

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



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**
UNIVERSITY OF PATRAS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη της απόδοσης των Small Cells στα κινητά δίκτυα
πέμπτης γενιάς**

Συγγραφέας

Ανθιμίδης Παναγιώτης

A.M. 235990

Υπεύθυνος Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Επιβλέπων

Βασίλειος Κόκκινος

ΠΑΤΡΑ, Αύγουστος 2021

© Copyright συγγραφέας Παναγιώτης Ανθιμίδης, 2021

© 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 της απόδοσης των Small Cell στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς».

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 την οικογένεια μου.

Πάτρα, Αύγουστος 2021
Παναγιώτης Ανθιμίδης

Περίληψη στα Ελληνικά

Τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς είναι ήδη στην καθημερινότητα μας . Η απόδοση τους και η ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρουν στους χρήστες είναι πρωτοφανής. Στην παρούσα εργασία αναλύουμε ένα εξειδικευμένο κομμάτι των 5G δικτύων, τα *small cells*. Οι μικροί σταθμοί βάσης που έχουν μεγάλη συνεισφορά στη λειτουργία των δικτύων αποτελούν ένα άκρως ενδιαφέρον θέμα που σχετίζεται με τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Θα αναλύσουμε τα *small cells* και την απόδοσή τους και στη συνέχεια θα δούμε με ποιον τρόπο μπορούν να βοηθήσουν στην ελάττωση των παρεμβολών και στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

Περίληψη στα Αγγλικά

Fifth generation mobile networks are already in our daily lives. Their performance and the quality of the services they offer to the users is unprecedented. In the present work we analyze a specialized part of the 5G networks, the *small cells*. Small base stations that make a major contribution to the operation of networks are a very interesting topic related to telecommunications networks. We will analyze the *small cells* and their performance and then we will see how they can help reduce interference and the energy efficiency of the network.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. 1G – 4G.....	12
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	12
1.2 1G	13
1.3 2G	13
1.4 3G	14
1.5 4G	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (5G).....	18
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ 5G.....	18
2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ 5G	19
2.2.1. SDN ΚΑΙ NFV	21
2.2.2. NETWORK SLICING.....	22
2.2.3. SMALL CELLS	23
2.2.4. MASSIVE MIMO ΚΑΙ BEAMFORMING	24
2.3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ 5G	25
2.4. ΤΟ 5G ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. SMALL CELLS	28
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ SMALL CELLS	28
3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ SMALL CELLS	29
3.3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ SMALL CELLS.....	32
3.3.1. FEMTOCELLS.....	32
3.3.2. PICOCELLS	35
3.3.3. MICROCELLS	36
3.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ SMALL CELLS	37
3.4.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΧΥΟΣ EARTH.....	39
3.5. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ C-RAN	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	45
4.1 DOWNLINK, UPLINK ΚΑΙ DECOUPLING DL/UL.....	46
4.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΈΚΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ	63
5.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ,ΦΑΣΜΑ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ	64

5.2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	66
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ</u>	68
6.1. ΣΥΝΟΨΗ.....	68
6.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	69
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	72

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρονική περίοδος στην οποία διάγουμε τις ζωές μας είναι όσο ποτέ άλλοτε εξαρτώμενη από τη δύναμη της πληροφορίας. Η πληροφορία δεν είναι όμως μια αφαιρετική έννοια, είναι μια ουσιαστική γνώση που απαιτεί σωστή μελέτη, ορθή μεταφορά και διαχείριση. Μέσω αυτής μπορούμε πλέον να επικοινωνούμε και να ελαχιστοποιούμε τις αποστάσεις. Τίποτε όμως δεν θα μπορούσε να συμβεί εάν η πληροφορία δεν ταξίδευε μέσα από τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Η επιστημονική πρόοδος του τομέα των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων σήμερα είναι μείζονος σημασίας και αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε όλα τα μήκη και τα πλάτη της υφηλίου.

Είναι κοινός τόπος το γεγονός ότι τα τεχνολογικά επιτεύγματα που έχουν επιτευχθεί στον συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα, είναι αξιοθαύμαστα και ειδικότερα ο ρυθμός με τον οποίο η επιστημονική κοινότητα έχει καταφέρει να παρουσιάζει συνεχώς νέες εφαρμογές είναι ραγδαίος. Πιο ειδικά ο τομέας των δικτύων σήμερα είναι σε θέση να προσφέρει αρκετά καλή ποιότητα υπηρεσιών, υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων, ικανοποιητική ασφάλεια και σχετικά μικρές καθυστερήσεις μετάδοσης. Όμως ο αριθμός των χρηστών συνεχώς διογκώνεται και κατά συνέπεια ο ρυθμός των πληροφοριών που μπορούν να ταξιδέψουν μέσα στα δίκτυα αυξάνεται με ιλιγγιώδεις ρυθμούς. Σύμφωνα με αυτό, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί γνωρίζουν ότι υπάρχουν διαρκώς νέες προκλήσεις και προβλήματα που απαιτούν λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Στόχος λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση των δικτύων και η ανασκόπηση της προόδου που έχουν λάβει από την αρχή της εφεύρεσης τους μέχρι και σε πολύ εξειδικευμένες γενιές δικτύων. Ειδικότερο αντικείμενο μελέτης σε αυτή την εργασία είναι τα *small cells*. Η σπουδαιότητα, ο τρόπος λειτουργίας και η αποδοτικότητα τους είναι τα πιο σημαντικά ζητήματα που αναλύουμε παρακάτω, δίνοντας περαιτέρω βάση στη χρησιμότητα τους στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G).

Στο Κεφάλαιο 1, θα ξεκινήσουμε την παρουσίαση με μια ιστορική αναδρομή, εκκινώντας από την ανακάλυψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και των μαθηματικών μοντέλων που αποτελούν τη βάση όλων των δικτύων. Στη συνέχεια θα πραγματευτούμε την ιστορική πορεία που είχαν τα ασύρματα κινητά δίκτυα από την πρώτη γενιά μέχρι και την τέταρτη γενιά. Θα ασχοληθούμε πιο αναλυτικά με τα 4G δίκτυα και το πρότυπο LTE-A διότι εκεί για πρώτη φορά στην ιστορία συναντάμε την έννοια της πυκνοποίησης του δικτύου (*network densification*) που είναι μια έννοια συνυφασμένη με τα *small cells* τα οποία αποτελούν το κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, θα περιγράψουμε αναλυτικά τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς ή αλλιώς 5G. Αρχικά θα ανφέρουμε κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν αυτή τη γενιά δικτύων. Έπειτα θα κάνουμε μια ουσιαστική ανασκόπηση των τεχνολογιών που διακατέχουν καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία και την αποδοτικότητα του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα αναφερόμαστε στις τεχνολογίες SDN,NFV,στο Network slicing,στα MIMO και Beamforming και φυσικά στα small Cells.Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε κάποιες εφαρμογές οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή στα 5G κινητά δίκτυα και θα κλείσουμε το κεφάλαιο δίνοντας ορισμένες πληροφορίες σχετικά με τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς στη χώρα μας.

Στο Κεφάλαιο 3, θα διεξάγουμε μια εκτενέστερη ανάλυση στα small cells,ξεκινώντας από τη περιγραφή τους και το ρόλο που κατέχουν εσωτερικά του δικτύου.Στη συνέχεια θα περιγράψουμε κάποια γενικά τους χαρακτηριστικά και θα εξετάσουμε διάφορα έξυπνα σημεία στα οποία τα τοποθετούν οι πάροχοι των δικτύων ώστε να μπορούν να καλύψουν τους τεράστιους ρυθμούς δεδομένων των χρηστών.Ακόμη θα αναφέρουμε όλες τις κατηγορίες των σταθμών βάσεων και θα μελετήσουμε την ενεργειακή τους απόδοση σύμφωνα με το μοντέλο ισχύος EARTH. Η αποδοτικότητα των small cells όπως θα διαπιστώσουμε παρακάτω συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην ενεργειακή κατάσταση του δικτύου.Στο τέλος του κεφαλαίου θα αναφέρουμε την αρχιτεκτονική C-RAN,είναι ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου το οποίο είναι συμβατό με τα small cells.

Στο Κεφάλαιο 4, θα αναλύσουμε ζητήματα που προκύπτουν σε θέματα παρεμβολών και ισχύος,γενικά στα δίκτυα αλλά και πιο ειδικά στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς. Επιπρόσθετα θα παρουσιάσουμε διάφορες τεχνικές κατά τις οποίες με κατάλληλες μεθόδους λειτουργίας των small cells έχουμε τη δυνατότητα να επιλύουμε προβλήματα παρεμβολών και ενεργειακής αποδοτικότητας του δικτύου. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε δύο αλγορίθμους που προτάθηκαν και πέρασαν σε πειραματικό στάδιο σχετικά με την απόδοση των small cells και την δραστική συμπεριφορά στα προβλήματα των παρεμβολών και την ενέργειας. Θα περιγράψουμε τους αλγορίθμους και τα μοντέλα επάνω στα οποία οι ερευνητές διεξήγαγαν τα πειράματα τους και στο τέλος θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα με διάφορες γραφικές παραστάσεις.

Στο Κεφάλαιο 5, θα σχολιάσουμε περιγραφικά,δίνοντας έμφαση στα πιο σημαντικά στοιχεία των κινητών δικτύων έκτης γενιάς (6G). Πιο αναλυτικά θα αναφέρουμε τις απαιτήσεις και μερικές κατηγορίες εφαρμογών που θα έχουν τη δυνατότητα να γίνουν πραγματικότητα σε αυτή τη γενιάς δικτύων. Ακόμη αναφέρουμε την ζώνη συχνοτήτων στην οποία θα λειτουργούν τα 6G και στο τέλος παρουσιάζουμε μια προτεινόμενη αλλά εξαιρετικά ενδιαφέρουσα αρχιτεκτονική δικτύου στην οποία ίσως βασίζονται τα δίκτυα των επόμενων γενεών.

Στο Κεφάλαιο 6, θα πραγματοποιηθεί μια ανασκόπηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα αναφέρουμε κάποια ζητήματα τα οποία απαιτούν περαιτέρω επιστημονικής έρευνας και μελέτης στο μέλλον.

Κεφάλαιο 1. 1G – 4G

1.1 Ιστορική αναδρομή

Μια από τις βασικότερες ανάγκες του ανθρώπινου γένους κατά το ταξίδι του στο χρόνο αναμφίβολα είναι εκείνη της επικοινωνίας. Η θεμελιώδης αυτή έννοια συνέβαλε τα μέγιστα στην διαμόρφωση και την βελτίωση των ανθρώπων σε κάθε γωνιά του πλανήτη. Με τη πάροδο των ετών και τα συνεχώς αυξανόμενα επιστημονικά επιτεύγματα, η ανθρωπότητα αναζητούσε λύσεις για ταχύτερη και ασφαλέστερη επικοινωνία. Όλα όμως ξεκίνησαν την δεκαετία του 1860 και την ανακάλυψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τον σκωτσέζο φυσικό *James Clark Maxwell*. Ο *Maxwell* κατόρθωσε να πραγματοποιήσει μια καινοτόμα ανακάλυψη για την εποχή κατά την οποία διαπίστωσε ό,τι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν στον αέρα με ταχύτητα που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός. Λίγα χρόνια αργότερα ο γερμανός φυσικός *Heinrich Hertz* ανακάλυψε ένα τρόπο ώστε να μπορεί να κατασκευάζει αλλά και να ανιχνεύει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το επίτευγμα του *Hertz* ώθησε την επιστημονική κοινότητα στην ιδέα ό,τι τα φέροντα αυτά κύματα κατά τη μετάδοσή τους θα μπορούσαν με την κατάλληλη επεξεργασία να μεταφέρουν πληροφορία. [1]

Λίγα χρόνια νωρίτερα από τις προαναφερθείσες ανακαλύψεις των παραπάνω ερευνητών, ο Αμερικανός φυσικός *Samuel Morse* εφηύρε τον κώδικα *Morse* και τον πρώτο ενσύρματο τηλεγράφο. Ήταν η απαρχή της πρώτης ουσιαστικής μετάδοσης της πληροφορίας που μπορούσε να επιτευχθεί. Ο κώδικας *Morse* δεν ήταν τίποτε άλλο από την μεταφορά πληροφορίας μέσω παλμών μικρής διάρκειας, όπου αντιπροσώπευαν τις τελείες και παλμών μεγάλης διάρκειας που αντιπροσώπευαν τις παύλες. Ο ενσύρματος τηλεγράφος ήταν ένα μέσο επικοινωνίας, όμως η ενσύρματη φύση του, οι γεωγραφικοί περιορισμοί και η δυνατότητα αποστολής μικρής ποσότητας πληροφορίας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κατέστησαν την τεχνολογική του αναβάθμιση αναγκαία.

Το 1893, ο Σέρβος ηλεκτρολόγος μηχανικός *Nikola Tesla* επιδεικνύει για πρώτη φορά δημόσια μια ασύρματη μεταφορά ραδιοκυμάτων στην Φιλαδέλφεια των Ηνωμένων Πολιτειών. Κατά το πείραμα του ο *Tesla* χρησιμοποιεί ένα πομπό, μια γειωμένη κεραία, ένα συντονισμένο κύκλωμα, ένα διακόπτη για σήματα *Morse* και ένα δέκτη με σωλήνα εκκένωσης αερίου που χρησιμοποιήθηκε σαν δείκτης λήψης των ραδιοκυμάτων. [2] Η εκπομπή και λήψη σημάτων μέσω ηλεκτρικών ταλαντώσεων ήταν γεγονός. Με την πάροδο του χρόνου, όλο και περισσότεροι νέοι επιστήμονες και μηχανικοί ασχολήθηκαν με την ασύρματη μεταφορά πληροφορίας, βασιζόμενοι πάντα στο επιστημονικό υπόβαθρο της εποχής. Με πρωτεργάτη τον Ιταλό μηχανικό *Guglielmo Marconi* και την πατέντα του, τον ασύρματο τηλεγράφο η επιστημονική κοινότητα πέρασε σε μια άλλη εποχή. Στη συνέχεια, οι τηλεπικοινωνιακές έρευνες επικεντρώθηκαν στην ασύρματη τηλεφωνία

Η ασύρματη τηλεφωνία εμφανίστηκε στο προσκήνιο λίγο μετά το πέρας του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου. Είναι η πρώτη εποχή της τηλεφωνίας, καθώς το δίκτυο δεν είχε τη κυψελοειδή μορφή που γνωρίζουμε σήμερα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι ότι ο πάροχος είναι εκείνος που πραγματοποιεί τις κλήσεις και υπάρχουν ελάχιστα διαθέσιμα κανάλια. Αυτή η τεχνολογία ονομάστηκε *0G (Zero Generation)* και ήταν διαθέσιμη σχεδόν αποκλειστικά σε υψηλά ιστάμενα πρόσωπα που επιθυμούσαν να επικοινωνήσουν μέσω φωνητικών κλήσεων. [3] Ο μικρός αριθμός καναλιών σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά, παρακίνησε τους ερευνητές στη μεθοδευμένη έρευνα για ακόμη περισσότερη βελτίωση στην παροχή υπηρεσιών, πράγμα που οδήγησε στην έλευση του *1G*.

1.2 1G

Το *1G (First Generation)* είναι η πρώτη γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας και πρωτοεμφανίστηκε το 1980 με τα πρώτα αναλογικά κινητά τηλέφωνα να κάνουν την εμφάνιση του. Η επικουρική επιστημονική βάση στην οποία στηρίχθηκε ήταν το πρώτο κυψελοειδές σύστημα στο κόσμο το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 1979 από την ιαπωνέζικη εταιρεία *Nippon Telephon and Telegraph (NTT)*. Στην Ευρώπη τα πρώτα αναλογικά κυψελοειδή τηλεφωνικά συστήματα ήταν το *Nordic Mobile Telephone (NMT)* και το *Total Access Communications System (TACS)* και άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως τη δεκαετία του 1980. Στις ΗΠΑ το *AMPS* ήταν το πρώτο πρότυπο *1G* που έκανε την εμφάνιση του το 1982. Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνίας της χώρας εκχώρησε ένα εύρος ζώνης *40 MHz* εντός του εύρους συχνοτήτων *800-900 MHz* για τη λειτουργία του συστήματος. Όλα τα συστήματα πρόσφεραν ομαλή μεταφορά της τηλεφωνικής κλήσης για συνδρομητές του δικτύου. Ο ρυθμός μετάδοσης εντός του τηλεπικοινωνιακού δικτύου πρώτης γενιάς έφτανε έως και *2,4 kbps*. Παρόλα αυτά υπήρχαν προβλήματα όπως για παράδειγμα η αδυναμία να λειτουργήσουν αυτά τα συστήματα μεταξύ κρατών, η χαμηλή χωρητικότητα του φάσματος, η μεγάλη πρόκληση παρεμβολών και φυσικά η έλλειψη ασφάλειας των φωνητικών κλήσεων. Σύμφωνα λοιπόν με τα προαναφερθέντα τεχνικά προβλήματα η βελτίωση και η ανάγκη για ένα νέο αναβαθμισμένο κυψελοειδή δίκτυο ήταν απαραίτητο για να καλύψει επαρκέστερα την επικοινωνία των χρηστών. Έτσι μεταβήκαμε ομαλά στη δεύτερη γενιά δικτύων *2G*. [3]

1.3 2G

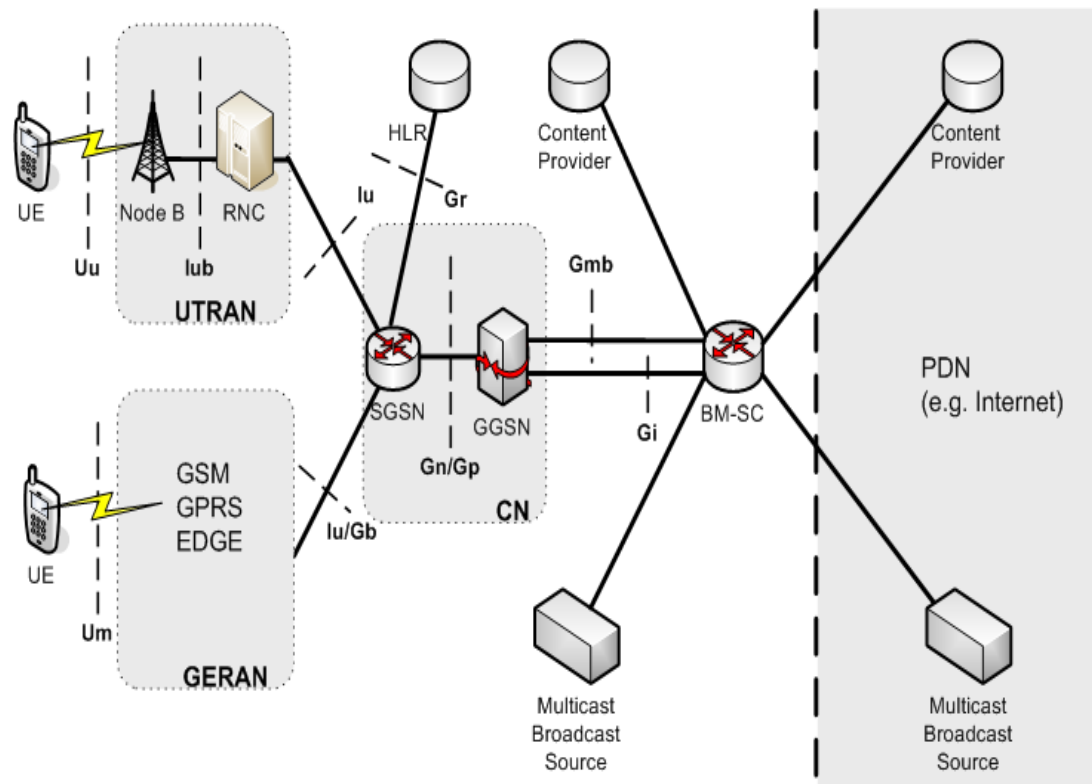
Τα ασύρματα κινητά κυψελοειδή δίκτυα δεύτερης γενιάς *2G* είναι βασισμένα σε ψηφιακή τεχνολογία και πρωτοεμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Το 1991 η Φινλανδία ήταν η πρώτη χώρα που εισήγαγε τα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Οι επαναστατικές του διαφορές σε σχέση με τον προκάτοχο του ήταν αισθητές. Για πρώτη φορά ο πομπός με τον δέκτη μπορούν να ανταλλάσσουν μεταξύ τους γραπτά

μηνύματα κειμένου,εικόνες αλλά ακόμη και video. Επιπρόσθετα η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών αναβαθμίστηκε όσον αφορά την ασφάλεια της,καθώς όλα τα μηνύματα και οι κλήσεις πλέον μπορούν να κρυπτογραφηθούν ψηφιακά προσφέροντας αρκετά καλή για την εποχή ποιότητα υπηρεσιών. Οι τεχνικές μετάδοσης του προτύπου 2G στηρίχθηκαν στην καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος μέσω του TDMA (*Time Division Multiple Access*) και του CDMA (*Code Division Multiple Access*). Με αυτές τις δύο τεχνικές κάθε χρήστης μπορεί να μεταφέρει πληροφορία σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές του φάσματος και πολλαπλοί χρήστες μπορούν να στέλνουν πληροφορίες ταυτόχρονα στο κανάλι του δέκτη. Το πρότυπο στο οποίο βασίστηκε το εγχείρημα ήταν το GSM (*Global System for Mobile Communications*) και χρησιμοποιήθηκε συνολικά από 212 χώρες προσφέροντας μεγάλη βελτίωση στη διεθνή περιαγωγή,επιτρέποντας στους χρήστες να χρησιμοποιούν τα τηλέφωνα τους σε πολλά μέρη του κόσμου.

Σύμφωνα με το πρότυπο GSM αναπτύχθηκαν μεταγενέστερα και άλλες τεχνολογίες έτσι ώστε να βελτιώσουν τον ρυθμό μετάδοσης και τη χωρητικότητα του δικτύου. Για παράδειγμα το GPRS (*General Packet Radio Service*) είναι μια επέκταση του δικτύου 2G που παρέχει καλύτερες αποδόσεις στον ρυθμό με τον οποίο μπορεί να στέλνει δεδομένα ο χρήστης. Για την ακρίβεια αυτή η επέκταση 2.5G όπως ονομάστηκε ξεκινούσε το ρυθμό μετάδοσης από 56 kbps και έφτανε έως και 384 kbps. Έπειτα εμφανίστηκε η τεχνολογία EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*),μια εκτεταμένη έκδοση του GSM με σαφή και γρήγορη μετάδοση δεδομένων και πληροφοριών με τις ταχύτητες να φτάνουν ακόμη και στο 500 kbps.Με την καθιέρωση της τεχνολογίας EDGE μεταφερθήκαμε στη γενιά δικτύων 2.75G αλλά όλα έδειχναν πως υπάρχουν ακόμη πολλοί τομείς που επιδέχονται αναβάθμιση στον τηλεπικοινωνιακό κόσμο. [3]

1.4 3G

Το 3G είναι η τρίτη γενιά προτύπων που χρησιμοποιήθηκε για τα ευρυζωνικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών, έκανε την εμφάνιση του το 2001 και είναι συνυφασμένο με τα πρότυπα της ITU (*International Telecommunication Union*). Συγκρίνοντας το πρότυπο 3G με τα προηγούμενα 1G και 2G παρατηρούμε ότι η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι αισθητά βελτιωμένη καθώς από τα 144Kbps μεταβαίνουμε σε ταχύτητες 2 Mbps. Μετά από μερικά έτη φυσικά οι ταχύτητες αυξήθηκαν στα 10 Mbps έπειτα από διάφορες επεκτάσεις των βασικών πρωτοκόλλων. Το 3G βασίζεται στην υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων τα οποία όμως είναι μοιρασμένα σε πακέτα (packet-switched) και βασίζεται και αυτό πάνω στο υπάρχων πρότυπο GSM με μία παραλλαγή του CDMA που ονομάζεται WCDMA(*Wideband-CDMA*).Επιπλέον το πρότυπο UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) με την καινοτόμα αρχιτεκτονική του έθεσε νέα θεμέλια σχετικά με την κινητικότητα των χρηστών μέσα στο δίκτυο. [4] Για την αξιόπιστη και αντικειμενική μελέτη όλου του τεχνολογικού εγχειρήματος μάλιστα έχει θεσπιστεί ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός με το όνομα *Third Generation Partnership Project (3GPP)* του οποίου μέλημα είναι η παρακολούθηση και η εξέλιξη στη συγκεκριμένη τεχνολογική περιοχή.



Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική UMTS [4]

Ακολούθησαν στη συνέχεια διάφορες προεκτάσεις και υλοποιήσεις των πρωτοκόλλων, όπως το *HSPA* (*High Speed Packet Access*) το οποίο είναι συμβατό και χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες με το *WCDMA* και προσφέρει ταχύτητες *14.4Mbps* για το downlink και *5.76 Mbps* για το uplink. Στη συνέχεια οι μηχανικοί θέλοντας να αυξήσουν περαιτέρω τις ταχύτητες μετάδοσης προχώρησαν στην αναθεώρηση του *HSPA* σε *HSPA+* με το οποίο οι χρήστες μπορούσαν να φτάσουν στα *168 Mbps* κατά το downlink και στα *22 Mbps* κατά το uplink. Με αυτές τις ταχύτητες μετάδοσης είχαμε εισέλθει στον κόσμο των *3.5G δικτύων*. Κλείνοντας είναι άξιο αναφοράς το ασύρματο πρότυπο επικοινωνίας *WiMAX* (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) το οποίο βασίστηκε στα πρότυπα της *IEEE 802.16* και προσέδωσε ένα ακόμη επίπεδο ευεργετικότητας στους χρήστες ανοίγοντας τον δρόμο για την επόμενη γενιά δικτύων, διότι με την καθιέρωση του η επιστημονική κοινότητα βρισκόταν ήδη στη γενιά δικτύων *3.75G*. [5]

1.5 4G

Τα κινητά δίκτυα τέταρτης γενιάς ή αλλιώς *4G* (*Fourth Generation Networks*) έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση το 2009 σε δύο σκανδιναβικές χώρες, την Σουηδία και τη Νορβηγία. Τα *4G* δίκτυα συστήθηκαν στους καταναλωτές βασισμένα στο πρότυπο *LTE Έκδοση 8* όπως καθόρισε ο μη κερδοσκοπικός οργανισμός *3GPP*. Η τεχνολογία *LTE* πρόσφερε ταχύτητες μέχρι και *100 Mbps* στους χρήστες, αριθμός

που απαγόρευε τους ειδικούς να χαρακτηρίσουν το πρότυπο ως μέλος της οικογένειας του 4G. Δύο χρόνια αργότερα, το 2011 ήρθε στην αγορά η επέκταση του προτύπου, το *LTE-A (LTE-Advanced)*, το οποίο πληρώντας όλες τις προδιαγραφές αποτέλεσε το πρώτο επίσημο πρότυπο για τα κινητά δίκτυα τέταρτης γενιάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι το *LTE-A* δεν ήταν ένα καινούργιο πρότυπο αλλά μια προσαρμοσμένη επέκταση του *LTE* με πολλά καινούργια χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα η ταχύτητα στο downlink έφτανε μέχρι και στο *1 Gbps*, ενώ η ταχύτητα στο uplink μέχρι και στα *500 Mbps*. Η ποιότητα των υπηρεσιών που προσέφερε, ικανοποίησε εκατομμύρια καταναλωτές ανά τον κόσμο και γρήγορα εξαπλώθηκε στη παγκόσμια αγορά. Χαρακτηριστικά αναφέρω ότι τον Αύγουστο του 2019 η Παγκόσμια Ένωση Προμηθευτών *GSA* γνωστοποίησε ότι υπήρχαν 304 εμπορικά δίκτυα *LTE-A* σε 134 χώρες, ενώ παράλληλα 335 φορείς είχαν επενδύσει σε αυτή τη τεχνολογία σε 141 διαφορετικές χώρες του κόσμου. [6]



Εικόνα 2. Σταθμός βάσης *LTE-A* στο Ιράκ. [6]

Η καταναλωτική επιτυχία του προτύπου δεν ήταν τυχαία αλλά ήταν απόρροια δυο παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας ήταν οι νέες τεχνολογίες που χρησιμοποίησε και ο δεύτερος ήταν οι σωστές και οξυδερκείς προεκτάσεις των ήδη υφιστάμενων τεχνικών χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια παραθέτω μερικές από αυτές τις τεχνικές που κατέστησαν το πρότυπο *LTE-A* και κατ'επέκταση τα κινητά δίκτυα τέταρτης γενιάς αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας εκατομμύρια χρηστών.

