιγμή επιχειρεί και αυτός να μεταδώσει κάτω από το ίδιο πρωτόκολλο δεδομένα προς το *UE*, αλλιώς δεν θα υπάρχει παρεμβολή από αυτό το γειτονικό σταθμό.

Επιπρόσθετα, η απόσταση μεταξύ *UEs* γειτονικών περιοχών κάλυψης είναι μέγιστης σημασίας στο φαινόμενο των παρεμβολών. Στην περίπτωση που ακολουθείται το πρωτόκολλο *Time Division Duplex (TDD)*⁹, εξαλείφονται τυχόν παρεμβολές μεταξύ της λήξης μετάδοσης σε ένα *UE* από την έναρξη μετάδοσης σε κάποιο άλλο *UE*, καθώς το *TDD* ορίζει τεχνικές διαχείρισης μέγιστου χρόνου ταξιδιού (*Round Trip Time, RTT*) μεταξύ σταθμού βάσης και *UE*. Όμως, υπάρχει πάντα μια μικρή πιθανότητα οι αυξομειώσεις στις αποστάσεις κινητών συσκευών γειτονικών κελιών να δημιουργήσουν αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές που αντιστοιχούν στον *TDD* συγχρονισμό μέγιστου *RTT*, δημιουργώντας κατ' επέκταση ανεπιθύμητες παρεμβολές μεταξύ γειτονικών συσκευών. Το γεγονός αυτό όμως στις περισσότερες περιπτώσεις θεωρείται οριακά αμελητέο, αφού η τυχόν απόσταση μεταξύ τέτοιων γειτονικών *UEs* είναι ήδη αρκετά μεγάλη, άρα και το παραγόμενο σήμα παρεμβολές είναι αρκετά εξασθενημένο, ώστε να αποτελέσει σοβαρή απειλή στις επιδόσεις του δικτύου.

Εάν πάμε ένα επίπεδο χαμηλότερα από τα *RBs*, τότε μπορούμε να παρατηρήσουμε παρεμβολές στους φορείς (*carriers*) των *RBs*. Το φαινόμενο αυτό είναι ανεξάρτητο από το εάν οι φορείς ακολουθούν το πρωτόκολλο *Frequency Division Duplex (FDD)*¹⁰, ή το *TDD*, ή οποιοδήποτε συνδυασμό τους. Λάθος προγραμματισμός των *carriers* ενός σταθμού βάσης από τον εκάστοτε πάροχο μπορεί να οδηγήσει σε μεταδιδόμενα σήματα διαφορετικής ισχύος και κατά συνέπεια σε ανεπιθύμητες παρεμβολές, παρεμβολές οι οποίες μπορούν να καταπολεμηθούν μόνο μέσω μηχανισμών *handover* οι οποίοι αναθέτουν το ισχυρότερο *carrier* στο *UE*.

3.1.2 Παρεμβολές στο Uplink

Στην αντίπερα όχθη του δικτύου, το *uplink (UL)* αναφέρεται στη μετάδοση δεδομένων από το *UE* απευθείας στο σταθμό βάσης της εκάστοτε κυψέλης. Στο *UL*, τα πράγματα σε γενικές γραμμές ταυτίζονται με τα όσα είδαμε και στο *DL*. Πιο συγκεκριμένα, οι παρεμβολές δημιουργούνται από μεταδόσεις γειτονικών *UEs* που ακολουθούν την *TDD* προσέγγιση, αλλά με ελλιπή συγχρονισμό μεταξύ των κελιών. Όταν η απόσταση μεταξύ δυο *UEs* γειτονικών κελιών υπερβαίνει τη μέγιστη αποδεκτή απόσταση που αντιστοιχεί στο μέγιστο αποδεκτό *RTT*, τότε δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ της έναρξης μετάδοσης μιας συσκευής και της λήξης σύνδεσης της συσκευής ενδιαφέροντος στη γειτονική κυψέλη. Ταυτόχρονα, στη πλειοψηφία των

⁹ Η τεχνολογία *TDD* αποτελεί μορφή αμφίδρομης επικοινωνίας (*full duplex*) στα δίκτυα όπου χρησιμοποιείται ενιαίο φάσμα συχνοτήτων για αποστολή και λήψη, το οποίο διαμοιράζεται σε εναλλασσόμενες χρονικές θυρίδες (*time slots*) και άρα η αποστολή και η λήψη εναλλάσσονται όσο περνάει ο χρόνος [32].

¹⁰ Η τεχνολογία *FDD* επίσης είναι μορφή αμφίδρομης επικοινωνίας, η οποία όμως χρησιμοποιεί δυο ανεξάρτητα φάσματα συχνοτήτων από δυο διαφορετικά κανάλια για αποστολή και λήψη δεδομένων [32].

περιπτώσεων, τα *UEs* χαρακτηρίζονται από αλγορίθμους μείωσης της ισχύος τους όταν βρίσκονται κοντά στις άκρες της γεωγραφικής κάλυψης του σταθμού βάσης και κατά συνέπεια, το δίκτυο δεν κινδυνεύει από μετάδοση παρεμβολών σε πολλά *RBs*.

Ομοίως και με την *DL* περίπτωση, ασχέτως *FDD-TDD* προσέγγισης, υπάρχουν παρεμβολές μεταξύ *carriers* γειτονικών κυψελών. Εάν δηλαδή το παραγόμενο σήμα ενός γειτονικού *UE* κάποιου *carrier* είναι αρκετά ισχυρότερο από αυτό του *UE* στην τωρινή κυψέλη συγκεκριμένου *carrier*, ο γειτονικός φορέας είναι σε θέση να μπλοκάρει το σήμα προς μετάδοση της γειτονικής του συσκευής. Μια τέτοια περίπτωση προϋποθέτει διαφορετικούς παρόχους δικτύου μεταξύ γειτονικών κελιών – αν ο πάροχος μεταξύ τους ήταν κοινός, η προσεκτική σχεδίαση και ανάπτυξη των μετρικών του δικτύου θα είχε προβλέψει τέτοιες περιπτώσεις παρεμβολών μέσω μηχανισμών *handover* ώστε το *UE* να συνδέεται στο ισχυρότερο *carrier*.

3.2 Η προσέγγιση μέχρι σήμερα

Όλες οι προγενέστερες γενιές δικτύων μέχρι και πριν τα *5G* Δίκτυα, ακολουθούσαν μια κοινή προσέγγιση όσον αφορά τη λειτουργικότητα των *DL* και *UL* επιπέδων του δικτύου, προσέγγιση η οποία αντιμετώπιζε το *DL* και το *UL* ως ένα ενιαίο ζεύγος (ή αλλιώς ένα ενιαίο σύνολο). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως για να συνδεθεί μια τυχαία κινητή συσκευή σε κάποιο σταθμό βάσης, η συσκευή αυτή αναγκαστικά θα έπρεπε να συνδεθεί και στο *DL* και στο *UL* με τον ίδιο σταθμό βάσης. Με τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα την εποχή εκείνη (δηλαδή από τα *1G* έως τα *4G* Δίκτυα), η συσχέτιση της συσκευής με τον ίδιο σταθμό ως προς τις διαθέσιμες *DL* και *UL* κατευθύνσεις μεταφραζόταν σε ένα βέλτιστο μηχανισμό συσχέτισης, καθώς η ισχυρότερη σύνδεση συσκευής και σταθμού ίσχυε αμφίδρομα [33].

Πιο συγκεκριμένα, η ομαδοποίηση των επιπέδων *DL* και *UL* επιφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Εξαλείφεται η ανάγκη για αποδοτικό συγχρονισμό και συνδεσιμότητα των σταθμών βάσης.
- Είναι ευκολότερο για τους παρόχους του δικτύου να αναλύσουν, να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν το λογικό επίπεδο, το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο μεταφοράς (του δικτύου).
- Η ομογενής μορφή του δικτύου είναι σαφώς απλούστερη, σε αντίθεση με την ετερογενή μορφή των *5G* υπέρ-πυκνών δικτύων, κάτω από την υπόθεση ότι οι *macrocell* σταθμοί βάσης εκπέμπουν σε σταθερή ισχύ.
- Κατά τις περιόδους λειτουργίας των *2G* μέχρι και τις αρχικές εκδόσεις των *3G* Δικτύων, η κίνηση των χρηστών σε γενικές γραμμές ήταν μοιρασμένη ισόποσα σε *DL* και *UL*. Όμως, από τα *3.5G* Δίκτυα και μετά, η εκθετική αύξηση στο φόρτο χρηστών του *DL* σε σχέση με το *UL* αναπόφευκτα

οδήγησε στη συγκέντρωση του ενδιαφέροντος σε ζητήματα συσχέτισης σε επίπεδο *DL*, δίχως την ανάγκη διαχωρισμού του δικτύου.

Η παραπάνω προσέγγιση παρέμεινε κυρίαρχη από τη στιγμή που πρωτοεισήχθησαν τα *1G* Δίκτυα μέχρι και τα *4G* Δίκτυα του σήμερα. Παρόλα ταύτα, νέες τάσεις σε καινοτόμες ιδέες γύρω από την ετερογενή αρχιτεκτονική των *5G* Δικτύων (π.χ. βλέπε *network densification*) οδήγησε σε αναθεώρηση των ήδη υπαρχόντων προσεγγίσεων, όπως του ομαδοποιημένου *DL/UL* και ως αποτέλεσμα, ο διαχωρισμός τους μέσω *Downlink/Uplink Decoupling (DUDe)* σε εντελώς ξεχωριστά ανεξάρτητα και αυτόνομα υπο-δίκτυα φαντάζει ως η πλέον επικρατέστερη λύση για τις ανάγκες των *5G* Δικτύων. Οι συγγραφείς του [34] μελέτησαν την τότε καινοτόμα *DUDe* προσέγγιση, ερευνώντας πιθανά οφέλη από τον πλήρη διαχωρισμό *DL* και *UL* σε δυο τελείως ξεχωριστά δίκτυα, κάτω από τελείως διαφορετικές αρχιτεκτονικές, μετρικές και μηχανισμούς αντιμετώπισης παρεμβολών. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα αναπτύξουμε λεπτομερώς τους λόγους για τους οποίους ο *DUDe* μηχανισμός θεωρείται ως η αποδοτικότερη προσέγγιση για τα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς.

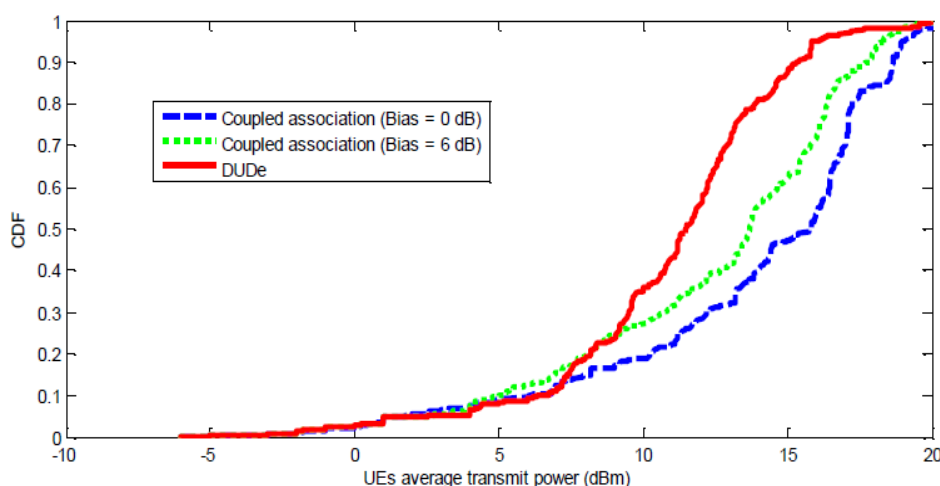
3.3 Πλεονεκτήματα Διαχωρισμού

Τα οφέλη που προκύπτουν από το διαχωρισμό του δικτύου προκύπτουν μέσα από προσεκτική μελέτη και από πειράματα εξομοίωσης, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στην εργασία [33]. Στο σύνολό τους, τα πλεονεκτήματα χωρίζονται σε πέντε (5) διαφορετικές ενότητες.

3.3.1 Αυξημένο SNR στο UL και μειωμένη ισχύς μετάδοσης

Εντός ενός ετερογενούς δικτύου που χαρακτηρίζεται από τη συμβίωση *macrocell* και *small cell* υποδομών κάτω από την ίδια κυψέλη, στην περίπτωση του *DL* δικτύου, ένας σταθμός βάσης *macrocell* εκπέμπει σε σαφώς μεγαλύτερη ισχύ από ότι ένα *small cell* και κατ' επέκταση, είναι σε θέση να καλύψει μια μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή από χρήστες σε σχέση με το *small cell*. Στην *UL* περίπτωση όπου η μετάδοση γίνεται από τα *UEs* στους σταθμούς, η ισχύ εκπομπής των *UEs* εΐθισται να είναι όμοια μεταξύ των συσκευών. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως ένα *UE* το οποίο έχει καλύτερο σήμα ως προς ένα *macrocell* παρά ως προς ένα *small cell* στην *DL* περίπτωση, ίσως να ήταν προτιμότερο να συνδεθεί με ένα *small cell* στην *UL* περίπτωση, εκμεταλλευόμενο τις μειωμένες απώλειες στο μεταδιδόμενο σήμα σε σχέση με μια πιθανή συσχέτιση με *macrocell*. Η μέχρι πρότινος προσέγγιση θα ανάγκαζε το *UE* να συνδεθεί στον ίδιο σταθμό βάσης και στις δυο περιπτώσεις (*DL/UL*). Όμως, η προτεινόμενη προσέγγιση έχει ως συνέπεια, αυτό το *UE* που θα συνδεθεί σε κοντινότερο σταθμό βάσης, να έχει καλύτερο *Signal-to-Noise Ratio (SNR)*, ενώ για δεδομένη τιμή *SNR*, μέσω μηχανισμών διαχείρισης ισχύος, είναι εφικτό να έχουμε μειώσεις στην ισχύ εκπομπής λόγω μειωμένης απόσβεσης σήματος, όλα αυτά πάντα στη περίπτωση που στο *UL*, το *UE* συνδεθεί με ένα κοντινότερο *small cell*, παρά με το *macrocell* της κυψέλης του (με δεδομένα από [35]).

