



Πανεπιστήμιο Αιγαίου

**Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών &
Επικοινωνιακών Συστημάτων**

Διπλωματική Εργασία

**Αρχιτεκτονική και Τεχνολογίες Δικτύων Πέμπτης Γενιάς
(5G)**

Τσαρής Αθανάσιος, Α.Μ: 321/2012063

Επιβλέπων καθηγητής: Σκούτας Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Σκούτας Δημήτριος

Σκιάνης Χαράλαμπος

Κορμέντζας Γεώργιος

**Επίκουρος
Καθηγητής**

Καθηγητής

Καθηγητής

Σάμος, 10 / 11 / 2020



Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος του τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστήμιου Αιγαίου. Κατά κύριο λόγο, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Σκούτα Δημήτριο για την υπομονή και επιμονή του, τις υποδείξεις του και την καθοδήγηση που μου παρείχε στη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές μου, γιατί ο καθένας ξεχωριστά έβαλε το δικό του λιθαράκι στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, η οποία με στήριξε σε κάθε μου στιγμή σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και μου στέκεται σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Τέλος, αφιερώνω αυτήν την εργασία στην οικογένεια μου και στην μνήμη των δύο παππούδων μου, της γιαγιάς μου και του θείου μου Γιώργου (ο οποίος ήταν αυτός που με εισήγαγε στον κόσμο της τεχνολογίας), οι οποίοι έφυγαν πρόσφατα από την ζωή αλλά είμαι σίγουρος ότι βλέπουν τις επιτυχίες μου από εκεί ψηλά και νιώθουν περήφανοι.

Σας ευχαριστώ όλους για όσα μου προσφέρατε με τον δικό σας τρόπο,

Τσοαρης Αθανάσιος

<< Φαίνεται πάντα αδύνατο, μέχρι να γίνει >>

Nelson Mandela...



Υπεύθυνη Δήλωση πρωτοτυπίας διπλωματικής εργασίας

Δηλώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Ίτσαρης Αθανάσιος



Περίληψη

Στη σύγχρονη εποχή που ζούμε, οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για εφαρμογές, διαδικτυακές υπηρεσίες και υλικό, ορίζουν τον δρόμο για δημιουργία νέων δικτύων, τα οποία θα είναι συγχρόνως αποδοτικά και με την βέλτιστη δυνατή οικονομία ως προς την λειτουργία τους. Με αυτόν τον τρόπο γίνονται ικανά να εξυπηρετήσουν περισσότερους χρήστες με λιγότερους πόρους και χαμηλότερο κόστος.

Αν και οι υπηρεσίες φωνής και μηνυμάτων σαφώς και υπάρχουν ακόμη, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια στροφή προς τις υπηρεσίες που έχουν να κάνουν με την μεταφορά δεδομένων. Οι εφαρμογές, όπως η κοινωνική δικτύωση, η τηλεϊατρική, το online gaming, η αναζήτηση θέσης και η διαφήμιση καταστημάτων και εφαρμογών είναι μερικές από αυτές που χρησιμοποιούν οι χρήστες. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι αναγκαία η αύξηση των ρυθμών δεδομένων, η παροχή καλύτερης εμπειρίας χρήσης και το μεγαλύτερο εύρος ζώνης, τα οποία δημιουργούν τις ανάγκες διαμόρφωσης του δικτύου, ώστε να μπορεί ανταπεξέλθει στις μεγάλες ποσότητες κίνησης δεδομένων. Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς με άλλα λόγια, θα πρέπει να υποστηρίζουν το Διαδίκτυο των εφαρμογών και των συσκευών, επιτρέποντας έτσι τη σύνδεση όλων των έξυπνων συσκευών μεταξύ τους. Η εκτίμηση εξάλλου είναι ότι θα προσφέρουν τεράστιες ταχύτητες **Mobile Internet** ανώτερου του **1Gbps** με σταθερή ποιότητα υπηρεσιών ακόμα και σε κίνηση, όπως για παράδειγμα στις εφαρμογές **V2X** (Vehicle-to-everything). Τέλος, θα υποστηρίζουν την ενοποίηση δικτύων και υπηρεσιών με τους εξοπλισμούς που τα συνοδεύουν, ανοίγοντας τον δρόμο του **IoT** (Internet of things).

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιάσει όλες τις τεχνολογικές εξελίξεις και τα χαρακτηριστικά του δικτύου 5G, εστιάζοντας σε σημαντικές τεχνολογίες και ιδιαιτερότητες του δικτύου που το κάνουν ξεχωριστό σαν δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση της αρχιτεκτονικής του δικτύου 5G και μια σύγκριση με το προγενέστερο και τωρινό δίκτυο 4G. Εν συνεχεία, θα αναλυθούν οι πιο σημαντικές τεχνολογίες του δικτύου 5G ανάλογα με το που ανήκουν, δηλαδή δίκτυο κορμού ή δίκτυο πρόσβασης. Τέλος, στο τελευταίο **κεφάλαιο3**, γίνεται μια εκτενής ανάλυση και παρουσίαση των μελλοντικών εξελίξεων και των τεχνολογιών που θα δούμε μετά το 2020 (**Release 17 3GPP**) και ορισμένες προσθήκες που θα γίνουν σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες (Release 15-16) και θα εφαρμοστούν με το **Release 17** της 3GPP.



ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κινητά δίκτυα 5^{ης} γενιάς, Αρχιτεκτονικές Δικτύων, Τεχνολογίες Δικτύων 5^{ης} Γενιάς και Εφαρμογές, ITU, ITU-R, 3GPP, mmWave, Massive MIMO, NETWORK MIMO, εικονοποίηση δικτύου, NFV, SDN, NOMA, UDN. EPC, 5G CORE, 5G RAN, C-RAN, IoT, Release 17 3GPP.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	4
Πίνακας Εικόνων.....	9
1 Ιστορική Αναδρομή- Εισαγωγή.....	11
1.1 1 ^{ης} Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (1G)	12
1.2 2 ^{ης} Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (2G)	13
1.3 3 ^{ης} Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (3G)	13
1.4 4 ^{ης} Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (4G)	14
1.4.1 Δίκτυο κορμού – Evolved Packet Core (EPC).....	15
1.4.2 Δίκτυο πρόσβασης LTE – Radio Access Network (E-UTRAN).....	17
1.5 Εισαγωγή στα 5G δίκτυα.....	19
1.5.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) και 3rd Generation Project (3GPP).....	22
2 Αρχιτεκτονική 5G δικτύων	24
2.1 Δίκτυο Κορμού (5G Core).....	29
2.1.1 Αρχιτεκτονικές εικονικοποίησης δικτύου.....	32
2.2 Δίκτυο Πρόσβασης 5G RAN.....	40



2.2.1	C-RAN	43
2.2.2	Παρουσίαση των σημαντικότερων τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών στο δίκτυο Πρόσβασης 5 ^{ης} γενιάς.....	44
2.2.2.1	Massive MIMO	44
2.2.2.2	Μικροκυματική ζώνη (mmWave)	49
2.2.2.3	NETWORK MIMO - COOPERATIVE MIMO	54
2.2.2.3.1	Εφαρμογή Network MIMO σε ασύρματο δίκτυο.....	55
2.2.2.4	Αρχιτεκτονική πυκνοποίησης δικτύου	57
2.2.2.4.1	Επαναχρησιμοποίηση της καθολικής συχνότητας.....	59
2.2.2.4.2	Διαχείριση της κίνησης του δικτύου, της κατανομής των πόρων και των παρεμβολών 59	
2.2.2.4.3	Η προτυποποίηση των UDN σε 5G δίκτυο	60
2.2.2.5	Direct Short-Range Communication (DSRC)	61
2.2.2.5.1	Σηματοδосία και πολλαπλή πρόσβαση (Signaling and multiple access).....	62
3	Εξελίξεις στα 5G Δίκτυα (προ υπάρχουσες και νέες τεχνολογίες - Release 17 3GPP).....	64
3.1	M2M(Machine to Machine)	66
3.2	D2D (Device to Device)	69
3.3	V2X (Vehicle to Everything)	70
3.3.1	V2V (Vehicle-to-Vehicle).....	71
3.3.2	V2D (Vehicle-to-Device).....	72



3.3.3	V2P (Vehicle-to-Pedestrian)	73
3.3.4	Vehicle-to-Infrastructure (V2I)	74
3.4	Βελτιώσεις στην μετάδοση μικρών δεδομένων (Smalldata enchantments)	75
3.5	NR Light	75
3.6	NR σε συχνότητες άνω του 52,6 GHz	76
3.7	Βελτιώσεις ως προς την ενεργειακή κατανάλωση	76
3.8	Extended Reality – 5G	77
3.9	Νέες τεχνολογίες και προσθήκες καινούργιων χαρακτηριστικών σε ήδη υπάρχουσες (Release 17)	78
3.9.1	Περίπτωση eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	79
3.9.1.1	Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και περιπτώσεις χρήσης	79
3.9.1.2	Προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και περιπτώσεων χρήσης	80
3.9.2	Περίπτωση URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication)	81
3.9.2.1	Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και περιπτώσεις χρήσης	81
3.9.2.2	Προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και περιπτώσεων χρήσης	82
3.9.3	Περίπτωση mMTC (Massive Machine-Type Communications)	82
3.9.3.1	Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και περιπτώσεις χρήσης	82
3.9.3.2	Προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και περιπτώσεων χρήσης	82
3.9.4	Συμπεράσματα	82



Επίλογος - Συμπεράσματα.....	87
Αναφορές.....	88
Ακρωνύμια.....	93



Πίνακας Εικόνων

<i>Εικόνα 1- 4G Αρχιτεκτονική.....</i>	<i>16</i>
<i>Εικόνα 2 – 4G RAN (E-UTRAN).....</i>	<i>18</i>
<i>Εικόνα 3-Σενάρια χρήσης 5G δικτύου.....</i>	<i>20</i>
<i>Εικόνα 4-Εκδόσεις 3GPP.....</i>	<i>23</i>
<i>Εικόνα 5-Πορεία 5G δικτύου</i>	<i>26</i>
<i>Εικόνα 6 - Αρχιτεκτονική 5G δικτύου.....</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 7 -5G Core.....</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 8 - Διεπαφές 5G Core</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 9 - Virtualization.....</i>	<i>33</i>
<i>Εικόνα 10 - SDN architecture.....</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 11 - NFV_Cloud.....</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 12 - Τεχνολογίες NFV</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 13 - NFV MANO</i>	<i>40</i>
<i>Εικόνα 14 - Αρχιτεκτονική 5G RAN.....</i>	<i>41</i>
<i>Εικόνα 15 - Centralized and non-Centralized Deployment.....</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 16 - Standalone & Non_Standalone</i>	<i>43</i>
<i>Εικόνα 17 - Το μαζικό MIMO εκμεταλλεύεται μεγάλες σειρές κεραίας για να πολλαπλασιάσει πολλά τερματικά.....</i>	<i>48</i>



<i>Εικόνα 18 -Ελεύθερες συχνότητες και ανάθεση αυτών ανά περιοχή</i>	<i>50</i>
<i>Εικόνα 19 - Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mm-Wave</i>	<i>51</i>
<i>Εικόνα 20 - UDN δίκτυο</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 21 - User-Centric Ultra-Dense Networks.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 22 - NOMA-OFDMA</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 23 – Μελλοντικές Τεχνολογίες 5G.....</i>	<i>66</i>
<i>Εικόνα 24 – Χρήσεις Τεχνολογίας M2M στα δίκτυα 5G.....</i>	<i>67</i>
<i>Εικόνα 25-M2M Αρχιτεκτονική.....</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 26 - Vehicle-to-Everything.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 27 - V2V σύνδεση.....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 28 - Vehicle to Pedestrian αρχιτεκτονική</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 29 - Vehicle to Infrastructure αρχιτεκτονική</i>	<i>75</i>
<i>Εικόνα 30- VR and AR.....</i>	<i>77</i>
<i>Εικόνα 31 - XR τεχνολογία.....</i>	<i>78</i>



1 Ιστορική Αναδρομή- Εισαγωγή

Ένα από τα χαρακτηριστικά της εποχής μας είναι η συνεχής και γρήγορη εξάπλωση των κινητών επικοινωνιών. Τα κυψελωτά δίκτυα, των οποίων οι βασικές αρχές διατυπώθηκαν περίπου αρχές της δεκαετίας του '40, αριθμούσαν μόνο λίγα εκατομμύρια συνδέσεις μέχρι και το **1990**. Σήμερα όμως, παρέχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων προς το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της γης και επιτρέπουν την πρόσβαση στο δίκτυο από οπουδήποτε στον κόσμο και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ([1]).

Το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για την κυψελωτή επικοινωνία σχεδιάστηκε έτσι, ώστε να συνδυάζει τα εξής:

- Συνδυασμό μικρών γεωγραφικών περιοχών, οι οποίες αποκαλούνται «κυψέλες» και οι οποίες ενσωματώνουν έναν σταθμό για εκπομπή και λήψη του σήματος και αποτελούν όλες μαζί ενιαία δίκτυα.
- Επανεκπομπή συχνотήτων από σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν κυψέλες, οι οποίες δεν είναι γειτονικές μεταξύ τους.
- Διαδικασία μετάβασης ενός κινητού χρήστη από μια κυψέλη σε μια άλλη γειτονική, χωρίς να διακοπεί η σύνδεση επικοινωνίας του (λεγόμενο **handover**).
- Έλεγχο της κίνησης τηλεπικοινωνίας από έναν κεντρικό τηλεπικοινωνιακό κόμβο.

Παρόλο που οι αρχές των δικτύων κινητής τηλεφωνίας διατυπώθηκαν περίπου στα μέσα του 20ού αιώνα, κατά την αρχή διατύπωσης τους εξελίχθηκαν με πολύ αργούς ρυθμούς και μόνο κατά τα τελευταία 20 έτη επιταχύνθηκε η πορεία της εξέλιξής τους, με σημαντικά γρήγορους ρυθμούς. Στη βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο έχει επικρατήσει να ονομάζουμε την πορεία ανάπτυξης των δικτύων σε «γενιές».([3])

Σήμερα οι γενιές των δικτύων κινητής τηλεφωνίας είναι τέσσερις με την 5^η να είναι ακόμη σε πιλοτικές δοκιμές ανά τα κράτη του κόσμου. Στις τελευταίες γενιές, η βασική ιδέα είναι ο σχεδιασμός με βάση τη λογική του πρωτοκόλλου **IP**, δηλαδή σε οποιοδήποτε μέρος και οποιαδήποτε χρονική στιγμή, ένας χρήστης εν κινήσει μπορεί να έχει οποιαδήποτε στιγμή κάλυψη από διάφορα δίκτυα,



ανεξάρτητα από την υποδομή τους, είτε μιλάμε για κυψελωτό ή για δορυφορικό ή για **WLAN** δίκτυο κ.λπ.([2])

Τα 5^{ης} Γενιάς Δίκτυα, αποτελούν επίσης τεχνολογία κυψελοειδών και ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων, όπως τα 4G, 3G και 2G. Κύριος στόχος όμως της 5^{ης} Γενιάς που θα ξεπεράσει κατά πολύ και αυτόν του 4G δικτύου, είναι ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης που θα έχει, η τεράστια γεωμετρική κάλυψη, η πολύ υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, η μικρή καθυστέρηση και η μεγάλη αξιοπιστία του.

Επίσης, με την εισαγωγή των νέας γενιάς δικτύων, ανοίγουμε τον δρόμο στον κόσμο του Internet of things (**IOT**), όπου κάθε συσκευή που έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί στο Internet και θεωρείται έξυπνη συσκευή, θα μπορεί να συνδεθεί με οποιαδήποτε άλλη και να δώσει ή να αντλήσει πληροφορίες (δεδομένα).

Τέλος, καταλαβαίνουμε ότι, έχουμε βελτίωση στην κάλυψη σήματος σε οποιοδήποτε σημείο, στο οποίο μπορεί να βρίσκεται ένας κινητός-χρήστης, στην ταχύτητα, στις διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας των υπηρεσιών (**QoS**) και ειδικότερα στις μεγάλες πόλεις, με την πυκνότητα της ασύρματης κίνησης να είναι αρκετά μεγάλη και απαιτητική ως προς την κατανάλωση ενέργειας, όπου και εδώ το νέο Γενιάς Δίκτυο θα πρέπει να παρέχει ό,τι και οι προκάτοχοί του εις διπλούν όμως, με την χαμηλότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας.

1.1 1^{ης} Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (1G)

Αν και αναφορικά όταν εννοούμε δίκτυα πρώτης γενιάς, θεωρούμε τα δίκτυα που αποτελούν την αρχή των κινητών επικοινωνιών, υπάρχουν και δίκτυα κινητών επικοινωνιών, τα οποία δεν ήταν κυψελωτά και προπορευόντουσαν των δικτύων 1^{ης} Γενιάς. Ήταν αναλογικά με υποστήριξη φωνητικής επικοινωνίας, δίχως όμως υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών, η οποία ήταν υποτυπώδης έως μηδαμινή με πολλά προβλήματα. Μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά δεδομένων με μόντεμ. Η τεχνική πολυπλεξίας που χρησιμοποίησε η πρώτη γενιά ήταν πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας FDMA (**F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess). Το 1990 τα συστήματα πρώτης γενιάς αριθμούσαν **20 εκατομμύρια** συνδρομητές. Λόγω της αναλογικής εφαρμογής σημάτων όμως, δεν παρείχε ασφαλή μετάδοση δεδομένων. Τέλος, από τα πρώτα κυψελωτά δίκτυα που έκαναν την εμφάνιση τους, ήταν αυτό της Nippon Telephone & Telegraph (**NTT**) στο Τόκιο και εν συνεχεία



ακολούθησαν στην Ευρώπη οι Nordic Mobile Telephony (NMT) με την Total Access Communication System (TACS).

1.2 2^η Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (2G)

Η είσοδος της δεύτερης γενιάς δικτύων, έγινε 10 χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα περίπου στις αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν χρησιμοποιούσαν ψηφιακή τεχνολογία όπως, TDMA (**Time Division Multiple Access**) και CDMA (**Code Division Multiple Access**), εν αντιθέσει με την 1^η γενιά. Το πρότυπο στο οποίο στηρίχθηκαν ήταν τα **Παγκόσμια Συστήματα Κινητής Επικοινωνίας** (Global Systems for Mobile Communication - **GSM**), το οποίο προσφέρει μετάδοση φωνής και δεδομένων με ρυθμό μέχρι 64kbps. Οπότε μιλάμε για περισσότερες δυνατότητες με πολύ καλύτερη ποιότητα. Οι συσκευές των δικτύων **2G** λειτουργούσαν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα καθώς τα ράδιο-σήματα είχαν χαμηλότερη ισχύ. Επίσης τα δίκτυα 2G παρείχαν υπηρεσίες αποστολής μικρών γραπτών μηνυμάτων (Short Message Service - **SMS**) και email. Άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ότι πλέον ανοίγει ο δρόμος και προς την περιαγωγή. Τέλος, κάποιες τεχνολογίες 2G περιλάμβαναν την ευρωπαϊκή τεχνολογία **GSM**, τις αμερικανικές τεχνολογίες **IS-95 - CDMA** και **IS-136 - TDMA** και στην χώρα του ανατέλλοντος Ηλίου, την Ιαπωνία, είχαμε την τεχνολογία **PDC**, η οποία είχε παρόμοια λειτουργία με αυτήν της **IS-136 – TDMA**.

Στη συνέχεια, τα **2.5G** δίκτυα αποτελούνται από 2G δίκτυα τα οποία όμως ενσωματώνουν **υπηρεσίες πακέτων** (General Packet Radio Services) αλλά χρησιμοποιούν και την μεταγωγή κυκλώματος για τα δεδομένα φωνής και τη μεταγωγή πακέτων για τα δεδομένα με ρυθμό μετάδοσης μέχρι **144kbps**. Οι κύριες 2.5G τεχνολογίες είναι οι GPRS (**General Packet Radio Services**), EDGE (**Enhanced Data Rate for GSM Evolution**) και CDMA. ([3])

1.3 3^η Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (3G)

Η ταχύτατη ανάπτυξη των κινητών τηλεπικοινωνιών έφερε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 τα **3G** δίκτυα, προσφέροντας ταχύτητες μέχρι **2 Mbps**. Τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων **3G** είναι



η μεγάλη αποδοτικότητα, η παγκόσμια χρήση, η υποστήριξη μεταγωγής πακέτου και μεταγωγής κυκλώματος για τη μετάδοση δεδομένων. Γίνεται επιτρεπτή η πρόσβαση με υψηλή κινητικότητα μέσω υπηρεσιών που βασίζονται σε **IP**. Το πρόγραμμα συνεργασίας τρίτης γενιάς (**3GPP**) όπως ονομάστηκε, ήταν αυτό που διευκόλυνε την ασφάλεια της παγκόσμιας εμβέλειας των συστημάτων 3G. Τα δίκτυα 3G, με την είσοδο τους φέρνουν την κωδικοποίηση πολλαπλής πρόσβασης ευρείας ζώνης (**WCDMA**) και αξιοποιούν το φάσμα των **5 MHz**. Περιλάμβαναν υπηρεσίες φωνής και εικόνας με μεταγωγή κυκλώματος, όπως και υπηρεσίες δεδομένων με μεταγωγή πακέτων και κυκλώματος. Τέλος, το μεγάλο μειονέκτημα των δικτύων **3G**, ήταν η υψηλότερη κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με τα **2G** δίκτυα λόγω της μεγαλύτερης κάλυψης, του μεγαλύτερου φάσματος και της μεγαλύτερης απόδοσης, που συνεπάγεται σε μεγαλύτερη κατανάλωση των αναμεταδοτών και κόμβων του δικτύου.