- **Carrier Aggregation (CA)** : Με την ραγδαία αύξηση των χρηστών, η ορθή χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης είναι σημαντική. Με αυτή τη τεχνική, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επαναχρησιμοποιούν τις ίδες συχνότητες του φάσματος είτε στην ίδια ζώνη φάσματος είτε σε διαφορετική, χρησιμοποιώντας έτσι πολλαπλά κανάλια για την μεταφορά των δεδομένων.

- **Coordinated Multipoint** : Σε πολλά κυψελοειδή δίκτυα,είχε παρατηρηθεί η κακή απόδοση των συσκευών στα άκρα του δικτύου,λόγω της απόστασης αλλά κυρίως λόγω των παρεμβολών από παρακείμενες κυψέλες. Με αυτή την τεχνολογία η απόδοση των χρηστών στα μη αποδοτικά σημεία του δικτύου βελτιώθηκε αισθητά.
- **LTE Relaying** : Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για την καλύτερη κάλυψη των απομακρυσμένων σταθμών βάσης του δικτύου από τον κεντρικό σταθμό βάσης. Έτσι οι χρήστες μπορούν να ανταλλάσουν δεδομένα σε υψηλή ποιότητα ακόμη και αν βρίσκονται σε αντιδιαμετρικά σημεία του δικτύου. [7]

Το πρότυπο *LTE-A* καθόρισε σε μεγάλο βαθμό τα κινητά δίκτυα τέταρτης γενιάς,στα οποία συναντήσαμε για πρώτη φορά στα κυψελοειδή δίκτυα την έννοια της πυκνοποίησης του δικτύου (*densification network*). Η πυκνοποίηση του δικτύου είναι μια τεχνολογία που προτάθηκε για να ικανοποιεί όλες τις υψηλές απαιτήσεις μεγάλου πλήθους χρηστών οι οποίοι είναι συγκεντρωμένοι σε σχετικά μικρούς γεωγραφικούς χώρους όπως για παράδειγμα σε γήπεδα συναυλίες ή εμπορικά κέντρα. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος έπρεπε να υπάρξει μια αναθεώρηση των πόρων του δικτύου,διότι η εκτεταμένη χρήση των *macrocells* δεν ήταν λειτουργικά αποδοτική. Αυτό συμβαίνει γιατί πρώτον η εγκατάσταση και η συντήρηση αυτών των σταθμών βάσης απαιτεί ένα σεβαστό οικονομικό κεφάλαιο. Δεύτερον δεν θα ήταν εφικτό να ικανοποιηθούν όλα τα αιτήματα μεταφοράς δεδομένων χιλιάδων χρηστών μόνο με την λειτουργία των *macrocells* και τρίτον σε περίπτωση οποιασδήποτε πρόσκαιρης βλάβης θα ήταν επιβεβλημένη η παρουσία κάποιου μηχανικού δικτύων για την επιδιόρθωση της. Τη λύση στο πρόβλημα αυτό έδωσε η εγκατάσταση και η λειτουργία μικρότερων σταθμών βάσης που ονομάζονται *small cells*,τα οποία αποτελούν το πρωταρχικό σημείο ενδιαφέροντος στη παρούσα εργασία και θα παραθέσω μια πλήρη περιγραφή στο τρίτο κεφάλαιο. Τα *small cells* είναι σταθμοί βάσης με πολλή μικρότερη κατανάλωση ισχύος σε σχέση με τα *macrocells*. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η εύκολη εγκατάσταση σε καίρια σημεία του δικτύου ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο την απόσταση του χρήστη από το σταθμό βάσης. Με αυτή τη τεχνική καταφέρνουμε να επιτύχουμε υψηλά *data rates* για τους χρήστες καθώς μειώνουμε σε μεγάλο βαθμό τις παρεμβολές αυξάνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση,την ισχύ του σήματος και κατ'επέκταση την ποιότητα των υπηρεσιών. Πλέον ακόμη και τα πιο απομακρυσμένα σημεία του δικτύου από τα *macrocells* δεν έχουν ασθενές σήμα και παράλληλα αποσυμφορείτε το δίκτυο.

Κεφάλαιο 2. Κινητά Δίκτυα Πέμπτης Γενιάς (5G)

2.1 Εισαγωγή στο 5G

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε συνοπτικά την εξέλιξη των δικτύων εκκινώντας από την περίοδο των πρώτων μεγάλων επιστημονικών ανακαλύψεων που αποτέλεσαν τη βάση για τα αξιοθαύμαστα επιστημονικά πεπραγμένα και καταλήξαμε στην τέταρτη γενιά των κυψελοειδών δικτύων. Ο κοινός τόπος των ερευνών και των εξελίξεων ήταν η ανάγκη των καταναλωτών για γρηγορότερη και ασφαλέστερη απόδοση των συστημάτων με όλο και χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση. Πέρα από τις τεχνολογικές απαιτήσεις των χρηστών, η επιστημονική κοινότητα έπρεπε με τη πάροδο του χρόνου να αντιμετωπίσει και το πρόβλημα των πολυάριθμων χρηστών. Η ραγδαία αύξηση των ηλεκτρονικών συσκευών μεταφράζεται σε εκθετική αύξηση των πληροφοριών που κινούνται μέσα στο δίκτυο με αποτέλεσμα τη συμφόρηση, την αύξηση των παρεμβολών και την άμβλυση της αποδοτικότητας κατά τη παροχή υπηρεσιών. Οι απαιτήσεις των καταναλωτών και ο μεγάλος πλουραλισμός πηγών πληροφορίας έφερε αισίως στις ζωές μας την πέμπτη γενιά των κυψελοειδών κινητών δικτύων.

Η πέμπτη γενιά δικτύων προσάρμοσε τις ζωές των χρηστών σε ένα οικοσύστημα πληροφοριών με τεράστιο όγκο δεδομένων και υπηρεσιών. Έξυπνες εφαρμογές, ταχύτερες μηχανές αναζήτησης πληροφοριών και κοινωνικά δίκτυα έχουν κατακλύσει κάθε σπίτι, κάθε ατομική ηλεκτρονική συσκευή. Με τα 5G δίκτυα η τεχνολογική πρόοδος προχώρησε ένα ακόμη βήμα μπροστά, συνδέοντας ακόμη και αυτόνομες συσκευές στο διαδίκτυο, αναφέρομαι φυσικά στην επαναστατική τεχνολογία του *Internet of Things (IoT)*. Συνεπώς τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών αναμένεται να μπορούν να λειτουργήσουν ομαλά με ακόμη μεγαλύτερα *data rates* σε περιβάλλοντα που σίγουρα απαιτούν μεγαλύτερες χωρητικότητες αλλά και υψηλότερες ταχύτητες. Εκτιμάται ότι παγκοσμίως η κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας θα αυξηθεί το 2030 περίπου 20.000 φορές περισσότερο κατά μέσο όρο σε σχέση με το 2010. Σύμφωνα με μια επιστημονική έρευνα στη Κίνα αναμένεται η αύξηση να φτάσει ακόμη και 40.000 φορές περισσότερο το 2030 ενώ στα μεγάλα αστικά κέντρα όπως το Πεκίνο και η Σανγκάη ίσως ξεπεραστεί και αυτό το φράγμα. [8]

Πριν από την ανάλυση ορισμένων εξειδικευμένων τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου 5G είναι σημαντικό να ανφέρουμε ορισμένες βασικές απαιτήσεις οι οποίες θεσπίστηκαν και έπρεπε να καλύπτονται από τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς. Το πρότυπο 5G εκδόθηκε το 2016 από τον οργανισμό 3GPP και βελτίωσε σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ανάπτυξη του δικτύου σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις. Πιο συγκεκριμένα τα 5G συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν :

- Ρυθμό δεδομένων από 0.1 έως 1 Gbps
- Πυκνότητα σύνδεσης περίπου ένα εκατομμύριο συνδέσεις ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.
- Καθυστερήση μετάδοσης στα άκρα του δικτύου της τάξης του millisecond.
- Πυκνότητα του όγκου πληροφοριών μερικές δεκάδες Gbps ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.
- Κινητικότητα πάνω από 500 χιλιόμετρα ανά ώρα.
- 99,9 % διαθεσιμότητα του δικτύου.
- 100 % κάλυψη των χρηστών του δικτύου.

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω απαιτήσεις του δικτύου [8] εύκολα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ό,τι έχει τρομερό ενδιαφέρον να περιγράψουμε και να αναλύσουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς, όπως είναι η αρχιτεκτονική του και οι συνδυασμοί διάφορων τεχνολογιών που συνδράμουν στην ομαλή λειτουργία τους.

2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά 5G

Για την ουσιαστικότερη μελέτη και κατανόηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου 5G αξίζει να σταθούμε σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κατά τις οποίες τα δίκτυα πέμπτης γενιάς καλούνται να ανταπεξέλθουν σύμφωνα με το επίσημο πρότυπο τεχνικών προδιαγραφών της *ITU(International Telecommunication Union)*. Η πρώτη περίπτωση ονομάζεται *eMBB(Enhanced Mobile Broadband)* και επικεντρώνεται κυρίως στις υπηρεσίες κατά τις οποίες απαιτείται υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων όπως είναι οι νέες επιχειρηματικές υπηρεσίες και εφαρμογές, οι κοινωνικές τηλεπικοινωνίες που είναι βασισμένες σε τεχνολογίες αιχμής αλλά και εφαρμογές *VR(Virtual Reality)* και *AR(Augmented Reality)*. Σύμφωνα με το πρότυπο της *ITU* για αυτές τις εφαρμογές οι ρυθμοί μετάδοσης είναι αναγκαίο να κυμαίνονται για το *downlink* στα 20 Gbps και για το *uplink* στα 10 Gbps με *latency 4 millisecond*. Η δεύτερη περίπτωση ονομάζεται *mMTC(Massive Machine Type Communications)* και εστιάζει σε εφαρμογές και υπηρεσίες που απαιτούν μεγάλη συμφόρηση του δικτύου, άρα χρειάζεται μηχανισμούς που θα ελέγχουν τη ροή του πολύ πυκνού δικτύου που δημιουργείται. Τέτοιες εφαρμογές είναι τα έξυπνα αυτοκίνητα, οι έξυπνες πόλεις και άλλα που περιέχουν αρκετά μεγάλο αριθμό αισθητήρων και συνεπώς έναν τεράστιο όγκο πληροφοριών τις οποίες καλείται το δίκτυο να διαχειριστεί σε μια κλιμακούμενη υποδομή. Η τρίτη περίπτωση ονομάζεται *uRLLC(Ultra-Reliable and Low Latency Communications)* και επικεντρώνεται σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και απαιτεί την εξάλειψη των καθυστερήσεων (*latency sensitive*). Τέτοιες εφαρμογές είναι η αυτόματη οδήγηση, ο χειρισμός *drone* ακόμα και η απομακρυσμένη χειρουργική επέμβαση [9].

Είναι επιτακτική η ανάγκη να αντιληφθούμε ό,τι η συνδεσιμότητα και η επικοινωνία εκατομμύρια συσκευών προϋποθέτει την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων. Τα δίκτυα 5G χρησιμοποιούν έξυπνη

τεχνολογία για την αποτελεσματικότερη χρήση του φάσματος συχνοτήτων για να επιτύχουν μεγαλύτερες ταχύτητες. Το πρότυπο 5G για την κάλυψη των αναγκών κατηγοριοποιεί το φάσμα σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες τις οποίες θα αναλύσουμε ευθύς αμέσως. [10]

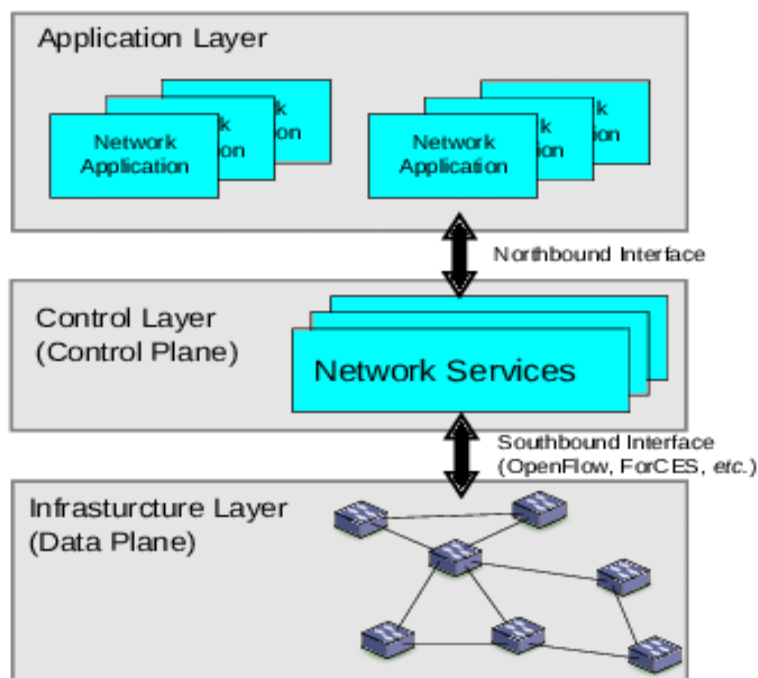
- **Low Band** : Είναι η πρώτη κατηγορία που συχνά αναφέρεται και ως επίπεδο κάλυψης με συχνότητες κάτω από 1GHz , μπορεί να καλύψει εκατοντάδες τετραγωνικά μίλια και παρέχει ρυθμό μετάδοσης για *downlink* που κυμαίνεται από 30 έως και 75 Mbps . Τα σήματα χαμηλής συχνότητας μπορούν να διαπερνούν εύκολα τα κτήρια προσφέροντας ισχυρή κάλυψη σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.
- **Mid Band** : Είναι η δεύτερη κατηγορία με συχνότητες που ξεκινούν από 1GHz και τελειώνουν στα 6 GHz . Σε αυτές τις συχνότητες παρατηρείται μια ισοροπία όσον αφορά τη μεγάλη χωρητικότητα και τη καλύτερη κάλυψη. Οι σταθμοί βάσης που χρησιμοποιούν αυτό το εύρος συχνοτήτων μπορούν να λάβουν και να μεταδώσουν αρκετά δεδομένα εξαιτίας της αυξημένης χωρητικότητας. Ενώ ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 115 έως 223 Mbps για μητροπολιτικές περιοχές.
- **High Band** : Είναι η τρίτη κατηγορία και χρησιμοποιεί ζώνες συχνοτήτων χιλιοστομετρικών κυμάτων (*mmWave*). Αυτό το εύρος συχνοτήτων επιφέρει τεράστιες αποδόσεις σε αστικές περιοχές και πολυσύχναστους χώρους. Μπορεί να παρέχει πάρα πολλές συνδέσεις και υψηλές ταχύτητες σε γεωγραφικά περιορισμένες τοποθεσίες με την βοήθεια των *small cells*. Σε σύγκριση με τις χαμηλότερες ζώνες η ροή των δεδομένων σε αυτές τις συχνότητες διαταράσσεται σχετικά εύκολα.



Εικόνα 3. Κατηγορίες ζωνών συχνοτήτων στο 5G. [10]

2.2.1. SDN και NFV

Το *SDN* (*Software Defined Networking*) έχει αναδειχθεί μια έξυπνη αρχιτεκτονική δικτύου για τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς καθώς μειώνει σε μεγάλο βαθμό τους περιορισμούς που δημιουργεί το *hardware*. Σε αυτή την αρχιτεκτονική δικτύου η διαχείριση της δρομολόγησης των πακέτων πραγματοποιείται από ένα κεντρικό σημείο που ονομάζεται *controller*. Ο εκάστοτε *controller* έχει την ευχέρια να διαχειρίζεται τους *servers* του δικτύου σύμφωνα πάντα με τα πρωτόκολλα που ορίζονται από τα χαμηλότερα επίπεδα λειτουργίας. Συνεπώς, μπορούμε να πούμε ότι το δίκτυο κατά κάποιο τρόπο λογισμικοποιείται διότι τα *small cells* ή τα *macrocells* που είναι γεωγραφικά ταξινομημένα μέσα στο δίκτυο έχουν την δυνατότητα να είναι σχεδόν αυτόνομα ως προς τον προγραμματισμό τους, ενώ ένας και μόνο κεντρικός ελεγκτής ελέγχει την ομαλή λειτουργία τους. Επομένως με τη χρήση του αυτοματοποιείται η ροή μέσα στο δίκτυο, δεν είναι απαραίτητη συχνά η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα και αποτρέπονται τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν μέσα στο δίκτυο. Η βασική αρχιτεκτονική του *SDN* διακρίνεται στη παρακάτω εικόνα. [11]



Εικόνα 4. Αρχιτεκτονική SDN. [11]

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να ανλύσουμε τα τρία στρώματα της αρχιτεκτονικής *SDN*. Το πρώτο στρώμα είναι το *Application Layer* και περιλαμβάνει συνδέσμους με άλλες εφαρμογές καθώς και εφαρμογές του συστήματος. Το δεύτερο στρώμα, το *Control Layer* περιλαμβάνει το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την λειτουργία των εφαρμογών που ανήκουν στο υψηλότερο επίπεδο, αποτελεί ουσιαστικά τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των εφαρμογών και των δικτυακών συσκευών. Το τελευταίο στρώμα είναι το *Infrastructure Layer* το οποίο αποτελείται από τις δικτυακές συσκευές και τον εξοπλισμό του δικτύου. Κλείνοντας, όπως αναφέραμε το *control layer* είναι η κινητήριος δύναμη του δικτύου όπου εναρμονίζει τα υπόλοιπα στρώματα, όμως για την αξιόπιστη λειτουργία του απαιτείται να υπακούει σε ένα προκαθορισμένο πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο που έχει επικρατήσει είναι το *OpenFlow* που αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 2008 στο πανεπιστήμιο του Stanford των Ηνωμένων Πολιτειών.

Με τη χρήση λοιπόν του *SDN* και το *softwarization* των δικτύων τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς αποκόπτονται από τα δεσμά των προηγούμενων γενεών δικτύων αποκτώντας πλέον μεγαλύτερη ελευθερία ως προς τη συντήρηση και τη λειτουργία τους. Επικουρικός παράγοντας για την δομή του *SDN* ήταν μια άλλη τεχνολογία, συμπληρωματική της που ονομάζεται *NFV* (*Network Function Virtualization*). Ο τρόπος λειτουργίας του *NFV* προβλέπει τη μεταφορά δικτυακών εφαρμογών οι οποίες λειτουργούν σε εξειδικευμένες πλατφόρμες. Για να το επιτύχει αυτό προγραμματίζει μέσω πολλών εικονικών μηχανών διάφορα λειτουργικά συστήματα και διαδικασίες, αποτελεί δηλαδή μια τεχνική εικονοποίησης του δικτύου με στόχο την την ορθολογικότερη διαχείριση του με αυτοσκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας του. Συνοψίζοντας λοιπόν καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι αυτές οι δύο τεχνολογίες είναι επικαλυπτόμενες καθώς το *SDN* έχει το ρόλο του συντονιστή ανάμεσα στο λογισμικό και τις δικτυακές συσκευές ενώ παράλληλα το *NFV* βελτιστοποιεί την ποιότητα των υπηρεσιών με *virtualization*.

2.2.2. Network Slicing

Το *Network Slicing* είναι μια αρχιτεκτονική δικτύου *5G* που επιτρέπει την δημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων επάνω από το φυσικό δίκτυο. Τα εικονικά αυτά δίκτυα λειτουργούν αυτόνομα από το πρώτο επίπεδο και έχουν προγραμματιζόμενες λειτουργίες ακολουθώντας παράλληλα τα κατάλληλα πρωτόκολλα που διέπουν τη συμπεριφορά τους. Επιπρόσθετα έχουν όλα τα χαρακτηριστικά ενός δικτύου που γνωρίζουμε (*bandwidth, latency* κτλ). Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι τα εικονικά δίκτυα που δημιουργούνται έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν τόσο μεταξύ τους αλλά και με το φυσικό δίκτυο. Αυτή η τεχνολογία προσαρμόζεται ιδανικά με τις δύο προηγούμενες που αναλύσαμε στο παραπάνω εδάφιο (*SDN* και *NFV*). [12] Η σχεδίαση ενός δικτύου *5G* πρέπει να βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη αλληλεπίδραση μεταξύ του λογισμικού ελέγχου και των υλικών υποδομών, το *Network Slicing* μπορεί να ικανοποιήσει αυτήν την απαίτηση και παράλληλα με βάση την ενοποιημένη φυσική του υποδομή μπορεί να διαμοιράσει τους δικτυακούς πόρους του δικτύου για την πραγματοποίηση πολλαπλών λειτουργιών. Για την βαθύτερη κατανόηση θα παραθέσω μερικά σημαντικά οφέλη που έχει αυτή η προσέγγιση στα ασύρματα δίκτυα πέμπτης γενιάς.

Παρατηρούμε μια διαφοροποίηση των ετερογενών υπηρεσιών καθώς ο τεμαχισμός του δικτύου είναι ένας ουσιαστικός τρόπος για να απομονωθούν διαφορετικές απαιτήσεις του δικτύου και να εξυπηρετηθούν αναλόγως δίχως να επηρεάζουν την λειτουργία των υπόλοιπων επιπέδων του. Επίσης η ύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών στο ίδιο δίκτυο συντελεί θετικά στην ορθά κλιμακούμενη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων και παράλληλα αποσυμφορείται το δίκτυο και βελτιώνεται η ποιότητα των υπηρεσιών. Ακόμη με το *Network Slicing* οι μηχανικοί έχουν τη δυνατότητα να αποφεύγουν τα υψηλά κόστη για τη δημιουργία νέων υποδομών, αυτό σημαίνει πρακτικά ό,τι δεν είναι απαραίτητο για κάθε τηλεπικοινωνιακό έργο να δημιουργείται από την αρχή ένα νέο δίκτυο, αλλά με την κατάλληλη λογισμικοποίηση ενός υφιστάμενου γειτονικού δικτύου να κατασκευάζεται ένα νέο εικονικό δίκτυο που θα καλύπτει όλες τις απαιτήσεις του εγχειρήματος. Τέλος ο τεμαχισμός του δικτύου δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορες εφαρμογές τις οποίες είτε δεν μπορούσαν είτε απαιτούσαν πολύ ισχυρούς επεξεργαστικούς πόρους σε παλαιότερες γενιές κυψελοειδών κινητών δικτύων.

2.2.3. Small Cells

Οι καταναλωτικές ανάγκες για την αυξημένη κίνηση των δεδομένων και την αποδοτική μεταφορά τους σε σχεδόν μηδενικό χρόνο για την εκπλήρωση των στόχων της λειτουργίας των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς δεν μπορεί να απέχει από μια τεχνολογία που ονομάζεται πυκνοποίηση δικτύου (*network densification*). Οι πάροχοι δημιουργούν πυκνά δίκτυα τα οποία απαρτίζονται από πολλούς σταθμούς βάσης, τα *small cells*. Τα *small cells* είναι μικροί σταθμοί βάσης που λειτουργούν με ελάχιστη ισχύ και συμβάλλουν την ανταλλαγή πληροφοριών είτε μεταξύ τους είτε με τις δικτυακές συσκευές. Η ουσιαστική τους χρήση ξεκίνησε από τη τέταρτη γενιά κινητών δικτύων και αποτέλεσε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο με πολλές προεκτάσεις. Ο αριθμός των *small cells* που έχουν τοποθετηθεί σε δίκτυα τέταρτης γενιάς σίγουρα δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις των κυψελοειδών δικτύων πέμπτης γενιάς διότι για την επαρκέστερη κάλυψη και αξιοποίηση του φάσματος απαιτείται η εγκατάσταση ενός μεγάλου πλήθους από αυτά, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου συνωστίζεται μεγάλος αριθμός χρηστών σε πολύ κοντινές αποστάσεις όπως είναι για παράδειγμα τα εμπορικά κέντρα. Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά είναι αρωγός ως προς την εγκατάσταση τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ό,τι μπορούμε να συναντήσουμε εγκατεστημένα *small cells* σε κτήρια ή ακόμη και στους δρόμους επάνω σε κολώνες ή φωτεινούς σηματοδότες, σε αντίθεση με τα *macrocells* τα οποία σε καμία περίπτωση δεν είναι κατάλληλα για την τοποθέτηση τους σε γεωγραφικές περιοχές με πολλούς χρήστες. Συνεπώς τα *small cells* είναι καινοτόμες λύσεις σχετικά χαμηλού κόστους που συμβάλλουν στην αύξηση της χωρητικότητας καθώς η συχνότητα που χρησιμοποιεί ένας σταθμός βάσης για την μεταφορά δεδομένων σε μία συγκεκριμένη περιοχή μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από έναν άλλο σταθμό σε άλλη περιοχή και να μεταφέρει και εκεί δεδομένα. Ακόμη με την αξιοποίηση τους οι συσκευές των χρηστών βελτιώνονται αισθητά ως προς τη διάρκεια λειτουργίας της μπαταρίας, πράγμα που δεν συνέβαινε πριν την αθρόα πυκνοποίηση του δικτύου καθώς η απόσταση μιας συσκευής από έναν απομακρυσμένο σταθμό βάσης *macrocell* είχε ως αποτέλεσμα τη μικρή διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τέλος, οι σταθμοί βάσης κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες με κύρια χαρακτηριστικά διαφοροποίησης να είναι η ισχύς λειτουργίας αλλά και η εμβέλεια. Η

απόδοση, τα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος λειτουργίας των *small cells* στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς θα αναλυθούν εκτενέστερα στο τρίτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

2.2.4. Massive MIMO και Beamforming

Το *Massive MIMO* είναι μια τεχνολογία που κατέχει θεμελιώδη ρόλο στο τρόπο λειτουργίας των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς. Είναι η επέκταση της τεχνολογίας *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*) και μαζί με την χρήση των *small cells* σε μια συγκεκριμένη περιοχή αναβαθμίζει αισθητά την απόδοση λειτουργίας των δικτύων 5G. Προβλέπει την εγκατάσταση εκατοντάδων ακόμη και χιλιάδων κεραιών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στους σταθμούς βάσης με στόχο την βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Πρακτικά με την αύξηση των κεραιών, ένας σταθμός βάσης θα μπορεί να λαμβάνει και να δέχεται δεδομένα από ακόμη περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα, άρα εύκολα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι εάν κάθε σταθμός βάσης επικοινωνεί με έναν ικανοποιητικό αριθμό από συστοιχίες κεραιών μπορεί να εξυπηρετήσει αρκετούς χρήστες. Η προσθήκη των επιπλέον κεραιών θα βοηθήσει έτσι ώστε η ενέργεια μετάδοσης να συρρικνωθεί σε χωρικά μικρότερες αποστάσεις χωρίς να χρειάζεται να ταξιδέψει αρκετά μέτρα και να εξασθενίσει. Σε αυτό ακριβώς το σημείο η τεχνολογία *Massive MIMO* συνάδει με την τεχνολογία των *small cells*. Φανταστείτε αν ένα κύμα που φέρει πληροφορία πρέπει να ταξιδέψει από μια συσκευή ενός χρήστη σε ένα απομακρυσμένο *macrocell* χωρίς την ενδιάμεσα να παρεμβάλλονται κεραιές. Σίγουρα το αποτέλεσμα δεν θα ήταν αρεστό. Θεωρητικά η τεχνολογία *Massive MIMO* μπορεί να παρέχει άπειρο αριθμό κεραιών στο σταθμό βάσης, πρακτικά όμως αυτό δεν συμβαίνει, συνήθως χρησιμοποιούνται 64 με 128 κεραιές για τους σταθμούς βάσης. Η αλληλένδυτη σύνδεση μεταξύ των κεραιών και σταθμών βάσεων δεν επηρεάζει άμεσα τις συσκευές των χρηστών. [13] [14]