Ο παραπάνω ισχυρισμός επιβεβαιώνεται όχι μόνο σε πρακτικό, αλλά και σε θεωρητικό επίπεδο. Στα πειράματα που διεξήχθησαν στην εργασία [33], τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων έδειξαν ότι ένας *DUDE* μηχανισμός αποτελεί την αποδοτικότερη προσέγγιση αναφορικά με τις μειώσεις σε ανάγκες για κατανάλωση ενέργειας από την πλευρά των *UEs* στην *UL* περίπτωση. Στη γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην *Εικόνα 14*, με μπλε χρώμα αναπαρίσταται η μέση ισχύς κατανάλωσης στα *UEs* σε δίκτυο με ενοποιημένα τα επίπεδα *DL/UL* χωρίς υποδομές *small cells*, με πράσινο χρώμα η μέση ισχύς κατανάλωσης με ενοποιημένα επίπεδα *DL/UL* αλλά με υποδομές *small cells* και με κόκκινο χρώμα οι επιδόσεις του *DUDE* μηχανισμού διαχωρισμού. Χρήστες που βρίσκονται κοντά στις ακριανές περιοχές κάλυψης του σταθμού *macrocell* απαιτείται να λειτουργούν κάτω από αυξημένη κατανάλωση ισχύος εκπομπής (όπως φαίνεται στο δεξιά μέρος του διαγράμματος) και κατά συνέπεια, μέσω της *DUDE* προσέγγισης, οι χρήστες του *UL* δικτύου (διαχωρισμένο από το *DL* πια) επωφελούνται από μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας στη συσκευή τους όταν βρίσκονται σε πολύ μακρινές αποστάσεις από το κεντρικό *macrocell* της κυψέλης.



Εικόνα 14. Κατανάλωση ενέργειας των UEs στο UL επίπεδο για τρία διαφορετικά σενάρια [33]

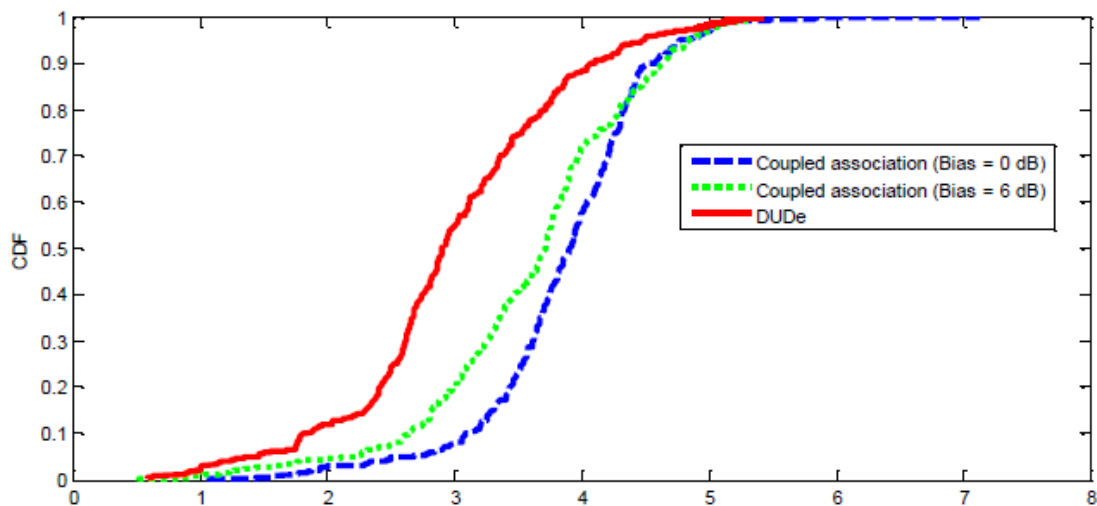
3.3.2 Μειωμένες παρεμβολές στο UL δίκτυο

Επιπρόσθετα, γνωρίζουμε ότι ο *DUDE* μηχανισμός επιτρέπει στις κινητές συσκευές του *UL* δικτύου να συσχετίζονται με σταθμούς βάσης, χρησιμοποιώντας σαφώς μειωμένη ισχύ εκπομπής για τη συσχέτιση συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο μηχανισμό. Από θεωρητικής άποψης, μείωση στην ισχύ εκπομπής μεταφράζεται και σε μείωση των παρεμβολών (τουλάχιστον για το *UL* δίκτυο).

Πέρα όμως από τις βελτιώσεις σε ενεργειακή κατανάλωση στις ασύρματες συσκευές, η ελευθερία της συσκευής να επιλέξει αυτή το αν θα συνδεθεί η όχι σε διαφορετικούς σταθμούς στα διαχωρισμένα δίκτυα είναι από μόνη της προς όφελος του συνολικού δικτύου. Όντως, αν αναλογιστούμε ότι στο *UL*, οι κακόβουλες παρεμβολές

εξαρτώνται από την απόσταση συσκευής-σταθμού και τις εκπομπές της συσκευής, ενώ στο *DL*, για συγκεκριμένη συσκευή, από την κατανάλωση του σταθμού προς συσχέτιση και την απόσταση από όλους τους υπόλοιπους σταθμούς βάσης, συνειδητοποιούμε το γεγονός ότι τα επίπεδα παρεμβολών διαφέρουν αισθητά στα δύο διαχωρισμένα δίκτυα. Κατά συνέπεια, η συσχέτιση σταθμών βάσης και ασύρματων συσκευών με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών από και προς τις δύο πλευρές είναι ύψιστης σημασίας για τη συνολική αποδοτικότητα του διαχωρισμένου δικτύου, εξαλείφοντας την απαίτηση μια συσκευή να συνδέεται με ένα σταθμό βάσης και στα δύο επίπεδα με βάση τις *DL* επιδόσεις.

Ο *DUDe* μηχανισμός μελετήθηκε ως προς πολλαπλές μετρικές στα πειράματα του [33]. Στην *Εικόνα 15*, με μπλε χρώμα αναπαρίσταται η *SINR* μετρική στα *UEs* σε δίκτυο με ενοποιημένα τα επίπεδα *DL/UL* χωρίς υποδομές *small cells*, με πράσινο χρώμα το *SINR* με ενοποιημένα επίπεδα *DL/UL* αλλά με υποδομές *small cells* και με κόκκινο χρώμα το μεταβαλλόμενο *SINR* μέσω *DUDe* μηχανισμού διαχωρισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν όντως πως αναφορικά με τη μετρική του *SINR* στο *UL* δίκτυο, η *DUDe* προσέγγιση προσφέρει μειώσεις στο *SINR* και άρα βελτιωμένες ταχύτητες στις συσκευές.



Εικόνα 15. Χρονικά Μεταβαλλόμενο *SINR* των συσκευών στο *UL* δίκτυο [33]

3.3.3 Αυξημένες ταχύτητες στο *UL* δίκτυο

Είναι αλήθεια το γεγονός πως τα *UEs* τα οποία αντιμετωπίζουν λιγότερες παρεμβολές μέσω του *DUDe* μηχανισμού έχουν αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων εντός του δικτύου και μπορούν να εκμεταλλευτούν την ελευθερία που έχουν ως προς την επιλογή σταθμού στο *UL* δίκτυο. Όντως, η ταυτόχρονη μείωση των παρεμβολών, σε συνδυασμό με την αύξηση της επιθυμητής ισχύος του σήματος οδηγεί σε βελτίωση (δηλαδή αύξηση) του *SINR* και κατά συνέπεια, σε αύξηση των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων από τα *UEs* στους σταθμούς. Με τη σειρά του, ένας αυξημένος

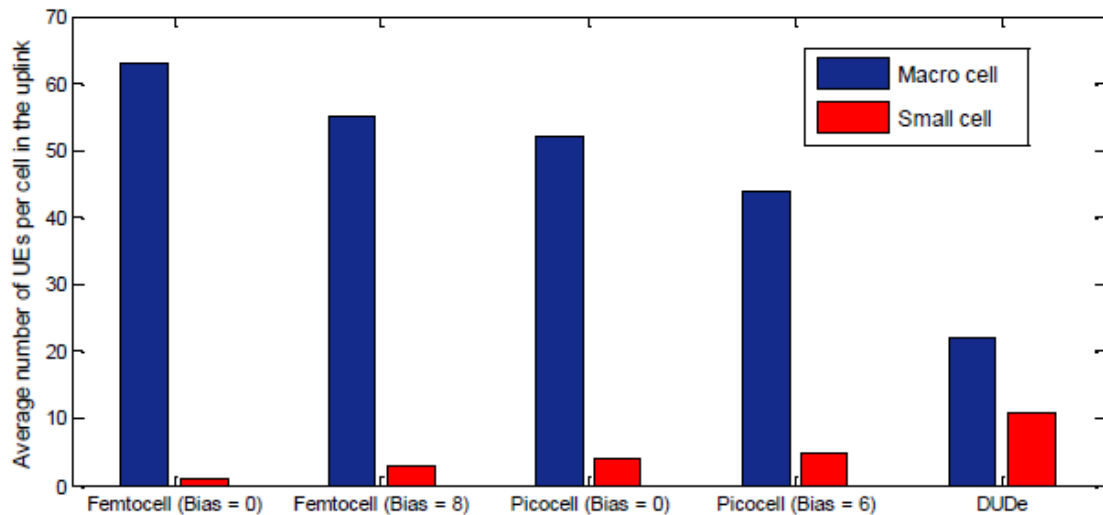
ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μεταφράζεται και σε αύξηση της φασματικής απόδοσης (*SE*) στο δίκτυο.

Σε επιστημονικό υπόβραθρο, υπάρχουν αρκετές εργασίες που μελέτησαν πιθανές βελτιώσεις στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων των συσκευών του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς των [34] και [36] κατέληξαν σε πολύ συγκεκριμένα αποτελέσματα αναφορικά με τα ποσοστά βελτίωσης των ταχυτήτων χρησιμοποιώντας τεχνικές αντιμετώπισης παρεμβολών, κυρίως λόγω της βελτίωσης της ποιότητας του καναλιού και της αποδοτικότερης κατανομής φόρτου στο δίκτυο μέσω υποδομών *small cells* και μηχανισμών *DUDE*. Με τις αρχικές ενδείξεις των παραπάνω ανεξάρτητων εργασιών να φανερώνουν πιθανές αυξήσεις στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξεως του 100% - 200%, η στροφή του επιστημονικού ενδιαφέροντος προς ακόμη αποδοτικότερες μορφές *DUDE* μοιάζει τόσο αναπόφευκτη όσο και αναγκαία.

3.3.4 Ελευθερία στη κατανομή φόρτου χρηστών στα DL/UL δίκτυα

Προφανώς, είναι προς όφελος των ασύρματων συσκευών (ειδικά των συσκευών κοντά στα όρια κάλυψης του *macrocell* σταθμού) να συνδέονται στο *small cell* αντί στο *macrocell*. Οι λόγοι πίσω από τον παραπάνω ισχυρισμό έχουν ήδη παρατεθεί με αρκετά επεξηγηματικό τρόπο. Επιγραμματικά, οι συσκευές κερδίζουν επαυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, βελτιωμένη κάλυψη δικτύου, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας και υποστήριξη σε υπέρ-πυκνές περιοχές ή σε περιπτώσεις κίνησης των χρηστών με πολύ υψηλές ταχύτητες.

Όμως, ο *DUDE* μηχανισμός δεν ευνοεί μόνο τις ασύρματες συσκευές. Η ελευθερία των *UEs* να διαλέξουν αυτά το σταθμό που τους ωφελεί περισσότερο να συνδεθούν οδηγεί σε απελευθέρωση του φόρτου συνδεδεμένων συσκευών στους σταθμούς *macrocell*, καθώς α) δεν είναι πια αναγκαστικό τα *UL* και *DL* δίκτυα να έχουν ακριβώς τον ίδιο φόρτο χρηστών και β) ο *DUDE* μηχανισμός εξισορροπεί την κατανομή συσχετισμών συσκευών-σταθμών για *small cells* που έχουν σαφώς λιγότερες συσκευές συνδεδεμένες σε αυτά σε αντίθεση με άλλα *small cells*. Η βελτιωμένη πια κατανομή συσκευών στο ετερογενές δίκτυο με υποδομές *macrocell* και *small cell* απεικονίζεται παρακάτω στην *Εικόνα 16*, όπου ο *DUDE* μηχανισμός ξεκάθαρα προσφέρει την καλύτερη κατανομή φόρτου *UEs* στο *UL*, συγκριτικά με υποδομές από *small cells* όπως *femtocells* ή *picocells* σε περιβάλλον ενοποιημένων *DL/UL*.



Εικόνα 16. Κατανομή χρηστών στο UL επίπεδο με διαφορετικές τεχνικές [33]

3.3.5 Χαμηλό κόστος ενσωμάτωσης DUDe μηχανισμού

Πάντοτε, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες πριν ληφθεί μια σημαντική απόφαση ήταν και το οικονομικό αντίκτυπο της απόφασης αυτής, καθώς και οι πιθανές συνέπειές της μελλοντικά. Ο DUDe μηχανισμός σίγουρα απαιτεί μια άρρηκτη επικοινωνία των διαχωρισμένων DL/UL επιπέδων, άρα μια ταχύτατη σύνδεση με όσο το δυνατό μικρότερη χρονοκαθυστέρηση.

Μέχρι στιγμής, γνωρίζαμε την ύπαρξη της *Cooperative Multiple-Input Multiple-Output (CO-MIMO)* τεχνολογίας, η οποία βελτιώνει αισθητά την ποιότητα της ασύρματης τηλεπικοινωνίας μεταξύ συσκευών μέσω αποδοτικής εκμετάλλευσης καναλιών στο δίκτυο που εξασθενούσαν. Παραδοσιακά, η απλή *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)* προσέγγιση προαπαιτούσε την ύπαρξη παραπάνω από μιας κεραίας επικοινωνίας τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη της ασύρματης τηλεπικοινωνίας, ώστε μέσω των πολλαπλών κεραιών να αυξηθεί η διαθέσιμη χωρητικότητα στο κανάλι επικοινωνίας. Όμως, παρά το γεγονός ότι από τα Δίκτυα 3G και μετά, η τεχνολογία MIMO συμπεριλαμβάνεται σχεδόν σε όλα τα πρότυπα ασύρματης τηλεπικοινωνίας, οι συσκευές αναγκαστικά περιορίζονται όσον αφορά το μέγιστο πλήθος κεραιών που μπορούν να ενσωματωθούν. Ταυτόχρονα, τεχνικές διαχωρισμού των ήδη διαθέσιμων κεραιών της συσκευής ποτέ δεν επέφεραν τα αναμενόμενα οφέλη και οι θεωρητικές επιδόσεις συνέχισαν να απέχουν αρκετά από τις πρακτικές [37].