Η προσπάθεια επίτευξης υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, έγινε με την είσοδο των **3.5G** δικτύων **HSUPA/HSDPA (High Speed Uplink/Downlink Packet Access)** και **Enhanced Uplink** στις εκδόσεις 5 (**Release 5**) και 6 (**Release 6**) της **3GPP**, σύμφωνα με τις οποίες προέκυψε η τεχνολογία **HSPA**. Τέλος, η έκδοση των δικτύων **3.5G** προσέφεραν ρυθμούς μετάδοσης μεταξύ **5-30 Mbps** ([4], [5]).

1.4 4^η Γενιάς Δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (4G)

Η επόμενη γενιά είναι τα **4G** δίκτυα ή αλλιώς και **Long Term Evolution (LTE)**, η οποία κυριαρχεί σε όλες τις έξυπνες συσκευές μέχρι και σήμερα με τις τελευταίες ενημερωμένες εκδόσεις της. Ήταν μέρος της 8^{ης} έκδοσης της **3GPP** και η πρώτη εμπορική εμφάνιση πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 2010 με μεγάλη ανάπτυξη από εκεί και έπειτα. Ένα χαρακτηριστικό του **LTE** που το καθιστά σημαντικό, είναι ότι αποτελεί τεχνολογία η οποία είναι λειτουργική παγκοσμίως και η εξέλιξη του έχει επίσης διευρύνει σημαντικά τη διάθεση υπηρεσιών εκτός των ορίων της κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης, θέτοντας σημαντικά θεμέλια για τα **5G** δίκτυα τα οποία θα αναλύσουμε παρακάτω αναλυτικά. Τα πλεονεκτήματα των **4G** δικτύων είναι κυρίως ότι τα δεδομένα φωνής, πολυμέσων κ.λπ., παρέχονται στους χρήστες παντού και πάντα σε πολύ υψηλότερο ρυθμό και οι εφαρμογές που διατίθενται μέσω των **4G** δικτύων αφορούν υψηλής ευκρίνειας τηλεόραση, τηλεσυνεδρίαση ακόμα και με υψηλή κινητικότητα και μετάδοση δεδομένων με υψηλό ρυθμό μετάδοσης (**1Gbps**). Οπότε



μιλάμε για ένα μεγαλύτερο εύρος φάσματος που σημαίνει μεγαλύτερη χωρητικότητα χρηστών και υψηλή ποιότητα υπηρεσιών με κύριο στόχο την ανάπτυξη συστημάτων που είναι πλήρως βασισμένα σε τεχνολογία **IP**. ([6] , [7])

Η επίτευξη για κάτι τέτοιο, έγινε με τη σύγκλιση των ενσύρματων και ασύρματων τεχνολογιών, ώστε να παραχθούν ταχύτητες μετάδοσης έως και 1 **Gbit/s**. Οι τεχνολογίες που κυριαρχούν στα δίκτυα 4^{ης} Γενιάς είναι η τεχνολογία **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και η **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), οι οποίες προσδίδουν πιο απλουστευμένη και καλύτερη κατανομή των χρηστών στο υπάρχον φάσμα. Εν αντιθέσει με την γενιά **3G** που υποστήριζε και μετάδοση μεταγωγής κυκλωμάτων, η **4G** γενιά βασίζεται εξολοκλήρου σε μεταγωγή πακέτων.

Επιπλέον, το 4G εκτός από την εξέλιξη στο δίκτυο πρόσβασης **RAN** (Radio Access Network), εξελίχθηκε σε ένα πλήρες σύστημα, γνωστό ως **SAE** (System Architecture Evolution), το οποίο περιλαμβάνει και το λεγόμενο δίκτυο κορμού του συστήματος, ως **EPC** (Evolved Packet Core) και τα οποία θα αναλύσουμε πιο λεπτομερή παρακάτω για να κατανοήσουμε την σύγκριση με το δίκτυο **5G**.

Τέλος, αναζητώντας για συνδεσιμότητα μεγάλου εύρους ζώνης, μαζικό αριθμό ταυτόχρονα συνδεδεμένων χρηστών, πολύ υψηλές ταχύτητες και ανταπόκριση σε κρίσιμες εφαρμογές με μεγάλη αξιοπιστία και χωρίς καθυστέρηση, καταλήγουμε στην 5^η γενιά των δικτύων. Στη συγκεκριμένη γενιά που θα αναλυθεί με λεπτομέρεια στα παρακάτω κεφάλαια, έχουμε να κάνουμε με ένα δίκτυο, που χαρακτηρίζεται από πολυμορφία συνδέσεων και ομοιομορφία στην κάλυψη, υψηλές ταχύτητες, σύνδεση μεταξύ εφαρμογών, μηχανών και έξυπνων συσκευών, χαμηλή κατανάλωση, συνδεσιμότητα μεγάλου εύρους ζώνης και ταυτόχρονη σύνδεση μαζικού αριθμού συνδεδεμένων συσκευών. ([8] , [9])

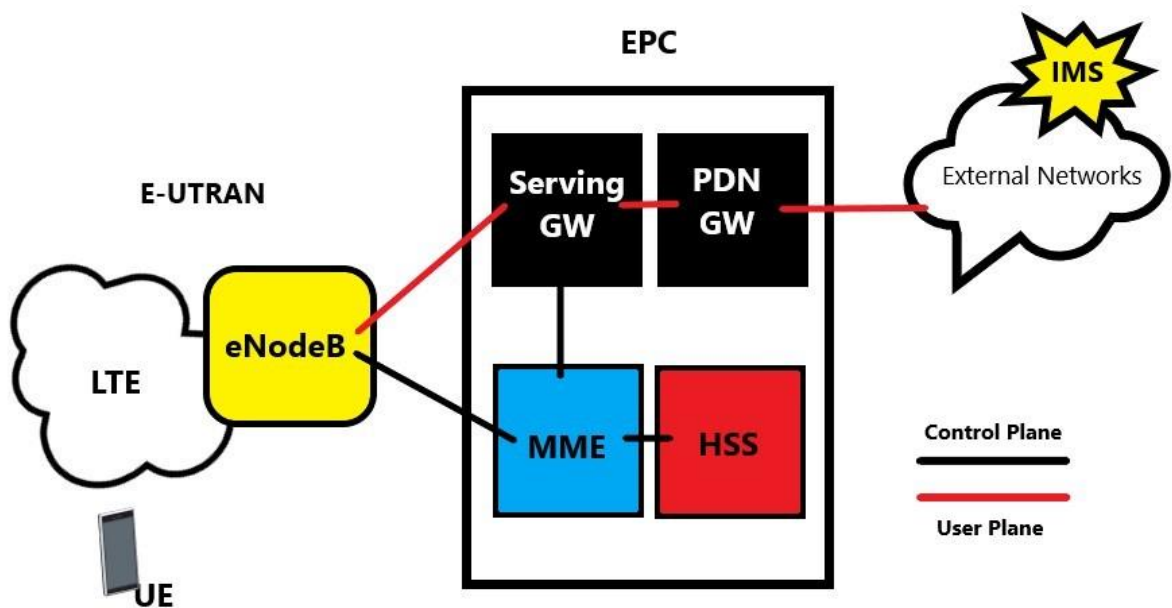
1.4.1 Δίκτυο κορμού – Evolved Packet Core (EPC)

Για την επίτευξη των στόχων του 4G δικτύου η **3GPP** επανεξέτασε την αρχιτεκτονική του συστήματος σε επίπεδο **RAN** (Radio Access Network) όσο και σε επίπεδο κορμού, θέλοντας να διαχωρίσει την λειτουργικότητα των δυο επιπέδων μεταξύ τους. Ο διαχωρισμός αυτός ονομάστηκε



SAE στην έκδοση 8 της 3GPP (Release 8) όπως είπαμε και παραπάνω και εξελίχθηκε το δίκτυο κορμού με ονομασία **EPC**. Σύμφωνα με το Release 8, το EPC και το **E-UTRAN** (Evolved UTRAN-LTE-RAN) αναφέρονται ως **EPS** (Evolved Packet System). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μεγάλη διαφορά αποτελεί ότι το EPC υποστηρίζει αποκλειστικά μεταγωγή πακέτων και όχι μεταγωγή κυκλώματος όπως οι προηγούμενες εκδόσεις δικτύων.

Στην παρακάτω **Εικόνα 1**, φαίνεται η βασική αρχιτεκτονική του **EPS** στην περίπτωση που ο εξοπλισμός του χρήστη (UE) είναι συνδεδεμένος στο EPC μέσω του E-UTRAN (δίκτυο πρόσβασης LTE). Το **eNodeB** (Evolved NodeB) είναι ο σταθμός βάσης για το LTE. Σε αυτό το σχήμα, το EPC αποτελείται από τέσσερις λογικούς κόμβους: το **Serving GW** (Serving Gateway), το **PDN GW** (PDN Gateway), το **MME** (Mobility Management Entity) και το **HSS** (Home Subscriber Server). Το EPC συνδέεται μαζί με τα εξωτερικά δίκτυα, τα οποία μπορούν να περιλαμβάνουν το υποσύστημα **IP Multimedia Core Network (IMS)**.



Εικόνα 1- 4G Αρχιτεκτονική

Serving Gateway (Serving Gateway): Οι λογικές πύλες (Serving GW και PDN GW) ασχολούνται με το επίπεδο του χρήστη. Μεταφέρουν την κίνηση των πακέτων δεδομένων μεταξύ του Εξοπλισμού Χρήστη (UE) και των εξωτερικών δικτύων. Λειτουργεί δηλαδή, ως σημείο διασύνδεσης μεταξύ των σταθμών βάσης (**eNodeBs**) του χρήστη και του LTE δικτύου ή και δικτύου διαφορετικής τεχνολογίας.



Όπως υποδηλώνει και το όνομά της, η Serving GW εξυπηρετεί τον Εξοπλισμό Χρήστη δρομολογώντας τα εισερχόμενα και εξερχόμενα πακέτα IP. Τέλος, όπως βλέπουμε και στο παραπάνω σχήμα συνδέεται λογικά με την άλλη πύλη, το PDN GW.

Packet Data Network Gateway (PDN Gateway): Το PDN GW αποτελεί εξίσου το συνδετικό σημείο μεταξύ του EPC και των εξωτερικών δικτύων IP. Αυτά τα δίκτυα ονομάζονται PDN (Packet Data Network). Η οντότητα PDN GW δρομολογεί τα πακέτα από τα PDN δίκτυα, αλλά και προς αυτά. Αποτελεί επίσης, την οντότητα που κατανέμει το πρόθεμα της IP διεύθυνσης και περιλαμβάνει λειτουργίες **PCEF** (Policy Control Enforcement Function) που σχετίζονται με την συλλογή πληροφοριών της πολιτικής και της χρέωσης του χρήστη.

MME (Mobility Management Entity): Το MME (οντότητα διαχείρισης πρόσβασης), αποτελεί την οντότητα που είναι υπεύθυνη για το επίπεδο ελέγχου. Διαχειρίζεται τη σηματοδοσία, η οποία σχετίζεται με την κινητικότητα του κάθε χρήστη αλλά και την ασφάλεια για πρόσβαση στο E-UTRAN. Περιλαμβάνει τις λειτουργίες για δημιουργία σύνδεσης και ασφάλειας μεταξύ του στρώματος που διαχειρίζεται την σύνδεση στο επίπεδο. Αποτελεί δηλαδή το σημείο τερματισμού του στρώματος χωρίς πρόσβαση (NAS).

HSS (Home Subscriber Server): Το HSS αποτελεί την βάση δεδομένων, η οποία περιέχει τις πληροφορίες και τις εγγραφές όλων των χρηστών-συνδρομητών. Παρέχει επίσης, λειτουργίες υποστήριξης στην οντότητα διαχείρισης πρόσβασης σχετικά με: **1)** τη ρύθμιση κλήσεων, **2)** τον έλεγχο ταυτότητας των χρηστών και **3)** την εξουσιοδότηση πρόσβασης. Τέλος, βασίζεται στο 3GPP Release 4 - Home Location Register (**HLR**) και στο Authentication Center (**AuC**) και αυτός είναι ο λόγος που κάθε HSS συνδέεται με ένα MME σε κάθε δίκτυο.

1.4.2 Δίκτυο πρόσβασης LTE – Radio Access Network (E-UTRAN)

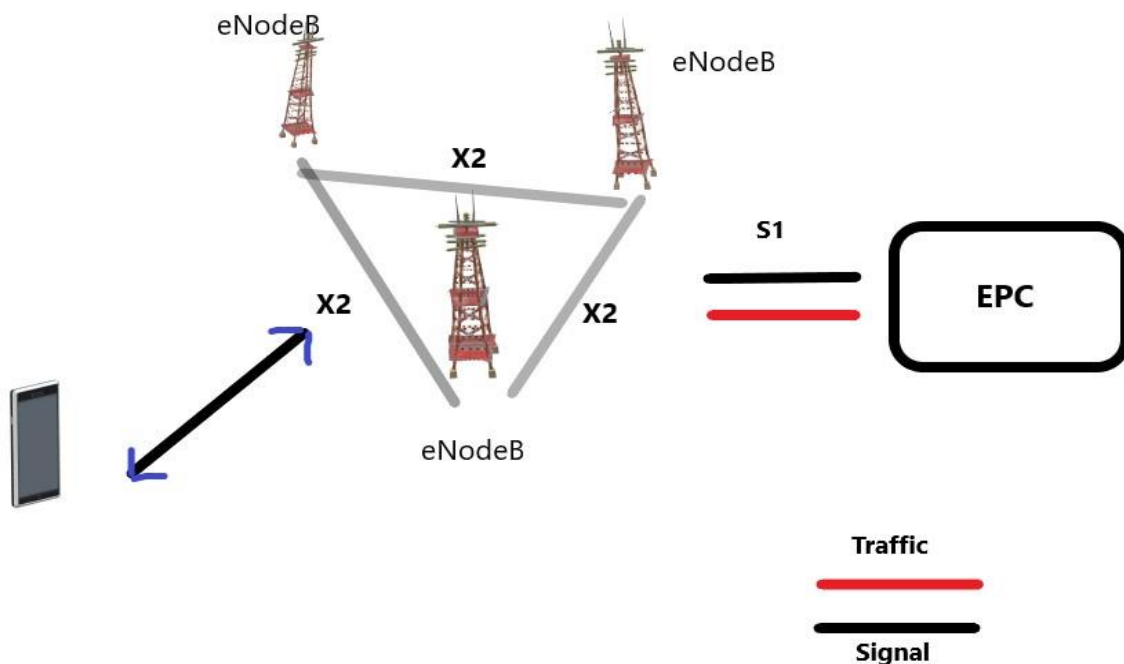
Το δίκτυο πρόσβασης της 4^{ης} Γενιάς, αποτελεί την οντότητα, η οποία παρέχει όλες εκείνες τις συνδέσεις πρόσβασης μεταξύ του χρήστη και του δικτύου κορμού (EPC). Οι σύνδεσμοι του δικτύου χωρίζονται σε επίπεδο χρήστη και σε επίπεδο ελέγχου, τα οποία αναφέραμε και παραπάνω. Ένα LTE RAN αποτελείται από ένα δίκτυο σταθμών **eNodeBs** (Evolved Node B), γι' αυτό λέμε ότι το δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιεί μια επίπεδη αρχιτεκτονική. Σε μια επικοινωνία μεταξύ χρηστών, δεν υπάρχει



κεντρική λειτουργία ελέγχου των συνδέσεων, αλλά ενσωματώνεται ξεχωριστά σε κάθε **eNodeB**, το οποίο έχει όλα τα απαραίτητα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης. Η σύνδεση μέσω των eNodeBs, γίνεται μέσω διεπαφών **X2** όπως θα δούμε και σε μεταγενέστερα κεφάλαια εν συγκρίσει με τους σταθμούς βάσης των 5G δικτύων και η σύνδεση μεταξύ του πυρήνα του δικτύου, γίνεται με διεπαφή S1. Οπότε συνοψίζοντας τα eNodeBs είναι υπεύθυνα για:

- 1) συμπίεση κεφαλίδων, κατά την οποία γίνεται συμπίεση των **IP κεφαλίδων** των πακέτων για μεγαλύτερη απόδοση.
- 2) Διαχείριση των πόρων πρόσβασης των χρηστών (Radio Resource Management) και εισαγωγή του χρήστη στο δίκτυο.
- 3) Κρυπτογράφηση των δεδομένων του χρήστη.
- 4) Συνδεσιμότητα με το δίκτυο κορμού (**EPC**).

Στην παρακάτω **Εικόνα 2**, μπορούμε να διακρίνουμε τη σύνδεση με που γίνεται με απλή απεικόνιση, μεταξύ του E-UTRAN και του UE.



Εικόνα 2 – 4G RAN (E-UTRAN)

Επίσης, βασικές λειτουργίες γενικότερα και χαρακτηριστικά του E-UTRAN αποτελούν, η καθυστέρηση λιγότερο από 10ms, η χρήση της τεχνικής **OFDM** για **downlink** στα 100Mbps και για



uplink με τεχνική **SC-FDMA** και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα **50Mbps**. Η διαχείριση του φάσματος συχνοτήτων στους χρήστες γίνεται με δυναμικό τρόπο αναλόγως την ανάγκη του καθενός. Η υποστήριξη ενός υψηλού **handover** επίσης διαφέρει από τις προηγούμενες εκδόσεις δικτύων και στην συνέχεια θα δούμε πόσο δραματικά θα αλλάξει, μιλώντας για τα 5G δίκτυα και τις τεχνολογίες τους.

Οι προδιαγραφές της 3GPP καθορίζουν με ποιον τρόπο θα επιτευχθεί η ασφαλής και ορθή σύνδεση μεταξύ του E-UTRAN (LTE και LTE - Advanced - 4G), GERAN (δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας GSM / GPRS- 3G) και UTRAN (δίκτυο ραδιοεπικοινωνίας τεχνολογιών που βασίζονται σε UMTS WCDMA και HSPA – 2G). Επίσης, το **EPS** (Evolved Packet System) επιτρέπει στις τεχνολογίες εκτός 3GPP να διασυνδέουν τον εξοπλισμό χρήστη (UE) με το EPC, π.χ. **WiMAX**, **WLAN** ή σταθερά δίκτυα κ.α.. Ο τρόπος που δίνεται η πρόσβαση μεταξύ των διάφορων τεχνολογιών από την **3GPP** μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: 1) τις αξιόπιστες (**trusted**) και 2) τις μη αξιόπιστες (**non-trusted**). Στην πρώτη κατηγορία, οι προσβάσεις μπορούν να αλληλοεπιδράσουν απευθείας με το EPC, ενώ στη δεύτερη κατηγορία, η πρόσβαση με το **EPC** γίνεται μέσω μιας οντότητας δικτύου που ονομάζεται **ePDG** (Evolved Packet Data Gateway). Ο ρόλος του **ePDG** είναι η παροχή μηχανισμών ασφαλείας. Το αν μια πρόσβαση επίσης θεωρείται αξιόπιστη ή μη αξιόπιστη, έχει να κάνει με τον χειριστή του εκάστοτε δικτύου.

Τέλος, σε αυτό το υποκεφάλαιο (**1.4 παραπάνω**), αναλύσαμε με λίγο μεγαλύτερη λεπτομέρεια το δίκτυο κορμού και το δίκτυο πρόσβασης ([10], [11]) του ήδη λειτουργικού δικτύου 4G που λαμβάνει να χρησιμοποιούμε εν έτει 2020, για να καταλάβουμε πολύ καλύτερα τις διαφορές της επόμενης Γενιάς δικτύων **5G** και τις τροποποιήσεις που έχουν γίνει και γίνονται στο νέο δίκτυο κορμού και στο νέο δίκτυο πρόσβασης σε σχέση με τα τωρινά και τα οποία θα αναλύσουμε με πού μεγάλη λεπτομέρεια στο **κεφάλαιο 2 παρακάτω**.