Εικόνα 5. MIMO Beamforming. [15]

Όπως είδαμε παραπάνω η σχέση μεταξύ των σταθμών βάσης και των παρατεταγμένων κεραιών κατέχουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των δικτύων 5G. Όμως η πληθώρα των κεραιών και των *small cells* σε ένα δίκτυο δημιουργεί ορισμένα προβλήματα στην κυκλοφορία των δεδομένων και έτσι συχνά ερχόμαστε αντιμέτωποι με παρεμβολές που διαστρεβλώνουν τα ραδιοκύματα που φέρουν δεδομένα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος των παρεμβολών και την καλύτερη δρομολόγηση των πληροφοριών οι μηχανικοί χρησιμοποιούν την τεχνολογία *Beamforming*. Είναι μια μορφοποίηση της ακτινοβολίας που ταξιδεύει από τις συστοιχίες των κεραιών προς τους σταθμούς βάσης. Πιο αναλυτικά τα *small cells* έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν μια κατάλληλη διαδρομή για την παράδοση των δεδομένων στο τερματικό του χρήστη με αποτέλεσμα να μειώνονται οι παρεμβολές που προκύπτουν, ιδιαίτερα για εκείνες τις συσκευές που βρίσκονται σε μικρή ακτίνα απόστασης από τον σταθμό βάσης. Αποτελεί μία αναγκαία και συμπληρωματική τεχνολογία της *Massive MIMO* διότι η κατάλληλη διαμόρφωση των δεσμών ακτινοβολίας που πηγάζουν από τις κεραιές παραμετροποιούν προς το καλύτερο τη φασματική απόδοση και συνδράμουν στην αύξηση της χωρητικότητας. Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς για τη μετάδοση πληροφοριών χρησιμοποιούν υψηλές συχνότητες με αποτέλεσμα οι πληροφορίες να ταξιδεύουν στον αέρα μέσω *mmWave*, με την τεχνολογία *Beamforming* αυτές οι δέσμες πληροφορίας αυξάνουν τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων καθώς πλέον κινούνται στοχευμένα και όχι άτακτα μέσα στο δίκτυο. Ενώ οι σταθμοί βάσης εφοδιάζονται με την ικανότητα να διαμορφώνουν διάφορες διαδρομές αποστολής των δεδομένων στο χρήστη σε διάφορες χρονικές στιγμές με αποτέλεσμα όλο και περισσότεροι χρήστες να μπορούν να ανταλλάσουν πακέτα με τους σταθμούς βάσης χωρίς να αντιμετωπίζουν προβλήματα εξασθένησης του σήματος. [13]

Έπειτα από την ανάλυση και τη μελέτη ορισμένων τεχνολογιών που συνθέτουν συνολικά τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς παρατηρήσαμε ό,τι υπάρχει μια αρμονική αλληλουχία των τεχνολογιών όσον αφορά τη δόμηση του δικτύου. Πολλά τεχνικά χαρακτηριστικά που έλλειπαν από τα προηγούμενα πρότυπα δικτύων κάνουν την εμφάνιση τους με στόχο της βελτιστοποίηση των αποδόσεων και την αξιοπιστία της ποιότητας των υπηρεσιών *QoS (Quality of Service)*. Το τεχνολογικό φάσμα το οποίο καλύπτουν τα δίκτυα 5G είναι τεράστιο, αν σκεφτούμε ό,τι από το *softwarization* των δικτύων και τη δημιουργία εικονοποιημένων μέχρι και την εξομάλυνση στη δρομολόγηση των ραδιοκυμάτων τότε σίγουρα είμαστε σε θέση να συμπεράνουμε ό,τι η επιστημονική κοινότητα διεξάγει σημαντικά βήματα προόδου για την ικανοποίηση των χρηστών και όχι μόνο. Προφανώς οι τεχνολογικές εξελίξεις των δικτύων έχουν επίπτωση σχεδόν σε όλους τους επιστημονικούς κλάδους, στις μελέτες και στις έρευνες αυτών. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε ορισμένα πεδία στα οποία τα δίκτυα πέμπτης γενιάς έχουν συμβάλει τα μέγιστα για την πραγματοποίησή τους που ήταν ανέφικτο να προέλθει με την τεχνολογία των προηγούμενων γενεών παρότι ήταν σε στάδια επεξεργασίας από τους επιστήμονες.

2.3. Εφαρμογές 5G

Οι τεχνολογικές δυνατότητες των δικτύων 5G έχουν επιφέρει δραστικές αλλαγές σε όλες τις εκφάνσεις της καθημερινότητας μας. Σίγουρα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί απλώς μια ακόμη γενιά κινητών δικτύων με την έννοια ό,τι οι χρήστες των συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο πλέον δεν είναι μόνο άνθρωποι αλλά και

χιλιάδες ή ακόμη και εκατομμύρια αισθητήρες και άλλες έξυπνες μηχανές που μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι υψηλές ταχύτες, η μεγάλη χωρητικότητα και ο μηδαμινός χρόνος απόκρισης έχουν επιφέρει καιρικές αλλαγές στη συνδεσιμότητα και στην υποστήριξη των συσκευών με αποτέλεσμα τη πραγματοποίηση καινοτόμων εφαρμογών που αλλάζουν όσο ποτέ άλλοτε τον τρόπο που ζούμε. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσω τις επιπτώσεις και τα ευεργετικά χαρακτηριστικά που έχουν προσφέρει τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς στον τομέα της ιατρικής αλλά και στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν πλέον οι έξυπνες πόλεις.

Οι έξυπνες πόλεις (*smart cities*) στοχεύουν στη βελτίωση της χρήσης των δημόσιων πόρων στην και της ποιότητας των υπηρεσιών δίνοντας έμφαση στην άνεση,τη συντήρηση και τη βιωσιμότητα. Παράλληλα το λειτουργικό κόστος των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας μειώνεται με την προσθήκη όλο και περισσότερων έξυπνων συσκευών στα πλαίσια του *Internet of Things(IoT)*. Σε γενικές γραμμές οι εφαρμογές που μας οδηγούν στη δημιουργία έξυπνων πόλεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι οι προσωπικές και οικιακές εφαρμογές,μπορούμε να τις συναντήσουμε στα *smartphones* που χρησιμοποιούμε και σε έξυπνες οικιακές συσκευές. Για παράδειγμα η συσκευή που μετράει τους καρδιακούς μας παλμούς θα μπορεί να είναι συνδεδεμένη σε ένα *monitor* του προσωπικού μας ιατρού. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο απομακρυσμένος έλεγχος των οικιακών μας συσκευών. Οι χρήστες μπορούν να καθορίσουν τη θερμοκρασία της οικείας τους μέσω προγραμματιζόμενων θερμοστατών που χειρίζονται από τη προσωπική τους συσκευή,ένω μπορούν να ελέγχουν την ασφάλεια της οικείας μέσω *live streaming* από τις έξυπνες κάμερες ασφαλείας. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι εφαρμογές βοηθητικών προγραμμάτων,εδώ συναντάμε εφαρμογές όπως αυτές της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα ή των υδάτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποστέλλονται ακαριαία στους αρμόδιους περιβαλλοντολόγους που είναι υπεύθυνοι για τις συνθήκες βιωσιμότητας μιας πόλης.

Στη τρίτη κατηγορία ανήκουν οι βιομηχανικές εφαρμογές που συνήθως αποτελούνται από ένα δίκτυο βιομηχανικών μηχανημάτων σε ένα περιβάλλον παραγωγής. Μέσω του δικτύου *5G* η συνδεσιμότητα των μηχανημάτων επιταχύνει τη παραγωγικότητα,αυξάνει την αποδοτικότητα και την εργασιακή εμπειρία και ελαχιστοποιεί τα βιομηχανικά λάθη. Ένας τομέας ο οποίος έχει επωφεληθεί στο ακέραιο από τις βιομηχανικές εφαρμογές είναι σίγουρα αυτός της γεωργίας. Η χρήση αισθητήρων με ασύρματη σύνδεση στο δίκτυο στα πεδία της καλλιέργειας μπορεί να μειώσει τη χρήση του νερού και των λιπασμάτων με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του κόστους και την βέλτιστη δυνατή παραγωγικότητα. Στη τέταρτη κατηγορία συναντάμε τα ευφυή συστήματα μεταφοράς. Ο αριθμός των οχημάτων στους δρόμους των μεγάλων πόλεων αυξάνεται συνεχώς με φυσικό επακόλουθο να αυξηθεί ο ρυθμός των τροχαίων ατυχημάτων αλλά και να επιβαρυνθεί περαιτέρω το φυσικό περιβάλλον από τα ρύπανση των αυτοκινήτων. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων με την αρωγή των δικτών πέμπτης γενιάς πλέον μιλάμε για έξυπνα αυτοκίνητα,τα οποία είναι εφοδιασμένα με πολλαπλούς αισθητήρες που αποσκοπούν στη συγκέντρωση πληροφοριών που υποβάλλονται σε επεξεργασία και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στη πλοήγηση,στη διαχείριση της κυκλοφορίας και τον έλεγχο της ρύπανσης. Επίσης τα έξυπνα αυτοκίνητα είναι σε θέση να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους αλλά και με τις έξυπνες κάμερες και τους φωτεινούς σηματοδότες του δικτύου. [16]

Τα δίκτυα πέμπτης γενιάς έχουν συμβάλει σε πολύ μεγάλο βαθμό και στον ιατρικό τομέα,δίνοντας λύσεις που πολλές φορές μπορεί ακόμη και να αποτρέψουν δυσάρεστα γεγονότα. Οι έξυπνες υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία έξυπνων εφαρμογών ώστε οι ασθενείς να μπορούν να τις χρησιμοποιούν σωστά. Τέτοιες εφαρμογές είναι η στιγμιαία μέτρηση της γλυκόζης στο αίμα,όπου ο ασθενής διαθέτει επάνω του έναν αισθητήρα μέτρησης και τα αποτελέσματα είναι ορατά στους υγειονομικούς αρμόδιους για τη ρύθμιση της γλυκόζης στο αίμα. Αντίστοιχη εφαρμογή είναι και του αισθητήρα που καταγράφει τους καρδιακούς παλμούς και ενημερώνει αυτόματα τον ιατρό σε περίπτωση προβλήματος εξοικονομώντας χρόνο για τους ασθενείς καθώς δεν χρειάζεται να επισκεφθούν το νοσοκομείο για διάγνωση. Σύμφωνα με τα παραπάνω παραδείγματα με την καθιέρωση του 5G στις ζωές μας παρατηρείται μεγαλύτερη υγειονομική κάλυψη και περίθαλψη. Όμως τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς δεν συνδράμουν μόνο στην ατομική ιατρική ασφάλεια αλλά παρέχουν και άλλες υπηρεσίες. Τέτοιες υπηρεσίες είναι η συνδεσιμότητα μεγάλων νοσοκομείων μεταξύ τους αλλά και με μεγάλα φαρμακευτικά κέντρα ερευνών με αποτέλεσμα τη ταχεία μετάδοση των νέων δεδομένων στην ιατρική με στόχο την αντιμετώπιση των λοιμώξεων και την περίθαλψη των ασθενών. [17]

2.4. Το 5G στην Ελλάδα

Η εξάπλωση των 5G δικτύων πραγματοποιήθηκε σχετικά γρήγορα κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες,επεκτάθηκε έπειτα με γρήγορους ρυθμούς στην ασιατική αγορά αλλά και στην Ευρώπη. Η Ελλάδα δεν θα μπορούσε να λείπει από το κάδρο των χωρών οι οποίες θα μπορέσουν να απολαύσουν τις απεριόριστες δυνατότητες των δικτύων της πέμπτης γενιάς. Στις 16 Δεκεμβρίου 2020 πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα δημοπρασία για την εκχώρηση του φάσματος συχνοτήτων που θα χρησιμοποιήσουν οι τρεις μεγάλες εταιρείες κινητής τηλεφωνίας της χώρας (*Cosmote, Vodafone, Wind*). Στην Ελλάδα καταχωρήθηκαν τέσσερις ζώνες συχνοτήτων στις οποίες θα βασίζεται το 5G δίκτυο. Οι ζώνες αυτές είναι η ζώνη των 700MHz,των 2GHz,των 3400-3800 MHz και των 26 GHz. Το συνολικό αντίτιμο το οποίο πλήρωσαν οι τρεις εταιρείες για την αξιοποίηση των παραπάνω ζωνών συχνοτήτων ανέρχεται στα 372 εκατομμύρια ευρώ. Είναι αλήθεια ό,τι η χώρα μας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο αν αναλογιστούμε ό,τι η πληθυσμιακή κάλυψη φτάνει περίπου στο 90% στα δυο μητροπολιτικά κέντρα,την Αθήνα και την Θεσσαλονίκη ενώ η υπόλοιπη χώρα δεν έχει καλυφθεί επαρκώς ακόμη. Αναμένεται μέχρι το τέλος του 2021 στη χώρα μας να έχουμε περισσότερο από 50% πανελλαδική κάλυψη. Κλείνοντας αξίζει να αναφερθεί ό,τι έχει δημιουργηθεί ένα fund με το όνομα *Φαιστός* το οποίο συγκεντρώνει κεφάλαια που θα χρησιμοποιηθούν για επενδύσεις και startups που θα αξιοποιούν τις δυνατότητες των 5G δικτύων. [18]

Κεφάλαιο 3. Small Cells

3.1. Εισαγωγή στα Small Cells

Τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουν σκοπό να παρεισφρήσουν στις ζωές μας και να τροποποιήσουν την καθημερινότητά μας με τέτοιο τρόπο που πριν από μερικά χρόνια έμοιαζε με σενάριο επιστημονικής φαντασίας. Το αξιοθαύμαστο έργο που παρέθεσε η επιστημονική κοινότητα στην ανθρωπότητα σίγουρα έδειξε το δρόμο του μέλλοντος, ένα μέλλον που ανήκει στα κινητά δίκτυα. Με την πέμπτη γενιά των δικτύων οι αλλαγές ήταν συναρπαστικές και προήλθαν έπειτα από την άμεση και αποτελεσματική μελέτη και πράξη των μηχανικών επάνω σε αλληλουχίες τεχνολογιών που συνεργάζονται και προσδίδουν τελικώς το αποτέλεσμα που απολαμβάνουμε σήμερα. Αναφέρομαι φυσικά στις τεχνολογίες που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που διέπουν τα δίκτυα 5G. Μεταξύ εκείνων των τεχνολογιών που συνέβαλλαν καταλυτικά στην δομή και τη λειτουργία των δικτύων ήταν και τα *small cells*. Μάλιστα αυτοί οι μικροί σταθμοί βάσης και η ορθολογική τους χρησιμοποίηση βοήθησε στην βελτίωση της απόδοσης των δικτύων αλλά παράλληλα γέννησε πολλά ερωτήματα και νέα επιστημονικά πεδία έρευνας για τους ενδιαφερόμενους.

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών, οι εκατομμύρια συσκευές που αποτελούν ατέρμονες πηγές πληροφορίας δημιουργούν μια κατάσταση που χρήζει σωστής διαχείρισης από τους μηχανικούς. Για την αντιμετώπιση και την επίλυση λοιπόν αυτών των προβλημάτων η ιδέα των μηχανικών ήταν τα πυκνά ετερογενή δίκτυα τα οποία θα είναι εφοδιασμένα με έναν μεγάλο, πολύ μεγάλο αριθμό από *small cells* διάσπαρτα μέσα στο δίκτυο. Ο πολλαπλασιασμός των σταθμών βάσης στο δίκτυο λειτουργεί λειτουργεί θετικά στην απόκριση όλο και περισσότερων χρηστών. Επιπρόσθετα η χρήση των *small cells* απαλλάσσει τους προβληματισμούς σχετικά με τον τρόπο που θα μπορούμε να έχουμε καλύτερη κάλυψη σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Η προσαρμοστικότητά τους και η συμβατότητα τους με παλαιότερες τεχνολογίες επιτρέπουν την εγκατάστασή τους κυριολεκτικά παντού, είτε σε εσωτερικούς χώρους είτε σε εξωτερικούς. Πράγμα που δεν μπορεί να συμβεί με μεγαλύτερους σταθμούς βάσης όπως είναι τα *macrocells*, διότι ο τρόπος λειτουργίας τους θα αποτελούσε ανασταλτικό παράγοντα στην αποδοτικότητα του δικτύου. Αντίθετα τα *small cells* ομαλοποιούν την κατάσταση και συρρικνώνουν την απόσταση μεταξύ της συσκευής του χρήστη και των *macrocells*. Κατά συνέπεια οι χρήστες διατηρούν σταθερά υψηλά επίπεδα ισχύος του σήματος και είναι απαλλαγμένοι από τις εξασθενίσεις. Βέβαια τα *small cells* δεν αντικαθιστούν σε καμία περίπτωση τα *macrocells*, απλά συνεργάζονται για την αποτελεσματικότερη λειτουργία και υψηλότερη απόδοση κατά τη μεταφορά των δεδομένων από και προς τα τερματικά των χρηστών. Στη συνέχεια θα κάνουμε μια εκτενέστερη ανάλυση των χαρακτηριστικών των *small cells*.

3.2. Χαρακτηριστικά των Small Cells

Τα *small cells* είναι συστήματα ασύρματης μετάδοσης (ή αλλιώς σταθμοί βάσης) που λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, παρέχουν μικρή γεωγραφική κάλυψη είτε σε μικρούς εσωτερικούς χώρους είτε σε εξωτερικούς χώρους. Έχουν όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά που διέπουν τους σταθμούς βάσης που χρησιμοποιούσαν όλες οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών τα προηγούμενα χρόνια έχοντας όμως παράλληλα αναβαθμιστεί έτσι ώστε να ακολουθούν τη φυσική πορεία της εξέλιξης της τεχνολογίας. Τα *small cells* χρησιμοποιούνται ευρέως στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς διότι είναι ικανά στο χειρισμό των υψηλών ρυθμών μετάδοσης των δεδομένων για τις κινητές ευρυζωνικές υπηρεσίες που επιφορτίζονται από τις ανάγκες των καταναλωτών. Επιπρόσθετα συμβάλλουν ενεργά και με μεγάλη αποτελεσματικότητα στη πυκνοποίηση του δικτύου μιας και μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα και να συμβαδίσουν με παλαιότερες τεχνολογίες. Εάν δεν υπήρχαν τα *small cells* στο 5G δίκτυο οι χρήστες θα ήταν αναγκασμένοι να ανταλλάσουν δεδομένα μόνο με τα απομακρυσμένα *macrocells*. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται σε αργά *data rates*,μη ορθολογική διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων με αποτέλεσμα την κάκιστη ποιότητα των υπηρεσιών. Ακόμη σε χώρους που συναθροίζονται πάρα πολλές συσκευές χρηστών η αποσυμφόρηση του δικτύου θα ήταν αδύνατη,καθώς ένας μικρός αριθμός και μάλιστα σχετικά απομακρυσμένων *macrocells* σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να ανταπεξέλθει στις ανάγκες του δικτύου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των *small cells* είναι το σχετικά απλουστευμένο *hardware* τους,με στόχο φυσικά να μειώσουν την πολυπλοκότητα λειτουργίας τους και να έχουν ταχεία εφαρμογή. [19] [20]



Εικόνα 6. *Small Cell* εγκατεστημένο σε στύλο. [19]

Όπως είδαμε τα *small cells* χρησιμοποιούνται μέσα στο δίκτυο για την ενίσχυση του σήματος και την αποτελεσματικότερη διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων σε περιοχές με αυξημένη κίνηση των δεδομένων ή σε περιοχές όπου η κάλυψη από τα *macrocells* δεν αρκεί. Συνεπώς έχει σημασία σε ποια σημεία θα γίνει η εγκατάσταση των *small cells* και σίγουρα τα σημεία αυτά δεν επιλέγονται τυχαία αλλά υπάρχουν μερικές παράμετροι που καθορίζουν την εγκατάστασή τους. Ο πρώτος παράγοντας είναι η πυκνότητα του δικτύου. Αν σε μια γεωγραφική περιοχή υπάρχει ήδη επαρκής αριθμός σταθμών βάσεων δεν υπάρχει λόγος για υπερφόρτωση. Ένας δεύτερος παράγοντας ο οποίος είναι αλληλένδετος με τον προηγούμενο είναι αυτός της κάλυψης των χρηστών. Σε σημεία που είναι γνωστό ότι θα υπάρξει αυξημένη κινητικότητα και επιβάρυνση του δικτύου είναι λογικότερο να συναντάμε περισσότερα *small cells* σε σχέση με άλλα σημεία όπως για παράδειγμα στην ύπαιθρο που γνωρίζουμε ότι το δίκτυο δεν θα επιβαρυνθεί. Ένας άλλος παράγοντας είναι το ύψος και η τοποθεσία στην οποία μπορούμε να εγκαταστήσουμε ένα *small cell*, είναι σημαντικό διότι μπορούμε με αυτόν τον τρόπο να αποφύγουμε διάφορες επιπλοκές. Ακόμη ένας τελευταίος λόγος λιγότερο σημαντικός είναι η αισθητική. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε πιο περιγραφικά ορισμένα σημεία στο οποία μπορούν να εγκατασταθούν τα *small cells*.

Η πιο δημοφιλής τοποθεσία που μπορούμε να συναντήσουμε ένα *small cell* είναι σίγουρα οι φωτεινοί πόλοι στους δρόμους. Είναι ένα σημείο που αναμέναμε να εγκατασταθεί μεγάλος αριθμός *small cells* διότι υπάρχουν αρκετοί πόλοι στα μεγάλα μητροπολιτικά κέντρα των κρατών και βρίσκονται σε κεντρικά σημεία όπου είναι αυξημένη η κίνηση των χρηστών άρα κατά συνέπεια θα υπάρχουν και πολλά δεδομένα. Επίσης, η κοντινή απόσταση μεταξύ τους βοηθάει τους μηχανικούς να πυκνοποιήσουν πιο αποδοτικά το δίκτυο ενώ παράλληλα προσφέρουν το ιδανικό ύψος για την τοποθέτηση ενός σταθμού βάσης διότι αν βρίσκονται στο κατάλληλο ύψος βελτιώνουν την κάλυψη του δικτύου και την απόδοση του. Πέρα από την χωροταξική ευκολία, υπάρχει και η ενεργειακή, με την έννοια ότι οι πόλοι τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια ώστε να λειτουργήσουν. Μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους σταθμούς βάσης που είναι εγκατεστημένοι στους φωτεινούς πόλους ώστε να συντηρηθεί η λειτουργία τους. Η γεωγραφική κατανομή αυτών των λαμπτήρων ωστόσο περιτριγυρίζεται από πολλά κτήρια στις μεγάλες πόλεις. Όπως είδα το δίκτυο 5G χρησιμοποιεί υψηλές συχνότητες στο φάσμα συχνοτήτων για τη μετάδοση των πληροφοριών, με αποτέλεσμα τα μήκη κύματος των ακτινοβολιών να συρρικνώνονται (τεχνολογία *mmWave*). Η μετάδοση μέσω αυτών των κυμάτων διαταράσσεται όταν παρεμβάλλονται πολλά κτήρια. Είναι ίσως ο μοναδικός ανασταλτικός παράγοντας που δεν μπορεί να εξαληφθεί για την εγκατάσταση των *small cells* σε στύλους λαμπτήρων. [21]

Συνεχίζοντας την ανάλυση, οι μηχανικοί έπρεπε να εντοπίσουν και άλλα σημεία στα οποία υπάρχει μεγάλος αριθμός χρηστών και είναι εφικτό να εγκατασταθούν *small cells*. Ένα ακόμη έξυπνο σημείο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις για αυξημένη κίνηση και συμφόρηση του δικτύου είναι οι στάσεις των λεωφορείων. Πάρα πολλοί άνθρωποι καθημερινά χρησιμοποιούν τα αστικά λεωφορεία για μετακίνηση στις μεγάλες πόλεις, η τοποθέτηση του σταθμού βάσης στις στάσεις γίνεται συνήθως

εσωτερικά του μεταλλικού παράλληλόγραμου στο οποίο προβάλλονται συνήθως διάφορες διαφημίσεις. Με αυτόν τον τρόπο οι μηχανικοί ουσιαστικά κρύβουν τα *small cells* από το οπτικό πεδίο των ανθρώπων αλλά βελτιστοποιούν την απόδοση των συσκευών τους μέσα στο δίκτυο. [22]



Εικόνα 7. Small Cell σε στάση λεωφορείου. [22]

Η τοποθεσία των εγκαταστάσεων των *small cells* καθορίζεται χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό τεχνικών και προτύπων. Οι διάφορες συνιστώσες που προσδιορίζουν την τοποθεσία τοποθέτησης αποσκοπούν σε ένα πολύ πυκνό δίκτυο *UDN* (*ultra-dense network*) ώστε να παρέχει καλύτερη κάλυψη στο αστικό περιβάλλον. Σύμφωνα με τα παραπάνω η εγκατάσταση των σταθμών βάσης στις ταράτσες των κτηρίων προσφέρει πολλαπλά οφέλη για τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς. Στα κτήρια μπορούν να τοποθετηθούν περισσότερα *small cells* και βαρύτερος εξοπλισμός σε σχέση με τους φωτεινούς πόλους ή τις στάσεις των λεωφορείων. Μεγαλύτεροι σταθμοί βάσης με ισχυρότερο σήμα και καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος συχνοτήτων μπορούν να τοποθετηθούν στις ταράτσες διότι έχουν το πλεονέκτημα λόγω του ύψους ό,τι δεν παρεμβάλλεται σχεδόν τίποτα κατά τη διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών. Η απόσταση από το έδαφος και το δρόμο προσφέρει καλύτερη κάλυψη και βοηθάει στην αποσυμφόρηση εκείνων των σταθμών βάσης που έχουν πολλά εμπόδια περιμετρικά τους. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ό,τι και τα φανάρια είναι μια αξιόπιστη λύση τοποθέτησης σταθμών βάσεων και συνήθως τα *small cells* που είναι εγκατεστημένα εκεί έχουν συμπληρωματικό, βοηθητικό ρόλο για την λειτουργία των υπόλοιπων με γνώμονα πάντα την υπερπύκνωση του δικτύου. Η εγκατάσταση των σταθμών βάσεων στους φωτεινούς σηματοδότες είναι σχετικά απλή, ενώ για λόγους ασφαλείας οι μηχανικοί έχουν μεριμνήσει η τοποθέτησή τους να πραγματοποιείται συνήθως στο τμήμα του στύλου που δεν κρέμεται επάνω στο δρόμο. Επίσης είναι μια λύση που έχει θετικό αντίκτυπο και στην αισθητική πλευρά. [21]

3.3. Κατηγορίες Small Cells

Όπως είδαμε προηγουμένως τα *small cells* είναι μικροί σταθμοί βάσης με λειτουργία χαμηλής ισχύος που συμβάλλουν στη πυκνοποίηση των 5G δικτύων με στόχο την αποτελεσματικότερη λειτουργία του δικτύου και την παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών. Επιπρόσθετα αναλύσαμε τα σημεία στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγάλα αστικά κέντρα έτσι ώστε να μπορεί το δίκτυο να ανταποκριθεί σε περιοχές όπου η κίνηση των δεδομένων είναι μεγάλη. Λόγω της μικρής γεωγραφικής τους εμβέλειας βρίσκουν εφαρμογή σε γεωγραφικές περιοχές που δεν έχουν μεγάλο εύρος έκτασης. Όμως η γεωγραφική εμβέλεια στην οποία λειτουργούν είναι εκείνη που καθορίζει τις διάφορες κατηγορίες των *small cells*. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες και είναι τα *femtocells*, τα *picocells* και τα *microcells*. Στη συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε μια ουσιαστική ανάλυση των παραπάνω τριών κατηγοριών.