Για να καταφέρουμε να αγγίξουμε τις απαιτούμενες θεωρητικές ταχύτητες, η τεχνολογία CO-MIMO συγκεντρώνει και ομαδοποιεί τις διαθέσιμες κεραίες πολλαπλών συσκευών και δημιουργεί μια νέα εικονική συστάδα κεραιών, με τις οποίες η αλληλεπίδραση αποφέρει ικανοποιητικές (σε σχέση με την MIMO τεχνολογία) επιδόσεις. Το πιο πιθανό σενάριο είναι κάποιος να συναντήσει την τεχνολογία CO-MIMO με τη μορφή του *Coordinated Multipoint (CoMP)*, σύμφωνα με το οποίο, η γνώση και η πληροφορία του καναλιού διαμοιράζεται μεταξύ των σταθμών βάσης του δικτύου και άρα α) οργανώνεται και βελτιστοποιείται η μετάδοση από τους σταθμούς

βάσης στις συσκευές στο *DL* επίπεδο και β) τα μεταδιδόμενα σήματα από τις συσκευές προς τους σταθμούς βάσης επεξεργάζονται από κοινού στο *UL* επίπεδο. Το *CoMP* δίνει έμφαση στις αρνητικές επιπτώσεις που εμφανίζονται κατά τη μετάδοση δεδομένων στο δίκτυο (π.χ. εξασθένιση σήματος λόγω εμποδίων), τις οποίες και μέσω επεξεργασίας μετατρέπει σε χρήσιμα και εκμεταλλεύσιμα σήματα, απαιτώντας όμως μια *backhaul* υποδομή υψηλών προδιαγραφών (π.χ. υποδομή οπτικών ινών) για την απρόσκοπτη και βέλτιστη επικοινωνία μεταξύ των σταθμών βάσης για κοινή επεξεργασία πληροφορίας.

Απεναντίας, ο *DUDe* μηχανισμός προσφέρει το πλεονέκτημα του ότι δεν απαιτεί κανέναν περιορισμό/ανάγκη όσον αναφορά τις ανάγκες σε *backhaul* υποδομές δικτύου. Μέσω του μηχανισμού αυτού, το δίκτυο επωφελείται όχι μόνο από τις υψηλές ταχύτητες που παρέχει, αλλά και από το πολύ χαμηλό κόστος ενσωμάτωσης του μηχανισμού.

3.4 Ανασκόπηση ερευνητικής περιοχής

Είδαμε αρκετά αναλυτικά τους λόγους για τους οποίους η *DUDe* προσέγγιση αναμένεται να αποτελέσει το μέλλον τουλάχιστον των Δικτύων *5G*. Από τις πιο συγκεντρωτικές εργασίες σχετικά με τα πλεονεκτήματα του διαχωρισμού του δικτύου αποτελεί η εργασία στο [33]. Η εργασία αυτή επιβεβαίωσε μέσω εξομοιώσεων σε *LTE-A* δίκτυο τα ισχυριζόμενα οφέλη του μηχανισμού σε τομείς, όπως οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, η κάλυψη χρηστών στο δίκτυο και η ενεργειακή κατανάλωση, αποδεικνύοντας πως ο μηχανισμός αναμένεται να αποτελέσει τις βάσεις δόμησης των Δικτύων *5G*. Μάλιστα, η *DUDe* προσέγγιση όχι μόνο προσφέρει ισχυρά πλεονεκτήματα στο ετερογενές δίκτυο, αλλά μάλιστα το καταφέρνει με πολύ μικρότερο κόστος συγκριτικά με τις μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους, όπως οι τεχνολογίες *MIMO* και *CoMP*.

Η εργασία των συγγραφέων στο [34] αναλώθηκε γύρω από την ενσωμάτωση του *DUDe* μηχανισμού σε ένα ετερογενές υπέρ-πυκνό *LTE* δίκτυο, όπως το δίκτυο δοκιμών που παρέχεται από την *Vodafone*. Η γενική συνειδητοποίηση πως η συσχέτιση συσκευής και σταθμού βάσης βασιζόμενη στην ισχύ του εισερχόμενου σήματος αρκούσε για ομογενή δίκτυα αλλά όχι για ετερογενή δίκτυα (λόγω της διαφορετικής ισχύς εκπομπής των σταθμών βάσης) οδήγησε σε μια προσέγγιση, η οποία στο *DL* επίπεδο συσχετίζει χρήστες και σταθμούς βάσης με βάση την ισχύ του εισερχόμενου σήματος, ενώ στο *UL* επίπεδο συσχετίζει σταθμούς βάσης και χρήστες με βάση την εξασθένιση σήματος (*pathloss*). Η προσομοίωση αποκάλυψε α) σημαντικές βελτιώσεις στις επιδόσεις των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων του *UL* δικτύου και β) δραματική μείωση (από 90% σε μόλις 10%) στον αριθμό των συσκευών που το δίκτυο δεν εξυπηρετούσε ικανοποιητικά από τους σταθμούς βάσης *macrocell*.

Οι συγγραφείς στο [35] μελέτησαν τη δυνατότητα μιας συσκευής εντός ενός ετερογενούς διαχωρισμένου δικτύου που χαρακτηρίζεται από *macrocell* σταθμούς βάσης και διάφορα σημεία πρόσβασης *small cell*, να συνδέεται (αν είναι προς όφελός της) σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης στα επίπεδα *DL/UL*, δηλαδή τη δυνατότητα *DL/UL* ασύρματης πρόσβασης. Για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή λαμβανόμενη

ισχύς σήματος, ο μηχανισμός επιτρέπει τη διαχωρισμένη πρόσβαση σε όσες συσκευές απαιτείται, επιτρέποντας στις συσκευές να συνδέονται σε *macrocell* ή *small cell* στα δύο επίπεδα *DL/UL*, χωρίς η μια επιλογή να επηρεάζει την άλλη. Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης αποκάλυψαν ότι η *DL/UL* διαχωρισμένη πρόσβαση προσφέρει αυξημένη δικαιοσύνη όσον αφορά τις ταχύτητες στο *UL* επίπεδο, συγκριτικά με τις ήδη αυξημένες ταχύτητες του *DL* επιπέδου.

Στο [36], μελετήθηκε η τεχνική της αποφόρτισης (*offloading*) των σταθμών βάσης από χρήστες και το διαμοιρασμό τους σε σχετικά άδειους σταθμούς *small cell*, εντός ενός ετερογενούς δικτύου που λειτουργεί με *DUDe* μηχανισμό. Προτάθηκε ένας καινοτόμος μηχανισμός ανάλυσης του *SINR* στο *UL* δίκτυο, ο οποίος προσφέρει αυξημένες (περίπου $\times 1.5$) ταχύτητες σε χρήστες που είτε βρίσκονται κοντά στις άκρες της περιοχής κάλυψης του *macrocell*, είτε βρίσκονται σε τυχαία θέση μέσα στη *macrocell* κυψέλη. Οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η *DUDe* προσέγγιση, σε συνδυασμό με τεχνικές δίκαιου διαμοιρασμού των χρηστών σε *macrocells* και *small cells*, μπορεί να αποβεί ευεργετική για υπηρεσίες στις οποίες η διατήρηση του *QoS* είναι αναγκαία και στα δύο επίπεδα δικτύου (*DL* και *UL*).

4.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, έχει μελετηθεί έως στιγμής το θεωρητικό υπόβαθρο των 5G Δικτύων, το οποίο εκτείνεται από τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές μέχρι την εγκατάσταση *small cells* και το διαχωρισμό του δικτύου. Για να επιβεβαιώσουμε και σε πρακτικό επίπεδο τους θεωρητικούς ισχυρισμούς, κρίνεται αναγκαία η εξερεύνηση της συμπεριφοράς ενός 5G ετερογενούς δικτύου που λειτουργεί με έναν *DUDe* μηχανισμό. Το γεγονός ότι η τεχνολογία 5G NR, σε συνδυασμό με το πρότυπο *IMT-2020*, είναι αρκετά πρόσφατα, δεν υπάρχει ικανοποιητική διαθεσιμότητα σε έμπιστους εξομοιωτές που να επιτρέπουν διαχείριση του δικτύου με τα καινοτόμα μοντέλα των 5G Δικτύων. Κατά συνέπεια, επιλέξαμε να υλοποιήσουμε την εξομοίωση του μοντέλου μας σε περιβάλλον *MATLAB*.

Για την ανάπτυξη του προτεινόμενου μηχανισμού, μελετήθηκαν σε βάθος πολλαπλές επιστημονικές εργασίες σχετικά με κατανομή χρηστών και διαχείριση φάσματος. Σε αυτή την εργασία, δώσαμε έμφαση στην αποδοτική ως προς τους πόρους συχνοτήτων κατανομή χρηστών σε ένα υπέρ-πυκνό ετερογενές 5G Δίκτυο, το οποίο είναι διαχωρισμένο σε *DL* και *UL* επίπεδα μέσω *DUDe* μηχανισμού. Το προτεινόμενο μοντέλο ξεφεύγει από την μέχρι πρότινος προσέγγιση ως προς την εξυπηρέτηση του δικτύου (*Network-Centric model, NC model*) και στρέφει το ενδιαφέρον του στην αποδοτική παροχή υπηρεσιών στους χρήστες του δικτύου (*User-Centric model, UC model*), βελτιώνοντας την επικοινωνία μεταξύ τερματικών συσκευών και σταθμών βάσης στα δυο αυτά επίπεδα. Ο προτεινόμενος μηχανισμός καθορίζει τον πως οι χρήστες του δικτύου στο *DL* και στο *UL* επίπεδο θα συνδέονται αποτελεσματικά (ως προς τους φασματικούς πόρους) στους σταθμούς βάσης. Οι τελικές επιδόσεις του δικτύου αξιολογούνται όσον αφορά τις βελτιώσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και τα ποσοστά επιτυχημένων συνδέσεων συσκευής-σταθμού. Εν τέλει, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εξυπηρετήσει με ικανοποιητικό τρόπο τη πλειονότητα των συσκευών εντός του υπέρ-πυκνού ετερογενούς δικτύου, πετυχαίνοντας τέλεια (δηλαδή 100%) διατήρηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσιών (*QoS*), ανεξαρτήτως από τον αριθμό των ενεργών χρηστών. Παράλληλα, η δυνατότητα μιας συσκευής να συνδεθεί σε διαφορετικό σταθμό βάσης σε κάθε επίπεδο προσφέρει στο δίκτυο βαθμούς ελευθερίας ως προς την μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του, όπως θα δούμε και στη προσομοίωση.

Όπως αναφέραμε, η μελέτη μας περιστρέφεται γύρω από την αποδοτική σύνδεση τερματικών συσκευών με τους σταθμούς βάσης, μελέτη η οποία θα προσφέρει αυξημένη χωρητικότητα στο ετερογενές δίκτυο. Οι απαιτήσεις των χρηστών σε ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων είναι ύψιστης σημασίας στη μελέτη μας και άρα, ο προτεινόμενος μηχανισμός θα πρέπει να σέβεται τις απαιτήσεις των χρηστών και κατά συνέπεια, να διατηρεί την ποιότητα υπηρεσιών που παρέχονται από το δίκτυο, δηλαδή τη διατήρηση του *QoS*. Αυτό αναπόφευκτα σημαίνει πως το προτεινόμενο μαθηματικό

μοντέλο που θα αναπτύξουμε θα πρέπει να στοχεύει στην αύξηση της συνολικής χωρητικότητας στο συνολικό δίκτυο και στη διατήρηση του QoS . Χρησιμοποιώντας τη τεχνική του $DUDe$ μηχανισμού, τα DL και UL δίκτυα θεωρούνται πια ως ξεχωριστά και ανεξάρτητα, κάθε ένα εκ των οποίων απαιτεί διαφορετικές προσεγγίσεις ως προς την αρχιτεκτονική, τα μοντέλα αντιμετώπισης παρεμβολών και τις απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

4.2 Μοντέλο Συστήματος Δικτύου

Επειδή όπως είπαμε, το UC μοντέλο απαιτεί τελείως διαφορετικές προσεγγίσεις για τα DL και UL δίκτυα, προτείνεται επιστημονικά να ακολουθήσουμε την $OFDMA$ προσέγγιση για το DL επίπεδο και την $SC-FDMA$ προσέγγιση για το UL επίπεδο. Στα LTE δίκτυα, η διαθέσιμη συχνότητα χωρίζεται σε σύνολα από πόρους, που έχουμε ήδη αναφέρει ότι ονομάζονται RBs , όπου κάθε ένα RB εμπεριέχει δώδεκα (12) στο σύνολο υπό-φορείς (*subcarriers*) με χρονική διάρκεια σταθερή και ίση με 1 ms. Ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης, σε κάθε RB διαμοιράζεται διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων, άρα και ο κάθε υπο-φορέας θα έχει συχνότητα άμεσα εξαρτώμενη από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού (π.χ. εάν το εύρος ζώνης ισούται με 20 MHz, τότε κάθε RB έχει 175 KHz διαθέσιμο φάσμα). Όσον αφορά την $SC-FDMA$ προσέγγιση, εφόσον η επικοινωνία στο UL επίπεδο γίνεται από την κινητή συσκευή προς το σταθμό βάσης και οι συσκευές έχουν κατά πολύ μικρότερη ισχύ εκπομπής σήματος από τους σταθμούς βάσης, η τεχνολογία $SC-FDMA$ αυξάνει την ισχύ εκπομπής της συσκευής, παρέχοντας στο δίκτυο αυξημένο Λόγο Μέγιστης Ισχύος προς Μέσης Ισχύος (*Peak-to-average power ratio, PAPR*) [37].

Όταν αναφερόμαστε σε ένα σταθμό βάσης, θα το συμβολίζουμε στο μοντέλο μας με δείκτη i , ενώ όταν αναφερόμαστε σε τερματική συσκευή, ο συμβολισμός θα είναι με δείκτη j . Έστω λοιπόν μια τερματική συσκευή η οποία επιθυμεί να συνδεθεί με ένα σταθμό βάσης. Για να συνδεθεί η συσκευή στο σταθμό βάσης, θα πρέπει ο σταθμός να προσφέρει τον απαιτούμενο από τη συσκευή αριθμό από RBs και σε πρακτικό επίπεδο, κάθε συσκευή θα ζητάει όλο και μεγαλύτερες ταχύτητες από το δίκτυο, ενώ ο σταθμός θα προσπαθεί να εξυπηρετήσει όσο περισσότερους χρήστες με ικανοποιητικό τρόπο, καταναλώνοντας όσο το δυνατόν λιγότερους πόρους δικτύου. Για να είναι ο προτεινόμενος μηχανισμός μας αποδοτικός, θα πρέπει από τους πιθανούς χρήστες του δικτύου, να επιλέγεται κάθε φορά ο χρήστης ο οποίος θα έχει τις λιγότερες ανάγκες από RBs (ώστε να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι χρήστες στο υπέρ-πυκνό ετερογενές δίκτυο), αλλά προφανώς θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη σε ταχύτητες στο δίκτυο. Από το θεώρημα του *Shannon*, προκύπτει ότι οι ανάγκες σε RBs μιας κινητής συσκευής είναι α) ανάλογες των απαιτήσεων των χρηστών σε ταχύτητες, β) αντιστρόφως ανάλογες του εύρους ζώνης ενός RB και γ) αντιστρόφως ανάλογες του $SINR$ μεταξύ συσκευής και σταθμού. Δηλαδή, οι ανάγκες σε RBs μαθηματικά εκφράζονται ως εξής:

$$r_{j,i} = \left\lceil \frac{th_j}{B_{RB} \cdot \log_2(1 + SINR_{j,i})} \right\rceil \quad (1)$$

, όπου ως $\lceil \cdot \rceil$ ορίζουμε ο τελεστής άνω ακεραίου ορίου, ως th_j ορίζουμε τις απαιτήσεις της τερματικής συσκευής σε ταχύτητες, ως B_{RB} θεωρούμε το εύρος ζώνης ενός RB και ως $SINR_{j,i}$ την ποιότητα της σύνδεσης (δηλαδή το $SINR$) μεταξύ συσκευής και σταθμού. Ο τελεστής $\lceil \cdot \rceil$ στην εξίσωση (1) στρογγυλοποιεί τις απαιτήσεις από RBs που προκύπτουν από το κλάσμα προς τον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο, με αποτέλεσμα η συντριπτική πλειοψηφία των χρηστών να λαμβάνει μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τις πραγματικές ανάγκες τους. Όπως θα δούμε και στην εξομοίωσή μας παρακάτω, το γεγονός αυτό προσφέρει τέλεια διατήρηση του QoS για όλους τους χρήστες του δικτύου που εν τέλει κατάφεραν και συνδέθηκαν στον οποιονδήποτε σταθμό βάσης [39].