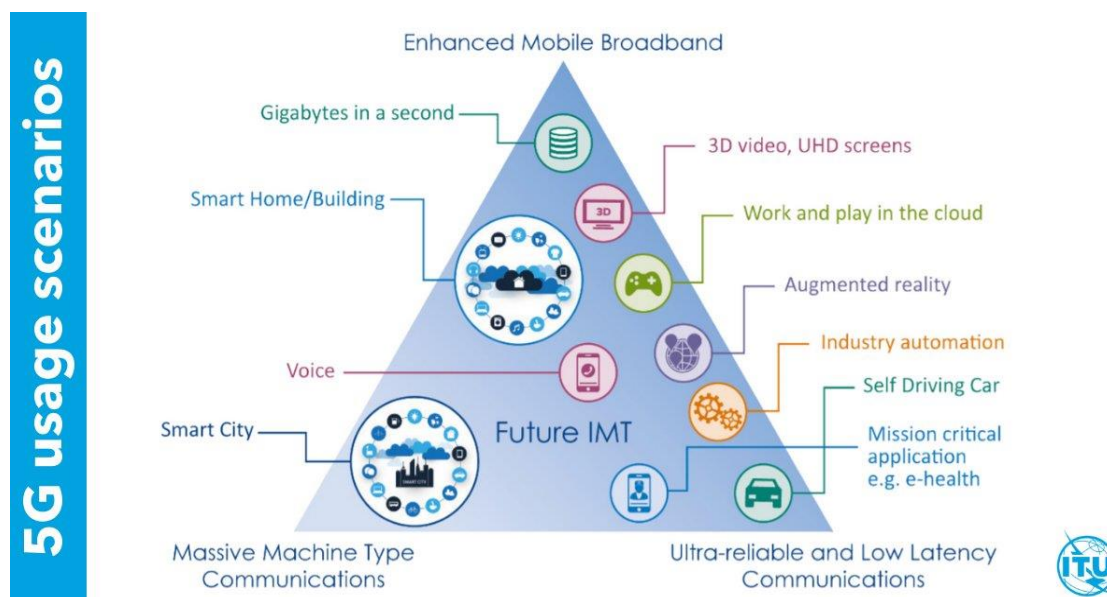
1.5 Εισαγωγή στα 5G δίκτυα

Την τελευταία δεκαετία υπάρχει μία έξαρση στην κίνηση των δεδομένων των τηλεπικοινωνιών που αναγκάζει την ανάπτυξη του 5G δικτύου να υλοποιείται με πολύ γρήγορους ρυθμούς, λόγω του ότι υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις από την μεριά των υπηρεσιών και των δυνατοτήτων που θα παρέχει. Η αλλαγή από επικοινωνία με απλά μηνύματα φωνής σε μηνύματα πολυμέσων μέσω του διαδικτύου έχει



αυξήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τα πακέτα που κινούνται. Η ανάγκη των εταιριών για μείωση του κόστους που υπάρχει με την υπάρχουσα τεχνολογία, κινεί τα νήματα για την ανάπτυξη των **NGN** (Next Generation Network). Αντίθετα αυτές οι εταιρίες έχουν ήδη επενδύσει τεράστια ποσά στην τωρινή δικτυακή δομή, επομένως πρέπει να λάβουν υπόψη τους το σημείο ανάμεσα στην κάλυψη αυτής της επένδυσης και στην επένδυση για το μέλλον. Οι πελάτες δεν θέλουν πλέον απλή επικοινωνία φωνής μέσω των **PSTN** παρόχων, αλλά αναζητούν πλούσιο περιεχόμενο που παρέχεται μέσω των **ISPs** (Internet Services Providers), δηλαδή τη διαδραστική επικοινωνία που προσφέρει το διαδίκτυο. Ουσιαστικά, η δυνατότητα του νέου ευρυζωνικού δικτύου μπορεί να υποστηρίξει στο μέγιστο βαθμό μεγάλο αριθμό εφαρμογών και υπηρεσιών, οι οποίες θα έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα και διαφοροποίησή μεταξύ τους. Σε επίσημη προτυποποίηση του 5G, η παραπάνω δυνατότητα εκφράζεται από διάφορες περιπτώσεις χρήσης (use cases), οι οποίες μέσω των ορισμών τους προσπαθούν να κατηγοριοποιήσουν το μεγάλο φάσμα των υπηρεσιών της 5^{ης} Γενιάς Δικτύων. Κάποιες από τις βασικές περιπτώσεις χρήσης είναι:

- URLLC (**Ultra-reliable and low-latency communications**)
- mMTC (**massive Machine type communications**)
- eMBB (**enhanced mobile broadband**)



Εικόνα 3-Σενάρια χρήσης 5G δικτύου

Πηγή: <https://news.itu.int/5g-fifth-generation-mobile-technologies/>



Με βάση τα παραπάνω διαφορετικά σενάρια, το δίκτυο **5G** έχει τη δυνατότητα να παρέχει υπηρεσίες με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει μελλοντικές επιχειρήσεις όπως (ιατρική από απόσταση, ηλεκτρονικά ελεγχόμενο οδικό δίκτυο, δίκτυο αυτοκινήτων κτλ. Ανεξαρτήτως απαιτήσεων σε εύρος ζώνης, καθυστέρηση, κ.α., η κάθε υπηρεσία μπορεί και υποστηρίζεται βέλτιστα μέσω της διαχείρισης όλων των πόρων του δικτύου από την μέθοδο **Network as a Service (NaaS)**. Έτσι για παράδειγμα, το **IoT** (Internet of Things) και οι πολλές εφαρμογές και υπηρεσίες που το συμπεριλαμβάνουν, οι οποίες απαιτούν διαφορετικά επίπεδα στις παραμέτρους απόδοσης και εύρους ζώνης, τώρα θα μπορούν να υλοποιηθούν ([12]) .

Γι' αυτό το λόγο λοιπόν, χρειάζεται μία βασική αναδιάταξη και διαφοροποίηση της αρχιτεκτονικής του παρόντος δικτύου και του “κορμού” του, ώστε να υπάρξει η δυνατότητα υποστήριξης “εικονικών” (**virtual**) δικτύων σε μία ενιαία φυσική υποδομή. Για τον λόγο αυτό, έχουν προταθεί διάφορες καινοτόμες αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες οι οποίες αποσκοπούν στο να φτιαχτεί ένα δίκτυο το οποίο να ενοποιεί όλες τις προηγούμενες τεχνολογίες δικτύωσης, όπως είναι οι τεχνολογίες όλων των προηγούμενων γενιών δικτύου κινητής τηλεφωνίας αλλά και των υπαρχουσών τεχνολογιών δικτύωσης όπως είναι το **Wi-Fi**, σε ένα ενιαίο δίκτυο. Το δίκτυο αυτό, λόγω του ότι θα αποτελείται από δίκτυα διαφορετικών τεχνολογιών, τα οποία θα επικοινωνούν και θα συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα ενιαίο δίκτυο, χαρακτηρίζεται ως “ετερογενές Δίκτυο” **Heterogeneous Network (HetNet)**.

Με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται ο επαναπρογραμματισμός, η αλλαγή και η προσθήκη λειτουργιών του δικτύου μέσω κώδικα, δημιουργώντας το σκεπτικό του ότι το **5G** δίκτυο θα πρέπει να κινείται γύρω από το **virtualization**. Μέσω της διαμόρφωσης και της διαχείρισης των πόρων, το νέο δίκτυο θα επιφέρει σημαντικές αλλαγές, ανοίγοντας σύγχρονους δρόμους, με τους οποίους θα μπορεί να υποστηρίξει τις διαφορετικές απαιτήσεις των πλείστων χρηστών και των εφαρμογών που όλο αυξάνονται με ταχύτατους ρυθμούς.

Όλα τα παραπάνω φυσικά, αναπτυχθήκαν και προτυποποιούνται από την **ITU** και την **3GPP** αλλά και πολλούς άλλους, για τους οποίους δεν μπορούμε να αναφερθούμε λόγω πλήθους. Στο παρακάτω υποκεφάλαιο όμως, θα αναφερθούμε σε δύο σημαντικούς αρωγούς για την ανάπτυξη του 5G δικτύου και θα πούμε λίγα λόγια για την **ITU** και την **3GPP**.



1.5.1 Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) και 3rd Generation Project (3GPP)

Ο **ITU ([17])** είναι ένας οργανισμός διεθνούς φήμης, ο οποίος ειδικεύεται στην πληροφορική και ειδικότερα στις τηλεπικοινωνίες είναι ο **ITU (International Telecommunication Union)**. Σκοπός του **ITU** είναι η δημιουργία **standards (ISO)**, ώστε να επιτευχθεί η εύρυθμη λειτουργία των δικτύων και των υπηρεσιών. Επίσης, είναι υπεύθυνος για τη σωστή διαχείριση του **ραδιοφάσματος** και του διαμοιρασμού του σε όλο τον πλανήτη αλλά και για την επιλογή της τροχιάς των δορυφόρων. Βελτιώνει τις δυνατότητες πρόσβασης των ανθρώπων σε **ICTs (Information and Communications Technologies)** και εντείνει τις προσπάθειες του ακόμα και σε λιγότερο τεχνολογικά εξελιγμένες περιοχές (τρίτοκοσμικές χώρες). Με την πλήρη αξιοποίηση των **ICTs**, προσπαθεί να είναι συνεπής με τη θεμελιώδη αρχή του, η οποία πρέπει να διέπει το θεμελιώδες δικαίωμα της επικοινωνίας, ένα από τα μεγαλύτερα δικαιώματα που πρέπει να κατέχει ο άνθρωπος, ανεξάρτητα με τον τόπο που βρίσκεται και τα μέσα επικοινωνίας που έχει στην κατοχή του. Έχοντας την βοήθεια των παγκόσμιων μελών της, τα οποία βρίσκονται σε 193 κράτη μέλη, εκ των οποίων κάποια από αυτά είναι ρυθμιστές των **ICT¹**, πολλών κορυφαίων ιδρυμάτων και πάνω από 600 εταιρειών τεχνολογίας πληροφορικής και δικτύων, ο **ITU** προσπαθεί στον ασφαλή και εύκολο διαμοιρασμό των πλεονεκτημάτων των μελλοντικών τεχνολογιών επικοινωνίας προς τους.

Σύμφωνα με το σχέδιο σύμπραξης της 3^{ης} Γενιάς (**3GPP ([13])**), το οποίο αποτελεί ουσιαστικά ένα σχέδιο τυποποίησης στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και είναι αυτό που ενοποιεί τους επτά οργανισμούς (**TTC, ATIS, CCSA, ARIB, TSDSI, TTA, ETSI**), είναι και αυτό που παρέχει στα μέλη τους το εργασιακό περιβάλλον για την εξαγωγή των εκθέσεων και των προτύπων που ορίζουν οι τεχνολογίες της **3GPP**. Αυτή η σύμπραξη εταιρειών ασχολείται με τις προτυποποιήσεις των τεχνολογιών των κυψελοειδών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, της ραδιοεπικοινωνίας και του βασικού

¹ Η τεχνολογία των πληροφοριών και των επικοινωνιών ή η τεχνολογία πληροφοριών (ICT) είναι ένας όρος επέκτασης για την τεχνολογία της πληροφορίας (IT) που τονίζει τον ρόλο των ενοποιημένων επικοινωνιών και την ολοκλήρωση των τηλεπικοινωνιών, τους υπολογιστές καθώς και απαραίτητο επιχειρησιακό λογισμικό αποθήκευσης και οπτικοακουστικών συστημάτων, τα οποία επιτρέπουν στους χρήστες να έχουν πρόσβαση, να αποθηκεύουν, να μεταδίδουν και να χειρίζονται πληροφορίες.



δικτύου μεταφοράς και εξυπηρέτησης. Οι προδιαγραφές και οι μελέτες της **3GPP** βασίζονται σε εταιρείες που αποτελούν μέλη της ίδια της **3GPP** και ανήκουν στις ομάδες εργασιών της.

Οι ομάδες των τεχνικών προδιαγραφών **TSG** (Technical Specification Group) ([14]) στο **3GPP** είναι:

- Δίκτυα πρόσβασης ραδιοσυχνοτήτων (RAN)
- Υπηρεσίες & Συστήματα Ασφαλείας (SA)
- Κεντρικό δίκτυο και τερματικά (CT)

Οι Ομάδες Εργασίας και οι τρεις ομάδες των **TSGs**, καλούν τακτικές συνεδρίες και συναντώνται για την τριμηνιαία σύνοδο, όπου κάθε θέμα τους παρουσιάζεται για ενημέρωση, συζήτηση και έγκριση. Κάθε ομάδα τεχνικών προδιαγραφών, έχει υπό την ευθύνη της έναν τομέα με συγκεκριμένες αρμοδιότητες και προδιαγραφές σύμφωνα με τους δικούς της όρους αναφοράς.

'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16
▼ Release 99: W-CDMA (UMTS)																	
▼ Release 4: 1.28Mcps TDD																	
▼ Release 5: HSDPA (& IMS)																	
▼ Release 6: HSUPA , MBMS																	
▼ Release 7: HSPA+ (MIMO, Higher order modulation)																	
▼ Release 8: LTE (OFDMA)																	
▼ Release 9 LTE improvement, SON																	
Release 10: LTE-Advanced (Carrier Aggregation, eMIMO, eCIC) → ▼																	
Release 11: CoMP, E-PDCCH → ▼																	
Release 12: FDD/TDD CA, ProSe (D2D), eMTC → ▼																	
Release 13: LTE-Advanced Pro → ▽																	
• Expanding Carrier Aggregation • Narrowband IoT • Elevation Beamforming/Full-Dimension (FD) MIMO for LTE • LAA																	

Εικόνα 4-Εκδόσεις 3GPP

Πηγή: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/ConformityandInteroperability2018/Session%202-2.pdf>

Οι τεχνολογίες της **3GPP** εξελίσσονται εν τάχει μέσω των εμπορικών κυψελοειδών και κινητών συστημάτων όπου και εμφανίζονται. Μετά από την ολοκλήρωση των πρώτων προδιαγραφών του



LTE, η **3GPP** έχει γίνει το επίκεντρο των κινητών συστημάτων πέραν της **3G**. Επίσης, η **3GPP** εργάζεται πάνω σε πολλές εκδόσεις παράλληλα και ξεκινάει μελλοντικές εργασίες πολύ πριν από την ολοκλήρωση της εκάστοτε τρέχουσας έκδοσης.

Η είσοδος του **5G**, αποτελεί βελτιώσεις του παρόντος **LTE-Advanced** και **LTE Pro** και σύντομα θα ακολουθήσει ένα σημαντικό τεχνολογικό βήμα, με την προοπτική μιας εντελώς νέας διεπαφής χρηστών, συσκευών και μηχανών. Τα πρώτα χαρακτηριστικά εμφανίζονται στην έκδοση **15 (Release 15)**, η οποία αποτελεί την 1^η φάση ανάπτυξης του **5G**. Η πλήρης συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της **ITU-IMT-2020** έγινε με την ολοκλήρωση της έκδοσης **16 (Release 16)** στο τέλος του **2019**, η οποία αποτελεί την 2^η φάση της **3GPP** για το **5G** μέχρι και το τέλος Ιουνίου 2020 και συνέχεια έχει η έκδοση **17 (Release 17)**. ([15])

2 Αρχιτεκτονική 5G δικτύων

Όπως αναφέραμε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο παραπάνω, με το **5G** θα έχουμε τη δυνατότητα της επίτευξης ενός **υπερσυνδεδεμένου δικτυακού κόσμου**, στον οποίο κάθε συσκευή-χρήστης θα είναι συνεχώς συνδεδεμένος με τον υπόλοιπο κόσμο. Τα βασικά χαρακτηριστικά που θα έχει ένας χρήστης δικτύου **5G** μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω:

1. Περιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης και από την συσκευή και από ολόκληρο το δίκτυο.
2. Καθυστερήση δικτυακών εφαρμογών και υπηρεσιών κάτω του ορίου των 0,5ms.
3. Μέγιστος ρυθμός δεδομένων της τάξης των 30Gbps για download και της τάξης των 1Gbps περίπου, για upload.
4. Τεράστια χωρητικότητα της τάξης των 1,5 εκατομμυρίων συσκευών περίπου ανά 2 τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων θα πρέπει να αναλύσουμε την αρχιτεκτονική του **5G** δικτύου και τον τρόπο λειτουργίας του. Ένα **5G** δίκτυο για να μπορέσει να ικανοποιήσει τις παραπάνω εκδοχές λειτουργικά, θα πρέπει να έχει κάποιες **τεχνολογικές** αλλά και **φυσικές αλλαγές** στον κορμό του δικτύου και στη διεπαφή του με τους χρήστες, οι οποίες θα αναφερθούν εν συντομία παρακάτω και



θα αναλυθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στη συνέχεια. Οπότε εν συντομία ένα δίκτυο 5G θα πρέπει να έχει τις παρακάτω αλλαγές:

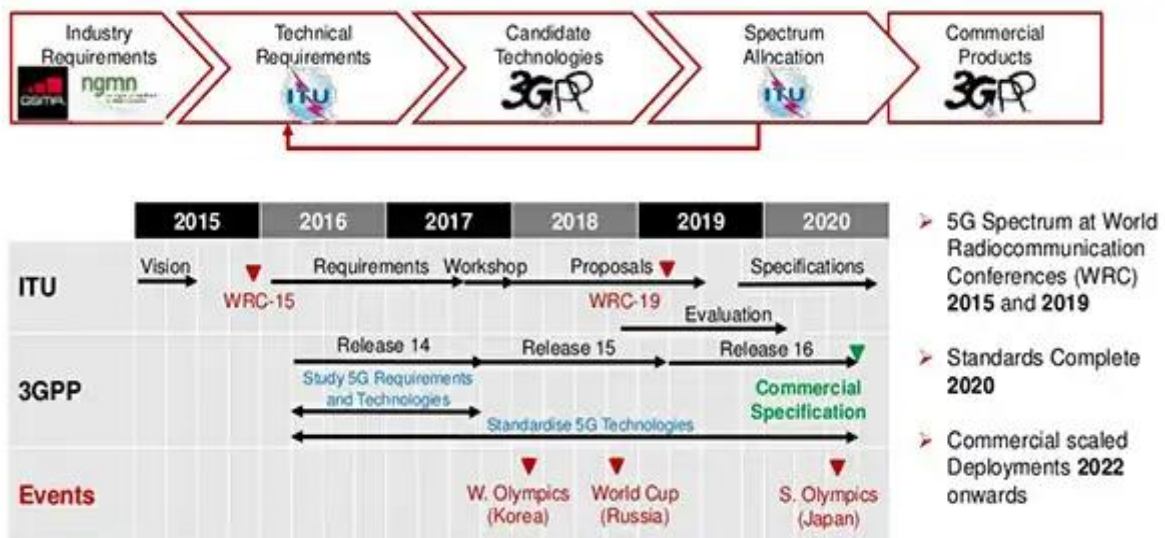
- Χρησιμοποίηση συχνοτήτων της τάξης των **30-300 GHz** (mmWave-Millimeter Wave) για αύξηση χωρητικότητας δικτύου.
- Αύξηση των σταθμών βάσης, διότι με περισσότερους σταθμούς βάσης μπορούμε να προσδώσουμε και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Άρα μιλάμε για μεγαλύτερη πυκνότητα κυψελών, που σε συνδυασμό με τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων των 6GHz θα είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση συχνότητας συνδυαστικά.
- Αλλαγή των τωρινών υποδομών και τεχνολογιών με τεχνολογίες που βασίζονται σε υποδομές που επιτρέπουν το cloud , όπως είναι το **NFV** και το **SDN**.
- Μεγαλύτερο εύρος ζώνης μέσω της εξέλιξης της υπάρχουσας δυνατότητας του δικτύου 4G για **Carrier Aggregation** και των νέων δυνατοτήτων του δικτύου 5G.
- Αλλαγή των **RF** κυματομορφών για μεγαλύτερη φασματική απόδοση σε σχέση με την τωρινή **OFDM** του δικτύου 4G.
- Ενίσχυση της χωρητικότητας και της μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, μέσω της **αλλαγής των τεχνολογιών** των τωρινών κεραιών από **MIMO** σε **massive MIMO**.

Τα 5G δίκτυα αναπτύσσονται κυρίως όπως είπαμε και παραπάνω, από την ITU και την 3GPP μέσω του IMT-2020 ([16]), στο οποίο και συνοψίζονται οι στόχοι και οι απαιτήσεις των δικτύων επόμενης γενιάς, τους οποίους αναφέραμε παραπάνω. Ας δούμε παρακάτω λίγα λόγια για την ITU και την 3GPP και πώς πάρθηκαν.

Σύμφωνα με την 3GPP, η **Φάση 1** που αποτελεί την έκδοση 15² της εξέλιξης των 5G έχει τελειώσει τον Σεπτέμβριο του 2018, ενώ η **Φάση 2** που αποτελεί την έκδοση 16 τελείωσε τον Ιούνιο του 2020. Με το πέρας της έκδοσης 16³ της 3GPP θα ξεκινήσουν ουσιαστικά και οι διεργασίες για το **IMT-2020**, δηλαδή την ανάπτυξη των προτύπων και όλων όσων αναφέρθηκαν στη Φάση 1.

² <https://www.3gpp.org/release-15>

³ <https://www.3gpp.org/release-16>

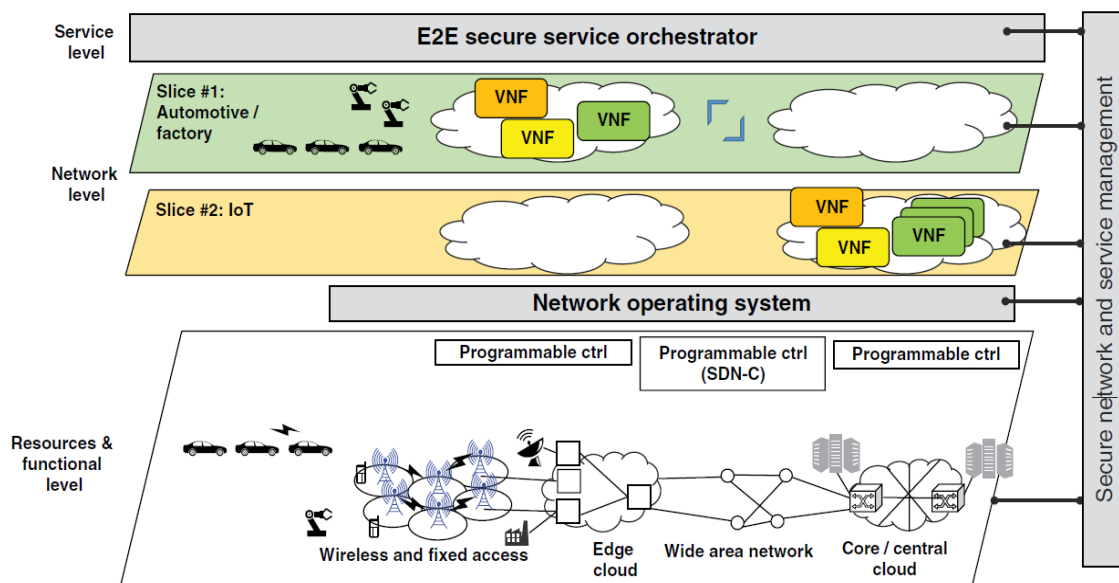


Εικόνα 5-Πορεία 5G δικτύου

Πηγή: Πηγή-<https://www.iotforall.com/cellular-iot-explained-nb-iot-vs-lte-m/>

Αφού ειπώθηκαν τα παραπάνω εν συντομία για την εισαγωγή στην αρχιτεκτονική των 5G δικτύων και τι θα πρέπει να πληρούν σε συμφωνία και με τα πρότυπα πάντα, παρακάτω θα αναλύσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια με ποιον τρόπο θα υλοποιηθεί αυτό, κάνοντας ανάλυση του δικτύου κορμού και των εγκαταστάσεων του 5G δικτύου.

Ξεκινώντας, μία περιγραφή της αρχιτεκτονικής ενός ευρυζωνικού δικτύου 5^{ης} Γενιάς, είναι αυτό που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6** παρακάτω.