3.3.1. Femtocells

Τα *femtocells* είναι μικροί σταθμοί βάσης χαμηλής ισχύος που έχουν σχεδιαστεί με στόχο τη χρησιμοποίησή τους σε μικρούς γεωγραφικούς χώρους όπως το σπίτι ή μια μικρή επιχείρηση. Είναι μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα δυο τις οικογένειες των *small cells* όσον αφορά την ακτίνα κάλυψης. Τα *femtocells* συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης (είτε DSL είτε καλώδιο) και διαθέτουν δύο ρυθμίσεις ανάλογα με τον αριθμό των συσκευών που μπορούν να ικανοποιήσουν. Η πρώτη ρύθμιση είναι η οικιακή που έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ταυτόχρονα τέσσερις έως οχτώ συσκευές, ενώ η δεύτερη είναι η εταιρική ρύθμιση που μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες ενός αριθμού συσκευών που κυμαίνεται στο εύρος οχτώ με δεκαέξι. Τα *femtocells* με τη λειτουργία τους δίνουν την δυνατότητα στους παρόχους υπηρεσιών να καλύψουν περιοχές που χωρίς την ύπαρξη τους δεν θα ήταν εύκολο να καλυφθούν. Για παράδειγμα κλειστοί χώροι, όπως δωμάτια που περιτριγυρίζονται από πολλά στρώματα τοίχων και κτηρίων και εξασθενούν το σήμα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των *femtocells* είναι ό,τι ο χρήστης μπορεί να τα εγκαταστήσει μόνος του δίχως να χρειάζεται η παρουσία ενός εξειδικευμένου ατόμου από τον πάροχο υπηρεσιών. Η ευκολία της εγκατάστασης από τους χρήστες είναι πραγματικά σημαντική, διότι εξοικονομείται χρόνος και εξασφαλίζεται η άμεση λειτουργικότητα του δικτύου.



Εικόνα 8. Ένα femtocell. [23]

Όπως προαναφέραμε παραπάνω τα *femtocells* έχουν δυο ρυθμίσεις λειτουργίας, την οικιακή και την εταιρική έχοντας πρακτικά τη δυνατότητα να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα δεκαέξι χρήστες αν και οι πάροχοι έχουν καθορίσει το θεωρητικό άνω όριο κάλυψης να είναι αυτό των τριάντα χρηστών. Η περιοχή δράσης στην οποία μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά τις ανάγκες των καταναλωτών ξεκινάει από τα δέκα μέτρα και εκτείνεται μέχρι και την ακτίνα των 100 μέτρων προσφέροντας επαρκή κάλυψη σε μικρούς εσωτερικούς χώρους ενώ η κατανάλωση ενέργειας του ανάλογα με το πεδίο κάλυψης κυμαίνεται από 1 mW έως και 250 mW . Τα χαρακτηριστικά κατασκευής του λοιπόν είναι προσαρμοσμένα για μικρή ακτίνα δράσης, αυτό πρακτικά σημαίνει ό,τι οι συσκευές των χρηστών θα είναι διαρκώς πολύ κοντά σε κάποιο σταθμό βάσης με αποτέλεσμα το προσδοκώμενο όριο της μπαταρίας τους να αυξάνεται. Επιπλέον ο χρήστης εκμεταλευόμενος τη λειτουργία των *femtocells* έχει επαρκή συνδεσιμότητα με κάποιο *macrocell* άρα και μεγαλύτερη αξιοπιστία στη μεταφορά δεδομένων. Επιπρόσθετα τα *femtocells* έχουν κατασκευαστεί από τους παρόχους των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών με τέτοιο τρόπο ώστε να υποστηρίζουν διάφορες τεχνολογίες και πρότυπα της πέμπτης γενιάς των δικτύων αλλά και παλαιότερων γενεών όπως είναι το *GSM*, το *CDMA*, το *UMTS* και το πρότυπο *LTE*. Η σημασία τους για την πυκνοποίηση του δικτύου έχει απασχολήσει μεγάλες εταιρείες τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες (*Cellcom*, *AT&T*, *Cisco*, *Alcatel*, *T-Mobile*) όσο και στην Ασία (*SoftBank*, *Huawei*). Όσον αφορά τη χώρα μας τον Ιούλιο του 2009 η *Vodafone* κυκλοφόρησε το πρώτο δίκτυο *femtocell* στην Ευρώπη με την αρωγή της *Alcatel*. Το 2010 η *Vodafone* προχώρησε στη παροχή των υπηρεσιών και σε άλλες χώρες και πιο συγκεκριμένα στην Ισπανία, την Ιταλία, την Ιρλανδία, την Ουγγαρία και την Ολλανδία. [24]

Εκτός όμως από τις θετικές επιδράσεις των *femtocells* στα 5G δίκτυα υπήρξαν και ορισμένα προβλήματα ως προς την ασφάλεια τους. Πιο συγκεκριμένα το 2013 στο συνέδριο *Black Hat* που έλαβε χώρα στο Λας Βέγκας των Ηνωμένων Πολιτειών, τρεις ερευνητές ασφάλειας δικτύων ανέφεραν λεπτομερώς τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να παρακολουθούν κρυφά φωνητικές κλήσεις, γραπτά μηνύματα και να υποκλέπτουν δεδομένα από συσκευές που συνδέονται σε *femtocells* της εταιρείας *Verizon*. Πραγματοποίησαν μάλιστα ζωντανά μια επίδειξη κατά την οποία έδειξαν πως κατέγραφαν μια φωνητική κλήση μιας συσκευής που είναι

συνδεδεμένη σε ένα *femtocell*, ηχογραφώντας μάλιστα και τους δυο συνομιλητές. Απέδειξαν επίσης ό,τι ήταν δυνατόν να υποκλέψουν το *ID* των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο *femtocell* και λειτουργούν σύμφωνα με το πρότυπο *CDMA*. Τα προβλήματα ασφαλείας που κατέδειξαν οι ερευνητές αποτέλεσαν την αφορμή ώστε να παρακινηθεί η επιστημονική κοινότητα με στόχο την βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας του δικτύου, καθώς με κάθε κενό ασφαλείας πολλά προσωπικά δεδομένα χιλιάδων χρηστών είναι εκτεθειμένα σε αγνώστους. [23] [24]

3.3.2. Picocells

Η αμέσως επόμενη κατηγορία με βάση την οποία ταξινομούνται τα *small cells* σύμφωνα με την ακτίνα δράσης την οποία καλύπτουν είναι τα *picocells*. Τα *picocells* μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές σε σύγκριση με τα *femtocells*. Έχουν την δυνατότητα να εγκατασταθούν σε μικρούς εσωτερικούς χώρους όπως είναι τα κτήρια ή τα αεροσκάφη αλλά μπορούν επίσης να τοποθετηθούν και σε μεγαλύτερες περιοχές όπως είναι τα εμπορικά κέντρα, οι σταθμοί τρένων και τα γήπεδα. Προσφέρουν και αυτά με τη σειρά τους επαρκή κάλυψη στις συσκευές των χρηστών που δεν βρίσκονται κοντά σε *macrocells*, δεν επιβαρύνουν τους παρόχους ως προς τη κοστολόγηση και εξασφαλίζουν την επαύξηση της χωρητικότητας του δικτύου προς όφελος των καταναλωτών. Τα *picocells* συνδέονται με τον ελεγκτή σταθμού βάσης *BSC (Base Station Controller)* ο οποίος είναι υπεύθυνος για την διαχείριση των πληροφοριών που ανταλλάσσει ο σταθμός βάσης με τους χρήστες και δρομολογεί με εξειδικευμένους αλγόριθμους τη πορεία των δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Κατά συνέπεια ο ελεγκτής είναι ο ιθύνων νους των σταθμών βάσεων μέσα στο δίκτυο καθώς όλοι είναι συνδεδεμένοι μαζί του είτε μέσω καλωδίωσης είτε μέσω δορυφόρων. Σε αντίθεση με τα *femtocells* όπου η εγκατάσταση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί από το χρήστη τα *picocells* πρέπει να τοποθετηθούν και να ρυθμιστούν μόνο από τον πάροχο του δικτύου, έτσι ώστε να συνδεθούν σωστά και να έχουν την απαραίτητη ενέργεια λειτουργίας.



Εικόνα 9. Ένα picocell. [25]

Τα *picocells* μπορούν να καλύψουν γεωγραφικές αποστάσεις που εκκινούν από τα 100 μέτρα και καταλήγουν στα 200 μέτρα. Επιπλέον ο αριθμός των συσκευών που μπορούν να ικανοποιήσουν ταυτόχρονα καθορίζεται με το ελάχιστο να είναι οι τριάντα χρήστες και το μέγιστο να είναι οι 100. Παρατηρούμε δηλαδή μία αύξηση ως προς τους υπολογιστικούς πόρους που προσφέρει σε σχέση με τα *femtocells* αυτά

παράλληλα σημαίνει ό,τι τα *picocells* χρειάζονται περισσότερη ενέργεια για να λειτουργήσουν. Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία τους η οποία φυσικά διαφέρει ανάλογα με την περίσταση κυμαίνεται από 250 mW έως 1 W . Όπως και τα *femtocells* έτσι και τα *picocells* είναι συμβατά με πολλές τεχνολογίες και πρότυπα προηγούμενης γενιάς δικτύων. Επίσης εντελώς αντίστοιχα πολλές εταιρείες χρηματοδότησαν προγράμματα για την ανάπτυξη και την έρευνα επάνω στα *picocells* και ο λόγος δεν είναι άλλος από τη κομβική σημασία που κατέχουν στα δίκτυα πέμπτης γενιάς καθώς αυξάνουν τη χωρητικότητα του δικτύου και τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. [26]

3.3.3. Microcells

Τα *microcells* είναι η τελευταία κατηγορία που συμπληρώνει την οικογένεια των *small cells* και είναι από την άποψη της γεωγραφικής κάλυψης ισχυρότεροι σταθμοί βάσης σε σχέση με τους δύο προηγούμενους που αναλύσαμε παραπάνω σε αυτό το κεφάλαιο. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλα συγκροτήματα όπως εμπορικά κέντρα και ξενοδοχεία όπως και τα *picocells*. Η διαφοροποίηση ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες σταθμών βάσεων είναι ό,τι τα *microcells* διαθέτουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες διαχειρίζονται την εκπομπή ισχύος τους έτσι ώστε να περιορίζουν ή να διογκώνουν το πλάτος κάλυψης τους ανάλογα με την περίσταση στην οποία χρησιμοποιούνται. Είναι κατάλληλα για τοποθέτηση σε χώρους όπου αναμένεται να υπάρξει μεγάλη συγκέντρωση συσκευών που πρέπει να εξυπηρετηθούν γι'αυτό το λόγο δεν εγκαθίστανται σε τέτοιους χώρους επ'άοριστον αλλά προσωρινά. Σε σχέση με τα *femtocells* και τα *picocells* τα *microcells* απαιτούν μεγαλύτερο οικονομικό κεφάλαιο για τη λειτουργία τους και τη συντήρησή τους.



Εικόνα 10. Ένα *microcell*. [27]

Η ακτίνα την οποία μπορεί να καλύψει ένα *microcell* έχει ως σημείο εκκίνησης τα 200 μέτρα και μπορεί να φτάσει ακόμη και στα 2 χιλιόμετρα. Ως φυσικό επακόλουθο αυτή η κατηγορία σταθμών βάσεων μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες περισσότερων χρηστών και πιο συγκεκριμένα μπορούν να είναι συνδεδεμένες σε ένα *microcell* ταυτόχρονα από 100 μέχρι και 2 χιλιάδες συσκευές. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ό,τι η μεγάλη παραγωγική ισχύ που διαθέτουν τα *microcell* μεταφράζεται σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τη λειτουργία τους. Οι ενεργειακές ανάγκες ενός *microcell* είναι από 1W μέχρι 10W. Τέλος όπως προαναφέραμε τα *microcells* έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται την εκπομπή ισχύος με αποτέλεσμα να καταφέρνουν να μειώνουν τις ανεπιθύμητες παρεμβολές βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο τη φασματική απόδοση του δικτύου. [27]

3.4. Ενεργειακή Απόδοση των Small Cells

Είναι γεγονός ό,τι η ανάπτυξη πολλαπλών *small cells* σε μικρές σχετικά αποστάσεις με στόχο την υπερπύκνωση του δικτύου,δημιούργησε πολλές προκλήσεις και ερωτηματικά σχετικά με την ενεργειακή απόδοση αυτών εσωτερικά του κυψελοειδούς δικτύου. Σύμφωνα με όσα είδαμε η τεχνολογία *Massive MIMO* είναι ικανή να μειώσει την ισχύ της μετάδοσης εσωτερικά του δικτύου με αντάλλαγμα βέβαια το υψηλότερο κόστος κατασκευής αλλά και την υψηλότερη υπολογιστική ισχύ,δίοτι είναι ξεκάθαρο ό,τι μεγάλος αριθμός πληροφορίας σε μικρό χρονικό διάστημα απαιτεί μεγάλους υπολογιστικούς πόρους για την άμεση και ορθή λειτουργία του δικτύου. Σε αυτό το εδάφιο θα αναλύσουμε παρακάτω τόσο την ισχύ μετάδοσης (*transmission power*),όσο και την υπολογιστική ισχύ (*computation power*) των *small cells* και την επίδραση που έχουν στην λειτουργία των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς. Ειδικότερα όπως θα δούμε στη συνέχεια ό,τι η βελτιστοποίηση της υπολογιστικής ισχύς είναι βαρόμετρο ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα των κυψελοειδών δικτύων που στηρίζονται στα *small cells*.

Στο [28] οι συγγραφείς βασίστηκαν στην αρχή του *Laundauer* και πρότειναν ένα μοντέλο υπολογιστικής ισχύος για τα 5G δίκτυα που στηρίζεται στη χρήση πολλών *small cells*. Πιο συγκεκριμένα διερεύνησαν την επίδραση του αριθμού των κεραιών σύμφωνα πάντοτε με την τεχνολογία *Massive MIMO* καθώς και το εύρος ζώνης στην υπολογιστική ισχύ. Πριν από την ορθολογικότερη ανάλυση της υπολογιστικής ισχύς και της ισχύς μετάδοσης είναι σημαντικό να αναλυθεί λεπτομερώς η γενική κατανάλωση ισχύος ενός σταθμού βάσης,σύμφωνα πάντα με τις υπάρχουσες τεχνολογικές διατάξεις. Η κατανάλωση ισχύος κάθε σταθμού βάσης ταξινομείται συνήθως σε τρεις τύπους: στην ισχύ μετάδοσης,στην υπολογιστική ισχύ και στην πρόσθετη ισχύ. Παρακάτω δίνεται μια πιο περιγραφική ανάλυση των τριών τύπων ξεχωριστά.

- **Ισχύς Μετάδοσης (*Transmission Power*)** : Είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για την λειτουργία των ενισχυτών ισχύος (*Power Amplifiers*) και των αλυσίδων ραδιοσυχνοτήτων (*RadioFrequency Chains*). Είναι ουσιαστικά η ενέργεια που δαπανάται για την ανταλλαγή των ασύρματων σημάτων του δικτύου, αλλά και για τον μετασχηματισμό των σημάτων.
- **Υπολογιστική ισχύς (*Computation Power*)** : Είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία των μονάδων βασικής ζώνης (*BaseBand Units*). Η μονάδες βασικής ζώνης (*BBU's*) μπορούν να μεταφέρουν ένα σήμα στην αρχική του συχνότητα, χωρίς διαμόρφωση. Πέρα από τις *BBU's* η υπολογιστική ισχύς των σταθμών βάσης καταναλώνεται για την διαχείριση και τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του εκάστοτε σταθμού αλλά και για την επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης με το κεντρικό δίκτυο.
- **Πρόσθετη Ισχύς (*Additional Power*)** : Είναι η ενέργεια που αντιπροσωπεύει την ισχύ του σταθμού βάσης. Πιο συγκεκριμένα στην πρόσθετη ισχύ περιλαμβάνεται η χαμένη ενέργεια από το δίκτυο τροφοδοσίας, η ενέργεια του συνεχούς ρεύματος και η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη του σταθμού βάσης.

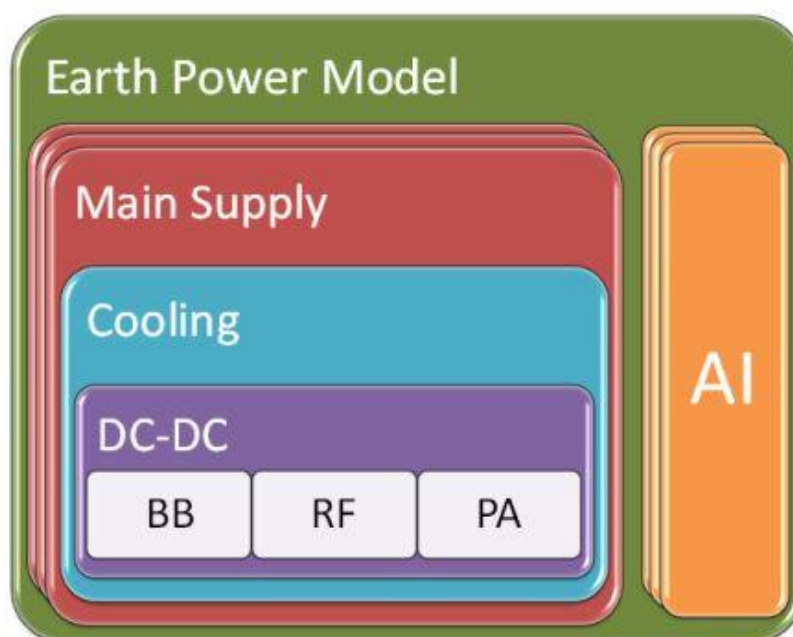
Οι διάφορες κατηγορίες καταναλισκόμενης ενέργειας για τις λειτουργίες των σταθμών βάσεων δεν είναι ίδιες σε κάθε σταθμό που συναντάται εσωτερικά του δικτύου, η παραπάνω κατηγοριοποίηση δεν αποτελεί τίποτε παραπάνω από ένα πολύ χρήσιμο μοντέλο με βάση το οποίο έχουμε την ευχέρεια να εντοπίσουμε την απώλεια ισχύος και να την ελαχιστοποιήσουμε. Ένα παράδειγμα διαφορετικότητας της σπατάλης της ενέργειας είναι ό,τι τα *small cells* εν αντιθέση με τα *macrocells* δεν διαθέτουν συνήθως ενεργό σύστημα ψύξης άρα κατά συνέπεια η πρόσθετη ισχύς που καταναλώνουν τα *small cells* είναι ουσιαστικά μικρότερη σε σχέση με εκείνη των *macrocells*. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα η κατανάλωση ενέργειας των ευρυζωνικών δικτύων έγινε αντικείμενο μελέτης και διεξοδικής έρευνας για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς σε ολόκληρο τον κόσμο.

Ένα από τα πολλά ερευνητικά έργα που διενεργήθηκαν ήταν και το Ευρωπαϊκό έργο *EARTH*, ένα project που εκκίνησε το 2010 από 15 ερευνητικές ομάδες από 10 διαφορετικές χώρες. Ο στόχος του εγχειρήματος ήταν η μελέτη και η προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας των ευρυζωνικών δικτύων, τόσο για την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου όσο και για την συμβολή της επιστήμης στην προσπάθεια της πράσινης ανάπτυξης με την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ειδικότερα για τους σταθμούς βάσης το *project EARTH*, παρέχει γενικευμένες εξισώσεις μέσα από τις οποίες είναι εύκολος ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας για διάφορα σχήματα εξοικονόμησης ενέργειας του δικτύου είτε αυτό απαρτίζεται από *macrocells*, είτε από *small cells* είτε από κοινό συνδυασμό των δύο κατηγοριών σταθμών βάσης. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ό,τι η

εξοικονόμηση ενέργειας των σταθμών βάσης και συγκεκριμένα των *small cells* εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις πολιτικές με τις οποίες χρησιμοποιούνται μέσα στο δίκτυο όταν είναι ενεργά ή όταν βρίσκονται σε αδράνεια (*sleep mode*). Η τεχνικές της αδρανοποίησης των *small cells* θα μελετηθούν αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Πρίν προχωρήσουμε στην ανάλυση του μοντέλου ισχύος του προγράμματος *EARTH* είναι άξιο αναφοράς ό,τι η επιστημονική κοινότητα έχει αποφανθεί ό,τι η πυκνοποίηση των ετερογενών δικτύων με εμπλουτισμό χιλιάδων *small cells* σε περιοχές που απαιτούν υψηλά *data rates* σε μηδαμινό χρόνο είναι μακράν καλύτερη λύση όσον αναφορά την ενεργειακή προσέγγιση σε σχέση με την εγκατάσταση των κοστοβόρων *macrocells*. [29]

3.4.1. Μοντέλο Ισχύος EARTH

Το μοντέλο ισχύος σύμφωνα με το ερευνητικό έργο *EARTH* είναι ένα απλοποιημένο γενικό μοντέλο διαγράμματος ενός σταθμού βάσης και μπορεί εύκολα να γενικευτεί και να περιγράψει είτε ένα *macrocell* είτε τις διάφορες κατηγορίες των *small cells* όπως τις είδαμε παραπάνω στο παρόν κεφάλαιο. Σε γενική ανάλυση μπορούμε να αναφέρουμε ό,τι το μοντέλο στηρίζεται στην ύπαρξη πολλαπλών πομποδεκτών και κεραιών. Πιο αναλυτικά, το μοντέλο ισχύος απαρτίζεται από μια διεπαφή κεραίας (*Antenna Interface*), έναν ενισχυτή ισχύος (*Power Amplifier*), ένα τμήμα πομποδέκτη μικρού σήματος ραδιοσυχνότητας (*Radio Frequency*), μια διεπαφή βάσης (*BaseBand unit*) που περιλαμβάνει έναν δέκτη για το *uplink* και έναν πομπό για το *downlink*. Επιπρόσθετα στο μοντέλο εντάσσεται ένα ενεργό σύστημα ψύξης και μια κύρια μονάδα παροχής *AC-DC* για σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος. Για την περαιτέρω ανάλυση του μοντέλου είναι αναγκαίο να περιγραφεί με περισσότερες λεπτομέρειες ευθύς αμέσως κάθε μονάδα του μοντέλου. [30]



Εικόνα 11. Μοντέλο Ισχύος EARTH. [30]

Η επίδραση της κεραίας διεπαφής (AI) στην αποδοτικότητα ισχύος του μοντέλου διαμορφώνεται από μια ορισμένη ποσότητα απωλειών που προέρχεται κυρίως από τα φίλτρα διέλευσης της κεραίας, των εξαρτημάτων των κεραιών και από τους τροφοδότες που ενισχύουν το σήμα μέσα στο ευρυζωνικό δίκτυο. Η ενεργειακή απώλεια που προκύπτει από τη λειτουργία των τροφοδοτών έχει παρατηρηθεί ότι είναι αμελητέα για τη λειτουργία των *small cells* έναντι των *macrocells*, συνεπώς η εγκατάσταση όλο και περισσότερων μικρών σταθμών βάσης είναι αποδοτικότερη. Ο ενισχυτής ισχύος (PA) συνδέεται με τις κεραίες των σταθμών βάσεων και παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την μεταφορά των σημάτων χωρίς απώλειες, όμως οι ενισχυτές ισχύος έχουν χαμηλή συνήθως χαμηλή αποδοτικότητα διότι έχουν κατασκευαστεί για να λειτουργούν σε μη κορεσμένες περιοχές όπου αποφεύγεται η μη γραμμική παραμόρφωση των σημάτων που προκύπτει από τις παρεμβολές που προκαλούν τα διάφορα κανάλια ή άλλα φυσικά εμπόδια. Εκ των πραγμάτων η χρήση τους σε ιδανικά περιβάλλοντα είναι αρκετά αποδοτική κάτι όμως που δεν συμβαίνει σε ένα πραγματικό περιβάλλον δικτύου όπου οι απαιτήσεις είναι υψηλές και η καταναλισκόμενη ενέργεια πρέπει να περιορίζεται. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος οι μηχανικοί ανέπτυξαν διάφορες τεχνικές με τις οποίες επιτυγχάνεται η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, μια τέτοια τεχνική είναι η εγκατάσταση περισσότερων *small cells* στο δίκτυο ώστε να περιορίζονται οι αποστάσεις και το δίκτυο να γίνεται ακόμη πυκνότερο. Η μονάδα ραδιοσυχνότητας (RF) χρησιμοποιείται για την μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά, ωστόσο η απόδοση της μονάδας διαφέρει ανάλογα με τον σταθμό βάσης και την αρχιτεκτονική επάνω στην οποία στηρίζεται. Συνήθως οι αρχιτεκτονικές χαμηλής ενδιάμεσης συχνότητας είναι περισσότερο αποδοτικές για τα *microcells* ενώ η αρχιτεκτονική μηδενικής ενδιάμεσης συχνότητας είναι κατάλληλη για τα *picocells* και τα *femtocells*. Πέρα από την αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης άλλοι παράγοντες που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα της μονάδας ραδιοσυχνότητας είναι το εύρος ζώνης, η παραμόρφωση του σήματος καθώς και η ανάλυση της μετατροπής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό. Η διεπαφή βάσης (BB) είναι ουσιαστικά ο ψηφιακός επεξεργαστής του σήματος για το *uplink* και το *downlink*. Σε αυτή τη μονάδα πραγματοποιείται το φιλτράρισμα (μέσω του *Μετασχηματισμού Fourier*) του σήματος, η διαμόρφωση και η αποδιαμόρφωση αλλά και η κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση του καναλιού. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την κατανάλωση ισχύος της μονάδας διεπαφής βάσης είναι το εύρος ζώνης του σήματος, ο αριθμός των διάσπαρτων κεραιών μέσα στο δίκτυο αλλά και οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για την επεξεργασία των σημάτων. Τέλος, υπάρχουν και ορισμένες απώλειες ισχύος για την παροχή ρεύματος και την ψύξη των σταθμών βάσης, που όπως αναφέραμε παραπάνω αυτές οι απώλειες δεν μας ενδιαφέρουν διότι είναι αμελητέες στα *small cells*. [29] [30]

Με γνώμονα το παραπάνω ενεργειακό μοντέλο οι ερευνητές του project *EARTH* προχώρησαν στην εφαρμογή δύο ανεξάρτητων πειραμάτων έτσι ώστε να υπολογίσουν την ενέργεια που καταναλώνουν οι σταθμοί βάσης σε ένα πυκνοποιημένο ετερογενές δίκτυο. Η ειδοποιός διαφορά των δύο πειραμάτων ήταν η τεχνολογική εξέλιξη των *macrocells* και των *small cells*, με την πρώτη να απευθύνεται στις τεχνολογίες του 2010 (χρονιά εκκίνησης του *project*) και τη δεύτερη να αναφέρεται δύο χρόνια έπειτα. Τα δύο πειραματικά συστήματα επικοινωνίας διαμορφώθηκαν ώστε να έχουν εύρος ζώνης *10 MHz*, σταθμούς βάσης με κεραίες *2x2* και τερματικά. Με βάση αυτά τα δεδομένα η κατανάλωση ισχύος του μοντέλου *EARTH* για τα *macrocells* υπολογίστηκε στα *321,6 W*, ενώ στην περίπτωση των *small*

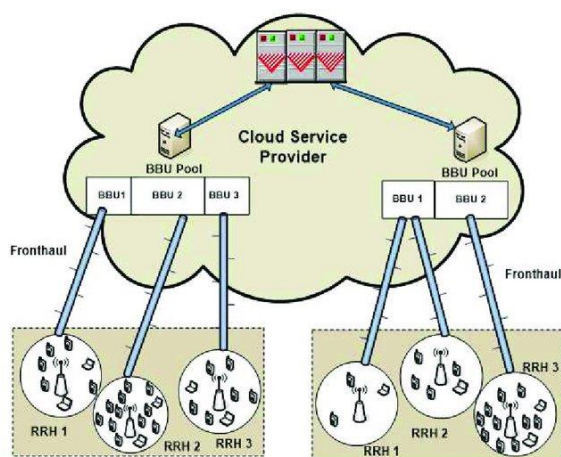
cells στα 6,2 W. Αντίστοιχα η υπολογιστική ισχύς του προγράμματος *EARTH* για τα *macrocells* υπολογίστηκε ό,τι είναι 29,68 W και για τα *small cells* 2,4W. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ό,τι η πυκνοποίηση του δικτύου με *small cells* είναι ενεργειακά καλύτερη λύση σε σχέση με την τοποθέτηση των *macrocells*. [30]

Όπως μελετήσαμε η υπολογιστική ισχύς είναι η ενέργεια που ξοδεύεται ως επί τω πλείστον στη μονάδα βασικής ζώνης (*BaseBand unit*) η οποία σύμφωνα με το μοντέλο *EARTH* είναι υπεύθυνη για το φιλτράρισμα του σήματος, για την διαμόρφωση και την αποδιαμόρφωση του καθώς και για την κωδικοποίηση/αποκωδικοποίηση των καναλιών. Οι ερευνητές στο [28] κατάφεραν να υπολογίσουν την υπολογιστική ισχύ στο ίδιο ενεργειακό μοντέλο και περιβάλλον με το *project EARTH* βασιζόμενη στην Αρχή του *Landauer*, οποία πραγματεύεται την σχέση μεταξύ της πληροφορίας και της κατανάλωσης ενέργειας από τη σκοπιά της στατιστικής φυσικής και των θερμοδυναμικών αρχών. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν αυτήν την αλληλεξάρτηση μεταξύ ενέργειας και πληροφορίας με στόχο την ανάλυση της υπολογιστικής ισχύς σε κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς που απαρτίζονται από *small cells*. Σύμφωνα με αυτή τη παραλαγή εφάρμοσαν το ίδιο πείραμα και κατέληξαν στο αριθμητικό συμπέρασμα ό,τι η υπολογιστική ισχύς για τα *small cells* είναι 3.6W. Πέρα από το αριθμητικό συμπέρασμα, η μελέτη των ερευνητών κατέδειξε τρία πολύ σπουδαία συμπεράσματα που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ό,τι η ενεργειακή σπατάλη των δικτύων αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο αριθμός των *macrocells* μέσα στο δίκτυο. Η πυκνωση του δικτύου με *small cells* είναι πιο κερδοφόρα ενεργειακά και φυσικά έχει χαμηλότερο οικονομικό κόστος. Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ό,τι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κεραιών μέσα στο δίκτυο, τόσο θα αυξάνεται αναπόφευκτα η ενεργειακή κατανάλωση, είναι ένα λογικό συμπέρασμα το οποίο δύσκολα μπορεί να περιοριστεί διότι είναι προτιμότερο να υπάρχει αξιόλογη κάλυψη χωρίς προβλήματα εξυπηρέτησης από το να καταναλώνει το δίκτυο λιγότερη ενέργεια με την έννοια ό,τι πρακτικά γίνεται μη λειτουργικό. Το τρίτο συμπέρασμα συσχετίζει την ενεργειακή απόδοση των 5G δικτύων με το εύρος ζώνης, με την τεχνολογία *mmWave* είδαμε ό,τι τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς έχουν μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά το εύρος ζώνης, όμως η αύξηση της χωρητικότητας του στοιχίζει περισσότερο ενεργειακά. Συνεπώς με βάση τα προηγούμενα συμπεράσματα η λειτουργία των *small cells* και οι διάφορες τεχνολογίες των 5G δικτύων απαιτούν μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα ώστε να υπερκαλύπτουν ποιοτικά τους χρήστες.