4.2.1 Μοντέλο Απώλειών Διαδρομής

Ακολουθώντας το *macrocell* μοντέλο διάδοσης για αστικές γεωγραφικές περιοχές, όπως αυτό ορίζεται στο [40], αν θέλουμε να μετρήσουμε τις απώλειες ισχύος στο μεταδιδόμενο σήμα εντός ενός ασύρματου δικτύου, τότε αυτό επιτυγχάνεται μέσω του μοντέλου απώλειών διαδρομής (*Path Loss Model*), όπου η εξίσωση είναι καθαρά συναρτήση της απόστασης μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη σήματος και είναι ίση με:

$$PL_{macro} = 128.1 + 37.6 \cdot \log_{10}(d) \quad (2)$$

, όπου ο όρος PL_{macro} αναφέρεται στις απώλειες στη περίπτωση ενός *macrocell* σταθμού και μετριέται σε dB, ενώ ο όρος d είναι η ευκλείδεια απόσταση σε χιλιόμετρα πομπού και δέκτη. Για την περίπτωση του *small cell* σταθμού, το μοντέλο διάδοσης ορίζει πως η εξίσωση απωλειών θα είναι (σύμφωνα με το [41]) η εξής:

$$PL_{small} = 140.7 + 36.7 \cdot \log_{10}(d) \quad (3)$$

, όπου ο όρος PL_{small} αναφέρεται στις απώλειες του *small cell* σταθμού και ο όρος d είναι (ξανά) η χιλιομετρική ευκλείδεια απόσταση πομπού και δέκτη. Και στα δύο διαχωρισμένα επίπεδα του δικτύου, τα μοντέλα διάδοσης και άρα οι εξισώσεις απώλειών ισχύος παραμένον ίδιες.

Το κέρδος που θα έχουμε στο κανάλι μας, το οποίο κυρίως καθορίζεται από τις απώλειές που είδαμε παραπάνω, θα το συμβολίζουμε με τον όρο G και θα ισούται με:

$$G = 10^{-PL/10} \quad (4)$$

4.2.2 Μοντέλο Ρυθμών Μετάδοσης

4.2.2.1 Επίπεδο DL

Στο DL επίπεδο, έχουμε ήδη αναφέρει ότι θα ακολουθήσουμε την $OFDMA$ προσέγγιση. Ως αποτέλεσμα, η μετρική του $SINR$ (που θυμίζουμε ότι δηλώνει την ποιότητα τη σύνδεσης) από ένα σταθμό βάσης ως προς μια συσκευή υπολογίζεται (σύμφωνα με το [42]) ως:

$$SINR_{i,j}^{DL} = \frac{P_i^{rad} \cdot G_{i,j}}{N_0 \Delta f + \sum_{i' \in \{BS\}} P_{i'}^{rad} \cdot G_{i',j}} \quad (5)$$

, όπου στον αριθμητή, ο όρος P_i^{rad} αναφέρεται στην ισχύ ακτινοβολίας από το i -οστό σταθμό βάσης, ενώ ο όρος $G_{i,j}$ αντιπροσωπεύει το κέρδος καναλιού του i -οστού σταθμού βάσης και της j -οστής συσκευής. Στον παρανομαστή του κλάσματος, ο όρος N_0 ορίζει τη ισχύ της φασματικής πυκνότητας του λευκού θορύβου, ο όρος Δf είναι η απόσταση (ως προς τη συχνότητα) μεταξύ διαδοχικών υπο-φορέων σε ένα RB και ο όρος $\sum_{i' \in \{BS\}} P_{i'}^{rad} \cdot G_{i',j}$ αναφέρεται στο άθροισμα κάθε ισχύος που ακτινοβολείται από όλους τους άλλους σταθμούς βάσης εκτός του i -οστού σταθμού και προκαλεί παρεμβολές, επί το κέρδος του καναλιού μεταξύ όλων των άλλων (εκτός του i -οστού) σταθμών και κάθε συσκευής στο δίκτυο. Επισημαίνεται ότι και στα δυο επίπεδα, όλοι οι υπολογισμοί γίνονται σε επίπεδο ενός υπο-φορέα του RB . Ο δείκτης του υπο-φορέα (έστω s) λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς, αλλά δεν σημειώνεται ρητά στις εξισώσεις για χάριν αναγνωσιμότητας των εξισώσεων.

Έχοντας λοιπόν υπολογίσει την ποιότητα σύνδεσης μεταξύ συσκευής και σταθμού, μπορούμε πλέον (ακολουθώντας την $OFDMA$ τεχνολογία) να υπολογίσουμε το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που θα αποκτάει η συσκευή στο DL επίπεδο του δικτύου. Επομένως, για την j -οστή συσκευή που συνδέεται στον i -οστό σταθμό βάσης, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από τη πλευρά της συσκευής ορίζεται ως:

$$R_{j,i}^{DL} = |RB| \cdot 12 \cdot \sum_{subc \in \{RB\}} B_{subc} \cdot \log_2(1 + SINR_{i,j}^{DL}) \quad (6)$$

, όπου ο όρος $|RB|$ αντιπροσωπεύει το πλήθος των RBs που απαιτείται να παρέχει ο σταθμός στη συσκευή, ο όρος B_{subc} αναφέρεται στο εύρος ζώνης κάθε ενός από τους υπο-φορείς ενός RB που θα ανατεθούν στη συσκευή και ο όρος $SINR_{i,j}^{DL}$ είναι η μετρική του $SINR$ μεταξύ σταθμού και συσκευής. Ο πολλαπλασιασμός επί δώδεκα (12) του αθροίσματος είναι αναγκαίος ώστε οι ταχύτητες των χρηστών να υπολογίζονται συναρτήσει των RBs που τους έχουν ανατεθεί (άλλωστε, κάθε RB αποτελείται από 12 υπο-φορείς).

4.2.2.2 Επίπεδο UL

Στο επίπεδο UL του διαχωρισμένου δικτύου μας, ακολουθούμε την SC - $FDMA$ τεχνολογία. Σύμφωνα με το [37], η μετρική του $SINR$ στο UL , με κατεύθυνση επικοινωνίας από τη j -οστή συσκευή προς τον i -οστό σταθμό εκφράζεται ως:

$$SINR_{j,i}^{UL} = \frac{P_j^{rad} \cdot G_{j,i}}{N_0 \Delta f + \sum_{j' \in \{UE\}} P_j^{rad} \cdot G_{j',i}} \quad (7)$$

, όπου στον αριθμητή, ο όρος P_j^{rad} ορίζει την ισχύ ακτινοβολίας από τη j -οστή συσκευή και ο όρος $G_{j,i}$ αναφέρεται το κέρδος καναλιού μεταξύ το εκάστοτε σταθμού και της εκάστοτε συσκευής. Στον παρονομαστή του κλάσματος, ο όρος N_0 ορίζει τη ισχύ της φασματικής πυκνότητας του λευκού θορύβου, ο όρος Δf είναι η απόσταση (ως προς τη συχνότητα) μεταξύ διαδοχικών υπο-φορέων σε ένα RB και ο όρος $\sum_{j' \in \{UE\}} P_j^{rad} \cdot G_{j',i}$ αναφέρεται στο άθροισμα κάθε ισχύος που εκπέμπεται από όλες τις συσκευές εκτός της j -οστής και προκαλεί παρεμβολές, επί το κέρδος του καναλιού μεταξύ όλων των υπολοίπων (εκτός της j -οστής) συσκευών και κάθε σταθμού στο δίκτυο. Και στο UL επίπεδο, ο δείκτης του υπο-φορέα να μεν λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς, αλλά δεν σημειώνεται ρητά στις εξισώσεις λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας στην ανάγνωση των εξισώσεων.

Προχωρώντας στη μελέτη των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων στο UL επίπεδο, για την j -οστή συσκευή που συνδέεται στον i -οστό σταθμό βάσης (θυμίζουμε ότι ο $DUDe$ μηχανισμός δεν προϋποθέτει την ίδια συσχέτιση σταθμού και συσκευής και στα δυο επίπεδα), ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από τη πλευρά της συσκευής ορίζεται ως:

$$R_{j,i}^{UL} = 12 \cdot |N_{subc}| \cdot B_{subc} \cdot \log_2(1 + SINR_{j,i}^{UL}) \quad (8)$$

, όπου ο όρος $|N_{subc}|$ ορίζει το πλήθος από υπο-φορείς στο UL που ανατίθενται στη συσκευή, ο όρος B_{subc} αντιπροσωπεύει το εύρος ζώνης του υπο-φορέα και ο όρος $SINR_{j,i}^{UL}$ είναι το $SINR$ για τη μετάδοση από τη συσκευή στο σταθμό.

Πριν μεταβούμε στον προτεινόμενο αλγόριθμο που θα εφαρμοστεί στα δυο ανεξάρτητα επίπεδα DL και UL , σημειώνουμε πως οι εξισώσεις υπολογισμού του $SINR$ στα δυο επίπεδα (βλέπε εξισώσεις (5) και (7)) δεν υπολογίζουν τη μετρική του $SINR$ σε κλίμακα dB. Ως αποτέλεσμα, για τη μετατροπή σε dB κλίμακα, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μετατροπές:

$$SINR_{(dB)}^{(DL)} = 10 \cdot \log_{10}(SINR_{i,j}^{DL}) \quad (9)$$

$$SINR_{(dB)}^{(UL)} = 10 \cdot \log_{10}(SINR_{j,i}^{UL}) \quad (10)$$

4.3 Αλγόριθμος κατανομής χρηστών

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής χρηστών σε σταθμούς βάσης απαιτεί εκ των προτέρων γνώση μετρικών του δικτύου (π.χ. $SINR$ μεταξύ συσκευής και σταθμών, διαθέσιμα RBs στους σταθμούς βάσης κλπ.) και διευκολύνει την αποδοτική σύνδεση συσκευών σε σταθμούς βάσης στα επίπεδα DL και UL , χωρίς μάλιστα να αναγκάζει πανομοιότυπες συσχετίσεις συσκευής-σταθμού και στα δυο επίπεδα (τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης έχουν αναλυθεί ενδελεχώς στο Κεφάλαιο 3.3). Στόχος του μηχανισμού παραμένει η ως προς το φάσμα συχνοτήτων αποδοτική εξυπηρέτηση των χρηστών μέσα στο δίκτυο, σεβόμενοι πάντα τις αρχικές απαιτήσεις τους σε ταχύτητες εντός του δικτύου.

Εν τέλει, καταλήγουμε ότι η μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης στο δίκτυο ουσιαστικά μετασχηματίζεται σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης των απαιτούμενων RBs . Προφανώς, για να μεγιστοποιηθεί η φασματική απόδοση, η βέλτιστη προσέγγιση είναι να εξυπηρετούμε πρωτίστους τους χρήστες με τις ελάχιστες ανάγκες σε RBs , άρα ταυτόχρονα εξυπηρετούμε όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες, σεβόμενοι το QoS και διασφαλίζοντας την αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος στο δίκτυο. Εάν το πλήθος των RBs που απαιτεί ο χρήστης δεν είναι διαθέσιμα στον σταθμό βάσης που έχει επιλεγεί εκείνη τη χρονική στιγμή ως η βέλτιστη δυνατή επιλογή, τότε ο μηχανισμός θα ψάξει να βρει τον επόμενο βέλτιστο ως προς το $SINR$ σταθμό και θα ξαναγίνει ο έλεγχος για τη διαθεσιμότητα των RBs , έως ότου οι ανάγκες του χρήστη εξυπηρετηθούν πλήρως από έναν σταθμό.

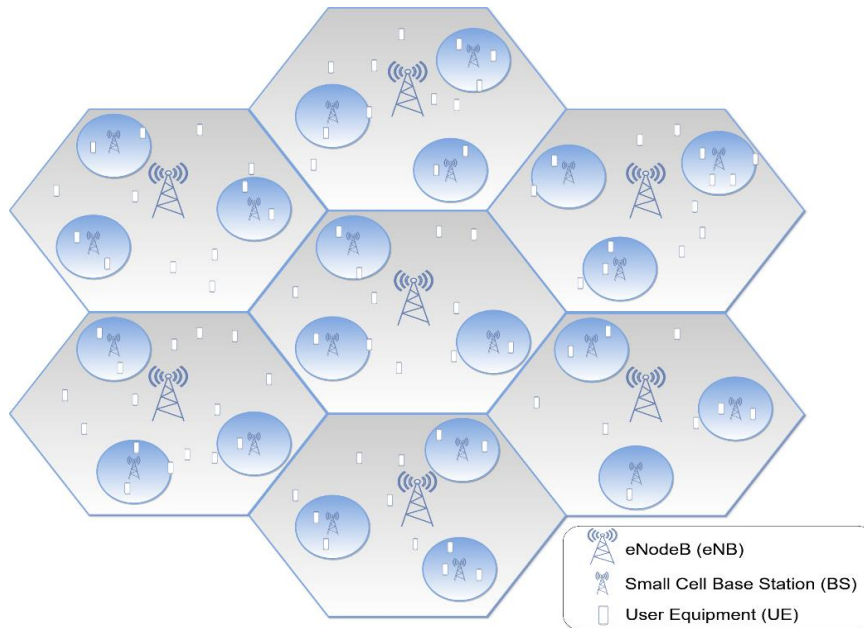
Προφανώς, η σύνδεση συσκευής και σταθμού είναι εφικτή αν και μόνο αν ο σταθμός έχει αρκετά εναπομείναντα RBs , αλλιώς αναδρομικά δοκιμάζουμε τον επόμενο καλύτερο σταθμό. Τέλος, ακριβώς επειδή θέλουμε οικονομική διαχείριση των πόρων διαθέσιμων συχνοτήτων, RBs που έχουν περισσέψει και δεν χρειάστηκαν για καμία σύνδεση συσκευής-σταθμού μένουν αχρησιμοποίητα, καθώς ο συνωστισμός δικτύου είναι δυναμικός και σε περίπτωση που αναθέταμε επιπλέον RBs σε χρήστες, όλοι οι σταθμοί θα ξέμεναν από διαθεσιμότητα αν είχαμε ξαφνική αύξηση των χρηστών σε μια κυψέλη.