Εικόνα 6 - Αρχιτεκτονική 5G δικτύου

Πηγή- <https://forum.huawei.com/enterprise/en/e2e-architecture-overview/thread/554267-100305>

Ουσιαστικά, ένα ευρυζωνικό δίκτυο 5^{ης} Γενιάς αποτελείται από ([18]) :

1. Το επίπεδο των Πόρων υποδομής (**Resources & functional level**)
2. Το επίπεδο Δικτύου (**Network Level**)
3. Το επίπεδο των υπηρεσιών και της οντότητας E2E.

Το επίπεδο των Πόρων υποδομής: Σε αυτό το επίπεδο περιέχονται όλοι οι φυσικοί πόροι που χρησιμεύουν σε ένα σταθερό-κινητό δίκτυο για την επικοινωνία, την αποθήκευση και τις παραμέτρους του δικτύου. Γενικά, περιλαμβάνει 5G συσκευές, κόμβους δικτύωσης και πρόσβασης εκτός και εντός Cloud και άλλους συνδέσμους εντός και εκτός δικτύου. Πιο ειδικά περιέχει:

- 1) **Edge Cloud**, με το οποίο προσφέρεται ευελιξία και μείωση κόστους και φυσικού χώρου, αυξάνοντας παράλληλα τις διαθέσιμες υπηρεσίες.
- 2) **Core/Central Cloud**, στο οποίο γίνονται όλες οι λειτουργίες διαχείρισης της σύνδεσης του δικτύου.



3) **Wide Area Network**, με το οποίο ένα σύνολο υπολογιστών και έξυπνων συσκευών δημιουργούν ένα κοινό δίκτυο.

Το επίπεδο Δικτύου: Το συγκεκριμένο επίπεδο αποτελεί ένα λειτουργικό σύστημα που υποστηρίζει τον διαμοιρασμό βάσεων δεδομένων, εφαρμογών και υπηρεσιών μεταξύ διαφορετικών υπολογιστών στο δίκτυο. Σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται εικονικοποίηση του φυσικού δικτύου και δημιουργούνται τα διαφορετικά επίπεδα δικτύου (**network slices**), τα οποία ξεχωριστά το καθένα εκτελεί και μια συγκεκριμένη λειτουργία.

Το επίπεδο των υπηρεσιών: Στο συγκεκριμένο επίπεδο συντελείται η δυνατότητα, του να μπορούμε να υποστηρίξουμε ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών υπηρεσιών ταυτόχρονα και με δυναμικό τρόπο.

Παραπάνω συμπεραίνουμε, ότι τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς που είναι σχεδιασμένα για την ικανοποίηση ενός χρήστη τηλεφώνου, πλέον διαμορφώνονται σε δίκτυα που μπορούν να υποστηρίξουν πολλές διαφορετικές υπηρεσίες και με διαφορετική ζήτηση η καθεμία σε πόρους και δικτυακές ανάγκες. Οπότε έχοντας τις παραπάνω απαιτήσεις σαν δεδομένα, η **3GPP** επικεντρώθηκε κυρίως στην ανάπτυξη μιας επίπεδης αρχιτεκτονικής όπου τα επίπεδα ελέγχου (**Control plane**) και χρήστη (**User plane**) είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτός ο λειτουργικός διαχωρισμός επιτρέπει στους παρόχους να αξιοποιήσουν με πιο δυναμικό τρόπο τους διαθέσιμους πόρους κατά την ανάπτυξη και επέκταση του δικτύου. Επίσης, εκτός από την ανεξαρτητοποίηση του επιπέδου ελέγχου και χρήστη, περιορίστηκε αρκετά και ο κοινός δεσμός μεταξύ του δικτύου RAN και του δικτύου κορμού.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα νέας γενιάς δίκτυα θα έχουν εξελιγμένη πρόσβαση στο RF δίκτυο με το επόμενης Γενιάς δίκτυο Πρόσβασης (**Next Generation RAN**) και το εξελιγμένο δίκτυο κορμού (**Next Generation Core**). Ουσιαστικά έχουμε:

1) Το νέο δίκτυο κορμού, **5GC** (5G Core), όπου το κεντρικό δίκτυο είναι πιο απλουστευμένο, δεν παρέχονται όλες οι πληροφορίες από αυτό για κάθε σύνδεση, προσδίδοντας έτσι μικρότερη καθυστέρηση, μικρότερο φορτίο δεδομένων στο κεντρικό δίκτυο, δημιουργώντας έτσι μια πιο ευέλικτη αρχιτεκτονική. Οπότε το **5GC** θα αποτελέσει ουσιαστικά μια ομαδοποίηση διαφόρων λειτουργιών που μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας το **NFV**, το οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω σε συνδυασμό με cloud εφαρμογές. Έτσι όλες οι λειτουργίες του δικτύου κορμού, έχουν απλοποιηθεί κατά πολύ σε σχέση με αυτές του δικτύου 4G (EPC) και μπορούν μέσω



προγραμματισμού από τους εκάστοτε διαχειριστές του δικτύου να επεκταθούν αναλογικά με τις ανάγκες του εκάστοτε δικτύου και να διαφοροποιηθούν ως προς τη λειτουργικότητα.

2) Το νέο δίκτυο πρόσβασης συσκευών-χρηστών, νέο RAN, στο οποίο οι σταθμοί βάσης του δικτύου 4G, οι **eNodeB**, μεταβαίνουν σε ένα καινούργιο σύστημα κόμβων επόμενης γενιάς, με ονομασία **gNB** (Next Generation Node B). Όπως προείπαμε και παραπάνω, θα γίνει αποσυμφόρηση του δικτύου κορμού από τις λειτουργίες του δικτύου, οπότε αυτές θα περιέχονται στους **νέους κόμβους gNB**, από όπου και θα υποστηρίζεται η επικοινωνία του 5G δικτύου με το δίκτυο RF. Επίσης, στα gNB θα ενσωματώνονται και όλες εκείνες οι πληροφορίες που θα συνδέουν το 5G δίκτυο με τις υπάρχουσες παροντικές και μετέπειτα εξελίξιμες τεχνολογίες.

2.1 Δίκτυο Κορμού (5G Core)

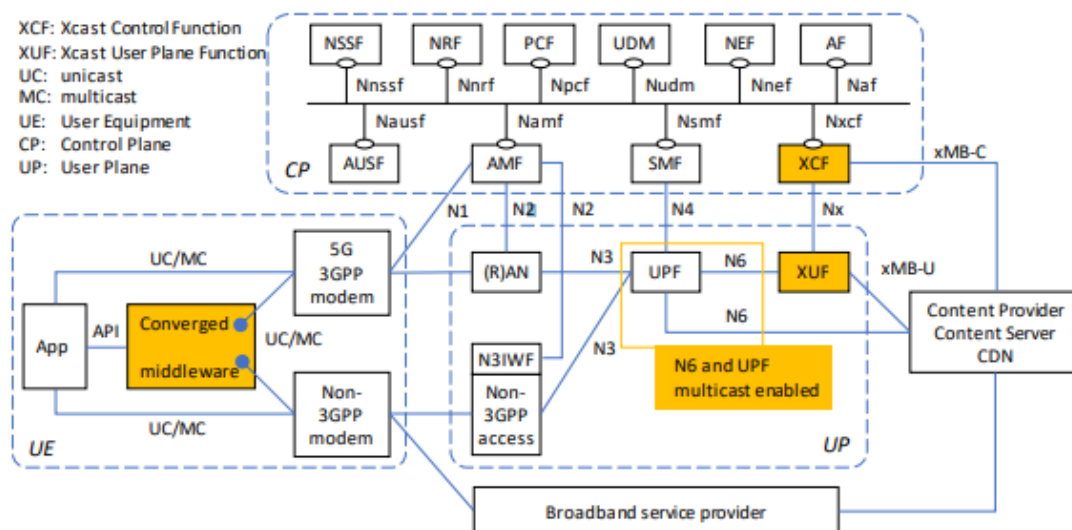
Στο δίκτυο κορμού τελευταίας γενιάς ([19], [20], [21]) , βασιζόμαστε στην προσφερόμενη υπηρεσία και στο σημείο αναφοράς αυτής. Η υπηρεσία του δικτύου κορμού 5GC βασίζεται στις λεγόμενες υπηρεσίες δικτύου (**NF - Network Functions**). Επίσης, το βασικότερο κομμάτι, αυτό της σύνδεσης μεταξύ του 5GC και του 5G RAN εκτελείται μέσω διεπαφών και πρωτόκολλων μεταφοράς. Βασικό είναι να αναφέρουμε επίσης, ότι υπάρχει διαχωρισμός στο επίπεδο ελέγχου και χρήστη, το οποίο αποτελεί θεμελιώδες έννοια για τον σχεδιασμό του 5G δικτύου. Οι λειτουργίες δικτύου (**NF**) που περιέχονται σε ένα 5GC, επικοινωνούν μεταξύ τους και παρέχουν υπηρεσίες σε άλλες NF, μέσω μιας διεπαφής βασιζόμενης στις υπηρεσίες **SBI** (Service-based interface) που βασίζεται στο πρωτόκολλο μεταφοράς **HTTP**. Από τα κυριότερα στοιχεία λειτουργιών δικτύου (**NF - Network Functions**) που περιέχονται σε ένα δίκτυο κορμού 5^{ης} Γενιάς είναι τα παρακάτω:

- **UPF** (User Plane Function): Το UPF υποστηρίζει όλες εκείνες τις λειτουργίες που αναφέρονται στην λειτουργία του επιπέδου χρηστών και διευκολύνουν την λειτουργία του. Είναι υπεύθυνα για δρομολόγηση και προώθηση πακέτων, για προσωρινή αποθήκευση δεδομένων και σύνδεση μεταξύ του δικτύου δεδομένων. Σύμφωνα με το Release 15 της 3GPP, η σύνδεση του επιπέδου χρήστη (UP) με το δίκτυο RAN γίνεται μέσω των διεπαφών N3 και με το δίκτυο δεδομένων μέσω των N6.
- **SMF** (Session Management Function): Αυτή η λειτουργία περιλαμβάνει λειτουργίες που είναι υπεύθυνες για χειρισμούς, όπως η εγκατάσταση, η τροποποίηση και ο τερματισμός μιας συνόδου ενός



χρήστη. Έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί με το **UPF** (User Plane Function) μέσω της διεπαφής N4 και αποτελεί μία από τις κύριες λειτουργίες του δικτύου κορμού.

- **DN** (Data Network): Αποτελείται από όλες εκείνες τις υπηρεσίες δεδομένων που μπορεί να υποστηρίζονται από το δίκτυο, είτε απαιτείται σε μια σύνδεση στο διαδίκτυο είτε σε οποιαδήποτε υπηρεσία δεδομένων.
- **NEF** (Network Exposure Function): Παρέχει ασφαλή αξιοποίηση υπηρεσιών που παρέχονται από τις λειτουργίες δικτύων 3GPP.
- **NRF** (NF Repository Function): Αποτελεί ένα σύστημα εντοπισμού υπηρεσιών μέσα στο δίκτυο και παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ανάγκες για Network Functions την δεδομένη στιγμή.
- **AMF** (Core Access and Mobility Management): Το AMF, είναι αυτό που επικοινωνεί με το UE, με τη διεπαφή N1 και η επικοινωνία με το RAN, γίνεται μέσω της διεπαφής N2. Η λειτουργία αντιστοιχίζεται περίπου με αυτή του **MME**⁴ σε ένα δίκτυο 4G. Διαχειρίζεται τη σύνδεση και την κινητικότητα του δικτύου και έχει σχέση και με κάποιες λειτουργίες ασφάλειας που απασχολούν αυτό.

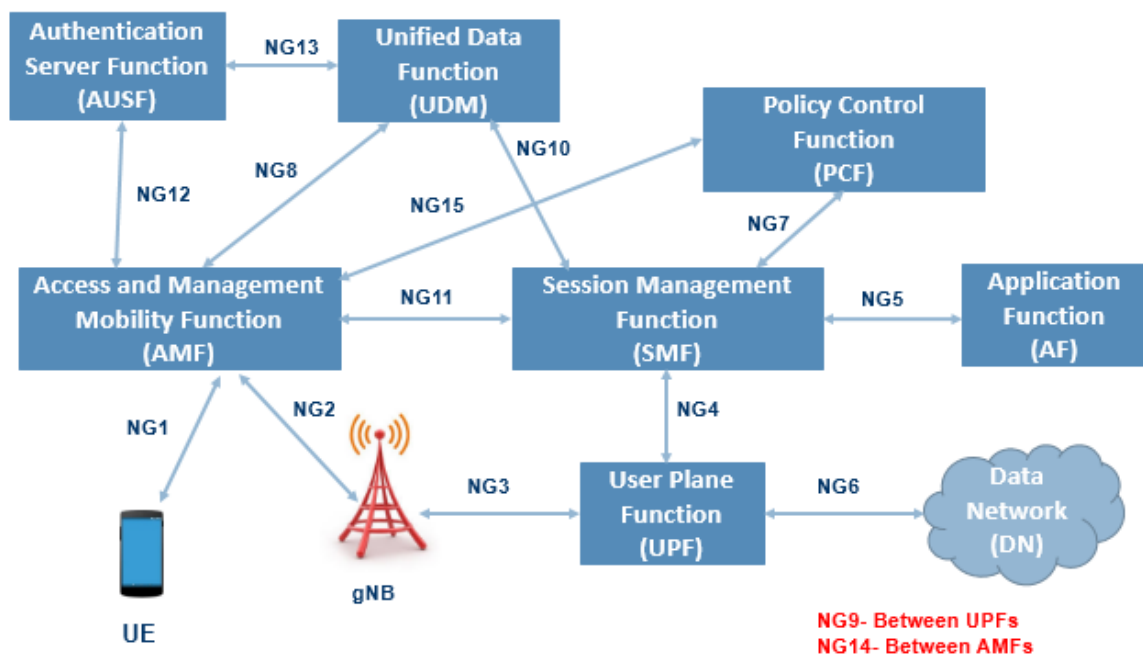


Εικόνα 7 -5G Core

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/System_Architecture_Evolution



Πηγή: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf



Εικόνα 8 - Διεπαφές 5G Core

Πηγή: <http://www.techplayon.com/5g-reference-network-architecture/>

- **PCF** (Policy Control Function): Σε αυτήν την λειτουργία υποστηρίζεται το ολοκληρωτικό νομοθετικό πλαίσιο της πολιτικής και παρέχονται οι κανονισμοί που θα πρέπει να ακολουθούνται για τη σωστή «συμπεριφορά» και τον έλεγχο των λειτουργιών στο επίπεδο ελέγχου του δικτύου.
- **AUSF** (Authentication Server Function): Αποτελεί μέρος των διαδικασιών ασφαλείας στο 5G.
- **UDM** (Unified Data Management): Ορίζει και είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση των μακροπρόθεσμων υπογραφών ασφαλείας και πληροφοριών των χρηστών που χρησιμοποιούνται για να γίνει η ταυτοποίηση των συνδρομητών-χρηστών.

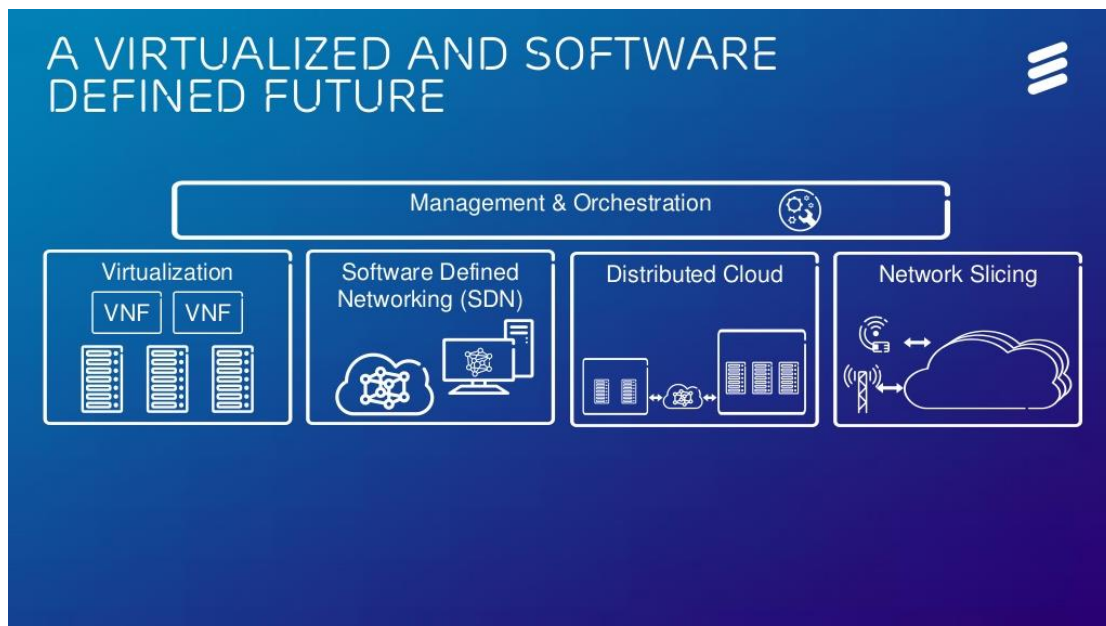


2.1.1 Αρχιτεκτονικές εικονικοποίησης δικτύου

Τα παραπάνω κύρια χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητό να έχουν τα 5G δίκτυα δεν μπορούν να επιτευχθούν με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές βάσει των οποίων έχουν υλοποιηθεί τα υπάρχοντα δίκτυα μέχρι και τέταρτης γενιάς. Ειδικά για να επιτευχθεί η απαραίτητη κινητικότητα των χρηστών αλλά και η επίτευξη δυναμικών δικτύων ικανών να υποστηρίξουν την ζητούμενη χωρητικότητα δικτύου, είναι απαραίτητο τα δίκτυα αυτά να είναι σε μεγάλο βαθμό διαχειρίσιμα και να μπορούν να παραμετροποιηθούν έτσι ώστε να αλλάξουν κάποια από τα χαρακτηριστικά τους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Μιλώντας για τα παραπάνω λοιπόν και αφού έχουμε αναφερθεί στην εικονικοποίηση, παρακάτω θα αναλύσουμε περαιτέρω με ποιον τρόπο θα λειτουργεί και σε ποιες αρχιτεκτονικές βασίζεται.

Η ιδέα της εικονικοποίησης λοιπόν, αποτελεί μια απλή σχετικά ιδέα. Στα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, η διαχείριση του δικτύου γίνεται μέσω ενός κεντρικού εξοπλισμού ο οποίος υλοποιείται με κάποιο κύκλωμα (**hardware**). Έτσι, θα πρέπει όλα τα μέρη του δικτύου να επικοινωνήσουν με τον κεντρικό αυτό κόμβο για να μπορέσουν να κάνουν κάποια αλλαγή στο υπάρχον δίκτυο, διαδικασία που είναι αρκετά χρονοβόρα και ακατάλληλη για τα 5G δίκτυα, ώστε να έχουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Αν όμως η διαχείριση των δικτύων γινόταν από ένα λογισμικό και όχι από κάποιο κύκλωμα, τα δίκτυα αυτά θα είναι πολύ πιο ευέλικτα και οι απαιτούμενες αλλαγές σε αυτά θα γίνονται σε πολύ μικρότερο χρόνο, κάνοντας εφικτή την υλοποίηση των δυναμικών δικτύων με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η κατάργηση των κυκλωματικών κέντρων ελέγχου των δικτύων και η αντικατάστασή τους από ένα κεντρικό λογισμικό είναι η κεντρική ιδέα της εικονικοποίησης που θα υλοποιηθεί στα δίκτυα νέας γενιάς 5G.