3.5. Αρχιτεκτονική C-RAN

Η αρχιτεκτονική δικτύου για τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς *Cloud-Radio Access Network (C-RAN)* ή αλλιώς *Centralized-Radio Access Network* παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2010 στο Πεκίνο από το Ερευνητικό Ινστιτούτο Κινητής Τηλεφωνίας της Κίνας με σκοπό να αποτελέσει την κύρια αρχιτεκτονική δικτύου για το 5G. Είναι μια αρχιτεκτονική που βασίζεται στο αφαιρετικό επίπεδο του *cloud computing* και προσφέρει προσβασιμότητα και στα κυψελωτά δίκτυα των προηγούμενων γενεών. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική δικτύου όλες οι λειτουργίες του χαμηλότερου επιπέδου αλλά και του υψηλότερου επιπέδου των σταθμών βάσης εκτελούνται σε ένα cloud και η συσχέτιση της με τον τρόπο λειτουργίας των *small cells* αποσκοπεί στη βελτίωση της κάλυψης τόσο εξωτερικά των κτηρίων,όσο και εσωτερικά προσφέροντας υψηλή ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. Η αρχιτεκτονική C-RAN αποτελείται κατά βάση από τρία κύρια μέρη.

Το πρώτο μέρος της αρχιτεκτονικής είναι οι διανεμημένες μονάδες κεραιών που βρίσκονται συνήθως σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και ονομάζονται *RRHs (Remote Radio Heads)*. Το δεύτερο μέρος είναι ένα οπτικό δίκτυο μεταφορών υψηλού εύρους και χαμηλής καθυστέρησης που συνδέει τις διάσπαρτα καταναμημένες μονάδες κεραιών *RRHs* με το τρίτο κύριο μέρος της αρχιτεκτονικής που ονομάζεται *BBU (Baseband Unit)*. Το *BBU* είναι ένα σύνολο από προγραμματιζόμενους επεξεργαστές υψηλής απόδοσης. Κατά συνέπεια η αρχιτεκτονική κινητών δικτύων C-RAN είναι μια φυσική τεχνολογική εξέλιξη των καταναμημένων συστημάτων αλλά αποτελείται από *RRH* και *BBU*. Πιο συγκεκριμένα το σύνολο των κεραιών διαμοιράζεται σε σταθμούς βάσης και στη συνέχεια μέσω του οπτικού δικτύου συνδέεται στο εικονοποιημένο ασύρματο *cloud*. Παράλληλα οι μονάδες *BBU* έχουν την δυνατότητα της αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ τους με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και ελάχιστη καθυστέρηση,ενώ ταυτόχρονα οι κεραίες *RRHs* συνδέονται με τα *BBU*. [31]



Εικόνα 12. Αρχιτεκτονική C-RAN. [32]

Η λειτουργία εικονικοποίησης των δικτύων ραδιοπρόσβασης σε πραγματικό χρόνο και οι διαδικασίες επεξεργασίας των πολλαπλών πληροφοριών από τα *small cells* σε ένα περιβάλλον δυναμικής διαχείρισης των πόρων και των υπηρεσιών καθιστούν την αρχιτεκτονική *C-RAN* κατάλληλη για την αποδοτική λειτουργία των δικτύων *5G*. Πιο συγκεκριμένα μέσω της εικονικοποίησης οι υπολογιστικοί πόροι στις μονάδες *BBU* μπορούν να διαμοιραστούν με ομαλό τρόπο σε όλους τους σταθμούς βάσης του δικτύου. Γενικότερα αυτή η αρχιτεκτονική επιφέρει πολλά οφέλη σε σχέση με παλαιότερες αρχιτεκτονικές ασύρματων συστημάτων, όπως είναι:

- Το κόστος ανάπτυξης και συντήρησης του δικτύου βελτιώνεται αισθητά, καθώς οι μονάδες *BBUs* είναι συγκεντρωμένες και δεν χρειάζεται να τις τοποθετήσουμε σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Στον αντίποδα η κοστοβόρα διαδικασία είναι η τοποθέτηση των μονάδων *RRHs*.
- Με βάση τον κεντρικό σχεδιασμό των *BBUs* μπορούν να υποστηριχθούν πολλά ασύρματα πρότυπα τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν, να διαχειριστούν και να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά με βάση τις απαιτήσεις των χρηστών, αξιοποιώντας ένα πλήρως ετερογενές ασύρματο σύστημα.
- Η αρχιτεκτονική *C-RAN* βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση μειώνοντας τον αριθμό των ενεργών κυψελών όταν δεν είναι απαραίτητες και έτσι ελαχιστοποιεί την συνολική κατανάλωση ενέργειας του χρήστη. Επιπρόσθετα όταν δεν απαιτείται η λειτουργία ορισμένων *BBUs*, τότε απενεργοποιούνται και η ισχύς τους διαμοιράζεται στις υπόλοιπες μονάδες που λειτουργούν.
- Το κεντρικό *BBU* μπορεί να μοιραστεί συνεργατικά τους πόρους μεταξύ των κελιών με αποτέλεσμα τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης και τη μείωση των παρεμβολών μεταξύ των καναλιών.
- Η αρχιτεκτονική *C-RAN* είναι αρωγός στην ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων που αποβλέπουν στην βελτίωση της ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών.

Πέρα από τη πληθώρα των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η αρχιτεκτονική *C-RAN*, παρουσιάζει και κάποια προβλήματα τα οποία είναι αναγκαίο να αναφερθούν. Ένα παράδειγμα είναι τα προβλήματα ασφαλείας των συμβατικών ασύρματων δικτύων από επιθέσεις παραποίησης των δεδομένων. Ακόμη η *C-RAN* επιφέρει μεγάλες επιβαρύνσεις στις οπτικές συνδέσεις *fronthaul* μεταξύ του κεντροποιημένου δικτύου και των *RRHs*. Τα μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής *C-RAN* σε συνδυασμό με την ραγδαία εξέλιξη της εικονικοποίησης των δικτύων ώθησαν την επιστημονική κοινότητα να προβεί σε περαιτέρω βήματα.

Για την καλύτερη αντιμετώπιση των προβλημάτων η επιστημονική κοινότητα εκκίνησε τη μελέτη μιας διαδοχικής αρχιτεκτονικής που βασίζεται εξ'ολοκλήρου στην εικονικοποίηση του δικτύου που ονομάζεται *Virtual-Radio Access Network (V-RAN)*. Η οποία μπορεί να προσφέρει ευέλικτο έλεγχο, χαμηλό κόστος, αποδοτική χρήση πόρων και διαφοροποιημένες εφαρμογές. Επιπλέον μπορεί να αντιμετωπίσει πολλά βασικά ζητήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη των δικτύων ραδιοπρόσβασης στο *cloud*. Πιο συγκεκριμένα ένα δίκτυο το οποίο θα είναι βασισμένο στην αρχιτεκτονική *V-RAN* θα μπορεί με μεγάλη ευκολία να αξιοποιεί τους ασύρματους πόρους και τις μονάδες *BBU* που θα διαμοιραστούν για την λειτουργία πολλών σταθμών βάσης με γνώμονα τις υποκείμενες συνθήκες κυκλοφορίας των πληροφοριών μέσα στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποσυμφόρηση του δικτύου και η λειτουργία των σταθμών βάσης. Ωστόσο η αρχιτεκτονική *V-RAN* θέτει διαφορετικές απαιτήσεις δικτύου *cloud* σε σχέση με την *C-RAN* διότι εισάγει δύο διαφορετικές θεμελιώδεις τεχνολογίες εικονικοποίησης που μπορούν να εφαρμοστούν, αυτές είναι η *hypervisor-based* και η *container-based*. Στην τεχνολογία *hypervisor-based* το δίκτυο ουσιαστικά μετατρέπεται σε ένα λειτουργικό σύστημα με την βοήθεια των εικονικών μηχανών και έτσι αυξάνεται η υπολογιστική λειτουργία των πόρων του δικτύου. Ένα γνωστό *framework* εικονικοποίησης που λειτουργεί σύμφωνα με την τεχνολογία *hypervisor-based* είναι το *OpenStack* το οποίο αποτελείται από πληθώρα υπηρεσιών που έχουν ευέλικτες λειτουργίες και υποστηρίζουν την δυναμική διαχείριση των πόρων και των πληροφοριών. Η *container-based* αντιπροσωπεύει μια τεχνολογία που αξιοποιεί τη γρήγορη και ασφαλή ανάπτυξη και εκτέλεση των εφαρμογών λογισμικού του δικτύου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία προωθεί την εκτέλεση ορισμένων εφαρμογών λογισμικού του δικτύου σε απομονωμένα περιβάλλοντα του συστήματος που ονομάζονται *containers*. Κάθε *container* είναι ένα εικονοποιημένο λειτουργικό σύστημα που οριοθετεί και διαχειρίζεται τις διάφορες διαδικασίες του συστήματος. Ένα γνωστό *container-based framework* είναι το *Docker* το οποίο προωθεί μια κλιμακούμενη ανάπτυξη πολλαπλών ανεξάρτητων μεταξύ τους εικονικών λογισμικών. Η πρόσβαση στους υλικούς πόρους του δικτύου πραγματοποιείται ανεξάρτητα από κάθε *container* και με κατάλληλους αλγορίθμους παραμετροποιείται η σειρά των διαδικασιών με στόχο την μεγαλύτερη αποδοτικότητα του δικτύου, ενώ σε αντίθεση με το *OpenStack* το *Docker* δεν απαιτεί την ανάπτυξη ενός πλήρους λειτουργικού συστήματος [33].

Κεφάλαιο 4. Προβλήματα Παρεμβολών και Ενέργειας

Η τεχνολογική ανάπτυξη που έχει επιτευχθεί τις τελευταίες δεκαετίες έχει επιφέρει καινοτόμες αλλαγές σε όλα τα επιστημονικά πεδία. Εκείνος όμως ο επιστημονικός τομέας ο οποίος έχει επωφεληθεί περισσότερο και έχει αλλάξει ριζικά είναι ο τομέας των τηλεπικοινωνιών. Η γρήγορη μετάδοση και επεξεργασία των πληροφοριών είναι πολύ σημαντικός πυλώνας στην επικοινωνία κατά τη σύγχρονη εποχή, πέρα όμως από τη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων υπάρχει και η ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνει ένας δέκτης από τον πομπό. Είναι μείζονος σημασίας, οι πληροφορίες που ταξιδεύουν μέσα στα κανάλια επικοινωνίας να φτάνουν στον προορισμό τους με όσο το δυνατόν λιγότερη παραμόρφωση σε σχέση με την αρχική τους μορφή. Η παραμόρφωση των πληροφοριών οφείλεται κατά κύριο λόγο στις διάφορες παρεμβολές που συναντάται σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Το πρόβλημα των παρεμβολών έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό την επιστημονική κοινότητα διότι η έλλειψη των παρεμβολών θα συνεισφέρει στην αξιοπιστία του τηλεπικοινωνιακού δικτύου και θα περιορίσει τα κόστη. Είναι χρήσιμο να αναφέρουμε ότι η εξάλειψη των παρεμβολών δεν μπορεί να επιτευχθεί διότι αντιστέκεται στους νόμους της φύσης, είναι όμως εφικτό να φτάσουμε σε οριακές τιμές που μας εξασφαλίζουν την μέγιστη ποιότητα των υπηρεσιών. Όπως αναφέραμε, κάθε τηλεπικοινωνιακό σύστημα αντιμετωπίζει το πρόβλημα των παρεμβολών, έτσι και στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς οι επιστήμονες καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις διάφορες παρεμβολές που συναντάμε γενικά στα δίκτυα και πιο συγκεκριμένα στα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς, καθώς επίσης και τον συσχετισμό των διάφορων παρεμβολών με τα *small cells*. Τέλος θα αναλύσουμε μερικές ενδεδειγμένες λύσεις που προτάθηκαν κατά καιρούς από την επιστημονική κοινότητα για την συμβολή των *small cells* στην ελαχιστοποίηση των παρεμβολών στα ασύρματα δίκτυα.

Σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα υπάρχουν διάφορα είδη παρεμβολών, τα οποία όμως μπορούμε να τα ομαδοποιήσουμε κατά κάποιο τρόπο σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Κάθε μορφή παρεμβολής που θα συναντήσουμε θα προσπίπτει σε μια από τις τρεις παρακάτω κατηγορίες παρεμβολών. Η πρώτη κατηγορία που συναντάμε είναι η κατηγορία των παρεμβολών που προέρχονται από τον θόρυβο, είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρξει τηλεπικοινωνιακό δίκτυο χωρίς την ύπαρξη θορύβου. Η δεύτερη περίπτωση που θα μας απασχολήσει είναι οι παρεμβολές που δημιουργούνται μεταξύ γειτονικών δικτύων. Σε αυτή τη περίπτωση το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μεταξύ των παρόχων του δικτύου. Για παράδειγμα εάν δύο γειτονικά δίκτυα έχουν δύο διαφορετικούς παρόχους, θα πρέπει οι πάροχοι να μεριμνήσουν όσον αφορά την κάλυψη των ζωνών συχνότητας και την ακτίνα κάλυψης των δικτύων τους, ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα παρεμβολών. Η τρίτη κατηγορία όμως είναι εκείνη που θα μας απασχολήσει περισσότερο στην παρούσα εργασία και είναι η κατηγορία που αναφέρεται στις παρεμβολές που προκύπτουν εντός του ίδιου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Είναι το είδος των παρεμβολών στο οποίο έχουν επικεντρωθεί περισσότερο οι ερευνητές και αφορά συνήθως παρεμβολές που

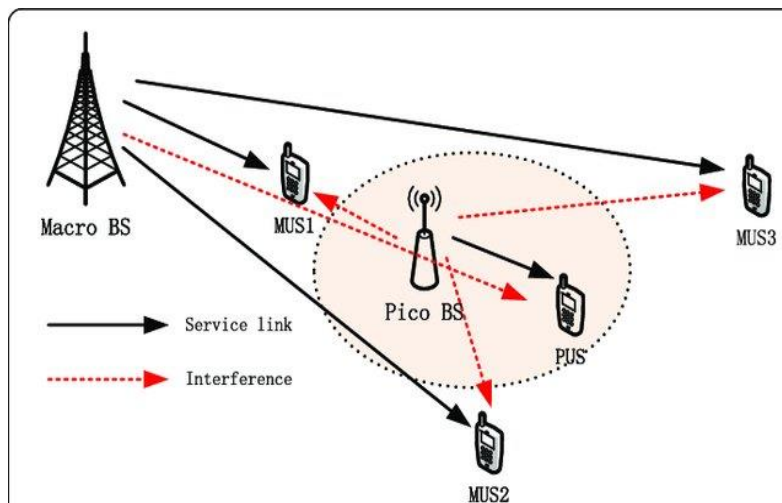
συμβαίνουν κατά την επικοινωνία της συσκευής του χρήστη (*User Equipment, UE*) με τους σταθμούς βάσης του δικτύου, είτε ο σταθμός βάσης είναι ένα *macrocell* είτε ένα *small cell*. Αυτές οι παρεμβολές εμφανίζονται τόσο στο *downlink* όσο και στο *uplink* και πριν τις αναλύσουμε περισσότερο είναι αναγκαίο να παρουσιάσουμε δύο διαφορετικά πρωτόκολλα, το *Time Division Duplex (TDD)* και το *Frequency Division Duplex (FDD)*.

Το πρωτόκολλο *Time Division Duplex* είναι μια χρονική διαμέριση που αναφέρεται σε duplex συνδέσους επικοινωνίας, όπου το *downlink* και το *uplink* διαχωρίζονται σε διαφορετικές χρονικές θυρίδες (ή αλλιώς *time slots*) στην ίδια όμως πάντα ζώνη συχνοτήτων. Είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που επιτρέπει την ασύμμετρη ροή μετάδοσης δεδομένων και οι χρήστες (*UEs*) διαθέτουν χρονικά διαστήματα για την αποστολή και την παραλαβή δεδομένων. Πρακτικά το πρωτόκολλο *TDD* διαιρεί μια ροή δεδομένων σε πλαίσια και εκχωρεί σε αυτά τα πλαίσια διαφορετικές χρονικές θυρίδες με βάση τις οποίες θα γίνει η προώθηση των δεδομένων και η αναστροφή πορείας τους, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο και στους δύο τύπου εκπομπών να μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης. Το πρωτόκολλο *Frequency Division Duplex* είναι ένα πρωτόκολλο που αναφέρεται σε duplex συνδέσους επικοινωνίας στην οποία ο πομπός και ο δέκτης εκπέμπουν σε διαφορετικές συχνότητες. Η ειδοποιός διαφορά με το *TDD* είναι ότι στην περίπτωση του *FDD* τα δεδομένα μεταδίδονται σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και κατά συνέπεια η μετάδοση και η λήψη μπορούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα και τα δεδομένα που λαμβάνονται ή αποστέλλονται δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

4.1 Downlink, Uplink και Decoupling DL/UL

Σε όλα τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα οι έννοιες του *downlink* και του *uplink* αναφέρονται σε μία μορφή αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ της κινητής συσκευής του χρήστη (*UE*) και του εγγύτερου σταθμού βάσης του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα ως *downlink* ορίζεται η διαδρομή που ταξιδεύουν τα δεδομένα με σημείο εκκίνησης κάποιον σταθμό βάσης και σημείο προορισμού ένα τερματικό κάποιου χρήστη. Αντίθετα ως *uplink* ορίζεται η διαδρομή των δεδομένων που εκκινούν από μια συσκευή ενός χρήστη του δικτύου και καταλήγουν σε κάποιον εγκατεστημένο σταθμό βάσης του δικτύου.

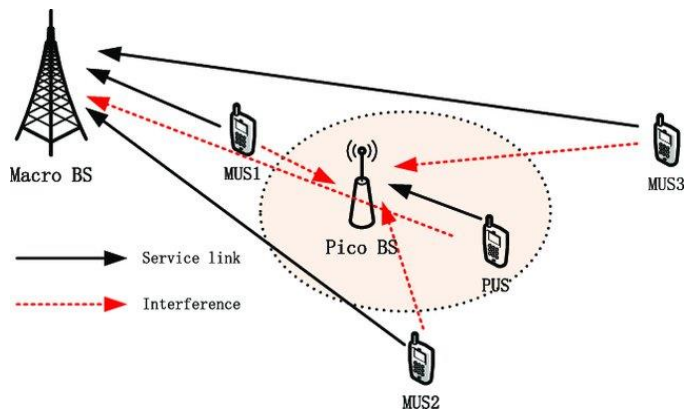
Το σύνηθες πρόβλημα παρεμβολών που παρουσιάζεται κατά το *downlink* προκύπτει όταν γειτονικές κυψέλες βρίσκονται σε κοντινές γεωγραφικές περιοχές, όπου ουσιαστικά η ακτίνας κάλυψης των δύο γειτονικών σταθμών βάσης αλληλοεπικαλύπτονται. Εάν λοιπόν οι δύο σταθμοί βάσης έχουν την ίδια ισχύ και έχουν την ίδια φασματική απόδοση, τότε μια συσκευή κάποιου χρήστη του δικτύου που βρίσκεται στην μέση της απόστασης θα δέχεται πληροφορίες και από τους δύο σταθμούς βάσης με αποτέλεσμα τα δεδομένα του ενός να παρεμβάλλονται στον άλλου. Στην παρακάτω εικόνα γίνεται περισσότερο κατανοητή η παρεμβολή που προκύπτει μέσω *downlink*.



Εικόνα 13. Παρεμβολή από Downlink. [34]

Στην παραπάνω εικόνα υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη παρεμβολών. Η πρώτη παρεμβολή εντοπίζεται από το *macrocell* στη συσκευή του χρήστη που βρίσκεται εντός του πεδίου κάλυψης του *picocell*. Η δεύτερη παρεμβολή είναι εκείνη που προκύπτει από το *picocell* σε όλες τις συσκευές που κατά βάση είναι στην ακτίνα κάλυψης του *macrocell*. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι παρεμβολές που δέχονται οι τρεις χρήστες που βρίσκονται εξωτερικά της ακτίνας δράσης του *picocell* δεν έχουν την ίδια ισχύ, διότι όποια είναι πιο κοντά στον σταθμό βάσης θα δέχεται και πιο ισχυρές παρεμβολές. Έτσι η σειρά των συσκευών με βάση την ισχύ παρεμβολής που δέχονται είναι *MUS1*, *MUS2*, *MUS3*. Επιπλέον παρατηρούμε ότι η ισχύς του σήματος που δέχονται από το *macrocell* οι συσκευές *MUS2* και *MUS3* είναι μικρότερη σε σχέση με τη συσκευή *MUS1* λόγω απόστασης. Έτσι αν θέλουμε να ισοσταθμίσουμε τον λόγο του σήματος προς το θόρυβο (*SINR*) και για τις τρεις συσκευές θα πρέπει να αυξήσουμε την ισχύ μετάδοσης του *macrocell*. Όμως αυξάνοντας την ισχύ μετάδοσης του *macro cell* ταυτόχρονα αυξάνεται και η ισχύς των παρεμβολών προς τη συσκευή *PUS*. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως οι παρεμβολές και η ισχύς μετάδοσης είναι δύο αλληλοεξαρτώμενες έννοιες.

Με παρόμοια λογική συναντάμε παρεμβολές και στο *uplink*, δηλαδή στη μετάδοση των δεδομένων από τις συσκευές/τερματικά του χρήστη προς τους σταθμούς βάσης που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη. Στην εικόνα 13 υπάρχουν και πάλι δύο είδη παρεμβολών. Το πρώτο είδος είναι οι παρεμβολές που προκαλούνται από τις συσκευές *MUS1*, *MUS2*, *MUS3* στο *picocell*, και το δεύτερο είδος είναι η παρεμβολή που προκαλεί η συσκευή *PUS* στο *macrocell*. Σε αντίθεση με την περίπτωση του *downlink*, στο *uplink* παρατηρούμε ότι όσο μακρύτερα βρίσκεται μια συσκευή από το σταθμό βάσης τόσο μεγαλύτερο *path loss*. Κατά συνέπεια η συσκευή του χρήστη θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης με αποτέλεσμα να προκαλούνται περισσότερες παρεμβολές. Έτσι λοιπόν στο παράδειγμα μας η συσκευή *MUS3* προκαλεί περισσότερα προβλήματα παρεμβολών κατά το *uplink* στο *picocell* σε σχέση με τις συσκευές *MUS2* και *MUS1*.



Εικόνα 14. Παρεμβολή από Uplink. [34]

Από την έναρξη της κινητής τηλεφωνίας και την πρώτη γενιά δικτύων μέχρι και την τέταρτη τόσο το *downlink* όσο και το *uplink* από πλευράς σχεδιασμού αντιμετωπιζόταν ως ένα ενιαίο σύνολο. Η παραπάνω πρόταση ερμηνεύεται ευκολότερα με την παράθεση του παρακάτω παραδείγματος. Έστω λοιπόν ό,τι ένα τερματικό/συσκευή κάποιου χρήστη του δικτύου έχει συνδεθεί με ένα συγκεκριμένα σταθμό βάσης του δικτύου. Η συσκευή του χρήστη θα αλληλεπιδρά μόνο με αυτόν τον σταθμό βάσης και με κανέναν άλλον είτε στο *downlink* είτε στο *uplink*. Με τη τεχνολογική εξέλιξη και την έλευση των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς, παρατηρήσαμε ό,τι τα δίκτυα πλέον είναι πυκνοποιημένα αφού έχει τοποθετηθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός σταθμών βάσεων μέσα σε αυτά. Η πυκνοποίηση των δικτύων άρχισε να προκαλεί διάφορα προβλήματα όσον αφορά την ενοποίηση του *DL* και του *UL*, αυτά τα προβλήματα ώθησαν τους μηχανικούς να αναζητήσουν μια νέα και πιο σύγχρονη λύση που θα μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες των δικτύων. Η λύση η οποία προτάθηκε ήταν ο διαχωρισμός του *downlink* από το *uplink* που ονομάστηκε *Downlink/Uplink Decoupling (DUDe)*.