Ο αλγόριθμος συσχέτισης συσκευών (UEs) και σταθμών βάσης (BSs) παρουσιάζεται παρακάτω σε μορφή ψευδογλώσσας:

Αλγόριθμος: Συσχέτιση UE-BS στα επίπεδα DL/UL	
Είσοδος: $SINR_{i,j}^{DL}, SINR_{j,i}^{UL}, RBs^{DL}, RBs^{UL}$	
1:	αρχή
2:	για κάθε χρήστη j
3:	για κάθε σταθμό i
4:	υπολόγισε $r_{j,i}$ μέσω της (1);
5:	τέλος αν
6:	τέλος αν
7:	για κάθε χρήστη j
8:	επέλεξε το χρήστη με το $\min(r_{j,i})$;
9:	βρες το καλύτερο σταθμό βρίσκοντας το $\max(SINR_{i,j}^{DL})$;
10:	εάν τα RBs του σταθμού στο DL αρκούν τότε
11:	ο j -οστός χρήστης συνδέεται στον i -οστό σταθμό;
12:	ανανέωσε τα διαθέσιμα RBs του σταθμού;
13:	αλλιώς
14:	βρες τον επόμενο καλύτερο σταθμό βρίσκοντας το επόμενο καλύτερο $\max(SINR_{i,j}^{DL})$;
15:	τέλος αν
16:	τέλος αν
17:	επανάλαβε τα βήματα 7-16 για το UL επίπεδο
18:	τέλος

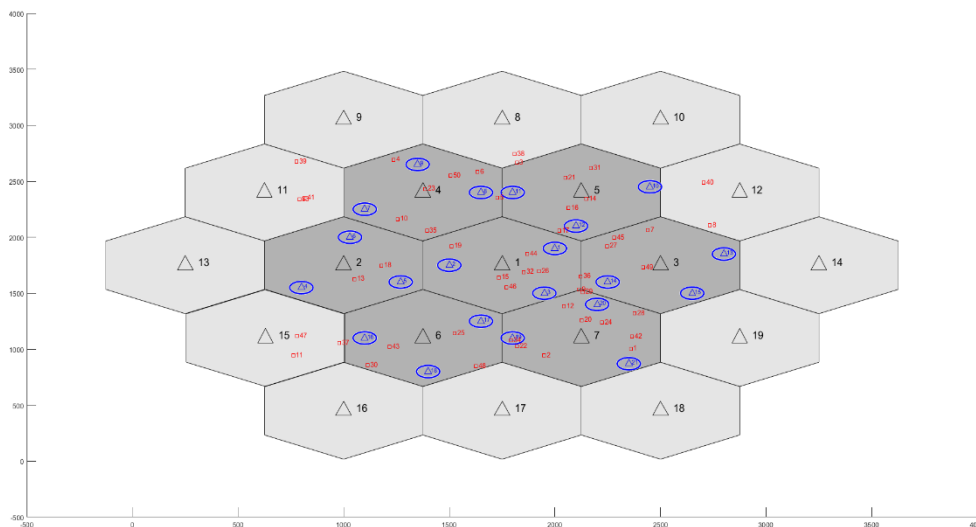
4.4 Παράμετροι και Περιβάλλον Εξομοίωσης

Η προσομοίωση του μηχανισμού μας θα γίνει σε μια γεωγραφική περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται από το *LTE* πρωτόκολλο και στην οποία κάθε κυψέλη ίδιο μέγεθος. Θεωρούμε πως η περιοχή αυτή εμπεριέχει α) εγκαταστάσεις *macro cell* σταθμών βάσης που βρίσκονται στο κέντρο της εκάστοτε κυψέλης και β) εγκαταστάσεις *small cell* σημείων πρόσβασης, τοποθετημένων στις άκρες της περιοχής κάλυψης του *macrocell* ώστε να γεφυρωθούν τα κενά κάλυψης (του *macrocell*). Τοποθετούμε τα *small cells* κοντά στα σύνορα της κυψέλης, καθώς χρήστες που βρίσκονται οριακά πάνω στα όρια κάλυψης μιας κυψέλης είναι επιρρεπείς σε κακή κάλυψη δικτύου από το *macrocell* σταθμό ή σε υψηλά επίπεδα παρεμβολών από γειτονικούς σταθμούς, προβλήματα που βέβαια μπορούν να αντιμετωπιστούν με την εγκατάσταση *small cell* σταθμών. Για λόγους απλότητας, στην εξομοίωσή μας υποθέτουμε ότι όλοι οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν με μέγιστη ισχύ εκπομπής. Το προτεινόμενο σενάριο του *UC* μοντέλου απεικονίζεται παρακάτω στην *Εικόνα 17*. Κάθε κυψέλη περιέχει στο κέντρο της ένα σταθμό βάσης *macrocell* που σημειώνεται ως *eNodeB (eNB)* και η ακτίνα κάλυψής του σημειώνεται με ένα γκρι πολύγωνο, ενώ οι σταθμοί πρόσβασης *small cell* τοποθετούνται στις άκρες της περιοχής κάλυψης των *macrocells* και η ακτίνα κάλυψης διαγράφει ένα κύκλο με κέντρο το *small cell*. Οι τοποθεσίες των συσκευών στο δίκτυο είναι ένα πλήρως τυχαίο σενάριο, ώστε η τυχαία κατανομής τους στο δίκτυο να προσομοιώνει ένα πραγματικό και ρεαλιστικό σενάριο.



Εικόνα 17. Σενάριο Εξομοίωσης Δικτύου

Το παραπάνω σενάριο ορίζει μια γεωγραφική περιοχή που εμπεριέχει 7 *macrocells* με ακτίνα κάλυψης 375 m, καθώς και 21 *small cells* τα οποία έχουν ακτίνα κάλυψης σαφώς μικρότερη και ίση με 50 m. Το σενάριο που απεικονίζεται στην *Εικόνα 17* είναι το σενάριο κατανομής χρηστών που μας ενδιαφέρει, αλλά όμως δεν θα ήταν ρεαλιστική η εξομοίωση εάν δεν λαμβάναμε υπόψιν μας και το παράγοντα των παρεμβολών που προέρχεται από *macrocells* σε γειτονικές κυψέλες σε ένα πραγματικό δίκτυο. Ως εκ' τούτου, μέσω του περιβάλλοντος της *MATLAB*, κατασκευάζουμε το ρεαλιστικό σενάριο της υποδομής του δικτύου, το οποίο συμπεριλαμβάνει επιπλέον 12 *macrocell* σταθμούς βάσης περιμετρικά από τους σταθμούς ενδιαφέροντος της εξομοίωσης. Η γραφική απεικόνιση του δικτύου φαίνεται στην *Εικόνα 18*.



Εικόνα 18. Γραφική Εξομοίωση Δικτύου (για 50 χρήστες)

Όπως βλέπουμε και στη παραπάνω εικόνα, η περιοχή ενδιαφέροντος στην εξομοίωση είναι η κεντρική συστάδα από *macrocells*, η οποία και χρωματίζεται με σκούρο γκρι χρώμα. Ο εξωτερικός δακτύλιος από *macrocell* σταθμούς βάσης που ρεαλιστικά δημιουργεί τις παρεμβολές χρωματίζεται με ανοιχτό γκρι. Με μαύρο χρώμα και με τη μορφή τριγώνου συμβολίζουμε αντικείμενα *macrocell* σταθμών βάσης, με μπλε χρώμα και με τη μορφή τριγώνου συμβολίζουμε αντικείμενα σταθμών *small cell* (όπου η περιοχή κάλυψης που προσφέρουν αναπαρίσταται με μπλε κύκλο) και οι τερματικές συσκευές στο δίκτυο συμβολίζονται με μικρά κόκκινα τετράγωνα.

Στη περιοχή ενδιαφέροντος, ο αριθμός των συνολικών χρηστών μπορεί να κυμανθεί από πενήντα (50) έως και διακόσιους πενήντα (250). Οι χρήστες έχουν 90% πιθανότητα να βρεθούν εντός της περιοχής ενδιαφέροντος των κεντρικών κυψελών και 10% πιθανότητα να βρεθούν σε κυψέλες του εξωτερικού δακτυλίου. Η παραπάνω σύμβαση είναι απαραίτητη ώστε να μελετήσουμε σενάρια στα οποία το δίκτυο είναι αρκετά πυκνό και η διαχείριση του υψηλού φόρτου εργασίας στους σταθμούς είναι ύψιστης σημασίας.

Οι τερματικές συσκευές στα επίπεδα *DL* και *UL* έχουν προφανώς διαφορετικές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Οι απαιτήσεις αυτές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις ανάγκες σε *RBs* από τους σταθμούς και η εξυπηρέτηση των αναγκών από τα δυο δίκτυα είναι ύψιστης σημασίας (η εξυπηρέτηση των αναγκών αυτόν συνεπάγεται και διατήρηση του *QoS*). Και για τα δυο δίκτυα, οι πιθανότητες οι χρήστες του δικτύου να ζητήσουν τις εκάστοτε ταχύτητες διαφέρουν. Ο Πίνακας 4 και ο Πίνακας 5 συνοψίζουν τα ζεύγη πιθανοτήτων και αναγκών σε ταχύτητες εκ μέρους τους χρηστών για τα δίκτυα *DL* και *UL* αντίστοιχα. Οι ανάγκες αυτές δημιουργούνται τυχαία σε κάθε νέα εκκίνηση της εξομοίωσης, με βάση τα όσα ορίζονται στο [43].

Πίνακας 4. Πιθανότητες οι χρήστες να ζητήσουν δεδομένες ταχύτητες στο *DL* επίπεδο

Ανάγκες σε Ταχύτητες (σε Kbps)	Πιθανότητα να έχουν τέτοιες ανάγκες (%)
2048	40
4096	30
8192	30

Πίνακας 5. Πιθανότητες οι χρήστες να ζητήσουν δεδομένες ταχύτητες στο *UL* επίπεδο

Ανάγκες σε Ταχύτητες (σε Kbps)	Πιθανότητα να έχουν τέτοιες ανάγκες (%)
1024	60
2048	30
4096	10

Προχωρώντας στη παραμετροποίηση του δικτύου, ο χρήστης είναι ελεύθερος να επιλέξει ελεύθερα διαφορετικές παραμέτρους που προέρχονται από εξωτερικό αρχείο αρχικοποίησης μεταβλητών στον κώδικα *MATLAB*. Όσον αφορά τις τεχνικές προδιαγραφές των *macrocell* σταθμών, ακολουθούμε πιστά τα όσα ορίζονται στο [40], ενώ οι προδιαγραφές για τους σταθμούς *small cell* και τις τερματικές συσκευές ορίζονται από τα [41] και [44]. Ο Πίνακας 6 συνοψίζει το σύνολο των τεχνικών προδιαγραφών για την εξομοίωση του υπερ-πυκνού ετερογενούς δικτύου με *DUDe* μηχανισμό.

Πίνακας 6. Τεχνικές Προδιαγραφές Εξομοίωσης

Παράμετρος	Ρύθμιση
Περιοχή	19 macrocells / 21 small cells
Κατεύθυνση Επικοινωνίας	DL / UL
Μετάδοση	Single Input Single Output (SISO)
Σχήμα Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης	64-Quadrature Amplitude Modulation (64-QAM)
Μορφή Πολυπλεξίας	FDD
Εύρος Ζώνης στο DL	60 MHz
Εύρος Ζώνης στο UL	40 MHz
Συχνότητα φορέα	2 GHz
Συχνότητα RB	180 KHz
Απόσταση μεταξύ υπο-φορέων	15 KHz
Φασματική Πυκνότητα Λευκού Θορύβου	- 174 dBm/Hz
Απόσταση μεταξύ macrocell σταθμών	750 m
Ακτίνα Κάλυψης macrocell σταθμού	375 m
Ακτίνα Κάλυψης small cell σταθμού	50 m
Τύπος κεραίας macrocell σταθμού	Αμφίδρομη
Τύπος κεραίας τερματικής συσκευής	Αμφίδρομη
Κέρδος κεραίας macrocell σταθμού	15 dBi
Κέρδος κεραίας τερματικής συσκευής	0 dBi
Ισχύς Εκπομπής macrocell σταθμού	40 Watt / 46 dBm
Ισχύς Εκπομπής small cell σταθμού	1 Watt / 30 dBm
Ισχύς Εκπομπής τερματικής συσκευής	0.2 Watt / 20 dBm

4.5 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός κατανομής χρηστών στο υπέρ-πυκνό δίκτυο αξιολογείται ως προς α) τις βελτιώσεις τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και β) τα ποσοστά επιτυχημένων συνδέσεων συσκευής-σταθμού. Θα δούμε ότι η δυνατότητα μιας συσκευής να συνδεθεί σε διαφορετικό σταθμό βάσης σε κάθε επίπεδο αυξάνει την αποδοτικότητα του δικτύου και επιτρέπει στις συσκευές (κυρίως στη περίπτωση του *UL*) να συνδέονται στο σταθμό που τους ωφελεί περισσότερο και όχι στο σταθμό που διαλέγει το δίκτυο για αυτούς.

Κάθε εξομοίωση δικτύου (*DL* και *UL*) εκτελείται κάθε φορά για τον ίδιο αριθμό χρηστών. Τα πειράματα ξεκινούν για την περίπτωση που το δίκτυο θα πρέπει να εξυπηρετήσει πενήντα (50) χρήστες και οι χρήστες συνεχώς θα αυξάνονται μέχρι και τους διακόσιους πενήντα (250), ώστε να μελετήσουμε τις περιπτώσεις που μας ενδιαφέρουν, δηλαδή τις περιπτώσεις συνωστισμού στο δίκτυο.