Εικόνα 9 - Virtualization

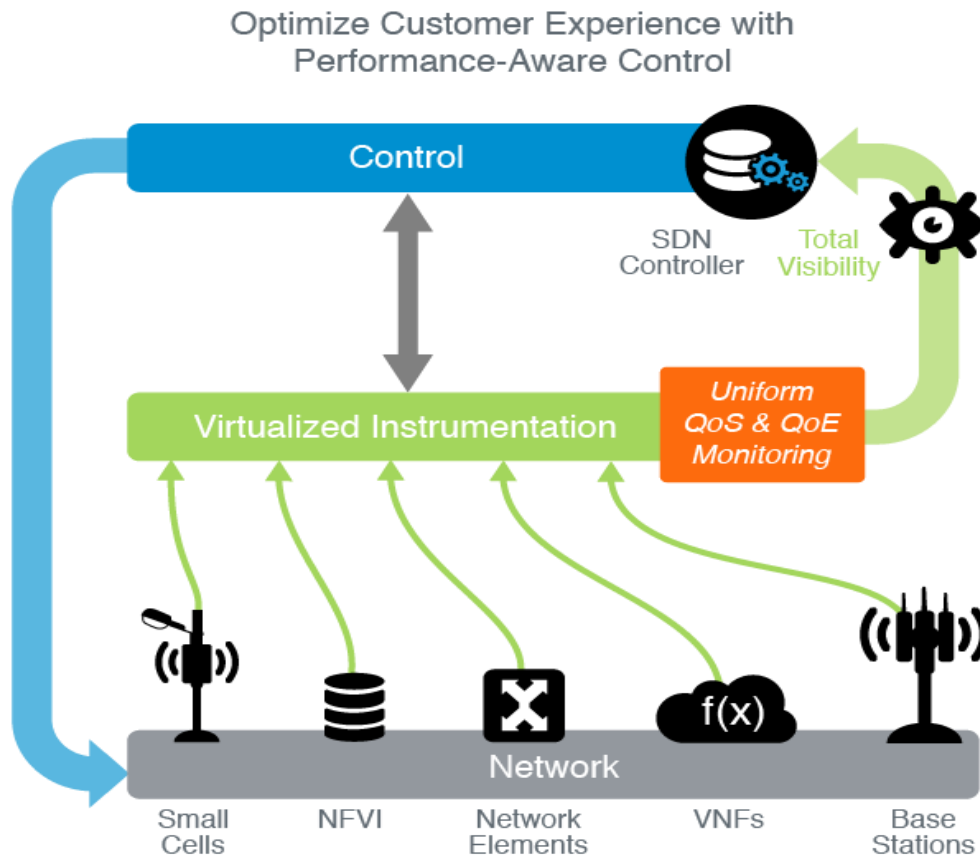
Πηγή: https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-virtualization/?c_action=related_articles

Οι 2 βασικές τεχνολογίες που ανήκουν στην αρχιτεκτονική της εικονικοποίησης του δικτύου ([40], [41]) είναι οι **SDN** (Software-Defined Network) και **NFV** (Network Function Virtualization). Η SDN τεχνολογία, είναι αυτή που ευθύνεται για τον διαχωρισμό του **C-Plane** και **U-Plane** του δικτύου, που αναφέραμε παραπάνω, απλοποιώντας κατά πολύ την διαχείριση του δικτύου και επιτρέποντας την εισαγωγή νέων υπηρεσιών στο δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα του απευθείας προγραμματισμού της, μέσω ανοιχτού λογισμικού, για μεγαλύτερη ευελιξία και δυναμική ρύθμιση από τους δικτυακούς παρόχους. Έτσι με απλό τρόπο, είναι η τεχνολογία που ρυθμίζει την διαχείριση των δεδομένων στο δίκτυο και προσφέρει δραματική αύξηση του επιπέδου της **QoE** μέσω της **user-centric** (υπηρεσίες επικεντρωμένες ως προς το χρήστη) προσέγγισης. Πιο συγκεκριμένα, το **5G SDN** παρέχει έναν έξυπνο τρόπο προγραμματισμού του δικτύου και δημιουργίας πολλών ιεραρχιών δικτύου. Κύρια ιδέα του **SDN** στα **5G** ([42], [43]), είναι να μεταφέρει τον έλεγχο του δικτύου μακριά από το υλικό (**hardware**) του δικτύου και να ενεργοποιήσει έναν εξωτερικό έλεγχο δεδομένων μέσα από μια συσκευή, που αποτελεί λογική οντότητα λογισμικού (**ελεγκτής - controller**). Ο ελεγκτής, ο οποίος διαχειρίζεται τον έλεγχο ροής πακέτων για την ενεργοποίηση της έξυπνης δικτύωσης, βρίσκεται ανάμεσα στις συσκευές δικτύου και στις εφαρμογές. Στην αρχιτεκτονική αυτήν, ο έλεγχος του δικτύου θα γίνεται με προγραμματισμό. Σε σύγκριση με τους σημερινούς πυρήνες των δικτύων, τα **5G** δίκτυα δημιουργούν



ιεραρχικούς πυρήνες, οι οποίοι με τη σειρά τους θα συνθέτουν μία τοπολογία ενός δικτύου 5G. Όπως τα δίκτυα που διανέμουν το περιεχόμενο, αποθηκεύουν προσωρινά το δημοφιλές περιεχόμενο στην άκρη, το 5G δίκτυο θα αποθηκεύει προσωρινά το περιεχόμενο τοπικά, αλλά θα απαιτεί έναν ελεγκτή (controller) SDN για τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την δημιουργία του τρόπου επικοινωνίας των συσκευών. Έτσι, εκατοντάδες κόμβοι θα μπορούν να στείλουν δεδομένα στον ελεγκτή 5G SDN. Οι διαφορετικές ιεραρχίες θα περιέχουν ραδιοπομπούς (RANs) διαφόρων μεγεθών και ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, το δίκτυο θα έχει διαφορετικούς βαθμούς ιεραρχίας. Οι πολλαπλές ιεραρχίες και ο ελεγκτής SDN θα επιτρέπουν την αλλαγή της κίνησης του δικτύου να γίνεται δυναμικά βάσει της ανάγκης, την εκάστοτε στιγμή.

Αυτό που επιτυγχάνεται είναι ότι, οι διαχειριστές του δικτύου 5G είναι σε θέση να διαχειρίζονται εύκολα το δίκτυο και να εισάγουν νέες υπηρεσίες, λογισμικά και άλλες αλλαγές. Για το λόγο αυτό, η αρχιτεκτονική SDN του 5G, επιτρέπει την αύξηση της ευελιξίας και τον προγραμματισμό των δικτύων 5G. Έτσι ένα έξυπνο, εικονικό, προγραμματιζόμενο δίκτυο 5G επιτρέπει στους παρόχους να καινοτομούν τόσο στις λειτουργίες τους όσο και στις προσφορές υπηρεσιών τους. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν νέες υπηρεσίες κατόπιν ζήτησης των πελατών τους, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική αποτελεσματικότητά τους σε όλους τους τομείς. Τέλος, η αρχιτεκτονική 5G SDN είναι δυναμική, εξαιρετικά διαχειρίσιμη και πολύ αποδοτική με μεγάλη οικονομία ενέργειας, καθιστώντας την έτσι ιδανική για την υψηλής ταχύτητας χρήση των περιπτώσεων του δικτύου 5G.



Εικόνα 10 - SDN architecture

Πηγή: <https://accedian.com/service-providers/business-goals/sdn-nfv/>

Η λειτουργία εικονικοποίησης δικτύου **NFV** ([44] , [45]) αναφέρεται κυρίως στην αντικατάσταση λειτουργιών του δικτύου σε κάποιες συσκευές, π.χ. δρομολογητές, αντισταθμιστές φορτίου και τείχη προστασίας (**firewalls**) με εικονικοποιημένες λειτουργίες και διεπαφές για τις λειτουργίες που εκτελούνται ως λογισμικό. Σκοπός του **NFV** είναι η μετατροπή του τρόπου υλοποίησης των εγκαταστάσεων των δικτύων. Έτσι κάθε επιχείρηση μπορεί να απλοποιήσει ένα μεγάλο φάσμα λειτουργιών δικτύου προς όφελος της μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας και να εισαγάγει νέες υπηρεσίες πολύ γρηγορότερα ανάλογα με τις καθημερινές ανάγκες.

Στα **5G** δίκτυα, η εισαγωγή του **NFV** θα επιτρέψει τον τεμαχισμό του δικτύου, κατά τον οποίο ένα μέρος ενός εικονικού δικτύου θα επιτρέπει στην αναδημιουργία πολλαπλών εικονικών δικτύων πάνω σε μια κοινή φυσική υποδομή. Στη συνέχεια, στα εικονικά δίκτυα θα δίνεται η δυνατότητα αναπροσαρμογής στις ανάγκες των χρηστών που πρέπει να ανταποκρίνονται στις εφαρμογές και τις



υπηρεσίες που χρησιμοποιούν. Η αρχή αυτή ονομάζεται “**Network Slicing**” και προβλέπει τον καθορισμό επιμέρους “τεμαχίων” ενός καθολικού 5G δικτύου. Κάθε τέτοιο “τεμάχιο δικτύου” (**Network Slice**) θα αποτελεί τον συνδυασμό λειτουργιών και πόρων που θα μπορεί να προσφέρει, ορίζοντας έτσι “προφίλ” δικτύου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που θα μπορεί να εξυπηρετεί καλύτερα χρήστες του δικτύου αυτού σύμφωνα με τις ιδιαίτερες “ανάγκες” επικοινωνίας αυτών. Η τεχνική του **Network Slicing** θα δίνει την δυνατότητα στους παρόχους υπηρεσιών δικτύωσης 5G δικτύων, στην κατασκευή μίας φυσικής υποδομής μέσω της οποίας θα μπορεί να δημιουργεί ποικίλα “τεμάχια δικτύου” προσανατολισμένα στις ιδιαίτερες ανάγκες διαφόρων ομάδων χρηστών. ([46])



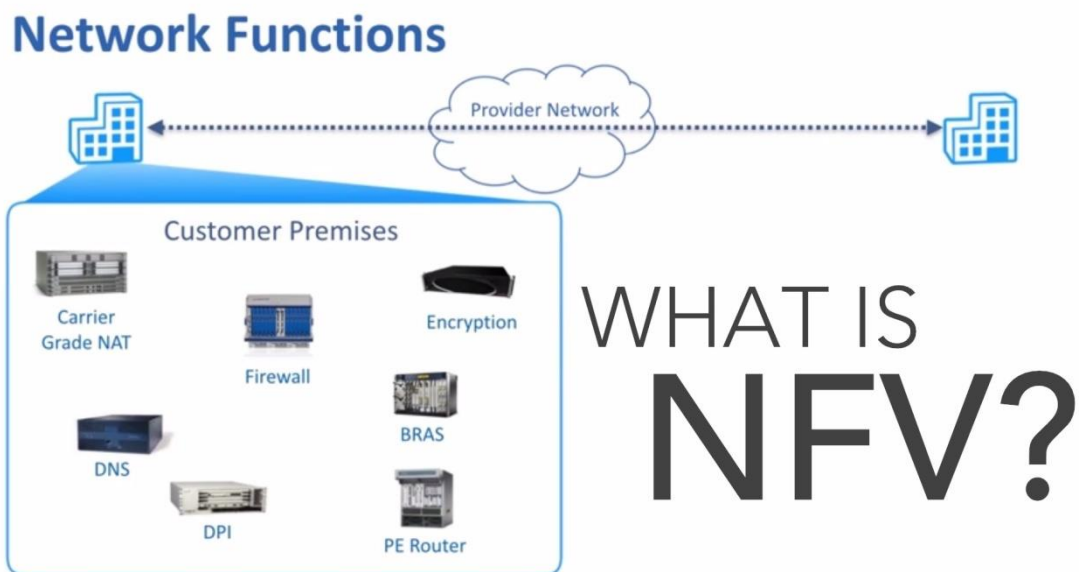
Εικόνα 11 - NFV_Cloud

Πηγή: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-nfv/>

Επίσης, στα 5G δίκτυα το **NFV** θα μπορεί να ενεργοποιήσει το κατακευματισμένο σύννεφο, δίνοντας τη δυνατότητα για δημιουργία προγραμματιζόμενων και ευέλικτων δικτύων. Μέσω της εικονικοποίησης του δικτύου, θα γίνει εφικτή η δημιουργία ενός νέου δικτύου ασύρματης πρόσβασης, του “C-RAN” (Cloud Radio Access Network) που, χρησιμοποιώντας την λογική του **cloud**, θα επιτρέπει σε πολλά κέντρα δεδομένων να εμφανίζονται ως ένα ενιαίο κέντρο εικονικών δεδομένων, το αντίστροφο σαν λογική της λογικής του **Network Slicing** που περιγράφηκε παραπάνω. Πολλές διαφορετικές δομές θα μπορούν οι χρήστες να τις αντιλαμβάνονται ως μία ενιαία. Το περιβάλλον κατανομής υπολογιστικού νέφους της **NFV** στα 5G θα είναι κλιμακωτό, ανθεκτικό και πολύ ανεκτικό σε σφάλματα. Ο συνδυασμός της τεχνολογίας κατακευματισμένου **cloud** με τις εικονικές λειτουργίες του δικτύου **VNFs**



(Virtualized network functions) θα επιτρέπει την ανάπτυξη των **VNF** βάσει των επιδόσεων των συσκευών και άλλων απαιτήσεων, διευκολύνοντας έτσι στη βελτιστοποίηση, στην πιο αποτελεσματική διαχείριση και συντήρηση των νέων δικτύων. [47]



Εικόνα 12 - Τεχνολογίες NFV

Πηγή: https://scholar.google.gr/scholar?q=network+function+virtualization&hl=el&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar

Η **NFV** στα **5G** δίκτυα θα επιτρέψει σε ένα φυσικό δίκτυο να χωριστεί σε πολλά εικονικά δίκτυα τα οποία θα έχουν την δυνατότητα να υποστηρίζουν ανόμοια μεταξύ τους δίκτυα πρόσβασης (**RAN**) και πολλούς τύπους υπηρεσιών, δημιουργώντας το **HetNet** που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτά τα πολλαπλά δίκτυα θα μπορούν να ξεχωρίζουν μεταξύ τους στο επίπεδο ελέγχου και χρήστη, και αυτός είναι ο λόγος που ο χρήστης θα έχει την ίδια εμπειρία σαν να βρίσκονταν σε ένα φυσικά ξεχωριστό δίκτυο. Ο διαχωρισμός του δικτύου, θα παίζει καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα **νέας γενιάς** λόγω των πολλών περιπτώσεων χρήσης και της εισαγωγής νέων υπηρεσιών που έχουν να υποστηρίξουν. Επίσης, με τη χρήση του **NFV** στα 5^{ης} γενιάς δίκτυα, οι φορείς εκμετάλλευσης θα έχουν την δυνατότητα να εισάγουν γρήγορα νέες υπηρεσίες και να προγραμματίζουν τα δίκτυά τους σε πραγματικό χρόνο, βασισμένα όλα στις ανάγκες εξυπηρέτησης. Τέλος, η χαμηλότερη καθυστέρηση, αλλά και τα οφέλη



στην κινητικότητα του δικτύου, στο εύρος ζώνης, στην ασφάλεια του δικτύου, την ευελιξία και τη διαθεσιμότητα σε πόρους, αποτελούν κάποια από τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων δικτύων. Μέσω των εικονικών δικτύων όμως, οι χειριστές τους θα έχουν την δυνατότητα να κατανέμουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου κάθε φορά.

Όλα τα παραπάνω θα οδηγήσουν στην υλοποίηση της αρχιτεκτονικής του Mobile Edge Computing (MEC), η οποία αποσκοπεί στην προώθηση και την επιτάχυνση της προόδου του cloud computing στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η ιδέα αυτή ξεκίνησε από το Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) το οποίο ίδρυσε το **MEC Group Industry Specification Group (ISG)** τον Δεκέμβριο του 2014. Ο στόχος του ETSI MEC ISG είναι να δημιουργήσει ένα ανοιχτό περιβάλλον σε πλατφόρμες cloud πολλαπλών προμηθευτών που βρίσκονται στα όρια του RAN, προσβάσιμο από παρόχους υπηρεσιών σε μια προσπάθεια να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με τα κεντρικά υπολογιστικά περιβάλλοντα cloud, που είναι κυρίως η εξασφάλιση υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων με πολύ μικρές καθυστερήσεις. Αυτό οδηγεί στην δυνατότητα αξιοποίησης διαφόρων υποδομών δικτύων, ακόμα και παλαιότερων τεχνολογιών, αλλά και υποδομών που μπορούν να προσφέρουν μεγάλη υπολογιστική ισχύ στους χρήστες που έχουν την δυνατότητα να συνδέονται με αυτές χρησιμοποιώντας τες από απόσταση. Έτσι, το κύριο μέρος του δικτύου θα μπορέσει να αποσυμφορηθεί από την πιθανή μεγάλη κίνηση δεδομένων και να αξιοποιούνται αποδοτικότερα οι φυσικές υποδομές του δικτύου. Ουσιαστικά το **NFV** υπόσχεται στους παρόχους, μειωμένο κόστος, μεγαλύτερες ταχύτητες στις παρεχόμενες υπηρεσίες τους και μεγάλη ευελιξία.

Από τον Σεπτέμβριο του 2016, το **ETSI** άλλαξε την σημασία του “M” στο ακρωνύμιο **MEC** από “**Mobile**” σε “**Multi-edge**” έτσι ώστε να περιγράφεται καλύτερα η αρχιτεκτονική αυτή που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στα ετερογενή 5G δίκτυα. Με τον όρο “**Mobile**” περιέχονταν στο όνομα μόνο τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας ενώ με τον όρο “**Multi-edge**” περιέχεται στο όνομα η ιδέα της ενοποίησης όλων των υπαρχουσών τεχνολογιών δικτύωσης, όπως παραδείγματος χάριν το Wi-Fi. Η αρχιτεκτονική MEC θα προσφέρει μια ανοιχτή πλατφόρμα ορίων δικτύου, διευκολύνοντας την υλοποίηση πολλαπλών καινοτόμων και απαιτητικών υπηρεσιών με το να επιτρέπει την εξουσιοδότηση στους χρήστες των 5G δικτύων να κάνουν χρήση των δυνατοτήτων αποθήκευσης και επεξεργασίας απομακρυσμένων υποδομών. Θα δημιουργηθεί με αυτόν τον τρόπο ένα πολύ ευέλικτο εικονοποιημένο



δίκτυο που θα μπορεί να παρέχει προσωποποιημένες υπηρεσίες και δυνατότητες στους χρήστες, σύμφωνα με την λογική του Network Slicing που αναφέρθηκε παραπάνω. ([48])

Η αρχιτεκτονική του **NFV** ορίζεται από το **ETSI ISG NFV** και αποτελείται από 3 βασικά στοιχεία όπως φαίνεται και στην εικόνα 13 παρακάτω: ([52])

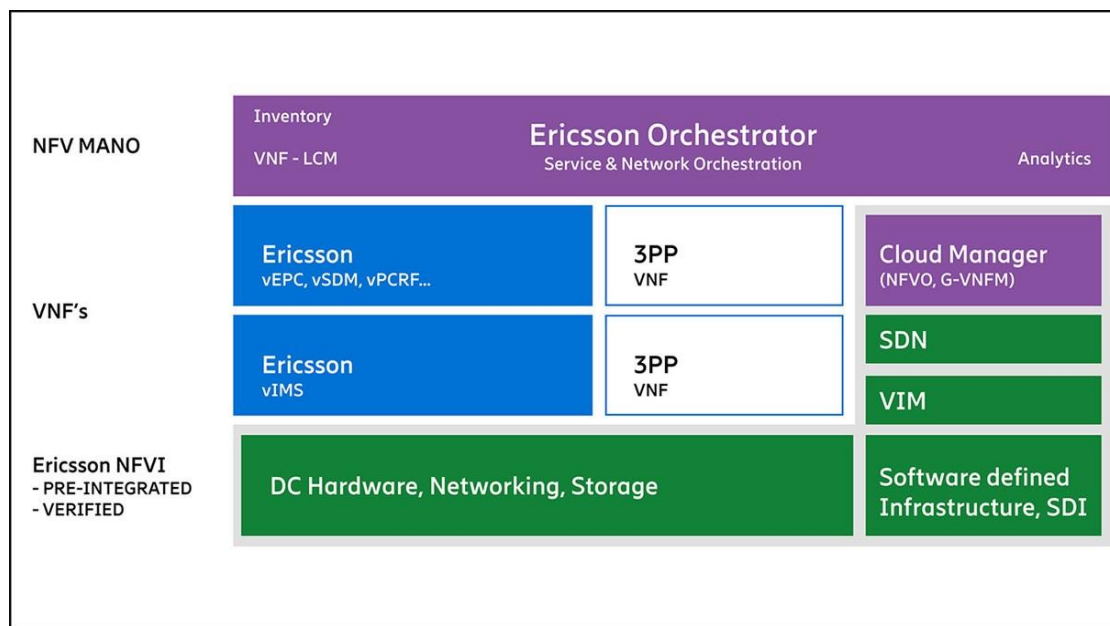
1. **NFVI (NFV Infrastructure)**: Αποτελεί μια **πλατφόρμα cloud**, που συνδυάζει τους πόρους του **hardware** και του **software**, πάνω στα οποία βασίζονται και αναπτύσσονται τα **VNFs** και διάφορες άλλες εφαρμογές. Η εικονικοποίηση επιτυγχάνεται μέσω layer μεταξύ φυσικών και εικονικών πόρων. Η υποδομή NFV χρησιμοποιεί τηλεπικοινωνίες, **OSS**⁵ (**Office of Strategic Services**), **BSS**⁶ (**Business support systems**), πολυμέσα και πολλούς τύπους εφαρμογών **IoT**. Τέλος, το **NFVI** ορίζεται από το **ETSI** ως επιμέρους τμήμα της αρχιτεκτονικής NFV. ([49])
2. **VNFs**: Στον πυρήνα (**core**) του **NFV**, βρίσκονται οι εικονικές λειτουργίες του δικτύου (**VNFs**) που διαχειρίζονται συγκεκριμένες λειτουργίες δικτύου όπως firewalls ή την εξισορρόπηση του φορτίου του δικτύου. Τα διάφορα **VNFs**, μπορούν να συνδεθούν ή ακόμη και να συνδυαστούν μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα πλήρως εικονοποιημένο περιβάλλον. Οι **VNF** λειτουργούν πάνω σε εικονικές μηχανές (**VM - Virtual Machine**) πάνω από την υποδομή υλικού δικτύωσης. Τέλος, οι διαφορές που εντοπίζει ο χρήστης σε σχέση με τις υπηρεσίες που του είναι διαθέσιμες είτε από **εικονικές μηχανές** είτε από φυσικές δομές, είναι μηδαμινές, οπότε και μη αντιληπτές προς αυτόν. ([51])
3. **NFV MANO (Management and Orchestration)**: Αυτός ο όρος περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές, για τη διαχείριση, την λειτουργικότητα, την διαμόρφωση, τον συντονισμό και την

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Office_of_Strategic_Services

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Business_support_system



διαχείριση των συστημάτων πληροφορικής και λογισμικού των φυσικών και εικονοποιημένων πόρων. Τέλος, στο **NFV MANO** ορίζεται και η “ζωή” μιας VNF. ([52])

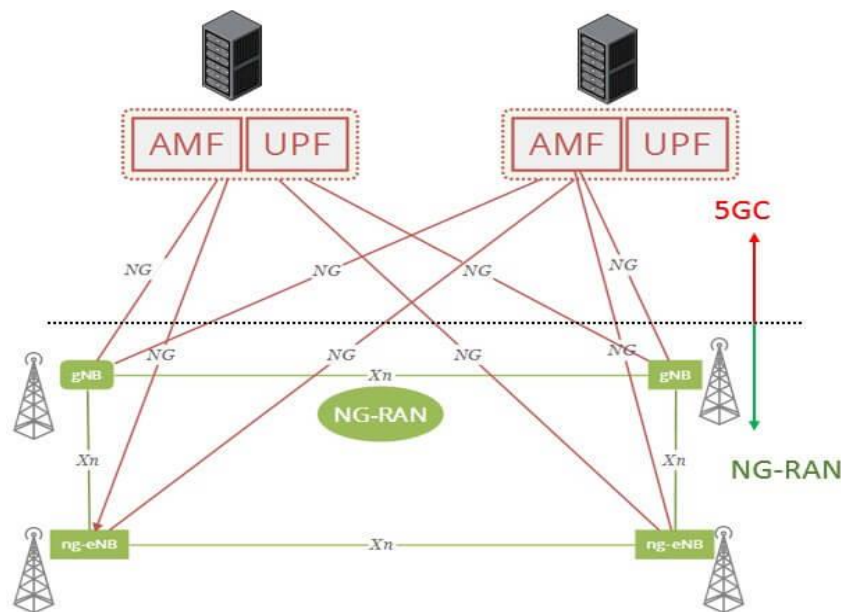


Εικόνα 13 - NFV MANO

Πηγή: https://www.ericsson.com/en/digital-services/trending/network-functions-virtualization?gclid=EAlaIqobChMlgN_p5_Sz6AIVGPhRCh2E6Q1QEAAAYAiAAEgIP6PD_BwE&gclsrc=aw.ds

2.2 Δίκτυο Πρόσβασης 5G RAN

Στην παρακάτω εικόνα, κατοπτρίζεται το νέο 5G RAN ([19], [20], [21]), κατά το οποίο οι νέοι κόμβοι είναι οι **gNB** που συνδέονται με το **5GC** μέσω διαφόρων διεπαφών. Η επικοινωνία μεταξύ των **gNB** πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής **Xn** και είναι σε αντιστοιχία με την διεπαφή **X2** στο υπάρχον δίκτυο 4G.