Ο διαχωρισμός ανάμεσα στο *downlink* και το *uplink* προσέδωσε πολλά πλεονεκτήματα στις επόμενες γενιές δικτύων, στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά από τα πολλά πλεονεκτήματα του διαχωρισμού. Το πρώτο πλεονέκτημα που παρατηρήθηκε ήταν το αυξημένο *SNR* κατά το *uplink* και η μειωμένη ισχύς μετάδοσης, πιο αναλυτικά το τερματικό του χρήστη *UE* πλέον έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε κάποιο κοντινότερο *small cell* και όχι στο *macrocell* με το οποίο έγινε το *downlink*, παράλληλα θα έχουμε καλύτερο *SNR* διότι ελατώνεται η ισχύς εκπομπής. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρει ο διαχωρισμός είναι η μείωση των παρεμβολών, καθώς οι συσκευές των χρηστών στο *uplink* δίκτυο μπορούν να αλληλεπιδρούν όπως είπαμε με τους κοντινότερους σταθμούς βάσης ανεξάρτητα με το *downlink* κατά συνέπεια υπάρχει μείωση στην ισχύ μετάδοσης άρα και μείωση των παρεμβολών. Με την μείωση των παρεμβολών όμως παρατηρήθηκε ό,τι αυξήθηκε

και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Μέσω του μηχανισμού λοιπόν *DUDe* οι συσκευές των χρηστών βελτιώνουν την ταχύτητα μετάδοσης τους προς τους σταθμούς βάσης. Μια ακόμη πολύ σημαντική παράμετρος που εξασφαλίζεται με την τεχνική του διαχωρισμού είναι η ορθότερη κατανομή των χρηστών στους σταθμούς βάσης που τους εξυπηρετούν. Ο μηχανισμός *DUDe* κατανομεί με βάση το φόρτο εργασίας του σταθμού βάσης έναν αριθμό από κινητές συσκευές που χρειάζονται εξυπηρέτηση. Για παράδειγμα εάν κάποιο *small cell* έχει υπερφορτωθεί και κάποιος χρήστης που βρίσκεται κοντά απαιτεί εξυπηρέτηση τότε θα εξυπηρετηθεί από κάποιο άλλο *small cell* που δεν έχει επιβαρυνθεί με μεγάλο φόρτο εργασίας. Τέλος ένα επίσης σημαντικό πλεονέκτημα του μηχανισμού *DUDe* είναι το χαμηλό κόστος ενσωμάτωσής του. [35]

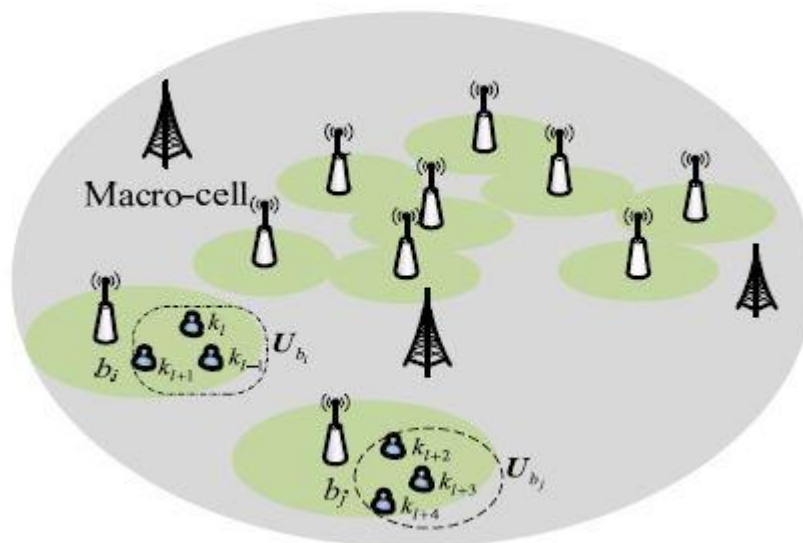
4.2. Πειραματικές προσεγγίσεις

Μέχρι στιγμής έχουμε αναλύσει τη λειτουργία των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς καθώς και την χρησιμότητα που κατέχουν τα *small cells* στη δομή των δικτύων. Επιπλέον παρατηρήσαμε ότι η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού από *small cells* μέσα στο δίκτυο με στόχο την υπερπύκνωση του δικτύου δημιουργεί διάφορα προβλήματα όσον αφορά τις παρεμβολές που παρουσιάζονται μέσα στο δίκτυο. Ένα ακόμη πρόβλημα που εμφανίζεται με την υπερπύκνωση των δικτύων 5G είναι η ενεργειακή κατανάλωση. Ξέχωρα όμως από τις θεωρητικές προσεγγίσεις που αναπτύξαμε στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας είναι χρήσιμο να αναλύσουμε και ορισμένες πειραματικές διατάξεις που έλαβαν χώρα από τους επιστήμονες. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι οι μελέτες, τα μοντέλα και τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν είναι τα απτά αποτελέσματα των εργασιών [36] [37] [38] [39]

Όπως είδαμε η υπερπύκνωση των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς απαιτεί την ανάπτυξη και εγκατάσταση πολλών *small cells* διάσπαρτα μέσα στο δίκτυο, με την ανάπτυξη τους όμως εμφανίζονται προβλήματα παρεμβολών μεταξύ των καναλιών (*co-channel interference*) και προβλήματα κατανάλωσης ενέργειας. Για την βελτίωση των συνθηκών εσωτερικά του δικτύου είναι αναγκαίο τα *small cells* να έχουν την δυνατότητα να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται δυναμικά με βάση ορισμένα κριτήρια και στρατηγικές. Οι ερευνητές στο [36] πρότειναν έναν αλγόριθμο ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των *small cells* σύμφωνα με το ποσοστό που συνεισφέρουν στις παρεμβολές (*Interference Contribution Rate, ICR*). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα μητρώο γειτνίασης στο δίκτυο (*NAM*) όπου με βάση αυτό και τις μετρήσεις ισχύος του σήματος εξυπηρέτησης του εξοπλισμού του χρήστη πραγματοποιείται η ενεργοποίηση ή η απενεργοποίηση του εκάστοτε σταθμού βάσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επαληθεύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει αποτελεσματικά την παρεμβολή των καναλιών μεταξύ των *small cells*, βελτιώνει την απόδοση ισχύος του δικτύου και τον συνολικό ρυθμό δεδομένων διατηρώντας παράλληλα τη χαμηλότερη απώλεια κίνησης (*traffic loss*) στο δίκτυο. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά το μοντέλο δικτύου, θα περιγράψουμε θεωρητικά τον αλγόριθμο δίνοντας έμφαση στη κατανόηση του και θα

παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Θεωρούμε ένα πυκνό ετερογενές δίκτυο, που αποτελείται από *macrocells*, από *small cells* και τερματικά χρηστών (*UEs*), επιπρόσθετα θεωρούμε ό,τι τα *small cells* του δικτύου λειτουργούν σύμφωνα με τον μηχανισμό ενεργοποίησης και απενεργοποίησης.



Εικόνα 15. Απεικόνιση του ετερογενούς δικτύου. [36]

Σε αυτό το μοντέλο δικτύου θεωρούμε τρία διαφορετικά σύνολα, το πρώτο σύνολο είναι το σύνολο που αποτελείται από τα *small cells*, το δεύτερο σύνολο αποτελείται από τα *macrocells* και το τρίτο σύνολο είναι οι συσκευές των χρηστών που απαιτούν εξυπηρέτηση. Επίσης τα *macrocells* καταλαμβάνουν τη ζώνη χαμηλών συχνοτήτων του δικτύου ($< 2,5 \text{ GHz}$) και παρέχουν κάλυψη ευρείας περιοχής στις συσκευές των χρηστών, αντίθετα τα *small cells* λειτουργούν στη ζώνη υψηλών συχνοτήτων για να επιτύχουν σταθερή μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου. Επιπρόσθετα έχει θεωρηθεί ό,τι κάθε συσκευή των χρηστών είναι εξοπλισμένη με μια μόνο κεραία και παράλληλα οι σταθμοί βάσης δημιουργούν συνδέσεις με τις συσκευές τις οποίες διατηρούν με στόχο την ανταλλαγή πληροφοριών. Πιο συγκεκριμένα τα *small cells* είναι υπεύθυνα για τη συλλογή πληροφοριών και μερικών μετρήσεων από τα *UEs* του δικτύου και στη συνέχεια όλα αυτά τα δεδομένα προωθούνται στον κεντρικό ελεγκτή. Ο κεντρικός ελεγκτής με τη σειρά του λαμβάνει την απόφαση σχετικά με την ενεργοποίηση ή την απενεργοποίηση των *small cells* σύμφωνα πάντα με τις ενδείξεις των μετρήσεων και των πληροφοριών που συγκεντρώνουν οι σταθμοί βάσης από τα τερματικά.

Παραπάνω αναλύσαμε την μοντελοποίηση του δικτύου,στη συνέχεια θα περιγράψουμε θεωρητικά την λειτουργία του αλγορίθμου,δίνοντας περισσότερη βάση στην πρακτική κατανόηση του παρά στο πλούσιο μαθηματικό υπόβαθρο που τον διέπει. Πρίν από την ανάλυση του αλγορίθμου είναι χρήσιμο να παραθέσουμε τον ορισμό του *ICR* (*Interference Contribution Rate*). Εάν μελετήσουμε μεμονομένα ένα συγκεκριμένο *small cell* τότε το άθροισμα των *RSPR* (*Reference Signal Received Power*) όλων των ενεργών συσκευών *UE* που είναι συνδεδεμένες στο σταθμό βάσης ορίζεται ο στόχος της ισχύς του σήματος που πρέπει να έχει,ενώ το άθροισμα των *RSPR* των άλλων συσκευών *UE* που δεν εξυπηρετούνται,ορίζεται ως η ισχύς παρεμβολής. Έτσι ο λόγος της ισχύος του σήματος παρεμβολής προς την ισχύ-στόχο του σήματος του σταθμού βάσης είναι το *ICR*.

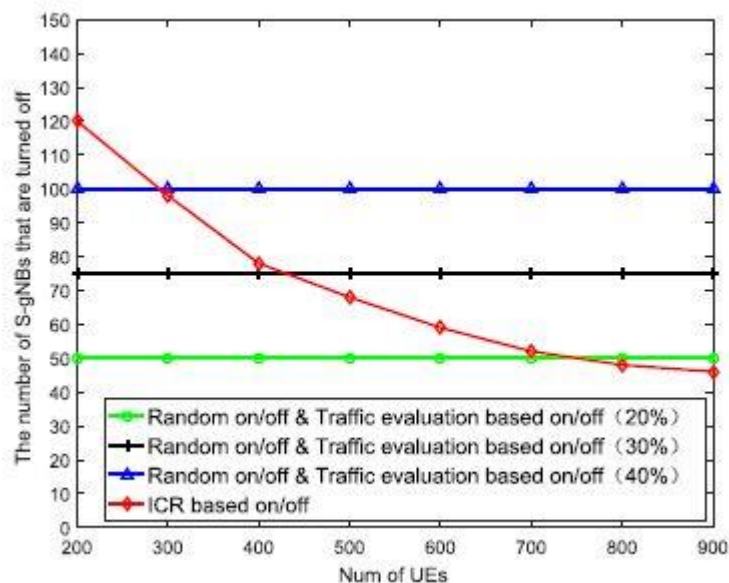
Προκειμένου να εκτελεστεί ορθά η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των *small cells* κατά τον σχεδιασμό του αλαγορίθμου ήταν αναγκαίο να οριοθετηθεί και ένα δυναμικό *ICR* κατώφλι. Συγκεκριμένα, σε κάθε κύκλο ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, το υποσύνολο των *small cells* ,ας υποθέσουμε ό,τι συμβολίζεται με *A*, το οποίο πρέπει να ενεργοποιηθεί ή να απενεργοποιηθεί εντός του τρέχοντος κύκλου,λαμβάνεται σύμφωνα με την κατάσταση του φόρτου εργασίας του κάθε *small cell*. Έτσι ο αλγόριθμος πραγματοποιεί μια διαδικασία επαναληπτικής απόφασης για κάθε *small cell* στο υποσύνολο *A*. Πρώτον, σε κάθε επανάληψη, η τιμή *ICR* κάθε *small cell* στο υποσύνολο *A* και η τιμή κατωφλίου *ICR* της τρέχουσας επανάληψης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το *NAM* και τις μετρήσεις που έχει λάβει το *small cell* από τα *UEs*. Στη συνέχεια η μέγιστη τιμή του *ICR* του κάθε σταθμού βάσης συγκρίνεται με την τιμή του *ICR* που έχουμε θέσει ως κατώφλι. Εάν η μέγιστη τιμή του *ICR* του σταθμού βάσης συμπίπτει με την τιμή του κατωφλίου τότε το *small cell* απενεργοποιείται,αλλιώς εάν δεν συμπίπτουν η τρέχουσα επαναληπτική διαδικασία σταματά και εκκινεί η επόμενη. Έπειτα από το πέρας όλων των επαναλήψεων προκύπτουν τα *small cells* που πρέπει να ενεργοποιήσουν την λειτουργία τους και εκείνα που πρέπει να την απενεργοποιήσουν,όπως και γίνεται.Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω ο αλγόριθμος *ICR* είναι ένας αλγόριθμος σύγκρισης που λαμβάνει υπόψη του τις παρεμβολές του δικτύου και τον φόρτο εργασίας που έχει να αντιμετωπίσει σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές κάθε *small cell* του δικτύου.

Στη συνέχεια θα δούμε τις παραμέτρους,τα σενάρια και τα αποτελέσματα της πειραματικής προσομοίωσης. Ο πίνακας των παραμέτρων δίνεται παρακάτω.

<i>Παράμετροι</i>	<i>Macro cells</i>	<i>Small cells</i>
Αριθμός Σταθμών Βάσεων	3	250
Απόσταση Σταθμών Βάσεων	1500m	150m
Μεταδιδόμενη Ισχύς	46dBm	22dBm
Ζώνη Συχνοτήτων	2.5GHz	3.5GHz
Εύρος	20MHz	20MHz

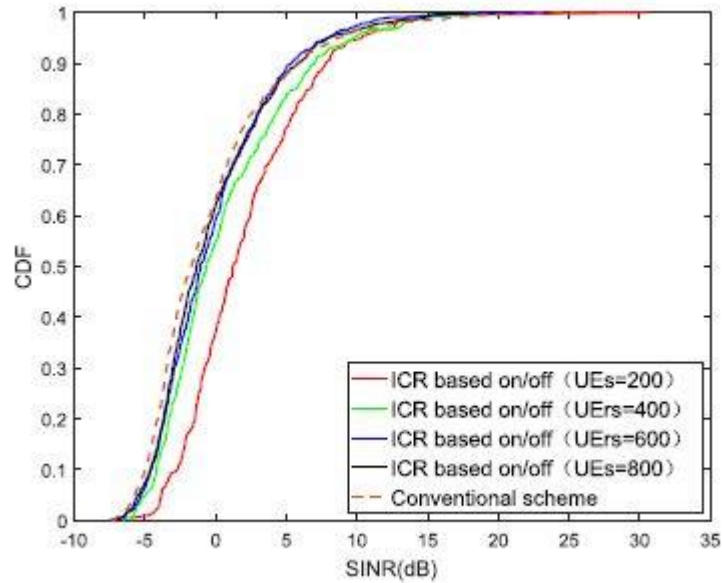
Για την αποδοτικότερη μελέτη, ανάλυση και διεξαγωγή συμπερασμάτων οι συγγραφείς διεξήγαγαν τα πειράματα τους σύμφωνα με τα τέσσερα παρακάτω σενάρια.

- **Συμβατικό Σενάριο (Conventional)** : Όλα τα *small cells* του δικτύου παραμένουν ενεργά χωρίς να υπάρχει μηχανισμός ενεργοποίησης/απενεργοποίησης.
- **Random On/Off** : Σε κάθε κύκλο ο κεντρικός ελεγκτής επιλέγει με τυχαίο τρόπο ένα ορισμένο ποσοστό από *small cells* που θα απενεργοποιηθεί, ενώ τα υπόλοιπα θα παραμείνουν ενεργά.
- **Ανάλογα με την κίνηση (Traffic evaluation based On/Off)** : Σε κάθε κύκλο το σύστημα δημιουργεί ένα υποσύνολο από *small cells* που έχουν χαμηλό φόρτο εργασίας και τα απενεργοποιεί, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν ενεργά.
- **Βασισμένο στον Αλγόριθμο ICR**: Η ενεργοποίηση ή η απενεργοποίηση των *small cells* πραγματοποιείται σύμφωνα με όσα είδαμε.



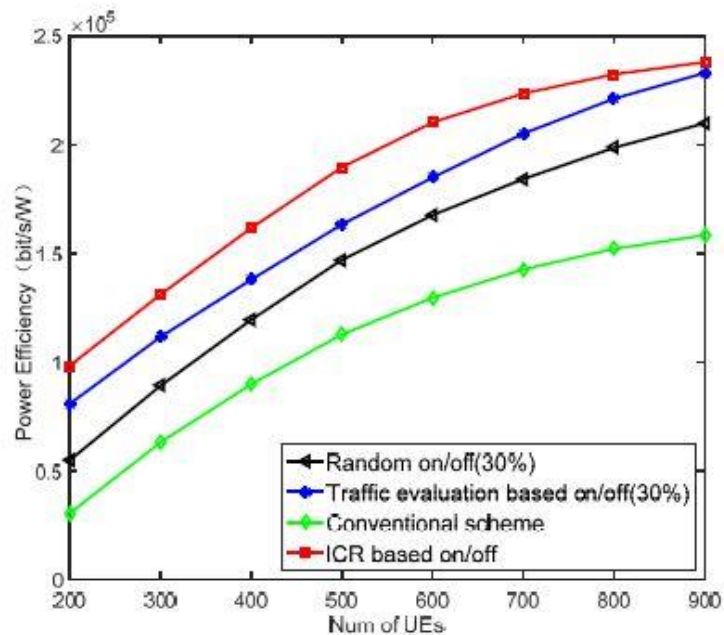
Εικόνα 16. Η σχέση μεταξύ των απενεργοποιημένων *small cells* με τον αριθμό των *UEs* στο δίκτυο. [36]

Στην εικόνα 16, παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να απενεργοποιήσει μεγαλύτερο αριθμό σταθμών βάσεων σε σχέση με τις άλλες δύο προσεγγίσεις όταν ο αριθμός των *UEs* δεν είναι πολύ μεγάλος, αυξάνοντας την αποδοτικότητα του δικτύου. Από την άλλη φυσικά παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος μπορεί να απενεργοποιήσει σημαντικά λιγότερα *small cells* όταν αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών στο δίκτυο.



Εικόνα 17. Συμβατικό σενάριο-Προτεινόμενος αλγόριθμος για τη συνάρτηση κατανομής. [36]

Στο διάγραμμα της συνάρτησης κατανομής που φαίνεται στην εικόνα 17, παρατηρούμε ότι η τιμή του $SINR$ των χρηστών του δικτύου είναι πάντοτε υψηλότερη σε σχέση με την συμβατική περίπτωση όπου δεν απενεργοποιείται κανένα *small cell*. Αποδεικνύεται λοιπόν ότι ο αλγόριθμος που περιγράψαμε μπορεί να συνδράμει ουσιαστικά στην μείωση των παρεμβολών που προκύπτουν μεταξύ γειτονικών κυψελών. Συνεπώς με την εφαρμογή του έχουμε την δυνατότητα να αναβαθμίσουμε την αποδοτικότητα του δικτύου, καθώς όσο λιγότερες παρεμβολές παρουσιάζονται τόσο περισσότερο βελτιώνεται η ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου.

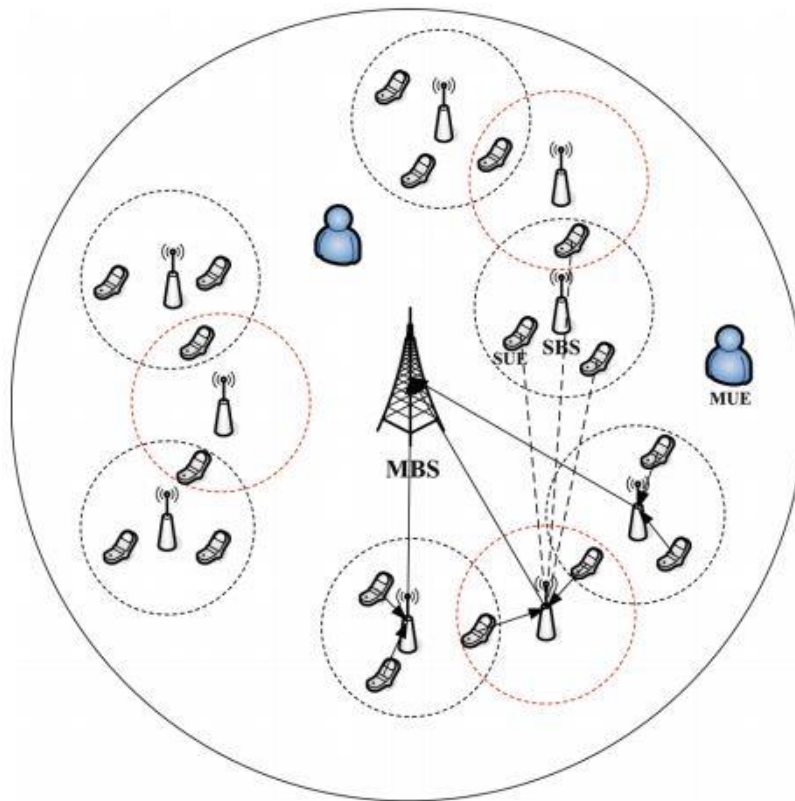


Εικόνα 18. Συγκρίσεις με κριτήριο την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου. [36]

Στην εικόνα 19, μπορούμε να παρατηρήσουμε ό,τι τα σενάρια λειτουργίας που παρατέθηκαν παραπάνω με βάση τα οποία με κάποιο τρόπο ορισμένο ποσοστό των *small cells* στο δίκτυο απενεργοποιείται είναι περισσότερο φίλια ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα σε σχέση με το συμβατικό σενάριο όπου κανένας σταθμός βάσης δεν απενεργοποιείται. Συμπεραίνουμε λοιπόν ό,τι προτεινόμενος αλγόριθμος συμβάλλει αποτελεσματικά στην μείωση των παρεμβολών και στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

Οι επιστήμονες στο [38] ανέπτυξαν μια πολύ σημαντική πειραματική προσέγγιση και μελετάει τον προγραμματισμό των πόρων καθώς και μια στρατηγική ελέγχου ισχύος για ένα 5G δίκτυο δύο επιπέδων το οποίο αποτελείται από ένα κεντρικό *macrocell* και μερικά *small cells*. Η πυκνοποίηση του δικτύου προϋποθέτει την ανάπτυξη πολλών *small cell* σε αυτό και για να μειώσουν την κατανάλωση της ενέργειας που προκαλείται από την επικάλυψη μεταξύ των σταθμών βάσης οι επιστήμονες προτείνουν μια στατηγική *sleep mode* για τα *small cells* όπως θα δούμε στη συνέχεια. Για την ευκολότερη ανάλυση της εργασίας [38] είναι αναγκαίο να παρουσιάσουμε αρχικά το μοντέλο του συστήματος που ανέπτυξαν οι ερευνητές.

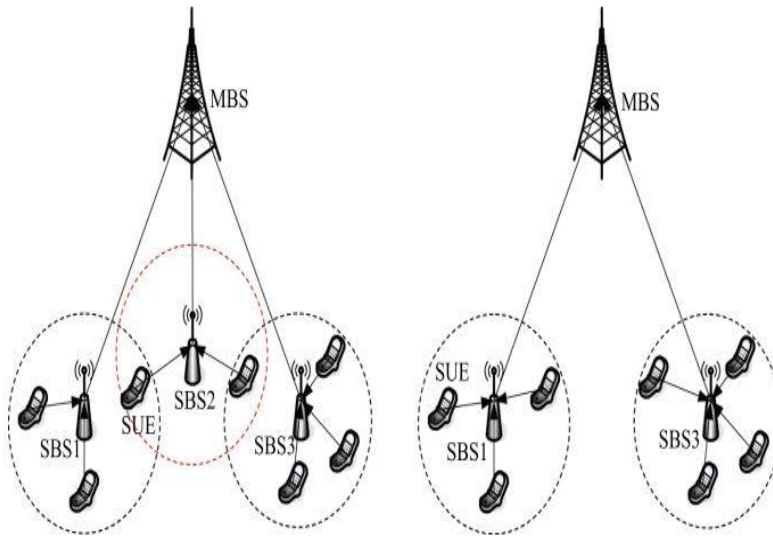
Το σύστημα που μελετάται είναι ένα δίκτυο 5G δύο επιπέδων που αποτελείται από ένα κεντρικό *macrocell* και από έναν τυχαίο αριθμό (έστω n) από *small cells*. Χάρην απλότητας οι χρήστες που εξυπηρετούνται από το *macrocell* θα αναφέρονται ως *MUEs*, ενώ τα τερματικά των χρηστών που εξυπηρετούνται από τα *small cells* θα αναγράφονται ως *SUEs*. Ένα ενδεικτικό μοντέλο συστήματος, είναι αυτό της εικόνας 18 παρακάτω.



Εικόνα 19. Μοντέλο συστήματος. [38]

Όπως παρατηρούμε το *macrocell* βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής εξυπηρέτησης και τα *small cells* βρίσκονται τυχαία παρατεταγμένα στο δίκτυο. Επιπλέον κάθε συσκευή που εξυπηρετείται από κάποιο *small cell* βρίσκεται εντός της περιοχής εξυπηρέτησης του αντίστοιχου σταθμού βάσης. Επίσης τα στερεά βέλη αντιπροσωπεύουν του συνδέσμους του σήματος κατά το *uplink*, ενώ τα διακεκομμένα βέλη είναι τα σήματα παρεμβολής. Με αυτή τη μορφή του συστήματος θα έχουμε μικρό αριθμό από συσκευές που εξυπηρετούνται από το *macrocell* *MUEs*, συνεπώς οι παρεμβολές που θα προκύπτουν στις συσκευές που εξυπηρετούνται από *small cells* θα προέρχονται κυρίως από άλλα *small cells*.

Η πυκνοποίηση του δικτύου συμβάλλει στην αύξηση της χωρητικότητας και στην μείωση της απόστασης της νεκρής ζώνης επικοινωνίας, όμως δημιουργεί παρεμβολές καθώς τα σήματα από τους σταθμούς βάσεις επικαλύπτονται δημιουργώντας προβλήματα στο επικοινωνιακό σύστημα όπως η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, η πληρότητα του φάσματος και η σπατάλη των πόρων. Η σταθμική *sleep mode* που προτείνετε, επιλύει πολλά από αυτά τα προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα ορισμένα *small cells* τα οποία η λειτουργία τους είναι περιττή θα μπου σε *sleep mode* και θα σταματήσουν τη λειτουργία τους. Στην παρακάτω εικόνα δίνεται ένα παράδειγμα.