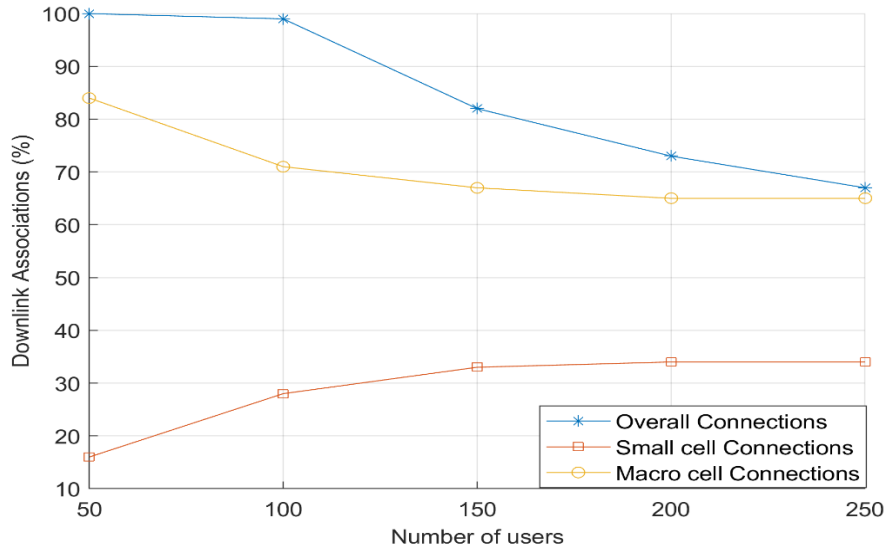
4.5.1 Σύνδεση συσκευής-σταθμού

Η μελέτη των επιδόσεων του μηχανισμού μας ξεκινούν από την ικανότητα του να συνδέσει αποδοτικά μια τερματική συσκευή (*UE*) σε ένα σταθμό βάσης (*BS*). Όπως παρατηρούμε στην *Εικόνα 19*, ο αλγόριθμος καταφέρνει να επιτύχει υψηλά ποσοστά χρηστών που τελικά γίνονται δεκτά και εξυπηρετούνται από το δίκτυο. Η μπλε καμπύλη αναπαριστά το συνολικό αριθμό από συνδέσεις σε σταθμούς *small cell* και *macrocell*, η πορτοκαλί καμπύλη αναπαριστά τις συνδέσεις συσκευών σε σταθμούς *small cell* και η κίτρινη καμπύλη τις συνδέσεις συσκευών σε σταθμούς *macrocell*. Οι ίδιοι χρωματισμοί ορίζονται και για την περίπτωση του *UL* επιπέδου στην *Εικόνα 20*.

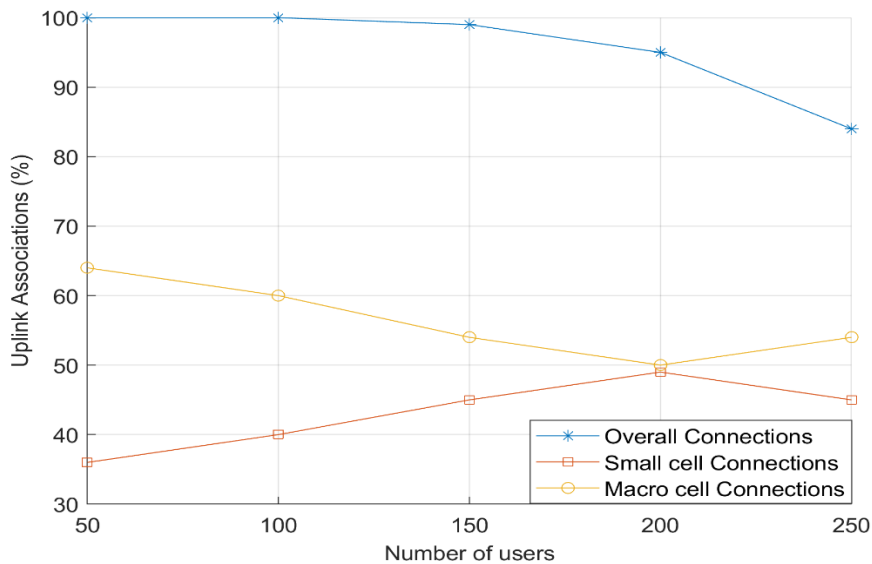
Όταν στο δίκτυο βρίσκεται ο ελάχιστος δυνατός αριθμός χρηστών (δηλαδή 50 χρήστες), τότε ο μηχανισμός επιτυγχάνει να κατανέμει όλους τους χρήστες σε κάποιο σταθμό βάσης. Όσο ο αριθμός των συσκευών στο δίκτυο αυξάνεται, παρατηρούμε ότι το ποσοστό επιτυχημένων συνδέσεων στο δίκτυο ελαττώνεται, γεγονός που είναι εύλογο να συμβαίνει. Σε κάθε σταθμό βάσης, κάνουμε τη σύμβαση πως η ισχύς εκπομπής θα είναι η μέγιστη δυνατή και κατά συνέπεια, ο αριθμός των *RBs* του σταθμού: α) εξαρτώνται άμεσα από το εύρος ζώνης του επιπέδου και β) διαμοιράζονται ομοιόμορφα σε κάθε σταθμό. Ενώ δηλαδή κάθε σταθμός (*macrocell* ή *small cell*) έχει προκαθορισμένους πόρους να προσφέρει στις συσκευές, οι συσκευές απεναντίας μπορούν να πολλαπλασιαστούν ανεξέλεγκτα, το οποίο προδίδει το ότι θα είναι σίγουρα μια τεράστια πρόκληση να καταφέρουμε να εξυπηρετήσουμε όλους τους χρήστες μέσα σε μια πυκνή περιοχή από συσκευές. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται στην *Εικόνα 19* (που αναφέρεται στο *DL* επίπεδο), αλλά και στην *Εικόνα 20* (που αναφέρεται στο *UL* επίπεδο), όπου όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών, το δίκτυο εξυπηρετεί να μεν ένα θεωρητικά υψηλό ποσοστό χρηστών, ποσοστό όμως που θα μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός τους.

Εξετάζοντας τις δυο αυτές εικόνες πιο προσεκτικά, θα παρατηρήσουμε το πόσο αναγκαία είναι η συνύπαρξη σταθμών *macrocell* και *small cell* σε μια κυψέλη. Όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται, οι συνδέσεις τους σε *macrocell* σταθμούς μειώνονται,

ενώ οι συνδέσεις σε *small cells* αυξάνονται (μοναδική εξαίρεση η περίπτωση των 250 χρηστών στην *Εικόνα 20*). Αυτή είναι άλλωστε και η κύρια λειτουργία των *small cells*, να προσφέρουν με οικονομικό τρόπο βελτιωμένη κάλυψη σε χρήστες πολύ μακριά από το κεντρικό *macrocell* σταθμό βάσης και να αποφορτίσουν τον εκάστοτε *macrocell* σταθμό σε πιθανά σενάρια όπου πολλαπλοί χρήστες επιθυμούν να συνδεθούν στο *macrocell*, το οποίο όμως δεν έχει αρκετούς πόρους για να καλύψει ικανοποιητικά όλους αυτούς τους χρήστες και πρέπει αναγκαστικά να επιχειρήσει να διαμοιράσει τους χρήστες σε γειτονικούς σταθμούς.



Εικόνα 19. Ποσοστά (%) Επιτυχημένων Συνδέσεων στο DL επίπεδο



Εικόνα 20. Ποσοστά (%) Επιτυχημένων Συνδέσεων στο DL επίπεδο

Συγκρίνοντας τώρα τα δύο επίπεδα *DL/UL* μεταξύ τους, αποκαλύπτεται πως το *UL* επίπεδο συμπεριφέρεται αποδοτικότερα σε σχέση με το *DL* επίπεδο. Όντως, για τουλάχιστον εκατό (100) τερματικές συσκευές και άνω, τα ποσοστά επιτυχημένων συνδέσεων στο *UL* επίπεδο είναι εμφανώς μεγαλύτερα, ενώ τα *small cells* χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο ως σταθμοί σύνδεσης, με τους σταθμούς *macrocell* να αποφορτίζονται εμφανώς περισσότερο. Το φαινόμενο αυτό προέρχεται καθαρά και μόνο από την εξίσωση (1). Καθώς οι ανάγκες των χρηστών του *UL* σε ταχύτητες είναι σαφώς λιγότερες σε σχέση με τις ανάγκες του *DL*, η εξίσωση (1) θα δημιουργεί και λιγότερες ανάγκες σε *RBs* από τους *UL* χρήστες, αφού οι ανάγκες σε *RBs* είναι ανάλογες των αρχικών αναγκών σε ταχύτητες. Ως αποτέλεσμα, η ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων σε *RBs* μεταφράζεται σε περισσότερες ευκαιρίες για έναν *UL* χρήστη να συνδεθεί σε ένα *small cell* που τον βολεύει. Αυτό συμβαίνει επειδή τα *small cells* έχουν μικρότερο αριθμό από *RBs* σε σχέση με τα *macrocells*, οπότε αν οι απαιτήσεις του χρήστη σε *RBs* από το *small cell* είναι παραπάνω από τους διαθέσιμους πόρους του σταθμού, αναγκαστικά ο χρήστης θα επιχειρήσει να συνδεθεί σε διαφορετικό σταθμό στο δίκτυο προς τον οποίον προφανώς έχει χειρότερη ποιότητα σύνδεσης (αφού ο αλγόριθμος που προτείναμε επιχειρεί πάντα να συνδέσει ένα χρήστη στο βέλτιστο σταθμό και αν αυτό δεν είναι εφικτό, δοκιμάζουμε τον επόμενο βέλτιστο σταθμό).

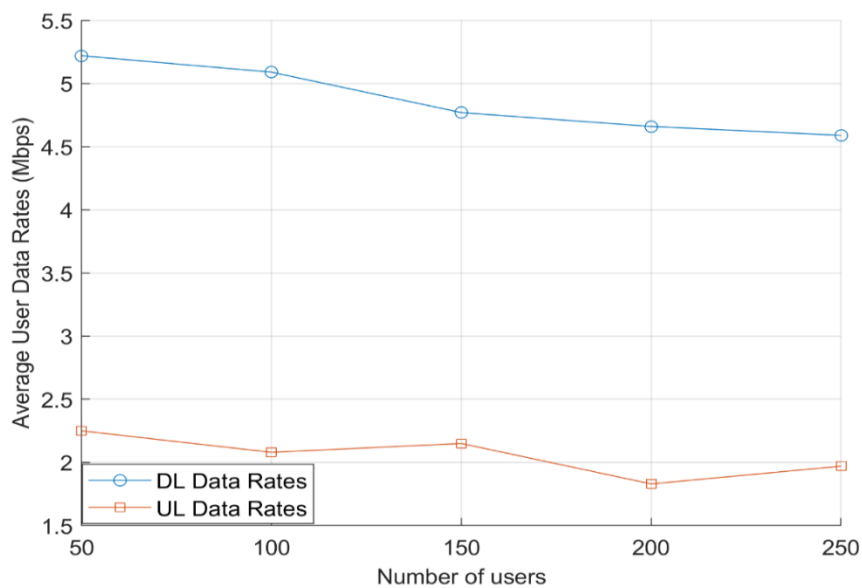
4.5.2 Ταχύτητες στις τερματικές συσκευές

Η *Εικόνα 21* απεικονίζει τους μέσους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (σε Mbps) των συσκευών και για τα δυο επίπεδα. Με βάση τα όσα ορίζονται από τις εξισώσεις (6) και (8), οι ταχύτητες των χρηστών είναι ανάλογες της ποιότητας σύνδεσής τους στο σταθμό (δηλαδή, του *SINR*) και άρα όσο υψηλότερο είναι το *SINR*, τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων των συσκευών. Και στα δυο επίπεδα, η πλειοψηφία των χρηστών καταλήγει να συνδέεται σε σταθμό *macrocell* παρά σε ένα σταθμό *small cell*. Στο σενάριο όπου έχουμε σχετικά μικρό αριθμό χρηστών στο δίκτυο (έστω η περίπτωση των 50 χρηστών), τότε το μεγαλύτερο μέρος των χρηστών θα συνδεθεί στο σταθμό ο οποίος είναι η βέλτιστη (ως προς το *SINR*) επιλογή και μάλιστα εφικτή, καθώς λόγω έλλειψης συνωστισμού στο δίκτυο, οι πόροι του σταθμού κατά πάσα πιθανότητα θα είναι πλήρως διαθέσιμοι. Όσο οι χρήστες στο δίκτυο αυξάνονται, για προκαθορισμένους πόρους σε κάθε σταθμό, θα είναι όλο και δυσκολότερο για τους χρήστες να συνδεθούν στο βέλτιστο (ως προς το *SINR*) σταθμό, οπότε αναδρομικά θα δοκιμάζουν πιθανούς γειτονικούς σταθμούς σε μεγαλύτερη απόσταση. Αυξημένη απόσταση μεταξύ συσκευής και σταθμού οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες σήματος (βλέπε εξισώσεις (2) και (3)) και λόγω της εξίσωσης (4), το κέρδος στο κανάλι για μια τέτοια σύνδεση θα μειώνεται. Μειωμένο κέρδος οδηγεί σε μειωμένο *SINR* (βλέπε εξισώσεις (5) και (7)), άρα και σε μειωμένες ταχύτητες, αφού οι ταχύτητες τους είναι ανάλογες της ποιότητας σύνδεσής τους στο σταθμό.

Όπως είναι λογικό, το γεγονός αυτό αποτυπώνεται ξεκάθαρα στην *Εικόνα 21*. Δηλαδή, οι μέσοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων ελαττώνονται όσο η εξομοίωση προσθέτει και περισσότερους χρήστες στο δίκτυο. Η *NC* προσέγγιση αναγκάζει μια συσκευή να συνδεθεί και στα δυο επίπεδα στον ίδιο σταθμό, αδιαφορώντας για το εάν

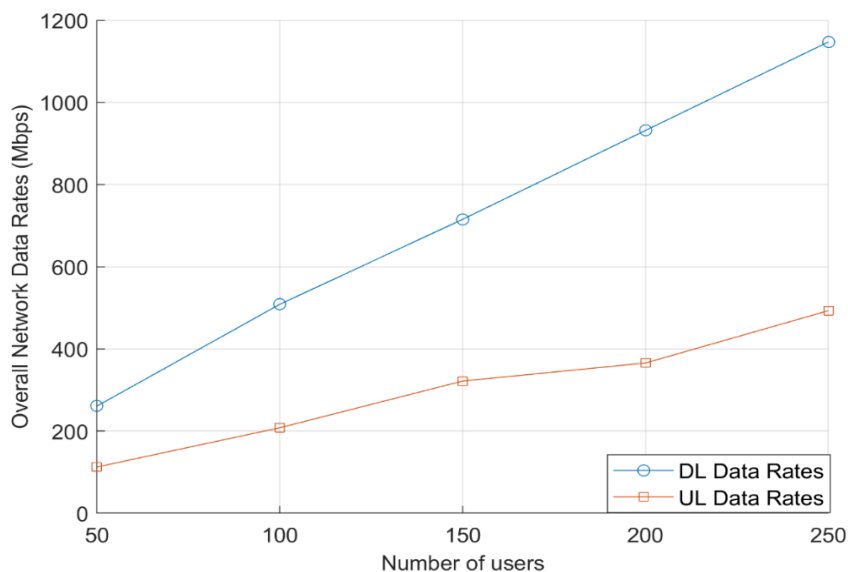
είναι προς όφελος της συσκευής και στα δυο επίπεδα να επικοινωνεί με τον ίδιο σταθμό. Αντίθετα, η *UC* προσέγγιση προσφέρει μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας στους χρήστες, καθώς τους επιτρέπει να συνδεθούν σε διαφορετικούς σταθμών στα διαχωρισμένα επίπεδα, με βάση το σταθμό που μπορεί να τις καλύψει πιο ικανοποιητικά. Η ωφέλιμη ως προς τη συσκευή σύνδεση σε σταθμούς στο διαχωρισμένο δίκτυο προσφέρει καλύτερη ποιότητα σύνδεσης μεταξύ συσκευής και σταθμού και κατά συνέπεια, υψηλότερες ταχύτητες στις συσκευές.