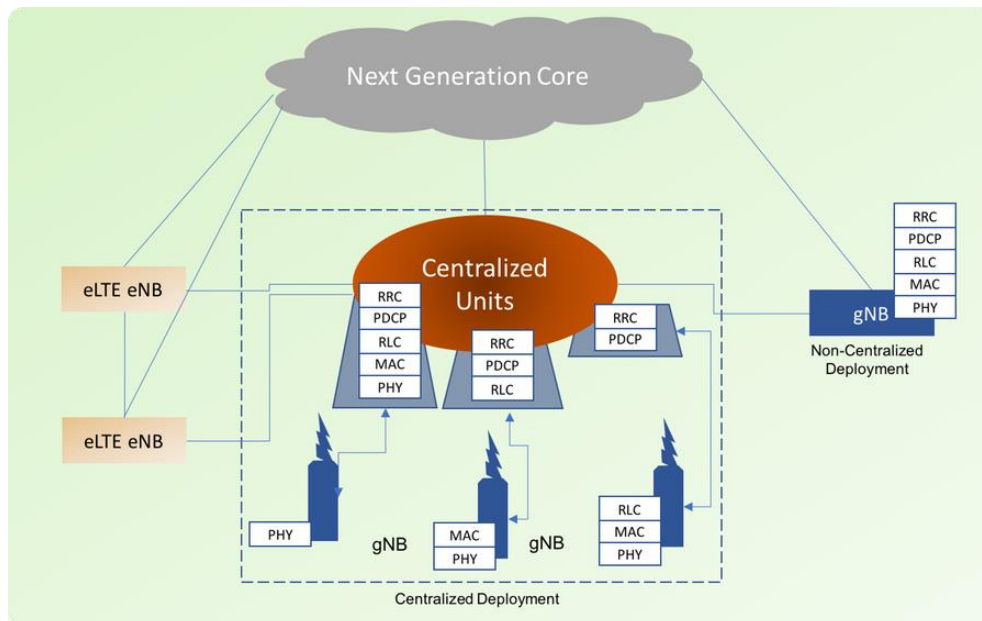


Εικόνα 14 - Αρχιτεκτονική 5G RAN

Πηγή:<https://www.ttswireless.com/5g-overview-part1-introduction/>

Εκτός από τους κόμβους gNB, παρατηρούμε ότι υπάρχουν και οι **ng-eNB** (eLTE eNodeBs), οι οποίοι ουσιαστικά αποτελούν τους παλιούς κόμβους του δικτύου 4G, αλλά έχουν αναβαθμιστεί, εξ' ου και το αγγλικό γράμμα 'e' (**evolved**), ώστε να πληρούν τις προϋποθέσεις λειτουργίας του δικτύου 5G.

Η προτυποποίηση για την πρακτική εφαρμογή των 5G βρίσκεται στο πέρας της, σύμφωνα και με το πέρας του **Release 16** της **3GPP**. Αυτό που εναπομένει, είναι οι μαζικές και ολοκληρωτικές διαδικασίες, οι οποίες θα οδηγήσουν στην πρακτική και λειτουργική εφαρμογή των δικτύων 5G σε όλο τον κόσμο. Σαφώς, η προτυποποίηση έχει γίνει και αναμένεται να συνεχίσει να γίνεται στο μελλοντικό **Release 17**, αλλά στην πράξη έχουμε πολλές διαφορετικές διαδικασίες και τρόπους λειτουργίας ενός 5G δικτύου, όπου από την μια μεριά τα **gNBs** θα έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας με το δίκτυο κορμού **5GC** για όλο το σύνολο των λειτουργιών τους, και από την άλλη, έχουμε και αυτή της κεντρικής ανάπτυξης του δικτύου, κατά την οποία οι λειτουργίες των ανωτέρων στρωμάτων των gNB θα εκτελούνται κάτω από την κεντρική διαχείριση (**5GC**) και οι άλλες στο **gNB**.

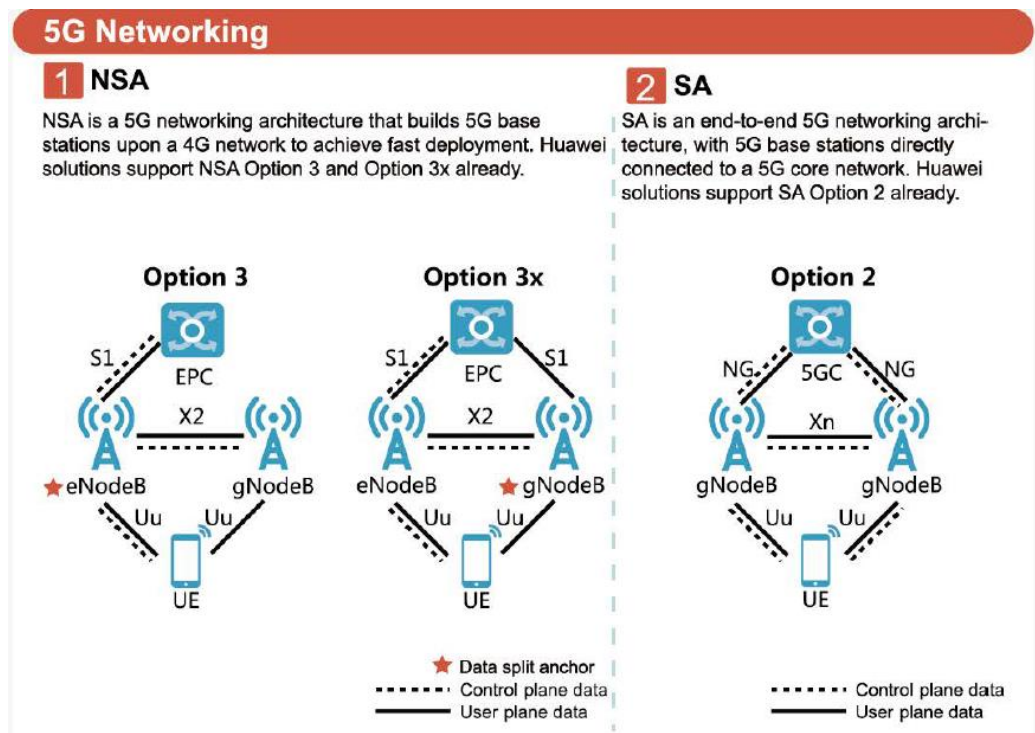


Εικόνα 15 - Centralized and non-Centralized Deployment

Πηγή:<https://telecomtraining.net/app/blog/12>

Στην παραπάνω εικόνα συνοψίζονται οι δύο εναλλακτικές μέθοδοι ανάπτυξης του νέου 5G RAN, αυτή της κεντρικής (**Centralized**) και της μη κεντρικής (**non-Centralized**) ανάπτυξης.

Επίσης, εκτός από την Centralized και non-Centralized μέθοδο, έχουμε και τις επιλογές ανάπτυξης της αυτόνομης (**Standalone**) και μη αυτόνομης (**Non-Standalone**) σύνδεσης. Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο, το gNB συνδέεται απευθείας με τον κορμό 5GC μέσω των αντίστοιχων διεπαφών, ενώ κατά την δεύτερη μέθοδο της μη αυτόνομης (Non-Standalone) σύνδεσης, το gNB πρώτα συνδέεται με ένα eLTE eNB και εν συνεχεία στο εκάστοτε EPC ή 5GC του δικτύου. Όλα τα παραπάνω εκτός από πειραματική και πιλοτική προτυποποίηση, δεν έχουν λάβει χώρα σε πρακτικό επίπεδο σε όλο τον κόσμο, οπότε και δεν έχουν οριστικοποιηθεί. Παρακάτω, παρατηρούμε την αυτόνομη και μη αυτόνομη σύνδεση.



Εικόνα 16 - Standalone & Non_Standalone

Πηγή: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/5g-sa-standalone-vs-nsa-non-standalone/thread/582272-100305>

2.2.1 C-RAN

Το **Cloud Radio Access Network (C-RAN)** αποτελεί ένα αρκετά πιο αποδοτικό δίκτυο, καθώς συνδυάζει τις τεχνολογίες του **IT** τομέα (Information Technology) με αυτές της ασύρματης τεχνολογίας και μπορεί και εντάσσει την τεχνική του **Cloud Computing** στο **RAN**. Επίσης, σε μια τέτοια τεχνολογία, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας είναι αρκετά πιο μικρό. Κύριες οντότητες της αρχιτεκτονικής ενός C-RAN δικτύου αποτελούν, τα **Remote Radio Heads (RRH)**, τα **Baseband Units (BBU)** και το Fronthaul/transport network. ([22], [23])

Γενικότερα ο βασικός στόχος του C-RAN είναι να περιέχει αρκετά **Baseband Units** που περιέχονται σε ένα **base station** και στη συνέχεια σε ένα **BBU pool** (το σημείο των διαθέσιμων προς χρήση **BBU**) ,έχοντας έτσι τη δυνατότητα να μοιράζονται από διαφορετικά base stations. Έτσι το δίκτυο καταφέρνει



και προσαρμόζει καλύτερα τους πόρους του και υπάρχει καλύτερη διαχείριση σε περίπτωση μη αναμενόμενης κίνησης.

2.2.2 Παρουσίαση των σημαντικότερων τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών στο δίκτυο Πρόσβασης 5^{ης} γενιάς

Παρακάτω θα αναλύσουμε με πιο λεπτομερή τρόπο, κάποιες από τις τεχνολογικές υπεροχές των δικτύων 5G που αναφέραμε παραπάνω αρκετά επιγραμματικά και θα καταλάβουμε το λόγο που η αρχιτεκτονική και οι τεχνολογίες τους τα κάνουν πραγματικά ξεχωριστά. Θα αναλύσουμε αυτές τις νέες τεχνολογίες και θα αναφερθούμε σε καινούργιες καινοτομίες ικανές να πάνε τον κόσμο του Internet ένα βήμα παρακάτω.

2.2.2.1 Massive MIMO

Για να είναι εφικτά και υλοποιήσιμα στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς τα παραπάνω και να είναι αποδοτικές οι μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης, είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων κεραιών, τα οποία να μπορούν να δίνουν την δυνατότητα στον εξοπλισμό του δικτύου και των χρηστών της πολλαπλής εισόδου και πολλαπλής εξόδου (**Multiple Input Multiple Output – MIMO**) σημάτων. Δηλαδή, τα συστήματα μπορούν να αποστέλλουν και να κάνουν λήψη πολλών σημάτων ταυτόχρονα. Τέτοια MIMO συστήματα έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς. Στα 5G δίκτυα σχεδιάζεται μία εξέλιξη των MIMO συστημάτων, η τεχνολογία massive MIMO. Αρχικά για την κατανόηση της τεχνολογίας **massive MIMO** ([24], [25]) θα αναφερθούμε στη λειτουργία μιας **MIMO** κεραίας και τις παρεχόμενες δυνατότητες.

Υπήρξε στιγμή που ο όρος “**MIMO**” στη διάλεκτο των ασύρματων δικτύων αναφερόταν αποκλειστικά στην ενσωμάτωση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και στον δέκτη. Σήμερα χρησιμοποιούμε τον όρο “**MIMO**” για να αναφερθούμε στην τεχνική για αποστολή και λήψη περισσότερων από ένα σημάτων μεταφοράς δεδομένων ταυτόχρονα, μέσω του καναλιού της ίδιας συχνότητας, έχοντας εκμεταλλευτεί την τεχνική της πολλαπλής μετάδοσης. Το **MIMO** διαφέρει θεμελιωδώς από τις τεχνικές έξυπνης κεραίας που αναπτύσσονται για την ενίσχυση της απόδοσης ενός σήματος δεδομένων, όπως το **beamforming** και το **diversity**.



Η πολλαπλή είσοδος και η πολλαπλή έξοδος ή αλλιώς **MIMO (Multiple Input Multiple Output)**, είναι μια τεχνική που πολλαπλασιάζει την χωρητικότητα ενός ραδιοζεύκτη έχοντας σε λειτουργία την εκπομπή και την λήψη πολλαπλών κεραιών για την εκμετάλλευση της πολλαπλής διάδοσης. Το **MIMO** είναι το προκάτοχο στοιχείο των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, όπως και τα πρότυπα **IEEE 802.11n (Wi-Fi)**, **IEEE 802.11ac (Wi-Fi)**, **HSPA + (3G)**, **WiMAX (4G)** και **Long Term Evolution (LTE 4G)**.

Το **MIMO** σαν τεχνολογία μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρεις ξεχωριστές κατηγορίες λειτουργίας των συστημάτων του: χωρική πολυπλεξία (**SM**), **precoding** και κωδικοποίηση ποικιλομορφίας.

Κατά την χωρική πολυπλεξία, απαιτείται διαμόρφωση κεραίας **MIMO**. Ένα σήμα υψηλής ταχύτητας διαχωρίζεται σε πολλαπλά σήματα χαμηλότερου ρυθμού όπου το κάθε σήμα έχει τη δυνατότητα να μεταδίδεται από ξεχωριστή κεραία εκπομπής αλλά στο ίδιο κανάλι συχνότητας. Εάν αυτά τα σήματα φτάσουν στη συστοιχία κεραίας δέκτη με επαρκώς διαφορετικές χωρικές υπογραφές και ο δέκτης έχει ακριβή **CSI (Channel state information)**, μπορεί να διαχωρίσει αυτά τα ρεύματα σε (σχεδόν) παράλληλα κανάλια. Η χωρική πολυπλεξία είναι μια πολύ ισχυρή τεχνική για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού σε υψηλότερες αναλογίες σήματος προς θόρυβο (**SNR**). Ο μέγιστος αριθμός χωρικών ρευμάτων περιορίζεται από το μικρότερο αριθμό κεραιών στον πομπό ή τον δέκτη. Η χωρική πολυπλεξία μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς **CSI** στον πομπό, αλλά μπορεί να συνδυαστεί με **precoding** εάν είναι διαθέσιμο το **CSI**. Η χωρική πολυπλεξία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλαπλούς δέκτες, γνωστή ως πολλαπλή πρόσβαση διάσπασης χώρου ή **MIMO** πολλαπλών χρηστών, οπότε απαιτείται **CSI** στον πομπό. Ο προγραμματισμός δεκτών με διαφορετικές χωρικές υπογραφές επιτρέπει καλό διαχωρισμό.

Η προ-κωδικοποίηση (**precoding**) είναι μια σχηματοποίηση δέσμης πολλαπλών ροών. Θεωρείται ότι είναι όλη η χωρική επεξεργασία που συμβαίνει στον πομπό. Στη διαμόρφωση δέσμης (**beamforming-μονής ροής**), το ένα και μοναδικό σήμα εκπέμπεται από κάθε μία από τις κεραίες μετάδοσης με την ξεχωριστή φάση το καθένα και αυξάνεται η στάθμη, ώστε να γίνεται μεγιστοποίηση της ισχύος του σήματος στην είσοδο του δέκτη. Το **beamforming** μπορεί να αυξήσει το κέρδος του ληφθέντος σήματος κάνοντας τα σήματα που εκπέμπονται από διαφορετικές κεραίες να συσσωρεύονται κερδοφόρα και να μειώνεται το φαινόμενο αναμετάδοσης πολλαπλών διαδρομών των σημάτων. Κατά τη διάδοση της οπτικής επαφής, το **beamforming** έχει ως αποτέλεσμα ένα καλά καθορισμένο μοτίβο



κατεύθυνσης. Ωστόσο, οι συμβατικές δοκοί που χρησιμοποιούνται δεν αποτελούν καλή αναλογία στα κυψελοειδή δίκτυα, τα οποία χαρακτηρίζονται από πολλαπλή διάδοση. Όταν ο δέκτης έχει πολλαπλές κεραίες, το **beamforming** δεν μπορεί ταυτόχρονα να μεγιστοποιεί το επίπεδο σήματος σε όλες τις κεραίες λήψης και η προκαταρκτική λειτουργία με πολλαπλές ροές είναι συχνά ευεργετική.

Οι τεχνικές κωδικοποίησης πολυμορφίας χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει γνώση καναλιού στον πομπό, εξάλλου και η λέξη πολυμορφία που χαρακτηρίζει την 3^η κατηγορία της **MIMO**. Στις μεθόδους διαφορετικότητας, έχουμε μετάδοση ενός μόνο ρεύματος (σε αντίθεση με τις πολλαπλές ροές στη χωρική πολυπλεξία), αλλά το σήμα κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας την τεχνική στο διάστημα του χρόνου που ονομάζεται κωδικοποίηση διαστήματος-χρόνου (**TDM-Time Division Multiplexing**). Το σήμα εκπέμπεται από κάθε μία από τις κεραίες μετάδοσης με πλήρως ή και σχεδόν ορθογώνια κωδικοποίηση (**OFDM**). Η κωδικοποίηση πολυμορφίας (**diversity coding**) εκμεταλλεύεται την ανεξάρτητη εξασθένιση των πολλαπλών ζεύξεων κεραίας για την ενίσχυση της ποικιλομορφίας των σημάτων. Επίσης, το diversity coding μπορεί να συνδυαστεί με τη χωρική πολυπλεξία (**spatial multiplexing**) μόνο όμως σε περίπτωση που είναι διαθέσιμη κάποια γνώση του καναλιού στον πομπό.

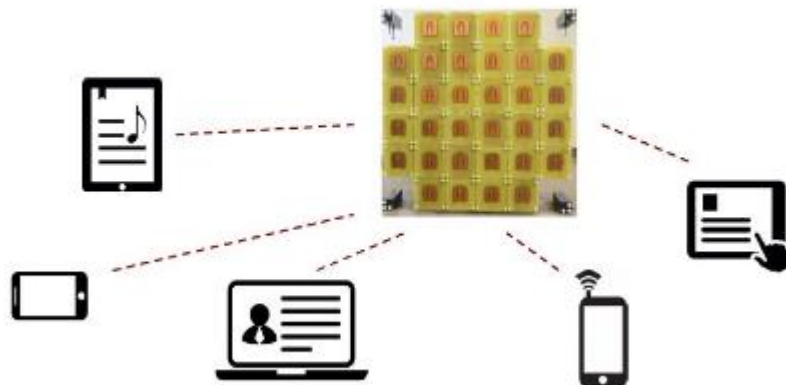
Τώρα, η χρήση συστοιχιών κεραιών πολύ μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από ότι σήμερα μπορεί να προσφέρει αυξημένη διαφορετικότητα (**diversity**) με μειωμένες απώλειες διάδοσης. Η τεχνολογία αυτή που διακατέχει αυτές τις δυνατότητες ονομάζεται **mMIMO (massive MIMO)** και επιτρέπει το **beamforming** με πολύ **μεγαλύτερη ακρίβεια**, ενώ θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμη στις **mmWave** συχνότητες (που θα αναφερθούμε λεπτομερέστερα παρακάτω), όπου το φυσικό μέγεθος των κεραιών μειώνεται σημαντικά.

Η δυνατότητα της **mMIMO** είναι ότι μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα κατά αρκετές τάξεις μεγέθους και να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση της ακτινοβολούμενης ισχύος που παρέχεται. Επίσης, αυξάνει τους βαθμούς ελευθερίας (**DoF - Degrees of Freedom**) που μπορούν να αξιοποιηθούν όταν η κατάσταση του ασύρματου καναλιού είναι διαθέσιμη.