Εικόνα 20. Σύγκριση τοπολογίας πριν και μετά την εφαρμογή του *sleep mode*. [38]

Όπως παρατηρούμε υπάρχουν τρία *small cells* και οι χρήστες που εξυπηρετούνται από τον σταθμό βάσης *SBS2* βρίσκονται στην ακτίνα κάλυψης των σταθμών βάσης *SBS1* και *SBS3*, συνεπώς τα *SBS1* και *SBS3* μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες επικοινωνίας στους χρήστες άρα κατά συνέπεια ο σταθμός βάσης *SBS2* μπορεί να μεταβεί σε *sleep mode state* έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στο σύστημα και λιγότερες παρεμβολές. Για την περαιτέρω ανάλυση είναι αναγκαίο να εξετάσουμε το συσχετισμό του ρυθμού μετάδοσης της επικοινωνίας των χρηστών με το κόστος επικοινωνίας. Ο ρυθμός μετάδοσης ενός ζεύγους επικοινωνίας ορίζεται ως:

$$R_{i,j} = W \log_2 \left(1 + \frac{g_{i,j} p_{i,j}}{\sum_{m,n \neq i,j} p_{m,n} g_{m,n}^j + N_0} \right).$$

Όπου ο δείκτης (i, j) δηλώνει τη j -οστή συσκευή που συνδέεται με το i -οστό *small cell* εντελώς αντίστοιχα το παραπάνω ισχύει και για το ζευγάρι δεικτών (m, n) . Το $p_{i,j}$ είναι η ισχύς του σταθμού βάσης για τη ζεύξη που αναγράφεται στους δείκτες, το $g_{i,j}$ είναι το πραγματικό *channel gain* από τη σύνδεση του ζευγαριού που αναγράφεται στους δείκτες, μεταξύ του σταθμού βάσης και της συσκευής του χρήστη. Αντίστοιχα το $g_{m,n}^j$ είναι το *channel gain* για το ζευγάρι (m, n) , ενώ το εύρος ζώνης συμβολίζεται ως W . Η αξιολόγηση της χρησιμότητας της κάθε κυψέλης ορίζεται ως :

$$U_i = R_i - c \sum_{j=1}^n p_{i,j}^*$$

Όπου το i αντιπροσωπεύει το i -οστό σταθμό βάσης της κυψέλης και το j τον j -οστό χρήστη της κυψέλης, n είναι ο αριθμός των χρηστών στη κυψέλη. R_i είναι ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης όλων των χρηστών που βρίσκονται εντός της i -οστής

κυψέλης και η μεταβλητή $p_{i,j}^*$ είναι η μέγιστη ισχύς του χρήστη. Στην ουσία το U_i είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης ισχύος, άρα σε αυτή τη συνάρτηση συνδυάζεται το πρόβλημα της κατανομής ισχύος με τη στρατηγική *sleep mode* που πρέπει να ακολουθηθεί. Αν υποθέσουμε ότι όλες οι συσκευές των χρηστών *SUEs* καλύπτονται από τα αντίστοιχα *SBSs*, τότε προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα συνολικά κέρδη των χρηστών η στατηγική *sleep mode* που πρέπει να ακολουθήσουμε είναι η εξής:

- **Συνθήκη 1:** όταν ο χρήστης που εξυπηρετείτε από έναν συγκεκριμένο σταθμό βάσης *SBS* μπορεί να εξυπηρετηθεί και από άλλους κοντινούς σταθμούς βάσης, τότε ο *SBS* τίθεται σε *sleep mode*.
- **Συνθήκη 2:** εντός μιας κυψέλης, εάν όλες οι συσκευές καλύπτονται από δύο και περισσότερους σταθμούς βάσης, τότε απενεργοποιούμε τον έναν, εάν αυτό δεν συμβαίνει δεν τον απενεργοποιούμε.
- **Συνθήκη 3:** εάν τα κέρδη της κυψέλης είναι κάτω από ένα κατώφλι που έχουμε θέσει, δηλαδή όταν $U_i \leq \xi$ τότε πρέπει ο σταθμός βάσης να απενεργοποιηθεί.

Εάν ένας σταθμός πληροί και τις τρεις συνθήκες τότε θα παραμείνει σε *sleep mode* και κατά συνέπεια θα συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Στη συνέχεια της ανάλυσης θα παρουσιάσουμε λεπτομερώς τα μαθηματικά βήματα που ακολούθησαν οι ερευνητές για να λύσουν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και θα παραθέσουμε τον προτεινόμενο αλγόριθμο πριν σχολιάσουμε τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Γνωρίζουμε ότι στα *5G* δίκτυα ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι ιδιαίτερα υψηλός. Θεωρούμε ως R_0 τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης ενός ζευγαριού (i, j) , λαμβάνοντας υπόψη ότι η αβεβαιότητα του ρυθμού μετάδοσης είναι μια διαδικασία στοχαστικής φύσεως εισάγουμε ένα κατώφλι διακοπής $\varepsilon_{i,j}$ ώστε να εξασφαλίσουμε την υψηλή ποιότητα των υπηρεσιών για κάθε χρήστη που κατά πιθανότητα δίνεται ως :

$$Pr\{R_{i,j} \leq R_0\} \leq \varepsilon_{i,j}.$$

Σε αυτό το δίκτυο των δύο επιπέδων που μας απασχολεί, θα πρέπει τα τεμαχικά των χρηστών που αλληλεπιδρούν με τα *small cells* (*SUEs*) να έχουν υψηλά *data rates*, όμως με βάση τον περιορισμό που θέσαμε παραπάνω πρέπει να διατυπώσουμε το πρόβλημα της μεγιστοποίησης ως εξής:

$$P1: \max \sum_{i,j=1}^n R_{i,j} - c * p_{i,j}$$

Όπου η μεταβλητή c είναι το κέρδος των συσκευών των χρηστών. Παρατηρούμε ότι το πρόβλημα έχει αναχθεί σε ένα μαθηματικό πρόβλημα μεγιστοποίησης το οποίο και πάλι εμπεριέχει παράμετρο αβεβαιότητας, την παράμετρο $g_{i,j}$ άρα κατά συνέπεια είναι αναγκαίο και πάλι να τροποποιήσουμε το

πρόβλημα μεγιστοποίησης ώστε να εξαλείψουμε την αβεβαιότητα. Χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορούμε να γράψουμε τον παράγοντα αβεβαιότητας ως $g_{i,j} = G_{i,j}\bar{g}_{i,j}$ όπου $\bar{g}_{i,j}$ είναι το κανονικό *channel gain* και $G_{i,j}$ είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί εκθετική κατανομή. Με αυτό τον τρόπο μέχρι ώρα το πρόβλημα της αβεβαιότητας έχει επιλυθεί. Υπάρχει όμως ακόμη ένα πρόβλημα το οποίο πρέπει να λυθεί. Εξαιτίας της σύζευξης ισχύος των συσκευών το μαθηματικό μοντέλο όπως το ορίσαμε παραπάνω ανάγεται σε πρόβλημα μη-κυρτής βελτιστοποίησης. Έτσι η προσέγγιση των επιστημόνων ήταν να εξεταστεί η χαλάρωση και η αντικατάσταση του μη κυρτού προβλήματος **P1** θέτοντας το παρακάτω κατώτατο όριο χαλάρωσης του.

$$\alpha \log_2 z + \beta \leq \log_2(1 + z)$$

Όπου $\alpha = \frac{z_0}{1+z_0}$ και $\beta = \log_2(1 + z_0) - \frac{z_0}{1+z_0} \log_2 z_0$ είναι οι μεταβλητές ρύθμισης μετά τη χαλάρωση. Επίσης η μεταβλητή z αντιπροσωπεύει το *SINR* των συσκευών των χρηστών και η μεταβλητή z_0 είναι η αρχική τιμή του *SINR*. Έπειτα από τη χαλάρωση το μαθηματικό μοντέλο γράφεται ως εξής :

$$\mathbf{P2}: \max \sum_{i,j=1}^n \alpha w \log_2 \left(\frac{g_{i,j} p_{i,j}}{\sum_{m,n \neq i,j} p_{m,n} g_{m,n}^j + N_0} \right) + \beta - c * p_{i,j}.$$

Η συνάρτηση **P2** είναι ακόμη μη κυρτή, για να την κυρτοποιήσουμε πραγματοποιούμε τον μετασχηματισμό $\tilde{p}_{ij} = \ln p_{i,j}$ και έχουμε $p_{i,j} = e^{\tilde{p}_{ij}}$, αντικαθιστούμε τη νέα μεταβλητή στην **P2** όπου προκύπτει :

$$\mathbf{P3}: \max \sum_{i,j=1}^n \alpha w \log_2 \left(\frac{g_{i,j} e^{\tilde{p}_{ij}}}{\sum_{m,n \neq i,j} p_{m,n} g_{m,n}^j + N_0} \right) + \beta - c * e^{\tilde{p}_{ij}}.$$

Η **P3** έχει αναγάγει το πρόβλημα σε ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης και για την επίλυση του θα χρησιμοποιηθεί μια Λαγκραζιανή συνάρτηση ο ορισμός της οποίας διακρίνεται παρακάτω:

$$L(p, \lambda) = \sum_{i,j=1}^n (R_{i,j} - c * p_{i,j}) - \sum_{k=i,j} \lambda_k \left(\bar{g}_{i,j} p_{i,j} \ln(1 - \varepsilon_{i,j}) + \left(2^{\frac{R_0}{w}} - 1 \right) (\sum_{m,n \neq i,j} p_{m,n} g_{m,n} + N_0) \right).$$

Σημειώνουμε ότι το λ είναι ο πολλαπλασιαστής *Langrange*. Μετά τη μαθηματική ανάλυση την οποία παρουσιάσαμε εκτενώς θα περιγράψουμε τον προτεινόμενο επαναληπτικό αλγόριθμο που προτάθηκε για την βελτιστοποίηση της **P3**. Κατά τη διάρκεια κάθε επαναληπτικής διαδικασίας του αλγορίθμου ο πολλαπλασιαστής *Langrange* ενημερώνεται ως εξής:

$$\lambda_k(t + 1) = \lambda_k(t) + \mu_0 S_{\lambda_k}(1).$$

Όπου, $S_{\lambda_k} = \frac{\partial L(p, \lambda)}{\partial \lambda_k}$ και μ_0 είναι το μήκος του βήματος επανάληψης. Έτσι λοιπόν όταν η ισχύς συγκλίνει προς τη μέγιστη ισχύ, η συνάρτηση **P3** αποκτά τη

μέγιστη τιμή της και επιτυγχάνουμε τη βέλτιστη στρατηγική *sleep mode* που περιγράψαμε νωρίτερα. Κατά συνέπεια ανά πάσα στιγμή, έχουμε τη δυνατότητα να γνωρίζουμε την κατανομή ισχύος από την παρακάτω εξίσωση.

$$p_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) + \lambda_k \frac{\frac{\alpha}{\ln 2}}{c + \sum_{m,n} \left(\frac{\alpha}{\ln 2} \frac{g_{i,j}}{p_{m,n} g_{m,n}} \text{SIR}(e^{\tilde{p}_{i,j}}) \right) + \lambda_k \bar{g}_{i,j} \ln(1 - \varepsilon_{i,j}) + \sum_{k \neq i,j} \lambda_k \left(g_{i,j} \left(\frac{R_0}{2^w - 1} \right) \right)} \quad (2).$$

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να αναφέρουμε ότι στην εργασία [38] υπάρχει σχετικό παράρτημα που αποδεικνύει μαθηματικά όλες τις παραπάνω εξισώσεις. Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου.

Επαναληπτικός Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

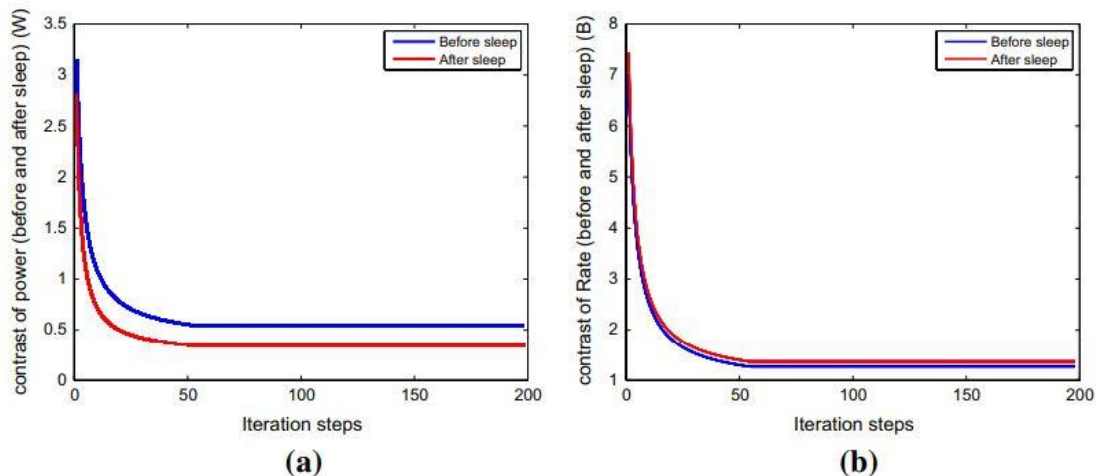
1. Αρχικοποίηση του μέγιστου βήματος επανάληψης L_{max} και της ισχύος p_0 .
2. Καθορισμός του κατωφλίου $\varepsilon_{i,j}$ και του δείκτη επανάληψης $n = 0$.
3. Αρχή επανάληψης:
4. Καθορισμός στρατηγικής *sleep mode*, ο αντίστοιχος σταθμός βάσης απενεργοποιείται.
5. Ανανέωση νέας τοπολογίας.
6. Αρχή επανάληψης:
7. Ενημέρωση της μεταβλητής $p_{i,j}$ σύμφωνα με την εξίσωση (2).
Ενημέρωση του πολλαπλασιαστή Lagrange λ_k σύμφωνα με την εξίσωση (1).
8. $k \leftarrow k + 1$.
9. Μέχρις ότου: $\|p^{k+1} - p^k\|_{\infty} \leq \varepsilon$ και ο πολλαπλασιαστής λ_k συγκλίνει.
10. $p^*_{i,j} \leftarrow p^{k+1}$ και παίρνουμε το λ^*_k .
11. Επαληθεύουμε αν το σύστημα βρίσκεται στη βέλτιστη κατάσταση *sleep mode* σύμφωνα με την ισχύ χρησιμοποιώντας τις τρεις συνθήκες που αναφέραμε για τη κατάσταση *sleep mode*.
12. Εάν όχι, επανέλαβε τα βήματα 4-10.
13. Μέχρις ότου: Το σύστημα λάβει την βέλτιστη ισχύ και φτάσει στη βέλτιστη κατάσταση *sleep mode* ή το βήμα της επανάληψης φτάσει το L_{max} .

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας των παραμέτρων οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος που στηρίχθηκε στον παραπάνω προτεινόμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 9 *small cells* και 18 τερματικά χρηστών *SUEs*.

Μεταβλητή	Παράμετρος	Τιμή
n	Αριθμός Χρηστών	18
R	Ακτίνα Macrocell	250 m
r	Ακτίνα Femtocell	30 m
p^{max}	Μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύς	1 Watt
f	Συχνότητα	2000 MHz
w	Εύρος Ζώνης	$10^{0.5}$
N_0	Διακύμανση AWGN	10^{-6}
ϵ_{ij}	Όριο πιθανότητας κατωφλίου	0.1
c	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	0.1
ξ	Κάτω όριο των κερδών	0.2
\bar{g}_{ij}	Μέσο κέρδος	10^{-3}
R_0	Κατώφλι ρυθμού μετάδοσης	0.25
μ_0	Μήκος βήματος επανάληψης	0.01

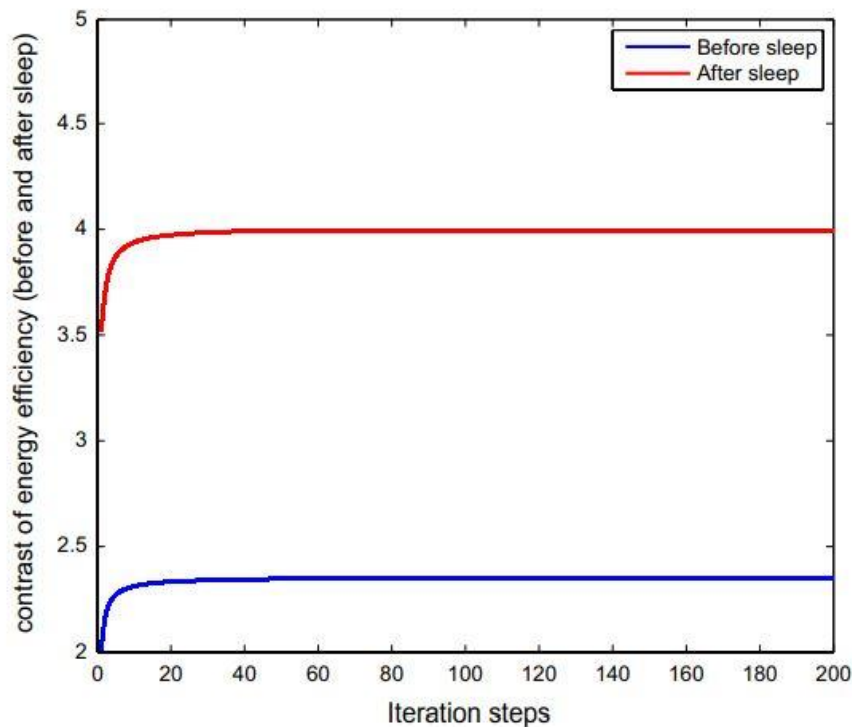
Πίνακας 2. Πίνακας προσομοίωσης. [38].

Στην εικόνα 22 παρατηρούμε την πορεία της ισχύος και του ρυθμού μετάδοσης πριν και μετά την εκτέλεση της στρατηγικής *sleep mode*. Σύμφωνα με τις συνθήκες *sleep mode* που ορίσαμε προηγουμένως κατά τη προσομοίωση προκύπτει ότι υπάρχουν 3 σταθμοί βάσης που ικανοποιούν τις συνθήκες άρα τίθενται σε *sleep mode state*. Όπως παρατηρούμε και η ισχύς και ο ρυθμός των χρηστών συγκλίνουν σε ένα σημείο ισορροπίας.



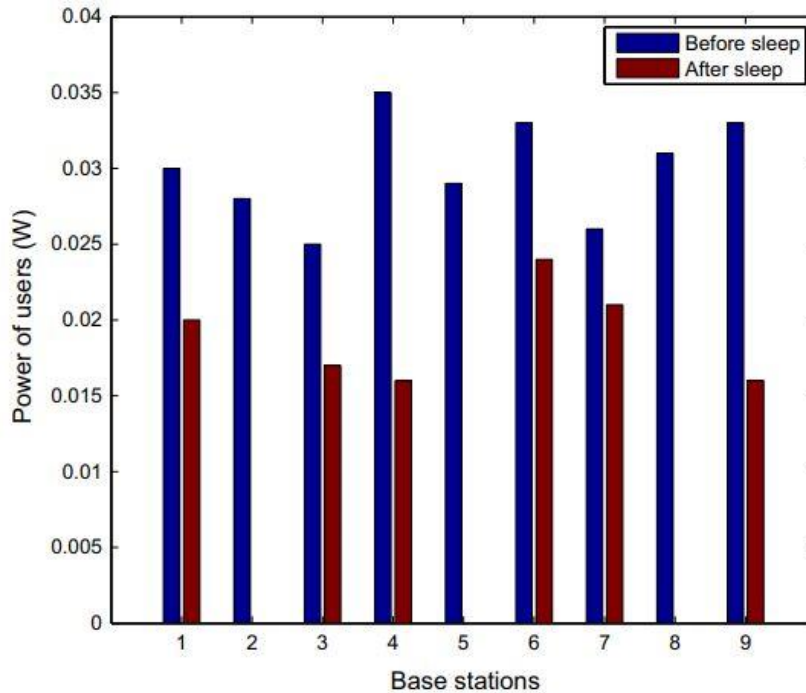
Εικόνα 21. Ισχύς και ρυθμός έπειτα από την εφαρμογή του *sleep mode*. [38]

Πριν από την εκτέλεση της στατηγικής *sleep mode* η ισχύς των χρηστών είναι μεγαλύτερη, ενώ μειώνεται έπειτα από την εκτέλεση του προτεινόμενου αλγορίθμου. Αυτό το φαινόμενο είναι απόρροια της μείωσης των παρεμβολών κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου, κατά συνέπεια η εκπεμπόμενη ισχύς των χρηστών θα ελαττώνεται άρα το δίκτυο γενικά θα έχει λιγότερη καταναλισκόμενη ενέργεια σε σχέση με πριν. Με την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, επιτυγχάνεται και ελαχιστοποίηση της ισχύος. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αποδεικνύει ότι η στρατηγική και ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκαν συνέβαλλαν στην επίτευξη του στόχου. Τι συμβαίνει όμως με την ενεργειακή απόδοση του συστήματος; Η απάντηση δίνεται εάν παρατηρήσουμε σωστά την *εικόνα 23*.



*Εικόνα 22. Ενεργειακή απόδοση έπειτα από την εφαρμογή του *sleep mode*. [38]*

Πριν από την εκτέλεση της στρατηγικής *sleep mode* η ενεργειακή απόδοση του συστήματος όπως παρατηρούμε στο σχεδιάγραμμα ήταν αισθητά μικρότερη σε σχέση με τις τιμές της ενεργειακής απόδοσης μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου, ο λόγος που συμβαίνει αυτό το γεγονός είναι γιατί καταναλώνεται μικρότερη ισχύς από το σύστημα όπως μελετήσαμε παραπάνω. Ένα πολύ ενδεικτικό παράδειγμα για την πρακτικότητα και την αποδοτικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής όσον αφορά την ισχύ και της παρεμβολές στο σύστημα θα περιγράψουμε παρακάτω με την βοήθεια της *εικόνας 24*.



Εικόνα 23. Σύγκριση ισχύος πριν και μετά την εφαρμογή της στρατηγικής. [38]

Σε αυτήν τη περίπτωση έχει επιλεγεί τυχαία ένας χρήστης μια κυψέλης. Όπως ήδη γνωρίζουμε πριν από την εκτέλεση του αλγορίθμου λειτουργούν εννέα σταθμοί βάσης. Μετά την εκτέλεση του προτεινόμενου αλγορίθμου θα παραμείνουν μόνο έξι ενεργοί σταθμοί όπως φαίνεται και στο σχήμα, ενώ ο σταθμός βάσης 2, ο σταθμός βάσης 5 και ο σταθμός βάσης 8 μεταβαίνουν σε *sleep mode*, άρα η ισχύς του μηδενίζεται ακαριαία. Γενικεύοντας λοιπόν η ισχύς του συστήματος θα είναι μεγαλύτερη πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Μετά την παρουσίαση και την ανάλυση των πειραματικών προσεγγίσεων είναι εύκολο κανείς να οδηγηθεί στο συμπέρασμα ότι τα *small cells* έχουν καθοριστικό ρόλο στη αποδοτικότητα των δικτύων 5G, διότι η λειτουργία τους και ο συνδυασμός αυτών με διάφορα μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης της απόδοσης επιτυγχάνουν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του δικτύου, αναστέλλουν σε σημαντικό βαθμό την παρουσία των παρεμβολών και έτσι προσφέρουν μεγαλύτερη ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. Η αποδοτικότητα των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς κινεί το ενδιαφέρον χιλιάδων ερευνητών ανά τον κόσμο, αρκετοί όμως από αυτούς κάνουν μερικά βήματα μπροστά και ασχολούνται με ακόμα μεγαλύτερες γενιές δικτύων, όπως είναι τα κινητά δίκτυα έκκτης γενιάς τα οποία θα προσεγγίσουμε πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας μας.

Κεφάλαιο 5. Κινητά Δίκτυα Έκτης Γενιάς

Είναι αλήθεια ό,τι τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς εισήγαγαν πληθώρα νέων υπηρεσιών και δυνατοτήτων προς τους χρήστες,προς τις επιχειρήσεις,προς τις βιομηχανίες και αυτοματοποίησαν ένα μεγάλο κομμάτι της καθημερινότητας. Σήμερα, έχουμε τη πολυτέλεια να χρησιμοποιούμε διάφορες τεχνολογίες όπως *IoT,smart cities,virtual reality* και άλλα,μέσω των οποίων βελτιστοποιούμε τη ποιότητα ζωής μας.Όμως η επιστημονική κοινότητα δεν παραμένει στάσιμη ως προς την ανάλυση και την πρόοδο των ασύρματων δικτύων αλλά διάγει καθημερινά βήματα προς τα εμπρός,εργαζόμενη στις ήδη υπάρχουσες υποδομές των κινητών δικτύων πέμπτης γενιάς αναπτύσει με γοργούς ρυθμούς την επόμενη γενιά κινητών δικτύων,τα κινητά δίκτυα έκτης γενιάς *6G*.Είναι γεγονός ό,τι τα δίκτυα της επόμενης γενιάς θα έχουν τεράστιες απαιτήσεις κάλυψης και ρυθμών δεδομένων διότι αναμένεται να εισάγουν διάφορες υπηρεσίες που πριν από μερικά χρόνια υπήρχαν μόνο στη σφαίρα της ανθρώπινης φαντασίας.

Η σημασία των κινητών δικτύων έκτης γενιάς έχει παρακινήσει πολλές κυβερνήσεις να επενδύσουν σε αυτόν τον πολλά υποσχόμενο,αναδυόμενο τεχνολογικό τομέα.Ήδη είναι σε εξέλιξη πολλά χρηματοδοτούμενα ερευνητικά προγράμματα ανά τον κόσμο,ένα από αυτά είναι το πρόγραμμα *6Genesis*,που πραγματοποιείται στη Φινλανδία.Παράλληλα τον Νοέμβριο του 2020,η Κίνα εν μέσω ερευνών εκτόξευσε έναν *6G* δορυφόρο στο διάστημα,ενώ τεράστιες τηλεπικοινωνιακές εταιρείες όπως η *Samsung* και η *Nokia* δραστηριοποιούνται πολύ ενεργά στην Νότια Κορέα και στην Ευρώπη αντίστοιχα. Όπως γίνεται αντιληπτό,η ανάπτυξη των *6G* δικτύων βρίσκεται ακόμη σε πολύ πρώιμο στάδιο και θα χρειαστούν μερικά χρόνια ακόμη μέχρι να κατακλύσει με τη σειρά του την καθημερινότητα των χρηστών. Η *Samsung* πιστεύει ό,τι ορισμένες υπηρεσίες των κινητών δικτύων έκτης γενιάς θα είναι διαθέσιμες το 2028,άλλα η εξ'ολοκλήρου διαθεσιμότητα θα επέλθει από το 2030 και έπειτα. [40]



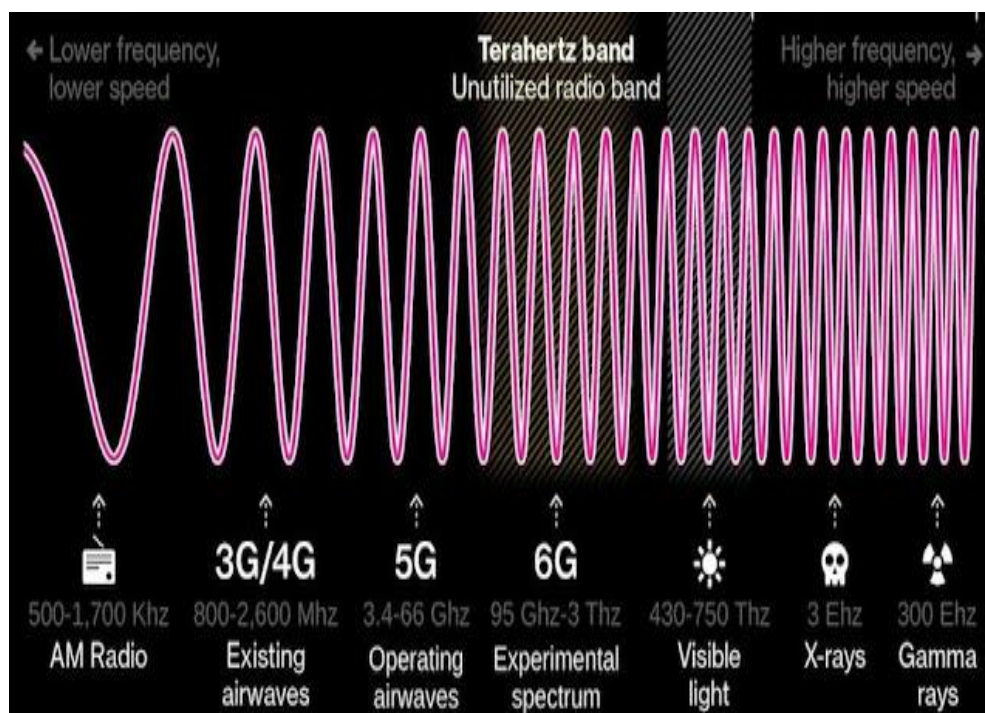
Εικόνα 24. 6G. [41]

5.1. Εφαρμογές, Φάσμα και Απαιτήσεις

Κάθε νέα γενιά κινητών δικτύων διέπεται από καινοτόμες εφαρμογές που προκύπτουν από την βελτίωση των υπαρχόντων ή κάνουν την εμφάνισή τους στο τεχνολογικό προσκήνιο για πρώτη φορά. Τα κινητά δίκτυα έκτης γενιάς δεν θα μπορούσαν να αποτελούν εξαίρεση σε αυτό. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε ορισμένες κύριες εφαρμογές τις οποίες θα μπορούν να υποστηρίξουν τα 6G δίκτυα. Οι ήδη υπάρχουσες εφαρμογές θα συνεχίσουν να υπάρχουν όμως οι καθοριστικοί παράγοντες των συστημάτων της επόμενης γενιάς κινητών δικτύων θα είναι οι τέσσερις νέοι τομείς εφαρμογών που παρουσιάζονται παρακάτω. [42]

- **Multisensory XR Applications:** Οι εφαρμογές πολλαπλών αισθητήρων είναι μία οικογένεια εφαρμογών που θα απασχολήσουν σε μεγάλο βαθμό τους επιστήμονες. Είναι γεγονός ό,τι τα 5G δίκτυα εξακολουθούν να μην είναι σε θέση να παρέχουν ολοκληρωμένη κάλυψη τέτοιων υπηρεσιών λόγω της αδυναμίας τους να παρέχουν χαμηλές καθυστερήσεις (*low latencies*) κατά τη μετάδοση των δεδομένων. Τα ασύρματα δίκτυα έκτης γενιάς αναμένεται να προσφέρουν σχεδόν μηδαμινές καθυστερήσεις, συνεπώς θα είναι σε θέση να βελτιώσουν αισθητά αυτή τη γκάμα εφαρμογών.
- **Connected Robotics and Autonomous Systems (CRAS):** Τα αυτόνομα συστήματα και η συνδεδεμένη ρομποτική αποτελούν ακόμη ένα μεγάλο κεφάλαιο εφαρμογών που θα έχουν ευρεία άνοδο κατά την άφιξη της επόμενης γενιάς. Αυτόνομα αυτοκίνητα, συστήματα παράδοσης μη επανδρωμένων αεροσκαφών και συστήματα αυτόνομης ρομποτικής δεν είναι τόσο μακριά όσο πιστεύουμε σήμερα.
- **Wireless Brain-Computer Interactions (BCI):** Αυτή η κατηγορία εφαρμογών αφορά τις ασύρματες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ανθρώπινου εγκεφάλου και των υπολογιστών. Είναι σίγουρο ό,τι θα έχουν ευρεία εφαρμογή σε περιπτώσεις υγειονομικής περίθαλψης. Αντί για την χρήση των *smartphones* θα μπορούμε να επικοινωνούμε με το περιβάλλον και με άλλους ανθρώπους χρησιμοποιώντας διακριτές συσκευές.
- **Blockchain and Distributed Ledger Technologies (DLT):** Οι εφαρμογές που θα ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία μπορούν να θεωρηθούν ως οι εφαρμογές της επόμενης γενιάς υπηρεσιών καταναλωμένων συστημάτων. Για την αξιόπιστη λειτουργία τους απαιτούνται υψηλά επίπεδα συνδεσιμότητας και επεκτασιμότητας των συσκευών που μέχρι στιγμής είναι δύσκολο να επιτύχουμε.