Συγκρίνοντας τα δυο επίπεδα μεταξύ τους, οι *DL* χρήστες έχουν ξεκάθαρα μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από τους *UL* χρήστες. Αναμέναμε να συναντήσουμε κάτι σχετικό, αφού ο Πίνακας 4 και ο Πίνακας 5 καθορίζουν σαφώς αυξημένες απαιτήσεις σε ταχύτητες στους *DL* χρήστες σε σχέση με τους *UL* χρήστες.



Εικόνα 21. Μέση Ταχύτητα Χρηστών στα επίπεδα DL/UL

Τέλος, η μελέτη επιδόσεων του δικτύου περιστρέφεται και γύρω από τις συνολικές ταχύτητες στα δυο επίπεδα. Η Εικόνα 22 αποτυπώνει τους συνολικούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπου όπως βλέπουμε οι ταχύτητες των χρηστών παρουσιάζουν σημαντικές αυξήσεις όσο οι χρήστες του δικτύου αυξάνονται (ο υπολογισμός γίνεται ως προς το άθροισμα όλων των συσκευών που συνδέθηκαν σε ένα σταθμό και για τα δυο επίπεδα).



Εικόνα 22. Συνολικές Ταχύτητες στα επίπεδα DL/UL

4.5.3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Στους παρακάτω πίνακες, παραθέτουμε όλα τα δεδομένα που μπορούμε να εξάγουμε τα πειράματα του προτεινόμενου μηχανισμού. Πιο συγκεκριμένα, ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε από την εξομοίωση του DL επιπέδου, ενώ ο Πίνακας 8 αναφέρεται στα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εξομοίωση στο UL επίπεδο.

Το πρώτο συμπέρασμα που πηγάζει από τα δεδομένα στους πίνακες αυτούς είναι ότι στο UL επίπεδο, ο μηχανισμός κατανομής χρηστών είναι αρκετά πιο αποδοτικός σε σχέση με το DL επίπεδο, καθώς οι απαιτήσεις σε ταχύτητες των UL χρηστών είναι μειωμένες και άρα οι ανάγκες τους σε RBs από τους σταθμούς θα είναι επίσης μειωμένες. Οι μειωμένες ανάγκες σε RBs οδηγούν σε μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχημένων συνδέσεων σε σταθμούς βάσης των UL χρηστών, αφού μπορούν να εξυπηρετηθούν πιο αποτελεσματικά και με λιγότερους πόρους δικτύου.

Το δεύτερο σημαντικό στατιστικό στοιχείο που προκύπτει είναι η τέλεια (100%) διατήρηση του QoS για τους χρήστες που κατάφεραν να συνδεθούν σε ένα σταθμό βάσης. Εφόσον ο τελεστής $\lceil \cdot \rceil$ στην εξίσωση (1) στρογγυλοποιεί τις απαιτήσεις από RBs που προκύπτουν από το κλάσμα προς τον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο, όσοι χρήστες εν τέλει συνδεθούν σε ένα σταθμό βάσης, τότε σίγουρα θα έχουμε καλύψει τις ελάχιστες ταχύτητες που απαιτούν, παρέχοντας μάλιστα ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες εάν η διαίρεση δεν εγγυάται ακέραιο αποτέλεσμα. Στη περίπτωση που από τη διαίρεση προκύψει ακέραιο αποτέλεσμα, τότε ο χρήστης αυτός, εάν και εφόσον καταφέρει να συνδεθεί σε ένα σταθμό, θα έχει ακριβώς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτήσει.

Έστω το τυχαίο σενάριο για 200 χρήστες στο DL επίπεδο. Η εξομοίωση οδήγησε σε 96 συνδέσεις σε *macrocells* και 50 συνδέσεις σε *small cells*, το οποίο σημαίνει ότι

οι εναπομείναντες $200 - 96 - 50 = 54$ χρήστες δεν κατάφεραν να συνδεθούν σε κανένα σταθμό εντός της κυψέλης τους, λόγω περιορισμένης διαθεσιμότητας των πόρων στους σταθμούς. Από τους χρήστες που κατάφεραν να συνδεθούν (δηλαδή, τους $96 + 50 = 146$), ξέρουμε σίγουρα ότι για όλους αυτούς, ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατάφερε να προσφέρει τουλάχιστον ίσες ταχύτητες σε σχέση με τις ταχύτητες που απαίτησαν και για αυτόν ακριβώς το λόγο, οι συνολικές συνδέσεις σε σταθμούς και οι συνολικές συνδέσεις όπου διατηρείται το QoS είναι όμοιες έννοιες για την εξομοίωσή μας.

Πίνακας 7. Συνολικά Αποτελέσματα Εξομοίωσης στο DL επίπεδο

Χρήστες	50	100	150	200	250
Χρήστες εκτός κάλυψης	0	1	26	54	81
Συνδέσεις σε macrocells	42	71	83	96	111
Συνδέσεις σε small cells	8	28	41	50	58
Συνολικές συνδέσεις με διατήρηση QoS	50	99	124	146	169
Μέσοι Ρυθμοί Μετάδοσης Δεδομένων (σε Mbps)	4.92	4.81	4.80	4.73	4.73
Συνολικές Ταχύτητες (σε Mbps)	246.25	481.04	719.95	945.43	1183.25

Πίνακας 8. Συνολικά Αποτελέσματα Εξομοίωσης στο UL επίπεδο

Χρήστες	50	100	150	200	250
Χρήστες εκτός κάλυψης	0	0	1	9	39
Συνδέσεις σε macrocells	32	60	81	97	115
Συνδέσεις σε small cells	18	40	68	94	96
Συνολικές συνδέσεις με διατήρηση QoS	50	100	149	191	211
Μέσοι Ρυθμοί Μετάδοσης Δεδομένων (σε Mbps)	2.14	2.15	2.04	1.84	1.99
Συνολικές Ταχύτητες (σε Mbps)	107.08	214.63	305.37	367.34	497.69

Κεφάλαιο 5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Τα 5G Δίκτυα αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς και αργά ή γρήγορα, η εγκατάσταση και η χρησιμοποίησή τους θα είναι άλλο ένα μέρος της καθημερινότητας των καταναλωτών. Αναμφίβολα, ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρούμε με την τεχνολογία θα αλλάξει για πάντα, καθώς θα πρέπει να συμμορφωθούμε με τα νέα καινοτόμα πρότυπα και τις επερχόμενες αλλαγές που θα οριστούν. Για να καταφέρουν τα δίκτυα αυτά να προσφέρουν όλα αυτά τα οποία υπόσχονται, κρίνεται επιτακτική η ανάγκη προσεκτικής μελέτης γύρω από τους πιο αποδοτικούς τρόπους ενσωμάτωσης των δικτύων αυτών στην υπάρχουσα δικτυακή τοπολογία. Επακριβώς το ρόλο αυτό διαδραματίζουν τα *small cells*, δηλαδή μικροί σε μέγεθος και οικονομικοί σε κόστος σταθμοί πρόσβασης, οι οποίοι πολλαπλασιάζουν τη χωρητικότητα του δικτύου, ελαττώνουν το φόρτο εγγεγραμμένων από τους κεντρικούς *macrocell* σταθμούς και προσφέρουν ικανοποιητική κάλυψη σε χρήστες μακριά από τους κεντρικούς *macrocell* σταθμούς, όπου η ποιότητα σύνδεσης θα ήταν κάκιστη και το μεταδιδόμενο σήμα θα αντιμετώπιζε πολλαπλές απώλειες στην ισχύ του. Ταυτόχρονα, ο διαχωρισμός του κύριου δικτύου σε *DL* και *UL* μέσω του *DUDE* μηχανισμού αποφέρει μια πληθώρα πλεονεκτημάτων τόσο για τις συσκευές όσο και για τα ανεξάρτητα διαχωρισμένα δίκτυα, ξεκινώντας από βελτιωμένη ποιότητα σύνδεσης και μειωμένες παρεμβολές μέχρι αυξημένες ταχύτητες και χαμηλότερη κατανάλωση μπαταρίας.

Με γνώμονα όλα τα παραπάνω, στη παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήσαμε τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα της υπερ-πύκνωσης του δικτύου από *small cells* και προτείναμε έναν αποδοτικό μηχανισμό κατανομής χρηστών στα διαχωρισμένα δίκτυα *DL* και *UL*, στοχεύοντας στη βέλτιστη ως προς το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων διαχείριση των πόρων στους σταθμούς βάσης και την πλήρη εξυπηρέτηση των αναγκών των χρηστών σε ταχύτητες, ανάγκες οι οποίες είδαμε και επεξηγήσαμε λεπτομερώς ότι μάλλον καλύφθηκαν και με το παραπάνω, οδηγώντας σε πλήρη διατήρηση του *QoS* στο ετερογενές δίκτυο εξομοίωσης στο οποίο εκτελέσαμε τα πειράματά μας.

Αρχικά, παρουσιάσαμε αναλυτικά το πρόβλημα, το οποίο μοντελοποιήσαμε για την εξομοίωση του ετερογενούς υπερ-πυκνού δικτύου. Ο ορισμός των απαραίτητων εξισώσεων έγινε ακολουθώντας πιστά τόσο τις τεχνικές προδιαγραφές του οργανισμού *3GPP*, όσο και τις επιστημονικές εργασίες που μελετούσαν ανάλογα σενάρια και προσομοίωναν 5G Δίκτυα με *DUDE* μηχανισμούς, εξισώσεις για τις οποίες επεξηγήσαμε τον κάθε όρο που τις χαρακτηρίζει.

Το τέλος της μοντελοποίησης του δικτύου σημαίνει και την αναπόφευκτη ανάγκη παρουσίασης του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής χρηστών. Ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί προκαθορισμένη γνώση της μετρικής του *SINR* που φανερώνει τη ποιότητα σύνδεσης μεταξύ του εκάστοτε σταθμού και της εκάστοτε συσκευής, αλλά και των *RBs* των σταθμών βάσης που φανερώνουν τους διαθέσιμους

πόρους συχνοτήτων που απαιτείται να προσφερθούν στις συσκευές ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις τους σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται ομοιόμορφα και στα δυο επίπεδα *DL* και *UL* και επιχειρεί να εξυπηρετήσει όσο το δυνατόν περισσότερες συσκευές σε κάθε δίκτυο, συνδέοντάς τις στο βέλτιστο ως προς τη ποιότητα σύνδεσης σταθμό βάσης. Στη περίπτωση που ο σταθμός αυτός δεν έχει διαθέσιμους τους αναγκαίους πόρους συχνοτήτων για να προσφέρει στο χρήστη, τότε ο αλγόριθμος υπολογίζει με βάση το *SINR* την επόμενη καλύτερη επιλογή για σύνδεση σε σταθμό. Ο εκ' νέου υπολογισμός της αμέσως καλύτερης επιλογής γίνεται αναδρομικά μέχρι να βρεθεί διαθέσιμος σταθμός. Προφανώς, αν δεν βρεθεί κανένας εφικτός σταθμός για σύνδεση εντός της κυψέλης, η συσκευή είναι αδύνατον να εξυπηρετηθεί.

Έχοντας υλοποιήσει και τον αλγόριθμο κατανομής χρηστών, απομένει μόνο ο καθορισμός των παραμέτρων εξομοίωσης του δικτύου. Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με το μοντέλο του συστήματός μας, οι τεχνικές παράμετροι εξομοίωσης ακολουθούν τις τεχνικές προδιαγραφές του οργανισμού *3GPP* και τις επιστημονικές εργασίες που μελετούσαν ανάλογα σενάρια και προσομοίωναν *5G* Δίκτυα με *DUDe* μηχανισμούς.

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης επιβεβαίωσαν τα όσα εκ των προτέρων ισχυριστήκαμε περί αποδοτικότητας του δικτύου που λειτουργεί σε συνδυασμό με σταθμούς *small cells* και *DUDe* μηχανισμό. Πιο συγκεκριμένα, είδαμε την ανάγκη συνύπαρξης *macrocell* και *small cell* σταθμών αφού όπως αποδείχτηκε, όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται, οι συνδέσεις τους σε *macrocell* σταθμούς μειώνονται, ενώ οι συνδέσεις σε *small cells* αυξάνονται, προδίδοντας την άμεση αναγκαιότητα των *small cells* σε συνωστισμένα δίκτυα για κάλυψη σε απομακρυσμένους χρήστες και αποφόρτιση των *macrocell* σταθμών.

Επιπρόσθετα, είδαμε ότι τα οφέλη που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.3 για τον *DUDe* μηχανισμό κυρίως στο *UL* επίπεδο επαληθεύονται στα πειράματά μας, αφού όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών στο δίκτυο, τα ποσοστά επιτυχημένων συνδέσεων στο *UL* επίπεδο είναι εμφανώς μεγαλύτερα σε σχέση με το *DL* επίπεδο, ενώ τα *small cells* χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο ως σταθμοί σύνδεσης, με τους σταθμούς *macrocell* να αποφορτίζονται εμφανώς περισσότερο.

Όσον αφορά τους μέσους ρυθμούς μετάδοσης, τότε παρατηρείται μια σχετική μείωση όσο στο δίκτυο προστίθενται επιπλέον χρήστες. Η συμμόρφωση με το *UC* μοντέλο προσφέρει μεγαλύτερη ελευθερία στις συσκευές, επιτρέποντας συνδέσεις σε διαφορετικούς σταθμούς στα διαχωρισμένα επίπεδα, με βάση το σταθμό που μπορεί να τις καλύψει πιο ικανοποιητικά. Κατά συνέπεια, ικανοποιητική ποιότητα και εξυπηρέτηση και στα δύο δίκτυα συνεπάγεται καλύτερες επιδόσεις από τη πλευρά των συσκευών.

Το αμέσως επόμενο που προκύπτει από τα παραπάνω δεν είναι άλλο πέραν της τέλει διατήρησης του *QoS* για τους χρήστες που κατάφεραν να συνδεθούν σε ένα σταθμό βάσης. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε λαμβάνει σοβαρά υπόψη τις ανάγκες των χρηστών σε πόρους, οι οποίες στρογγυλοποιούνται στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο και άρα σίγουρα καλύπτουμε τις ελάχιστες απαιτούμενες

ταχύτητες για τους χρήστες που επιτυχημένα συνδέονται σε σταθμό βάσης. Μάλιστα, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της εξομοίωσης αποκαλύπτουν πως η πλήρης διατήρηση του QoS για τους συνδεδεμένους χρήστες είναι ανεξάρτητη από το πλήθος των χρηστών στο συνωστισμένο δίκτυο, αφού για κάθε πείραμα με διαφορετικό αριθμό χρηστών, ο μηχανισμός προσφέρει τουλάχιστον τις αρχικές απαιτήσεις τους σε ταχύτητες.