Βασικές τεχνολογικές ιδιαιτερότητες που διακατέχει το **massive MIMO** συγκριτικά με τον προκάτοχό του είναι:



- 1) Πλήρης ψηφιακή επεξεργασία διότι κάθε κεραία έχει τη δική της RF (**Radio Frequency**). Τα σήματα που εισέρχονται από όλες τις κεραίες σε κάθε σταθμό βάσης επεξεργάζονται συνολικά καθολικά. Κύρια πλεονεκτήματα της πλήρους ψηφιακής επεξεργασίας είναι η αποφυγή συγκεκριμένων υποθέσεων στο κανάλι διάδοσης, η δυνατότητα μέτρησης της πλήρους απόκρισης καναλιού στην ανερχόμενη ζεύξη (**uplink**) και η γρήγορη ανταπόκριση στις αλλαγές στο κανάλι. Είναι δεδομένο με τις εκτιμήσεις που εξέρχονται, ότι η πλήρης ψηφιακή επεξεργασία μπορεί όχι μόνο να προσφέρει ανώτερη απόδοση αλλά και καλύτερη ενεργειακή απόδοση ενισχύοντας έτσι τις δυνατότητες των πράσινων δικτύων, μια δυνατότητα που μπορεί να ενισχυθεί από τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη προσαρμοσμένων κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος (**low-power-circuits**).
- 2) Η εξάρτηση της τεχνολογίας από την αμοιβαιότητα της διάδοσης και της λειτουργίας **TDD**, επιτρέπουν την εκτίμηση των καναλιών κατερχόμενης ζεύξης μέσω της ανερχόμενης ζεύξης και την αποφυγή της εξάρτησης από προηγούμενη ή δομική γνώση του διαύλου διάδοσης για την εκτίμηση.
- 3) Το **mMIMO** λειτουργεί εξίσου καλά με τη μετάδοση ενός φορέα (**single-carrier**) και της τεχνολογίας **OFDM**. Συγκεκριμένα, η συζευγμένη διαμόρφωση δέσμης με **OFDM** είναι ισοδύναμη με την αντιστροφή χρόνου σε ένα σύστημα ενός φορέα (**single-carrier**).
- 4) Το **channel hardening** (σκληρυνση του καναλιού σημαίνει ότι ένα κανάλι εξασθένισης συμπεριφέρεται σαν να ήταν ένα κανάλι που δεν έχει εξασθένιση), απομακρύνει ευλαβικά τις επιπτώσεις της γρήγορης εξασθένισης και κάθε σύνδεσμος τερματικού-σταθμού βάσης γίνεται ένα κανάλι ενός κλιμακωτού διαύλου, του οποίου το κέρδος σταθεροποιείται σε μια σταθερή και ανεξάρτητη από τη συχνότητα σταθερά. Με τον τρόπο αυτό απλοποιείται σημαντικά το πρόβλημα της κατανομής πόρων.
- 5) Η ομοιόμορφη παροχή μιας υπηρεσίας με καλή ποιότητα σε όλους τους τερματικούς σταθμούς σε ένα συγκεκριμένο κελί. Κάποιοι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος επιτυγχάνουν μέγιστη ακρίβεια και δικαιοσύνη παροχής των υπηρεσιών μεταξύ των τερματικών.
- 6) Η αυτόνομη λειτουργία των σταθμών βάσης, χωρίς την κατανομή των δεδομένων ή των πληροφοριών κατάστασης καναλιών με άλλα κελιά (**cells**) και χωρίς απαιτήσεις συγχρονισμού αυτών.
- 7) Η δυνατότητα αύξησης της ακρίβειας των διεπαφών πομποδέκτη, καθώς και η μείωση των υπολογισμών των ψηφιακών επεξεργασιών και της αναπαράστασης των αριθμών.



Εικόνα 17 - Το μαζικό MIMO εκμεταλλεύεται μεγάλες σειρές κεραίας για να πολλαπλασιάσει πολλά τερματικά

Πηγή: <https://blog.sitm.ac.in/massive-mimo-in-5g/>

Μαζί με τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας, έχουμε και κάποιους λειτουργικούς περιορισμούς. Η τεχνολογία **mMIMO** είναι κλιμακωτή σε σχέση με τις συμβατικές κεραίες, οπότε οι πρόσθετες κεραίες πάντα διευρύνουν το πεδίο. Το όριο υπαγορεύεται καθαρά από την κινητικότητα και το κόστος, οπότε είναι στην κρίση των εκάστοτε μηχανικών η δαπανηρή χρήση τους: κάθε διάστημα συνοχής (η συνοχή του χρόνου πολλαπλασιαζόμενη με την συνοχή του εύρους ζώνης συχνοτήτων) χρειάζεται να φιλοξενήσει την πιλοτική ανερχόμενη ζεύξη και το ωφέλιμο φορτίο στις διευθύνσεις ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Η υψηλότερη κινητικότητα και η μικρότερη συνοχή του καναλιού μπορούν να διατεθούν. Στα περιβάλλοντα μεγάλης κινητικότητας των **macro-cellular**, αυτό περιορίζει το κέρδος πολυπλεξίας σε μερικές δωδεκάδες τερματικών, αλλά σε περιβάλλοντα με λιγότερη ή καθόλου κινητικότητα, εκατοντάδες ή και χιλιάδες τερματικά θα μπορούσαν να πολυπλέκονται. Ο αριθμός των κεραιών που τελικά αποδεικνύεται χρήσιμος κλιμακώνεται παρόμοια και είναι πιθανό να περιοριστεί σε μία ή μερικές εκατοντάδες στα **macro-cellular**, αλλά ενδεχομένως σε χιλιάδες κεραίες σε εφαρμογές με χαμηλή κινητικότητα. Επίσης η τεχνική **beamforming** απαιτεί μεγάλη ποσότητα πληροφοριών καναλιού και είναι ιδιαίτερα απαιτητική για την κάτω ζεύξη. Συνεπώς, η **mMIMO** θα συναντήσει δυσκολίες στα δίκτυα διπλεξίας με διαίρεση κατά συχνότητα (Frequency Division Duplex - **FDD**) αλλά θα είναι **ωφέλιμη** για τα δίκτυα διπλεξίας με διαίρεση στο χρόνο (Time Division Duplex - **TDD**).



Στο άμεσο μέλλον το **mmMIMO** μπορεί να προσφέρει βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες και πολλές από τις σημερινές υπηρεσίες με βελτιωμένη απόκριση, ποιότητα και αξιοπιστία μετάδοσης δεδομένων. Τα νέα δίκτυα αναμένεται να υποστηρίξουν μια σημαντική αύξηση ασύρματων υπηρεσιών σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η ψυχαγωγία, τα έξυπνα σπίτια και τις πόλεις, τα smart grid, την κατασκευή και πολλά άλλα. Η τεχνολογία **mmMIMO** μπορεί να προσαρμοστεί για να υποστηρίξει έναν τεράστιο αριθμό συσκευών επικοινωνίας και τερματικών συσκευών τύπου μαζικής μηχανής (**MTC**). Επίσης, είναι μια εξαιρετική υποψήφια τεχνολογία για να πραγματοποιήσει την **Ultra Reliable Communication** των δικτύων 5G (Το URC αναφέρεται στην παροχή ενός ορισμένου επιπέδου υπηρεσίας επικοινωνίας σχεδόν στο 100% του χρόνου), καθώς μπορεί να δημιουργήσει πολύ ισχυρά φυσικά **links** ανάμεσα στις τερματικές συσκευές και τους σταθμούς αλλά και αναμεταξύ τους.

2.2.2.2 Μικροκυματική ζώνη (mmWave)

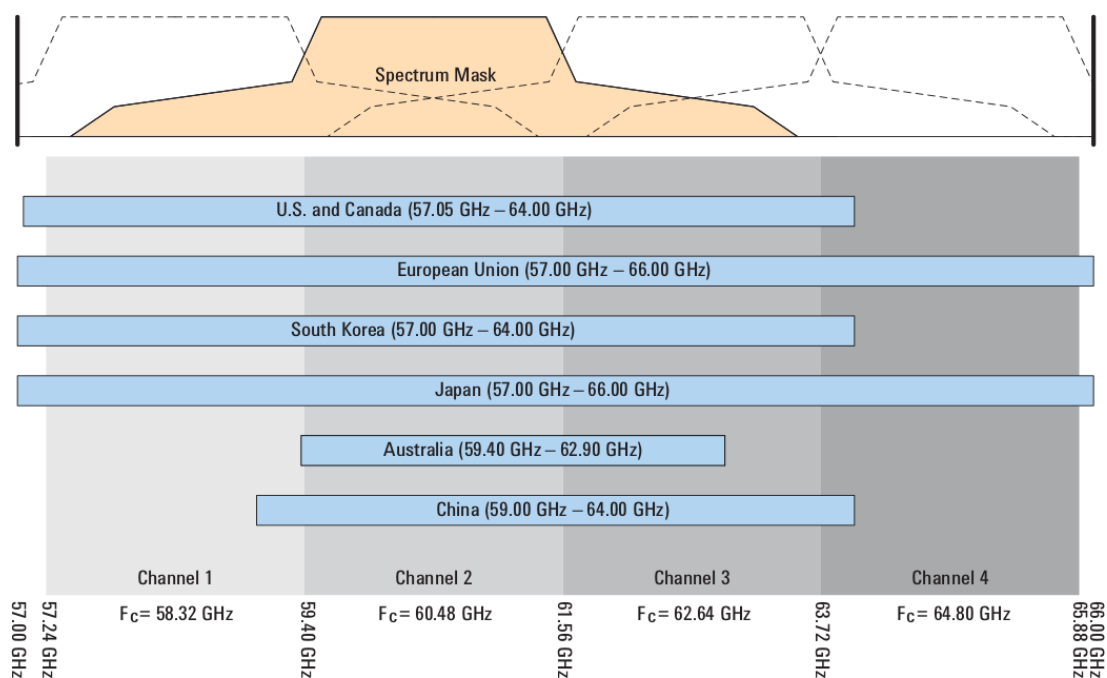
Ένας από τους κύριους στόχους για την επόμενη γενιά στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η προσπάθεια για μεγιστοποίηση της χωρητικότητας, λόγω της αύξησης του αριθμού των έξυπνων συσκευών. Όχι μόνο θα συνεχίσουμε να βλέπουμε συνεχή βελτίωση των ρυθμών σύνδεσης δεδομένων, αλλά και νέες προόδους όσον αφορά την αξιοποίηση των πόρων πεπερασμένου φάσματος. Δεδομένης της εκθετικής αύξησης της ζήτησης για μεγαλύτερο εύρος φάσματος, το **5G** παρουσιάζει περισσότερες προκλήσεις απ' ό,τι θα νομίζαμε ότι θα είχαμε σύμφωνα με νόμο του **Moore**, με τον οποίο πιστεύαμε ότι θα αυξήσει μαγικά τις ταχύτητες λήψης των υπηρεσιών ροής βίντεο και όλων των πολυμεσικών υπηρεσιών.

Λόγω έλλειψης φάσματος, γίνεται αναζήτηση σε φασματικές περιοχές ώστε να παρέχονται ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες στους χρήστες του δικτύου και αναφέρεται σε σήματα με μήκος κύματος της τάξεως του χιλιοστού ή διαφορετικά στην κοινή ορολογία **mmWave** ζώνη (millimetre – wave-length) ([27]-- [32]). Έχει την δυνατότητα να παρέχει διευρυμένο εύρος ζώνης για μετάδοση και συγκεκριμένα άνω των **30 GHz** και με αυτόν τον τρόπο δεν υπάρχουν προβλήματα συμφόρησης όπως στις περιοχές των μικροκυματικών συχνοτήτων. Γύρω από τα **60 GHz** παρουσιάζεται το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς σε αυτή την περιοχή υπάρχει ένα ελεύθερο εύρος τιμών της τάξης των **3 GHz** (από 59-62 **GHz**) παγκοσμίως. Από την άλλη όμως, εξαιτίας των υψηλών απωλειών διάδοσης και διείσδυσης που υπάρχουν εξαιτίας των τοίχων, το μέγεθος της κυψέλης του συστήματος είναι



αναγκαστικά πολύ μικρό. Το IEEE 802.11ad είναι ένα **WLAN** πρωτόκολλο που θα ευδοκιμούσε σε αυτές τις συχνότητες και θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί τις μεθόδους της τεχνολογίας **RoF** (Radio over Fiber) ώστε να έχουμε αύξηση της χωρητικότητας και της κάλυψης. Σύμφωνα με την περιγραφή που ορίζεται από το **IEEE 802.11ad πρωτόκολλο**, για το **mm-wave** φυσικού επιπέδου έχουμε:

1. **VHT (very high throughput)**: η φασματική περιοχή είναι κάτω από τα **6 GHz** και δεν συμπεριλαμβάνει την περιοχή γύρω από τα **2.4 GHz**.
2. **DMG (directional multi-gigabit)**: υποστηρίζει κάθε φασματική περιοχή που έχει ένα και μοναδικό κανάλι, το οποίο ξεκινάει σε συχνότητα πάνω από τα **45 GHz**. Στην παράγραφο της **IEEE 802.11ad-2012** προσδιορίζεται το **physical layer**, το οποίο υλοποιείται συνήθως στα **60 GHz** και στην φασματική περιοχή **57-66 GHz**.



Εικόνα 18 -Ελεύθερες συχνότητες και ανάθεση αυτών ανά περιοχή

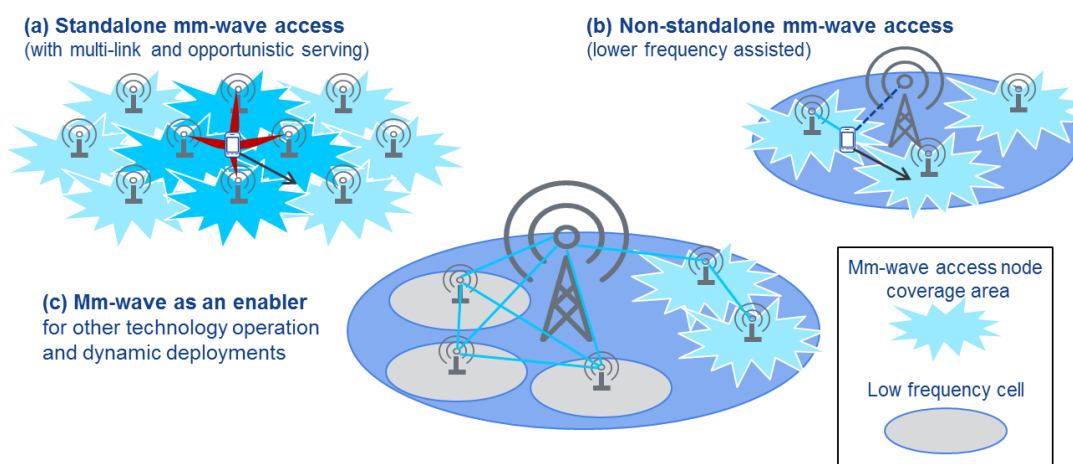
Πηγή: <https://www.cnx-software.com/2016/03/07/the-first-devices-and-routers-with-wifi-802-11ad-delivering-up-7gbits-transfer-rates-at-60-ghz-will-be-available-this-year/>

Παραπάνω στο σχήμα, παρατηρούμε τις ελεύθερες περιοχές φάσματος στις περιοχές αυτές και τον χωρισμό των καναλιών σύμφωνα με την προτυποποίηση της ITU-R. Επίσης, η ITU-R ανέθεσε το εύρος αυτών των καναλιών στην τάξη των **2.16 GHz** με κεντρικές συχνότητες τα **58.32 GHz**, **60.48 GHz**, **62.64 GHz** και **64.80 GHz** αντίστοιχα. Έτσι σύμφωνα και με την εικόνα παραπάνω ([50]), τα



κανάλια δεν είναι όλα ελεύθερα και σε όλες τις περιοχές και γι' αυτό ορίστηκαν οι συχνότητες του **Channel 2** ως οι βασικές για τον εξοπλισμό. Η τεχνολογία αυτή προτείνεται για χρήση στο σύστημα **5G** και ήδη γίνεται η χρήση του από αρκετά **5G – PPP projects** (5G XHAUL, FANTASTIC 5G κ.λπ.).

Στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική θα χρησιμοποιηθούν δύο λειτουργικές εφαρμογές, αυτόνομη (**standalone**) και μη αυτόνομη (**non-standalone**). Έτσι έχουμε την απαραίτητη ανάπτυξη και την επίλυση αναξιόπιστης (διακοπτόμενης) κάλυψης, λύνοντας με αυτόν τον τρόπο τα θέματα φορητότητας. Αυτή η αρχιτεκτονική χρησιμοποιείται για την από κοινού ανάπτυξη των κόμβων **mm-Wave** με κόμβους που λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες.



Εικόνα 19 - Αυτόνομη και μη αυτόνομη πρόσβαση mm-Wave

Πηγή: <https://5g-mmmagic.eu/project/>

Στο πρώτο σενάριο λειτουργίας, θα βελτιστοποιηθεί ο συντονισμός **AP** των σημείων προσπέλασης ώστε να περιοριστεί η κάλυψη και τα ζητήματα φορητότητας που έχουν συσχέτιση με την διάδοση των **mm-Waves**. Στο δεύτερο σενάριο (μη αυτόνομη ανάπτυξη) η τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης Radio Access Technology (**RAT**), χρησιμοποιεί μόνο τις **mm-Wave** συχνότητες και την ανάπτυξη των σημείων πρόσβασης **APs**.

Εκτός της εξυπηρέτησης του αυξανόμενου αριθμού χρηστών κινητής τηλεφωνίας και έξυπνων συσκευών, τα δίκτυα νέας γενιάς (**5G**) πρέπει επίσης να μπορούν να φιλοξενήσουν μια σειρά συνδεδεμένων συσκευών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (**IoT**), διατηρώντας παράλληλα την αξιοπιστία του δικτύου, βελτιώνοντας την ασφάλεια και διατηρώντας τον έλεγχο του κόστους του



δικτύου εξυπηρετώντας την ιδιότητά τους ως πράσινα δίκτυα. Η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των **5G** θα απαιτήσει μια σειρά αποφάσεων ανταλλαγής απόψεων για την εξισορρόπηση των αναγκών των εφαρμογών κρίσιμων για την κοινωνία και την υγεία, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η άμυνα και τα αυτόνομα αυτοκίνητα, αναλογικά με τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για χωρητικότητα δικτύου.

Για να αξιοποιήσουμε πλήρως τα **5G** δίκτυα, θα πρέπει να κάνουμε περισσότερα με το υπάρχον φάσμα που είναι κάτω από τα **6 GHz** και να βρούμε λύσεις στις τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με το πρόσφατα διαθέσιμο φάσμα υψηλής συχνότητας πάνω από **60 GHz**, που ονομάζεται **mmWave** (χιλιοστομετρικό κύμα). Αυτό το φάσμα προσφέρει εντυπωσιακά μεγάλο εύρος ζώνης φάσματος, αλλά εκμεταλλευόμενοι τα πλεονεκτήματα του προκύπτουν και απαιτούνται νέες προσεγγίσεις.

Οι χιλιοστομετρικές (**mmWave**) επικοινωνίες κυμάτων χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για τις σταθερές συνδέσεις μεταξύ πύργων κυψελών, που καλούνται **backhaul**. Αυτά τα συστήματα έχουν συχνά σταθερά πιάτα κεραίας που τοποθετούνται έτσι το ένα στο άλλο και ρυθμίζονται ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή μεταξύ των συνδέσεων. Τα πιάτα δεν έχουν νόημα σε έναν κόσμο νέων δικτύων, όπου όλα είναι εν κινήσει και οι κεραίες θα πρέπει να είναι μικροσκοπικές για να μπορούν να ενσωματωθούν στα έξυπνα κινητά τηλέφωνα αλλά και σε άλλες έξυπνες συσκευές.

Τεχνολογίες που πρόσφατα αφορούσαν μόνο στρατιωτικές εφαρμογές θα πρέπει να αξιοποιηθούν για να καταστήσουν το **mmWave** χρήσιμο για καθημερινούς χρήστες κινητών τηλεφώνων. Αυτές οι νέες προσεγγίσεις για τη μεγιστοποίηση του διαθέσιμου φάσματος περιλαμβάνουν τη ψηφιακή μορφοποίηση ακτίνων σε ηλεκτροκίνητες δέσμες επικοινωνιών και τη χωροχρονική-προσαρμοστική επεξεργασία (**STAP**) για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις των συνθηκών του καναλιού **RF**. Καθώς οι υπάρχουσες κυψελοειδείς ζώνες **LTE** συνεχίζουν να βελτιώνονται, θα είναι απαραίτητη η δυναμική εξισορρόπηση και η ολοκλήρωση των ζωνών (**band**) και με την υποδομή που προϋπάρχει.

Παρόλο που το τελευταίο πρότυπο **Wi-Fi 802. 11ad WiGig** δεν έχει εισαχθεί για τα καλά στο εμπόριο λειτουργεί ήδη στη ζώνη **mmWave** των **60 GHz**. Ενσωματώνει νέες προόδους που απαιτούνται από τα δίκτυα νέας γενιάς, όπως η ψηφιακή διεύθυνση δέσμης, παρέχει ένα καλό τεχνικό υπόβαθρο και σημείο εκκίνησης για την ικανοποίηση ορισμένων πτυχών του προτύπου **5G**.



Υπάρχουν επίσης πολλά περισσότερα που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν με τη δημιουργία πιο ευφυσών και προγνωστικού λογισμικού δικτύωσης. Οι αλγόριθμοι μάθησης στο κυψελοειδές δίκτυο θα βοηθήσει στη μεγιστοποίηση των οφελών και της χρησιμότητας του **5G**. Αυτά τα είδη τεχνολογικών εξελίξεων, βασισμένα στις υπάρχουσες λύσεις και την τεχνογνωσία στη δικτύωση **RF**, στις κεραίες σταδιακής συστοιχίας, στην επεξεργασία σήματος και στις προηγμένες δυνατότητες λογισμικού, θα είναι απαραίτητα ώστε να επιφέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα των δικτύων **5G**.

Η επέκταση του χρησιμοποιούμενου φάσματος αποτελεί έναν προφανή τρόπο αύξησης του ρυθμού μετάδοσης. Ωστόσο, το διαθέσιμο φάσμα κάτω από τα 6GHz είναι **ελάχιστο** και η εκμετάλλευση του φάσματος που άφησε πίσω της η διακοπή της αναλογικής τηλεόρασης δεν επαρκεί. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η αναζήτηση φάσματος στις συχνότητες χιλιοστομετρικού μήκους κύματος (**mmWave**) αποτελεί μία ελκυστική επιλογή. Παρόλα αυτά, τα χαρακτηριστικά των **mmWave** δεν έχουν μελετηθεί σε βάθος και θα απαιτηθούν εκτενείς μετρήσεις και μοντελοποιήσεις των ασύρματων καναλιών πριν το σχεδιασμό **mmWave** δικτύων.