Κάθε νέα γενιά δικτύων κινητής τηλεφωνίας χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο καινοτόμων τεχνολογιών επικοινωνίας που παρέχουν πρωτοφανή απόδοση και δυνατότητες. Για παράδειγμα στα δίκτυα πέμπτης γενιάς οι τεχνολογίες *massive MIMO* και *mmWave* αποτέλεσαν βασικοί πυλώνες για την αξιοπιστία του δικτύου. Για να ικανοποιηθούν οι τεράστιες απαιτήσεις που θα υπάρξουν στα 6G δίκτυα αναμένεται η επόμενη γενιά να βασίζεται σε τεχνολογίες συμβατικού φάσματος, δηλαδή κάτω από 6 Hz καθώς και στη τεχνολογία *mmWave*, αλλά σε ζώνες συχνοτήτων που δεν συναντούμε μέχρι τώρα στις υπάρχουσες υποδομές των δικτύων, αναφερόμαστε σε ζώνες συχνοτήτων της τάξης των *terahertz*. Το φάσμα το οποίο θα χρησιμοποιείται θα εκτείνεται στο εύρος ζώνης που θα ξεκινάει από τα 100 GHz και θα τελειώνει στα 10 THz με διάφορες εκατέρωθεν αποκλίσεις και όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό θα μπορεί να προσφέρει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των εκατοντάδων *gigabits/sec*. [43]



Εικόνα 25. Terahertz band. [44]

Σε αντίθεση λοιπόν με τις προηγούμενες γενιές, το 6G θα φέρει την επανάσταση στην ασύρματη εξέλιξη, διότι πλέον δεν θα αναφερόμαστε απλά σε συνδεδεμένες συσκευές αλλά σε συνδεδεμένα ευφυή συστήματα. Μελετώντας τις κατηγορίες των εφαρμογών και το φάσμα στο οποίο αναμένεται να λειτουργούν τα κινητά δίκτυα, θα ήταν χρήσιμο να αναφέρουμε και τις απαιτήσεις τις οποίες θα πρέπει να πληρεί ένα 6G δίκτυο, ώστε να προσφέρει ποιότητα υπηρεσιών στους χρήστες. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρουμε επιγραμματικά τις απαιτήσεις των κινητών δικτύων έκτης γενιάς.

Πολύ υψηλούς ρυθμούς δεδομένων,εως 1 Tbps.

Πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση, με δυνατότητα υποστήριξης συσκευών IoT χωρίς μπαταρία.

Αξιόπιστη παγκόσμια συνδεσιμότητα.

Έλεγχος χαμηλής καθυστέρησης (λιγότερο από 1 msec καθυστέρηση από άκρο σε άκρο).

Ευρείες ζώνες συχνοτήτων.

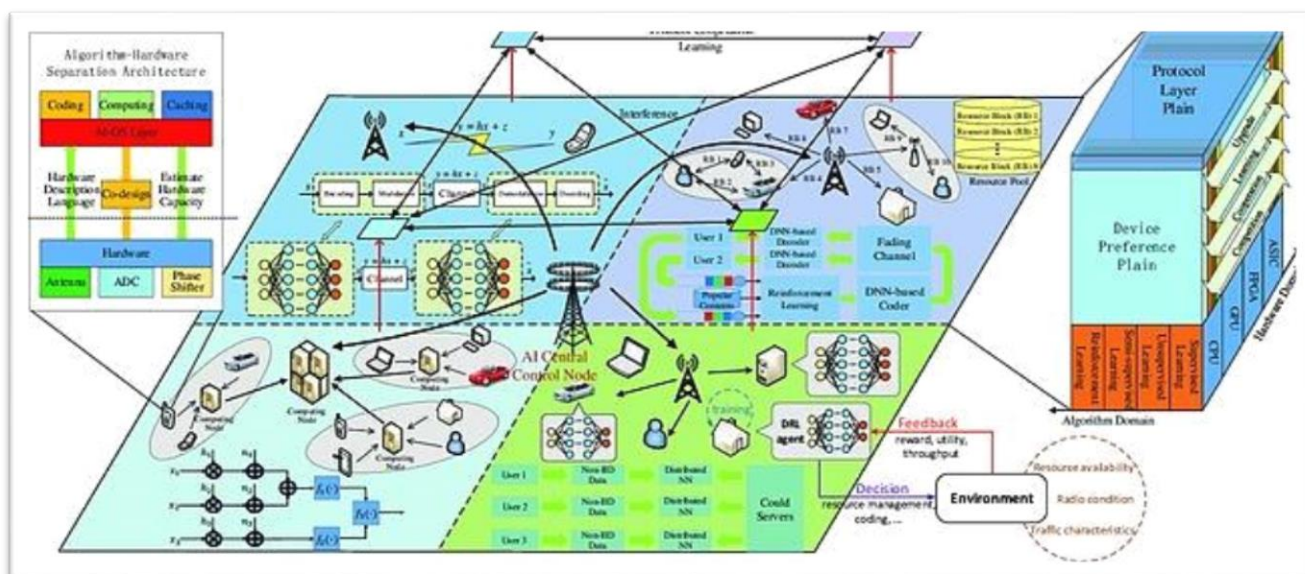
Πανταχού παρόντα παγκόσμιο δίκτυο ευρυζωνικής σύνδεσης με ενσωμάτωση επίγειας ασύρματης επικοινωνίας με δορυφορικά συστήματα.

Συνδεδεμένη νοημοσύνη με ικανότητα μηχανικής μάθησης και ιεραρχία δικτύωσης.

Πίνακας 3. Απαιτήσεις 6G δικτύου. [45]

5.2. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική

Δεν υπάρχει αμφιβολία ό,τι οποιαδήποτε προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρουσιαστεί για τα 6G δίκτυα θα πρέπει να ακολουθεί ερεθίσματα από τη τεχνητή νοημοσύνη,έτσι ώστε το δίκτυο να είναι έξυπνο,ευέλικτο και ικανό στη προσαρμογή των καταστάσεων που θα προκύψουν εξαιτίας της ραγδαίας κίνησης των δεδομένων. Οι επιστήμονες στο [45] προτείνουν μια πιθανή αρχιτεκτονική δικτύου η οποία χαρακτηρίζεται από δύο σταθερές,την ευφυΐα δικτύου και την εξέλιξη του δικτύου σε υποδίκτυα. Στην παρακάτω εικόνα,έχουμε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε μια ενδεχόμενη αρχιτεκτονική δικτύου 6G.



Εικόνα 26. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική 6G. [45]

Δύο τεχνολογίες που καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό τη δομή των 5G δικτύων ήταν χωρίς αμφιβολία οι SDN και NFV, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 2. Μετά από 4 γενιές δικτύων, με τον συνδυασμό τους φτάσαμε σε σημείο να μιλάμε για λογισμικοποιημένα δίκτυα για πρώτη φορά. Το *Network Softwarization* έφερε στο προσκήνιο τα *virtual networks* μια καινοτόμα τεχνολογία που συντέλεσε αποτελεσματικά στην ευκολότερη διαχείριση του ρυθμού των δεδομένων και κατά συνέπεια στην απόδοση του δικτύου. Ωστόσο με τη πάροδο των χρόνων το δίκτυο γίνεται όλο πιο περίπλοκο και περισσότερο ετερογενή, γεγονός που δεν καθιστά το *softwarization* επαρκή τεχνολογία στην οποία μπορούν να στηριχθούν τα δίκτυα από την πέμπτη γενιά και έπειτα. Συγκεκριμένα, για την υποστήριξη εφαρμογών που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη, οι οντότητες του δικτύου πρέπει να υποστηρίζουν διάφορες δυνατότητες όπως της προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων και της ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Σύμφωνα με αυτά, τα δίκτυα 6G θα στηρίζονται σε μία τεχνολογία που βασίζεται σε ευφυή συστήματα (*network intelligentization*). Συνεπώς η αρχιτεκτονική προσέγγιση των 6G δικτύων βασίζεται στη τεχνητή νοημοσύνη και στα ευφυή συστήματα και με αυτό τον τρόπο γίνεται αποτελεσματικό αντιμετωπίζοντας τα προβλήματα ετερογένειας και πλήθους πληροφορίας που σε προηγούμενες γενιές δικτύων θα ήταν αδύνατον.

Δεδομένης της αναμενόμενης εξαιρετικά υψηλής ετερογένειας, ένα βασικό χαρακτηριστικό της έκτης γενιάς δικτύων θα είναι η ικανότητα του να εκμεταλεύεται ένα ευέλικτο υποδίκτυο το οποίο πέρα από την αποτελεσματική προσαρμογή του σε τοπικό περιβάλλον θα έχει και ευρεία κλίμακα. Δημιουργείται λοιπόν ένα δίκτυο υποδικτύων (*network of subnetworks*). Τα τοπικά υποδίκτυα θα έχουν τη δυνατότητα να αναβαθμίζονται και να εξελίσσονται αυτόνομα σε σχέση με τα υπόλοιπα, αφού λοιπόν τα υποδίκτυα είναι αυτόνομα δεν υπάρχει ανάγκη ανακατασκευής νέων συνεπώς το κόστος του δικτύου μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Για να επιτευχθούν όμως οι παραπάνω στόχοι θα πρέπει να αντιμετωπισθούν οι τρεις ακόλουθες προκλήσεις :

1. Κάθε υποδίκτυο θα πρέπει να συλλέγει και να αναλύει τοπικά τα δεδομένα και στη συνέχεια να εκμεταλλεύεται μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης για να αναβαθμιστεί τοπικά και δυναμικά.
2. Όταν αλλάζουν αλλάζουν τα πρωτόκολλα στα τοπικά υποδίκτυα θα πρέπει να πραγματοποιείται ένας συντονισμός με τα υπόλοιπα, ώστε να είναι εφικτή η συνέχεια της αλληλεπίδρασης τους.
3. Η εξέλιξη των υποδικτύων δεν μπορεί να είναι ανξέλεγκτη, χρειάζεται λοιπόν να υπάρχει ένα επίπεδο ελέγχου που θα υποστηρίζει αυτές τις εξελίξεις. Το επίπεδο ελέγχου του 6G θα πρέπει να αξιολογεί κάθε αναβάθμιση των υποδικτύων και στη συνέχεια να εφαρμόζει μια διαδικασία εκμάθησης σε επίπεδο δικτύου για τον εντοπισμό της καλύτερης στρατηγικής για κάθε υποδίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά περιβάλλοντα και τις συμπεριφορές των χρηστών.

Κεφάλαιο 6. Σύνοψη και Μελλοντικές επεκτάσεις

6.1. Σύνοψη

Κλείνοντας αυτήν την εργασία είναι απαραίτητο να συνοψίσουμε όλα τα παραπάνω κεφαλαία και να εξάγουμε μερικά χρήσιμα συμπεράσματα. Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι ένας πολύ σημαντικός αρωγός στην βελτίωση της καθημερινότητάς μας και σίγουρα στο μέλλον η επίδραση τους θα είναι μεγαλύτερη. Οι παλαιότερες γενιές δικτύων ήταν εκείνες που έθεσαν τις βάσεις και καθόρισαν τις παραμέτρους οι οποίες χρειαζόταν βελτίωση για την αποδοτικότερη υλοποίηση των νεότερων δικτύων. Τα κινητά δίκτυα πέμπτης γενιάς ήταν εκείνα που έφεραν την επανάσταση στο τομέα των δικτύων με τις επαναστατικές εφαρμογές που εισήγαγαν, καθώς πλέον είμαστε πάρα πολύ κοντά στην εποχή του *Internet of Things*, στην εποχή των *smart cities*, στην εποχή της βιομηχανικής αυτοματοποίησης. Η αρχιτεκτονική και οι τεχνολογίες επάνω στις οποίες βασίστηκαν και θεμελιώθηκαν τα 5G δίκτυα ήταν απόρροια μιας συνεχής και αδιάκοπης έρευνας όλου του επιστημονικού κόσμου. Ιδιαίτερα η πυκνοποίηση των σύγχρονων δικτύων ήταν ένα μείζον θέμα το οποίο έπρεπε πάση θυσία να αντιμετωπιστεί ώστε να έχουν οι χρήστες υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Σύμφωνα με όσα είδαμε το πρόβλημα της ραγδαίας αύξησης των δεδομένων και των υψηλών ταχυτήτων δεν θα είχε επιλυθεί τόσο γρήγορα εάν δεν υπήρχαν αυτοί οι μικροί αλλά συνάμα πολύτιμοι σταθμοί βάσης, τα *small cells*. Οι εγκαθίδρυση τους στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ήταν επιδραστική τόσο στο οικονομικό σκέλος όπου είναι μακράν λιγότερο κοστοβόρα σε σχέση με τα *macrocells*, όσο και σε περισσότερο εξειδικευμένους τομείς. Ένας τέτοιος τομέας είναι η αποδοτικότητα του δικτύου, καθώς όπως είδαμε με την εγκατάστασή τους το δίκτυο προσφέρει καλύτερη κάλυψη στους χρήστες, ακόμη και σε απομακρυσμένα σημεία του δικτύου. Η αποδοτικότερη κάλυψη προέρχεται όπως είδαμε από την μείωση των παρεμβολών, η οποία προκύπτει με διάφορες τεχνικές τις οποίες αναλύσαμε για γειτονικά *small cells*. Επίσης η παρουσία των μικρών σταθμών βάσης στα κινητά ασύρματα δίκτυα πέμπτης γενιάς ήταν επικουρική στην ενεργειακή κατάσταση του δικτύου. Όπως παρουσιάσαμε μέσω κάποιων σωστά δομημένων αλγορίθμων μπορούμε να επιτύχουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Τέλος πραγματοποιήθηκε μια επιδερμική αναφορά στην επόμενη γενιά δικτύων, τα δίκτυα 6G. Η λειτουργικότητα τους και η γκάμα εφαρμογών οι οποίες αναμένεται να υποστηρίζουν είναι σίγουρο ότι θα φέρουν ριζοσπαστικές αλλαγές στο τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε σήμερα τον κόσμο και ίσως θα είναι η γενιά δικτύων η οποία θα παρακινήσει τους ανθρώπους να αντιληφθούν για πρώτη φορά την δύναμη και την επίδραση της τεχνολογίας σε όλες τις εκφάνσεις της καθημερινότητας και όχι μόνο.

6.2. Μελλοντικές επεκτάσεις

Σύμφωνα με το πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα ό,τι το ερευνητικό μέλλον σίγουρα θα είναι πολύ ενδιαφέρον αλλά και δύσκολο. Τα ασύρματα δίκτυα της πέμπτης γενιάς σίγουρα δεν έχουν φτάσει στην ακμή τους όσον αφορά τις δυνατότητες τους και τα ερευνητικά πεδία. Πιο συγκεκριμένα και σε συνάρτηση με τα γραφόμενα των προηγούμενων κεφαλαίων, η φιλικότερη προς το περιβάλλον λειτουργία των *small cells* στα 5G είναι ένα ερευνητικό πεδίο στο οποίο θα μπορέσει να επικεντρωθεί η επιστημονική κοινότητα. Επιπρόσθετα ένα ακόμη σημείο ενδιαφέροντος που σχετίζεται με τα *small cells* είναι η βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης που μπορούν να επιτύχουν με μη επανδρωμένα οχήματα (UAVs). Ένα UAV απαιτεί πολύ μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων σε σχέση με μια συσκευή κάποιου χρήστη στο δίκτυο, επιπλέον τα μη επανδρωμένα κινούνται διαρκώς και έτσι η επικοινωνία γίνεται ακόμη δυσκολότερη. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μελέτες που ερευνούν την βελτίωση της αποδοτικότητας τους μέσα σε ένα δίκτυο, όμως οι προκλήσεις και οι προεκτάσεις παραμένουν αρκετές. Τέλος είναι ένα μεγάλο ερωτηματικό ο τρόπος που θα χρησιμοποιηθούν τα *small cells* στα κινητά δίκτυα έκτης γενιάς και σε μεταγενέστερα, συνεπώς είναι σίγουρα ένα πεδίο ενδιαφέροντος που κεντρίσει το ενδιαφέρον στο άμεσο μέλλον.

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>ΕΙΚΟΝΑ 1.ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ UMTS.</i>	15
<i>ΕΙΚΟΝΑ 2.ΣΤΑΘΜΟΣ ΒΑΣΗΣ LTE-A ΣΤΟ ΙΡΑΚ.</i>	16
<i>ΕΙΚΟΝΑ 3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΖΩΝΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟ 5G.</i>	20
<i>ΕΙΚΟΝΑ 4. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ SDN.</i>	21
<i>ΕΙΚΟΝΑ 5.ΜΙΜΟ ΒΕΑΜFORMING.</i>	24
<i>ΕΙΚΟΝΑ 6.SMALL CELL ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟ ΣΕ ΣΤΥΛΟ.</i>	29
<i>ΕΙΚΟΝΑ 7.SMALL CELL ΣΕ ΣΤΑΣΗ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ.</i>	31
<i>ΕΙΚΟΝΑ 8.ΈΝΑ FEMTOCELL.</i>	33
<i>ΕΙΚΟΝΑ 9.ΈΝΑ PICOCELL.</i>	35
<i>ΕΙΚΟΝΑ 10.ΈΝΑ MICROCELL.</i>	36
<i>ΕΙΚΟΝΑ 11.ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΧΥΟΣ EARTH.</i>	39
<i>ΕΙΚΟΝΑ 12.ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ C-RAN.</i>	42
<i>ΕΙΚΟΝΑ 13.ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΑΠΟ DOWNLINK.</i>	47
<i>ΕΙΚΟΝΑ 14.ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΑΠΟ UPLINK.</i>	48
<i>ΕΙΚΟΝΑ 15.ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΕΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.</i>	50
<i>ΕΙΚΟΝΑ 16.Η ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ SMALL CELLS ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ UES ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.</i>	52
<i>ΕΙΚΟΝΑ 17.ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ-ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ.</i>	53
<i>ΕΙΚΟΝΑ 19.ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.</i>	53
<i>ΕΙΚΟΝΑ 20.ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.</i>	55
<i>ΕΙΚΟΝΑ 21.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ SLEEP MODE.</i>	56
<i>ΕΙΚΟΝΑ 22.ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΟΣ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ SLEEP MODE.</i>	60
<i>ΕΙΚΟΝΑ 23.ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΠΕΙΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ SLEEP MODE.</i>	61
<i>ΕΙΚΟΝΑ 24.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ.</i>	62
<i>ΕΙΚΟΝΑ 25. 6G.</i>	63
<i>ΕΙΚΟΝΑ 26.TERAHERTZ BAND.</i>	65
<i>ΕΙΚΟΝΑ 27.ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ 6G.</i>	66

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ 6G ΔΙΚΤΥΟΥ.	66

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Pauder, "5G Telecommunication Technology: History, Overview, Requirements and Use Case Scenario in Context of Nepal.," in *IT4D*, Khatmandu, 2018.
- [2] J. S. Belrose, "ON THE BIRTH OF WIRELESS TELEPHONY," Ottawa.
- [3] M. Mohammad and Dr. Sumit, "Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G," *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, vol. 6.
- [4] "<http://broadband.cti.gr/el/evrizonikotita/umts.php>," [Online].
- [5] "<https://en.wikipedia.org/wiki/3G>," [Online].
- [6] "https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced," [Online].
- [7] "<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/what-is-lte-advanced.php>," [Online].
- [8] G. Liu and D. Jiang, "5G: Vision and Requirements for Mobile Communication System towards Year 2020," *Chinese Journal of Engineering*, vol. 2016, no. Enabling Technologies for Fifth-Generation Mobile Communications, 2016.
- [9] S. Marimuthu, "New Era for Enhanced mobile broadband," in *5G NR*, 2018.
- [10] "<https://www.t-mobile.com/business/resources/articles/benefits-of-the-5g-spectrum-for-businesses>," [Online].
- [11] W. Braun and M. Menth, "Software-Defined Networking Using OpenFlow: Protocols, Applications and Architectural Design Choices," *Future Internet*, vol. 6, pp. 303-336, 2014.
- [12] H. Zhang, K. Long and V. Leung, "Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges," 2017.
- [13] R. Chataut and R. Akl, "Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction," *Sensors*, 2020.
- [14] H. PAPAPOULOS, C. WANG, O. BURSALIOGLU, X. HOU and Y. KISHIYAMA, "Massive MIMO Technologies and Challenges towards 5G," 2016.
- [15] "http://www.emfexplained.info/site/misc/emf/downloads/5G&EMF%20Explained_AMTA_23Aug_2019_20.pdf," [Online].
- [16] L. Guevara and F. A. Cheein, "The Role of 5G Technologies: Challenges in Smart Cities and Intelligent Transport Systems," *mdpi*, vol. 12, 2020.
- [17] A. Ahad, M. Tahir, M. A. Sheikh, K. I. Ahmed, A. Mughees and A. Numani, "Technologies Trend towards 5G Network for Smart Health-Care Using IoT: A Review," *Sensors*, vol. 20, 2020.
- [18] Δ. Μαλλάς, "CNN Greece," 29 12 2020. [Online]. Available: <https://www.cnn.gr/tech/story/247444/ola-osa-prepei-na-xerete-gia-to-5g>.
- [19] F. Usmani, "Why small cells will power 5G," *Evaluation Engineering*, 2019.
- [20] S. Khan, "telit," 12 March 2020. [Online]. Available: <https://www.telit.com/blog/5g-networks-guide-to-small-cell-technology/>.
- [21] M. I. Hossain, M. A. Alzarrad, K. Wolfe and S. Miah, "Small-Cell Installation in Transportation Infrastructure- A Literature Review," Urbana Illinois, 2020.
- [22] Z. Ghadialy, "<https://smallcells.3g4g.co.uk/>," 3 March 2017. [Online]. Available:

- <https://smallcells.3g4g.co.uk/2017/03/small-cells-in-bus-stop.html>.
- [23] M. DeGrasse, "rcrwireless," 28 February 2014. [Online]. Available: <https://www.rcrwireless.com/20140228/network-infrastructure/wireless-infrastructure-verizon-taps-samsung-tim-chooses-alcatel-lucent-for-femtocells>.
- [24] [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Femtocell>.
- [25] J. C. Santiago, "Public Safety Communications," 18 July 2011. [Online]. Available: <https://psc.apointl.org/2011/07/18/more-capacity-the-role-of-picocells-in-lte/>.
- [26] "<https://en.wikipedia.org/wiki/Picocell>," [Online].
- [27] "<https://www.landmarkdividend.com/microcells-technology-what-is-it-and-how-does-it-work/>," [Online].
- [28] X. Ge, J. Yang, H. Gharavi and Y. Sun, "Energy Efficiency Challenges of 5G Small Cell Networks," 2017.
- [29] S. Koustubh, "Comparison of energy efficiency between macro and micro cells using energy saving schemes.," Lund, Sweeden.
- [30] G. Auer, O. Blume, V. Giannini, I. Godor, M. A. Imran, Y. Jading, E. Katranaras, M. Olsson, D. Sabella, P. Skillermark and W. Wajda, "Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown," 31 January 2012. [Online]. Available: cordis.europa.eu.
- [31] [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/C-RAN>.
- [32] A. Mahbuba, R. Abdur, A. Iffat, M. Mohammad and A. Atif, "Tradeoff between User Quality-Of-Experience and Service Provider Profit in 5G Cloud Radio Access Network," *Sustainability*, 2017.
- [33] G. Liljiana, R. Valentin and D. Daniel, "From Cloud RAN to Open RAN," Skopje.
- [34] L. Yu and Z. Zufan, "Co-channel interference suppression for multi-cell MIMO heterogeneous network," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016.
- [35] B. Federico, A. Jeffrey, E. Hisham, D. Mischa, P. Stefan, P. Petar and S. Singh, "Why to Decouple the Uplink and Downlink in Cellular," 23 March 2015. [Online].
- [36] S. Bin, L. Zhenzhu, H. Xiaoge and C. Qianbin, "An Interference Contribution Rate Based Small Cells On/Off Switching Algorithm for 5G Dense Heterogeneous Networks," *IEEE Access*, vol. 6, 2018.
- [37] M. Feng, S. Mao and T. Jiang, "Base Station ON-OFF Switching in 5G Wireless Networks: Approaches and Challenges," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 46-54, 2017.
- [38] Z. Liu, J. Wu, Y. Yuan and X. Guan, "Robust Power Control for 5G Small Cell Networks with Sleep," *Wireless Personal Communications*, no. 116, pp. 2205-2222, 2020.
- [39] F. Qamar, N. Hindia, K. Dimiyati, K. Noordin and I. Amiri, "Interference management issues for the future 5G network: a review," *Telecommunication Systems*, no. 71, pp. 627-643, 2019.
- [40] [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/6G_\(network\)](https://en.wikipedia.org/wiki/6G_(network)).
- [41] [Online]. Available: <https://www.techspot.com/news/80382-samsung-opens-research-center-begin-initial-work-6g.html>.
- [42] S. Walid, B. Mehdi and C. Mingzhe, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, 2020.
- [43] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan and M. Zorzi, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, 2020.
- [44] [Online]. Available: <https://www.technopedia.com/2021/04/6g-network-countries.html>.
- [45] B. Letaief, W. Chen, Y. Shi and Y. Zhang, "The Roadmap to 6G – AI Empowered Wireless Networks," 2019.