5.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο, παραθέτουμε πιθανά ερευνητικές επεκτάσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και να επεκτείνουν την παρούσα εργασία. Άλλωστε, η έλευση των 5G Δικτύων συνοδεύεται από αρκετά αρχικές εκδόσεις τεχνολογιών όπως η 5G NR τεχνολογία και όπως έχουμε δει αναλυτικά και στην ιστορική αναδρομή, κάθε ξεχωριστή γενιά δικτύων χαρακτηρίζεται από πρότυπα και πρωτόκολλα τα οποία μελλοντικά επεκτάθηκαν για να καλύπτουν τις εκάστοτε ανάγκες των καταναλωτών.

Μια μελλοντικά ρεαλιστικότερη εξομοίωση του δικτύου θα ήταν η δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων με δυναμικά κινούμενους χρήστες. Η συμμόρφωση με σενάρια πραγματικής ζωής όπου οι χρήστες κινητής τηλεφωνίας κινούνται αποτελεί μια εύλογη σκέψη και αναμφίβολα, υπηρεσίες των 5G Δικτύων που περιλαμβάνουν χρήστες που κινούνται με πολύ υψηλές ταχύτητες (π.χ. τρένα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες) και όπου το *handover* θα πρέπει να γίνεται με ελάχιστη χρόνο-καθυστερήση, δημιουργούν ακόμα μεγαλύτερη ανάγκη για τη δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς του δικτύου με τη δυνατότητα κίνησης των χρηστών σε πραγματικό χρόνο.

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας *MIMO* ήδη έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι των ασύρματων δικτύων προγενέστερων γενεών και δεν θα μπορούμε να απουσιάζει από τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Παρόλο που οι *MIMO* δυνατότητες βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο στα 5G Δίκτυα, η υλοποίησή τους μελλοντικά αποκτάει άμεσα ενδιαφέρον, αφού μπορεί η τεχνολογία αυτή είναι σε θέση να αυξήσει το *SINR* των χρηστών σε μια κυψέλη και κατά συνέπεια, οι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν με πολλαπλάσια υψηλότερες ταχύτητες.

Η τεχνική του *CA* αναφέρθηκε και αυτή στην ιστορική αναδρομή της εργασίας μας και ακόμα και για 5G Δίκτυα, ο προσεκτικός σχεδιασμός και η ανάπτυξή τους μπορούν να αποβούν κερδοφόρα για το δίκτυο. Η δυνατότητα που δίνεται στους παρόχους του δικτύου να επαναχρησιμοποιούν συχνότητες του διαθέσιμου φάσματος των φορέων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καταμερισμό φάσματος στο σταθμό βάσης και άρα, οι πόροι συχνοτήτων των σταθμών μπορούν να αυξηθούν, αφού ήδη θα αυξηθεί και το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο δίκτυο.

Προφανώς, το γεγονός ότι η προσέγγιση του προτεινόμενου μηχανισμού εκμεταλλεύεται αποδοτικά τους διαθέσιμους πόρους συχνοτήτων στους σταθμούς βάσης δεν σημαίνει ότι ο αλγόριθμος δεν θα μπορούσε να στοχεύει στην επίτευξη διαφορετικών στόχων. Πράγματι, μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να εμπεριέχει τεχνικές ως προς τις ενεργειακές επιδόσεις των συσκευών του δικτύου, αφού

γνωρίζουμε έως ώρας ότι ο *DUDe* μηχανισμός σε συνδυασμό με το όραμα των 5G Δικτύων, υπόσχονται μειώσεις στη κατανάλωση της μπαταρίας της κινητής συσκευής.

Η ενεργειακή απόδοση μπορεί κάλλιστα να μελετηθεί και ως προς το όφελος των σταθμών βάσης, όπου αρκετές επιστημονικές μελέτες περιστρέφονται γύρω από την ενεργοποίηση της επιλογής του *sleep mode* για τους *femtocell* σταθμούς. Η επιλογή αυτή μειώνει την κατανάλωση του *femtocell*, ελαττώνοντας τη ισχύ (π.χ. κατανάλωση στη μνήμη του μικροεπεξεργαστή) ή και σε ορισμένες περιπτώσεις, απενεργοποιώντας πλήρως κυκλώματα και λειτουργίες (π.χ. πλήρης απενεργοποίηση πομπού και δέκτη ραδιοσυχνοτήτων στο *femtocell*) σε περιπτώσεις όπου ο σταθμός αυτός δεν εξυπηρετεί κανένα χρήστη και άρα δεν υπάρχει άμεση ανάγκη για να βρίσκεται σε πλήρη λειτουργική κατάσταση.

Κεφάλαιο 6.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. H. Alsharif, and R. Nordin, ‘*Evolution towards fifth generation (5G) wireless networks: Current trends and challenges in the deployment of millimetre wave, massive MIMO, and small cells*’, Telecommunication Systems Journal, Springer, vol. 64, no. 4, pp. 617-637, 2017.
- [2] Accelerated, ‘*A Brief History of Mobile Networks*’, 2017, <https://www.digi.com/accelerated?redirect=/m/66701/1/708211-a-brief-history-of-mobile-networks>
- [3] CableFree, ‘*Overview of LTE 3GPP Releases*’, 2015, <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/overview-of-lte-3gpp-releases/>
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/5G_NR
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/5G_NR_frequency_bands
- [7] RF Page, ‘*What is 5G NR (new radio) and how it works*’, 2017, <https://www.rfpage.com/what-is-5g-nr-new-radio-and-how-it-works/>
- [8] Α. Αλεξόπουλος, Γ. Λαγογιάνης, ‘*Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών*’, 10^η Έκδοση, Αθήνα, 2016.
- [9] S. Kavanagh, ‘*What is enhanced Mobile Broadband (eMBB)*’, <https://5g.co.uk/guides/what-is-enhanced-mobile-broadband-emb/>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/IMT-2020>
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/4G>
- [12] N. Vyakaranam, D. Krishna S, ‘*5G: Network As A Service – How 5G Enables the telecom operators to lease out their network*’, 2018, <https://netmanias.com/en/post/blog/13311/5g/5g-network-as-a-service-how-5g-enables-the-telecom-operators-to-lease-out-their-network>
- [13] 5G-PPP, ‘*View on 5G Architecture (Version 2.0)*’, 2017.
- [14] RF Page, ‘*Applications of 5G technology*’, 2018, <https://www.rfpage.com/applications-5g-technology/>
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_cell
- [16] T. Nguyen, ‘*Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1)*’, 2017, <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>

- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell>
- [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/Picocell>
- [19] NewsBytes, 'Ericsson launches world's first indoor picocell for small buildings', 2014, <http://newsbytes.ph/2014/09/10/ericsson-launches-worlds-first-indoor-picocell-for-small-buildings/>
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcell>
- [21] <https://en.wikipedia.org/wiki/C-RAN>
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_Transport_Network
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_optical_network
- [25] X. Zhang and X. Zhou, 'LTE-Advanced Air Interface Technology', CRC Press, 2013.
- [26] W. Guo, S. Wang, X. Chu, J. Zhang, J. Chen and H. Song, 'Automated small-cell deployment for heterogeneous cellular networks', in *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 5, pp. 46-53, 2013.
- [27] H. T. Cheng, A. Callard, G. Senarath, H. Zhang and P. Zhu, 'Step-Wise Optimal Low Power Node Deployment in LTE Heterogeneous Networks', 2012 *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Quebec City, QC, pp. 1-4, 2012.
- [28] H. Shimodaira et al., 'Optimization of picocell locations and its parameters in heterogeneous networks with hotspots', 2012 *IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications – (PIMRC)*, Sydney, NSW, pp. 124-129, 2012
- [29] C. S. Chen, V. M. Nguyen and L. Thomas, 'On Small Cell Network Deployment: A Comparative Study of Random and Grid Topologies', 2012 *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Quebec City, QC, pp. 1-5, 2012.
- [30] Y. Pak, K. Min and S. Choi, 'Performance evaluation of various small-cell deployment scenarios in small-cell networks', 18th *IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014)*, JeJu Island, pp. 1-2, 2014.
- [31] S. Cai, Y. Che, L. Duan, J. Wang, S. Zhou, and R. Zhang, 'Green 5G Heterogeneous Networks Through Dynamic Small-Cell Operation', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(5), pp. 1103-1115, 2016.
- [32] L. Frenzel, 'What's the Difference Between FDD and TDD?', 2012, <https://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-fdd-and-tdd>

- [33] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, P. Popovski, and S. Singh, ‘*Why to Decouple the Uplink and Downlink in Cellular Networks and How To Do It*’, in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 3, pp. 110-117, 2016.
- [34] H. Elshaer, F. Boccardi, M. Dohler and R. Irmer, ‘*Downlink and Uplink Decoupling: a Disruptive Architectural Design for 5G networks*’, 2014 IEEE Global Communications Conference, pp. 1798-1803, 2014.
- [35] K. Smiljkovikj, P. Popovski, and L. Gavrilovska, ‘*Analysis of the Decoupled Access for Downlink and Uplink in Wireless Heterogeneous Networks*’, in *IEEE Wireless Communications Letters*, Early Access, 2015.
- [36] S. Singh, X. Zhang, and J. G. Andrews, ‘*Joint Rate and SINR Coverage Analysis for Decoupled Uplink-Downlink Biased Cell Associations in HetNets*’, in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 10, pp. 5360-5373, 2014.
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Cooperative_MIMO
- [38] A. Ghaleb, D. Chieng, A. Ting, A. Abdulkafi, K.-C. Lim, and H.-S. Lim, ‘*Throughput performance insights of LTE release 8: Malaysia’s perspective*’, in 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 258-263, 2013.
- [39] H. Holma and A. Toskala, ‘*LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA based radio access*’, John Wiley & Sons, pp. 213-257, 2009.
- [40] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), ‘*3GPP TS 36.931, v13.0.0, Radio Frequency (RF) Requirements for LTE Pico Node B, (Release 13)*’, 2016.
- [41] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), ‘*3GPP TR 36.872, v12.1.0, Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN-Physical layer aspects, (Release 12)*’, 2013.
- [42] A. Goldsmith, ‘*Wireless Communications*’, Cambridge University Press, 2005.
- [43] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), ‘*3GPP TR 36.842, v12.0.0, Study on Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN; Higher Layer aspects, (Release 12)*’, 2013.
- [44] A. M. Ghaleb, A. M. Mansoor, and R. Ahmad, ‘*An Energy-Efficient User-Centric Approach for High-Capacity 5G Heterogeneous Cellular Networks*’, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, pp. 405-411, 2018.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

1. C. Bouras, V. Kokkinos and **E. Michos**, ‘*Resource-Efficient Decoupling in Ultra-Dense 5G Networks*’, in 2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2019.

Περίληψη: Η εξέλιξη των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G αναμένεται να αποτελείται από εγκαταστάσεις *small cell* σταθμών σε κοντινή απόσταση από τις υπάρχουσες υποδομές *macrocell*. Η υιοθέτηση των *small cells*, η οποία υπόσχεται να προσφέρει μια οικονομική λύση για βελτιωμένη κάλυψη και ρυθμούς δεδομένων, φαίνεται να είναι ο βασικός παράγοντας στη βελτίωση της συνεργασίας του δικτύου και της απόδοσης του συστήματος. Σε αυτή την εργασία, αξιολογούμε το *User-Centric* μοντέλο για τα Δίκτυα 5G, που στοχεύει στη βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ τερματικών χρηστών και σταθμών βάσης σε όλα τα επίπεδα. Προτείνουμε μια αποδοτική από πλευράς πόρων μέθοδο για τη βελτιωμένη εξωτερική κάλυψη των συσκευών και τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, με πλήρη σεβασμό προς τη Ποιότητα της Υπηρεσίας του χρήστη, αποσυνδέοντας το συνολικό δίκτυο σε *downlink* και *uplink* δίκτυα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες του δικτύου και στα δύο δίκτυα θα συνδεθούν αποτελεσματικά με έναν σταθμό βάσης. Οι επιδόσεις του δικτύου αξιολογούνται από την άποψη της βελτίωσης των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, της έκβασης των συνδέσεων και της διατήρησης της Ποιότητας της Υπηρεσίας για κάθε χρήστη. Ο αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας καταφέρνει τελικά να εξυπηρετήσει τη συντριπτική πλειοψηφία των χρηστών που είναι τοποθετημένοι σε ένα εξαιρετικά πυκνό δίκτυο και επιτυγχάνει άριστη διατήρηση της Ποιότητας της Υπηρεσίας, ανεξάρτητα από τον αριθμό των ενεργών χρηστών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Συντομεύσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, συνοδευόμενες από την επεξήγησή τους.

Συντόμευση	Επεξήγηση
1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
64-QAM	64-Quadrature Amplitude Modulation
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
BBU	BaseBand Unit
BSC	Base Station Controller
CA	Carrier Aggregation
CDMA	Code-Division Multiple Access
CN	Core Network
CO	Central Office
CO-MIMO	Cooperative Multiple-Input Multiple-Output
CoMP	Coordinated Multipoint
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Cloud-Radio Access Network
CWDM	Coarse Wavelength-Division Multiplexing
D2D	Device-to-Device
DL	Downlink
D-RAN	Distributed-Radio Access Network
D-RoF	Digital Radio over Fiber
DUDe	Downlink/Uplink Decoupling

DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EHF	Extreme High Frequencies
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eNB	eNodeB
EV-DO	Evolved-Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplex
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HD	High Definition
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
IMT-2020	International Mobile Telecommunications System-2020
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
LPN	Low Power Node
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MMS	Multimedia Messaging Service
mMTC	Massive Machine Type Communications
MSC	Mobile Switching Centre
NC	Network-Centric
NFV	Network Function Virtualization
NMT	Nordic Mobile Telephone
NR	New Radio
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
ONE	Optical Transport Elements
OTN	Optical Transport Network
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio

PNF	Physical Network Functions
PnP	Plug and Play
PON	Passive Optical Network
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RFID	Radio Frequency Identification
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
RTT	Round Trip Time
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SDM-C	Software Defined Mobile Network Controller
SDM-X	Software Defined Mobile Network Coordinator
SDN	Software Defined Networking
SE	Spectral Efficiency
SINR	Signal-to-Interference-plus-noise ratio
SISO	Single Input Single Output
SMS	Short Message Service
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TACS	Total Access Communications System
TDD	Time Division Duplex
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UC	User-Centric
UDN	Ultra-Dense Network
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
URLCC	Ultra Reliable Low Latency Communications
VNF	Virtual Network Functions
VR	Virtual Reality

W-CDMA	Wideband Code-Division Multiple Access
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
WiMAX	Worldwide Interoperability Microwave Access