Το φάσμα του **mmWave** (χιλιοστομετρικών κυμάτων) έχει ζώνη φάσματος που επεκτείνεται μεταξύ **30 GHz** και **300 GHz**. Συνδέεται μεταξύ των κυμάτων **microwave** (μικροκυμάτων) και υπέρυθρων ακτινών και έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται για ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας όπως υποστηρίζει και το τελευταίο πρότυπο **Wi-Fi 802. 11ad** (που λειτουργεί στα **60 GHz**). Θεωρείται από τον οργανισμό τυποποίησης, την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών και τους ερευνητές δικτύων και επικοινωνιών, ως ο τρόπος για να φέρουμε στο μέλλον το **5G** διαθέτοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερο εύρος ζώνης για την παροχή πιο γρήγορου δικτύου, επεκτείνοντας έτσι προς το καλύτερο την ποιότητα βίντεο και άλλου περιεχομένου όπως και όλων των πολυμεσικών υπηρεσιών.

Τα μελλοντικά δίκτυα **mmWave** οδηγούν σε σημαντικό **επανασχεδιασμό** συγκριτικά με τα τωρινά 4G δίκτυα. Συγκεκριμένα, οι κατευθυντήριες μεταδόσεις οδηγούν στην αναθεώρηση βασικών διαδικασιών όπως της αναζήτησης κυψέλης, του συγχρονισμού, της τυχαίας πρόσβασης και της σποραδικής επικοινωνίας. Εξαιτίας των περιορισμών της **mmWave** διάδοσης, θα απαιτηθεί η **υβριδική** συνύπαρξη με τα δίκτυα ράδιο-συχνοτήτων (**Radio Frequencies - RF**). Επιπλέον, η παροχή εσωτερικής κάλυψης και η αποδοτική χρήση φάσματος πιθανώς να οδηγήσει στην κοινή χρήση του φάσματος και του **backhaul** μεταξύ των παρόχων σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ό,τι σήμερα.



2.2.2.3 NETWORK MIMO - COOPERATIVE MIMO

Το **Net-MIMO** δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιεί κατανεμημένες κεραίες, οι οποίες θα τοποθετούνται σε άλλους χρήστες εν αντιθέσει με το απλό **MIMO**, το οποίο χρησιμοποιεί τις κεραίες του τοπικού τερματικού για να μεταδώσει τα δεδομένα. Οπότε αναφερόμαστε σε μια εξέλιξη του απλού προϋπάρχοντος **MIMO** συστήματος, στο οποίο υπάρχει συνεργασία των κόμβων που θέλουν να κάνουν μετάδοση και λήψη δεδομένων. Το **Network MIMO**, αποτελεί ουσιαστικά έναν συνδυασμό D2D επικοινωνίας, του cloud computing και των παλαιότερων τεχνικών MIMO. Με αυτόν τον τρόπο, βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του ασύρματου δικτύου προσθέτοντας σε αυτό τα οφέλη των πολλαπλών κεραιών, όπως για παράδειγμα πολυπλεξία, διαφορισμό και **beamforming**⁷, χρησιμοποιώντας έτσι με καλύτερη διαχείριση το υπάρχον φάσμα και παρέχοντας πιο υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε βελτίωση ως προς την απόδοση του δικτύου, δηλαδή ως προς τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο και την χρήση του φάσματος που είναι διαθέσιμο (αλλά όχι τη χωρητικότητά του).

Αποτελεί μια τεχνική, η οποία χρησιμοποιείται αλλά και θα χρησιμοποιηθεί στο άμεσο μέλλον με τα προσεχή μελλοντικά κυψελοειδή δίκτυα, στα οποία η δικτύωση θα είναι **mesh**⁸ ή ασύρματη δικτύωση **ad hoc**⁹.

Τα συμβατικά συστήματα **MIMO**, γνωστά ως **MIMO point-to-point** ή συνδυασμένο **MIMO**, απαιτούν από τον πομπό αλλά και από τον δέκτη, μια ζεύξη επικοινωνίας να είναι εξοπλισμένη με πολλαπλές κεραίες. Ενώ το **MIMO** έχει γίνει ουσιαστικό στοιχείο των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των IEEE 802. 11n (Wi-Fi), IEEE 802. 11ac (Wi-Fi), HSPA + (3G), WiMAX (4G), οι ασύρματες συσκευές δεν μπορούν να υποστηρίξουν πολλές κεραίες λόγω περιορισμών μεγέθους, κόστους και / ή υλικού. Το πιο σημαντικό είναι ότι ο διαχωρισμός μεταξύ των

⁷ <https://en.wikipedia.org/wiki/Beamforming>

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Mesh_networking

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Ad_hoc



κεραιών σε μια κινητή συσκευή και ακόμη και σε σταθερές ραδιοφωνικές πλατφόρμες είναι συχνά ανεπαρκής για να επιτρέψει σημαντικά κέρδη απόδοσης. Επιπλέον, καθώς ο αριθμός των κεραιών αυξάνεται, η πραγματική απόδοση MIMO πέφτει μακρύτερα πίσω από τα θεωρητικά κέρδη.

Το συνεργατικό MIMO χρησιμοποιεί κατανεμημένες κεραίες σε διαφορετικές συσκευές ραδιοσυχνότητας για την επίτευξη των θεωρητικών κερδών του MIMO. Η βασική ιδέα του Συνεργατικού MIMO είναι η ομαδοποίηση πολλαπλών συσκευών σε μια εικονική συστοιχία κεραίας για την επίτευξη επικοινωνιών MIMO. Μια συνεργατική μετάδοση MIMO περιλαμβάνει πολλαπλές ράδιο-ζεύξεις από σημείο σε σημείο, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσεων μέσα σε μια εικονική συστοιχία και ενδεχομένως συνδέσεις μεταξύ διαφορετικών εικονικών συστοιχιών.

Χρησιμοποιώντας το **Network MIMO** στους συνεργαζόμενους πομπούς σε ένα σύστημα μετάδοσης, καταφέρνουμε να μειώσουμε την εσωτερική παρεμβολή (**ICI Inter-carrier interference**) και να βελτιώσουμε την φασματική εξαιτίας της ικανότητας για μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος. Τα συστήματα, τα οποία είναι συνεργατικά μεταξύ τους, έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν περισσότερα οφέλη εν αντιθέσει με τα συμβατικά κυψελοειδή, για έναν δεδομένο αριθμό κεραιών σε αντιστοιχία με ένα σταθμό βάσης. Η χωρητικότητα χρηστών σε ένα δίκτυο (**capacity**) που αναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια, που προσφέρουν τα **MIMO** συστήματα δεν μπορούν να αποτελέσουν μια πλήρως λειτουργική λύση εξαιτίας των ήδη υπάρχουσών αρχιτεκτονικών των τωρινών κυψελοειδών δικτύων, στα οποία δεν μπορεί να γίνει έλεγχος της διακυτταρικής παρεμβολής που περιορίζει το **throughput**. Εδώ παίρνουν θέση οι συνεργαζόμενοι πομποί, οι οποίοι με την μετάδοσή τους έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν αλλά και να απαλείψουν το φαινόμενο αυτό.

2.2.2.3.1 Εφαρμογή Network MIMO σε ασύρματο δίκτυο

Κατά την εφαρμογή ενός συνεργαζόμενου ασύρματου δικτύου, όπως είναι επιθυμητό να είναι τα 5G δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, αυξάνεται το **throughput**¹⁰ σε αναλογία με το πλήθος των μεταδιδόμενων

¹⁰ η απόδοση ή η διαθεσιμότητα δικτύου είναι ο ρυθμός επιτυχούς παράδοσης μηνυμάτων μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας. Τα δεδομένα στα οποία ανήκουν αυτά τα μηνύματα μπορούν να παραδοθούν μέσω φυσικής ή λογικής σύνδεσης ή μπορούν να περάσουν από έναν συγκεκριμένο κόμβο δικτύου. Η διέλευση συνήθως μετριέται σε δυαδικά



συσκευών. Έντονο ενδιαφέρον έχουν οι περιπτώσεις, όπου υπάρχει έντονη συμφόρηση χρηστών όπως για παράδειγμα αίθουσες συνεδριάσεων, κεντρικές πλατείες, δημόσια κέντρα κπ. Στην περίπτωση του **Joint Multi-user Beamforming** που αποτελεί μια τεχνική, η οποία επιτρέπει σε οποιοδήποτε πομπό **MIMO** να μεταδίδει σε δέκτες με λιγότερες κεραιές πολλά ανεξάρτητα πακέτα, ένα σημείο πρόσβασης **AP**, το οποίο διαθέτει 2 κεραιές μπορεί και μεταδίδει ταυτόχρονα δυο πακέτα αναμεταξύ δυο δεκτών, οι οποίοι διαθέτουν ο καθένας τους από μια κεραία. Εκτός από την παραπάνω λειτουργία/τεχνική, επιτρέπεται σε πολλαπλά σημεία πρόσβασης **APs** τα οποία τοποθετούνται σε ίδιο κανάλι μετάδοσης, να μεταδίδουν τα πακέτα τους σε πολλαπλούς δέκτες ταυτόχρονα και χωρίς να υπάρχει επικάλυψη σημάτων αναμεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα αυξάνει το **throughput** του καναλιού του αναλογικά με τον αριθμό των συσκευών που βρίσκονται στο κανάλι και μεταδίδει τόσα πακέτα όσες είναι και οι συνολικές κεραιές των σημείων πρόσβασης του συστήματος. Το παραπάνω σύστημα είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί για το ασύρματο κανάλι καθοδικής ζεύξης (**wireless downlink channel**) και εφαρμόζεται στα σημεία όπου παρατηρείται μεγάλος όγκος φορτίου δεδομένων. Το δίκτυο που συνδέονται μεταξύ τους όλα τα σημεία πρόσβασης, στα οποία είναι μοιρασμένα τα πακέτα που έχουν προορισμό τους δέκτες, έχει **throughput** της τάξης των Gigabit Ethernet (**GigE**). Η μετάδοση των πακέτων γίνεται ταυτόχρονα από όλα τα σημεία πρόσβασης στους πολλαπλούς δέκτες έχοντας την συμπεριφορά λειτουργίας ενός μεγάλου **MIMO** κόμβου και παραδίδουν τόσα πακέτα όσα είναι και ο συνολικός αριθμός των κεραιών των σημείων πρόσβασης. Έτσι τελικός στόχος του συστήματος αυτού είναι να δώσει αξιοπιστία και να εγγυηθεί ότι δεν θα υπάρξουν παρεμβολές μετά την αποκωδικοποίηση από κάθε δέκτη.

Τελικά, αυτό που πρέπει να εγγυηθεί είναι ο συγχρονισμός των φάσεων των πομπών που είναι κατανεμημένοι μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο, ώστε σε κάθε δέκτη τα σήματα που δεν προορίζονται για αυτόν να εξουδετερώνονται και να μένουν μόνο αυτά που πρέπει. Αυτό απαιτεί έλεγχο των σχετικών φάσεων των εκπεμπόμενων σημάτων από τους πομπούς, ώστε να πραγματοποιείται η εξουδετέρωση. Η προστασία της μετάδοσης ενεργοποιείται από τους ανεξάρτητους ταλαντωτές που έχουν οι πομποί, με τους οποίους υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας μιας διαφοράς φάσης αναμεταξύ των φερόντων σημάτων, έτσι ώστε σε περίπτωση που υπάρξει ταυτόχρονη μετάδοση των ανεξάρτητων σημάτων από

ψηφία ανά δευτερόλεπτο (bit/s ή bps) και μερικές φορές σε πακέτα δεδομένων ανά δευτερόλεπτο (p/s ή pps) ή πακέτα δεδομένων ανά χρονική περίοδο.



πομπούς οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, η ολίσθηση που υπάρχει αναμεταξύ των ταλαντωτών αναγκάζει σε περιστροφή διαφορετικής γωνιακής ταχύτητας τα σήματα μεταξύ τους.

Τέλος, τα πλεονεκτήματα του συνεργατικού **MIMO**, είναι η ικανότητά του να βελτιώνει την χωρητικότητα, την απόδοση των κυψελών, την κάλυψη και την ομαδική κινητικότητα ενός ασύρματου δικτύου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αυτά τα πλεονεκτήματα επιτυγχάνονται με τη χρήση κατανεμημένων κεραιών, τα οποία μπορούν να αυξήσουν την χωρητικότητα του συστήματος με την αποδιαμόρφωση των υποκαναλιών. Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα του **Συνεργατικού MIMO** προέρχονται από την αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος και τη μεγάλη δαπάνη σηματοδότησης που απαιτείται για τη στήριξη της συνεργασίας των συσκευών. Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, όπως κυψελοειδή κινητά και ασύρματα ad hoc δίκτυα, τα πλεονεκτήματα της ανάπτυξης συνεργασίας τεχνολογίας **MIMO** αντισταθμίζουν τα μειονεκτήματα.

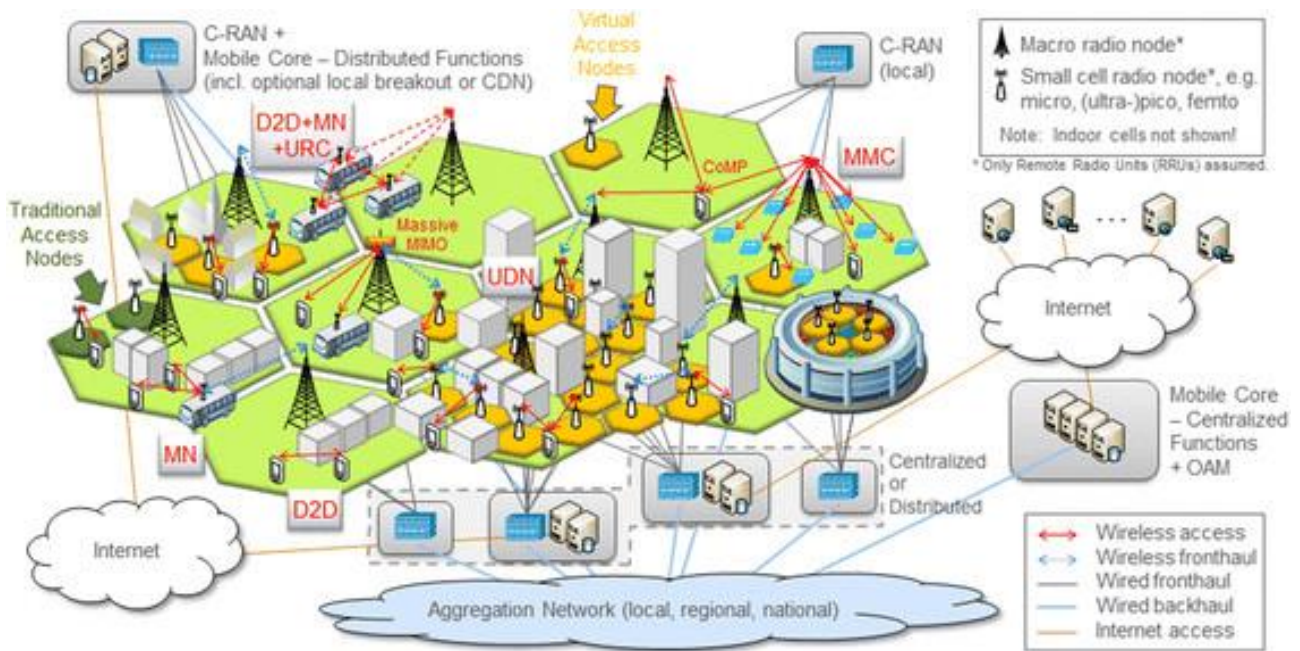
2.2.2.4 Αρχιτεκτονική πυκνοποίησης δικτύου

Λόγω του μεγάλου πλήθους των συσκευών που είναι επιθυμητό να συνδεθούν στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5^{ης} γενιάς, θα πρέπει τα δίκτυα αυτά να έχουν την δυνατότητα να υποστηρίζουν ένα μεγάλο πλήθος χρηστών σε μικρό σχετικά χώρο. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες τεχνολογίες κυψελών γιατί δεν μπορούν να υποστηρίξουν το μεγάλο πλήθος των συνδεδεμένων χρηστών ή συσκευών που είναι επιθυμητό να υποστηρίζονται από τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, ειδικά για την περίπτωση του **IoT** (Διαδίκτυο Πραγμάτων) που αναφέρθηκε παραπάνω. Θα πρέπει να αλλάξει το μέγεθος και η χωρητικότητα των υπαρχουσών κυψελών συγκριτικά με τα 4^{ης} γενιάς δίκτυα, την τελευταία γενιά υλοποιημένων δικτύων.

Στην περίπτωση αυτή, οι κυψέλες του δικτύου γίνονται πολύ μικρότερες (small cells) και πιο πυκνές, όσον αφορά τον αριθμό των χρηστών ανά μονάδα χώρου, απ' ότι οι συνηθισμένες που υπάρχουν στην 4^η γενιά. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, αυξημένη φασματική απόδοση και μικρότερη ισχύ εκπομπής εξαιτίας των μικρών αποστάσεων, άρα και λιγότερες παρεμβολές. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των **small cells** είναι η χρήση του Διαδικτύου για τη δρομολόγηση προς το **backbone**. Οπότε υπάρχει η δυνατότητα να εγκατασταθούν σε χώρους με σύνδεση στο διαδίκτυο και ανάλογα με την ισχύ εκπομπής που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν τα **femto cells** για τους εσωτερικούς χώρους, ενώ στην περίπτωση των εξωτερικών χώρων τα **pico cells**.



Με την πύκνωση αυτή πολλών διαφορετικών cells χρησιμοποιούνται και πολλές μπάντες συχνοτήτων (1.8 GHz - 6 GHz) από τις διάφορες συσκευές. Με την δυνατότητα λειτουργίας ενός συγχρονισμένου δικτύου με **macro**, **micro**, **pico** και **femto cells**, μιλάμε για ένα πολύ πυκνό δίκτυο το οποίο προσφέρει υψηλή φασματική απόδοση και ευέλικτη λειτουργία, δημιουργώντας ένα **UDN** (Ultra Dense Network) ([33] -- [35]), το οποίο συγκροτείται από μεγάλο αριθμό μικρών κυψελών, οι οποίες με την σειρά τους κάνουν κάλυψη περιοχών, όσο το δυνατόν μικρότερης έκτασης.



Εικόνα 20 - UDN δίκτυο

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Generic-5G-network-architecture-high-level-topological-view_fig5_276837125

Στα τελευταίες γενιάς δίκτυα, το **UDN** έχει φτάσει στην πιο εξελιγμένη μορφή του, ώστε να αντιμετωπίσει τις τελευταίες προκλήσεις των απαιτήσεων πυκνότητας και της εξαιρετικά υψηλής χωρητικότητας των 10 Mbps / m² περίπου όπως αναφέρεται στο πρόγραμμα **IMT-2020 (5G)**.

Το **UDN** είναι ένα δίκτυο, το οποίο έχει πολύ υψηλότερη πυκνότητα κεραιών σε σχέση με τα σημερινά δίκτυα. Σαν αποτέλεσμα, έχουμε πυκνότερο δίκτυο μικρών κυψελών. Ο ορισμός του **UDN** αλλάζει ανά τις βιβλιογραφίες και για παράδειγμα, το **UDN** ορίζεται ως ένα δίκτυο όπου η πυκνότητα των **BS** δυνητικά φτάνει ή και υπερβαίνει την πυκνότητα ενός χρήστη. Ένα **UDN** χαρακτηρίζεται ως ένα δίκτυο, όπου η απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών είναι μόλις λίγα μέτρα. Επίσης, αναγνωρίζεται



ως ένα δίκτυο που φθάνει στο σημείο όπου η χωρητικότητά του αυξάνεται υπο-γραμμικά, λόγω της αυξανόμενης επίδρασης της παρεμβολής, διότι η πυκνότητα των **BS** αυξάνεται.

Σε γενικές γραμμές, το UDN είναι μια νέα λύση ασύρματου δικτύου, για να παρέχει επαρκή χωρητικότητα και καλύτερη εμπειρία χρήστη σε ένα 5G δίκτυο. Σε ένα UDN, η πυκνότητα **AP**(Access Point), μπορεί να είναι συγκρίσιμη ή ακόμα και υψηλότερη από την πυκνότητα του χρήστη όπως είπαμε και πριν, όπου διαφορετικοί τύποι AP θα συνεργαστούν στενά ως ένα πολύ ευέλικτο δίκτυο, για να εξυπηρετεί κάθε χρήστη και να επιτυγχάνει υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος, χαμηλότερη κατανάλωση ρεύματος και αδιάκοπη κινητικότητα χωρίς περιορισμούς.

2.2.2.4.1 Επαναχρησιμοποίηση της καθολικής συχνότητας

Από τα δίκτυα 3G, αναφερόμαστε σε επαναχρησιμοποίηση καθολικής συχνότητας και αποτελεί μια πρακτική που εξετάζεται και σε **UDN** δίκτυα. Ο συντονισμός των παρεμβολών που μπορεί να υπάρξει σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι ανεπιθύμητος και αυτό έχει να κάνει με την μικρή κλίμακα των συγκεκριμένων δικτύων και των ακριβών **backhaul** υλικών (**οπτικές ίνες κ.τ.λ.**). Όσο το δίκτυο γίνεται πυκνότερο, διότι αυξάνεται ο λόγος πυκνότητας των σταθμών βάσης προς την πυκνότητα των χρηστών, η απενεργοποίηση των σταθμών βάσης οι οποίοι δεν χρησιμοποιούνται, μειώνει αρκετά αποτελεσματικά την παρεμβολή στο δίκτυο. Για να βελτιωθεί περαιτέρω ο μέσος όρος της αποδοτικότητας του φάσματος ενός **UDN** με απενεργοποίηση σταθμών βάσης, έχει ερευνηθεί η επαναχρησιμοποίηση της μερικής συχνότητας. Στην περίπτωση που επιτρέπεται η καταστολή των **BS** για τα κελιά που δεν έχουν ενεργούς χρήστες, διαπιστώθηκε ότι η επαναχρησιμοποίηση καθολικής συχνότητας είναι ιδανική για τα δίκτυα με ανόμοιες αναλογίες πυκνότητας σταθμών βάσης και χρηστών.

2.2.2.4.2 Διαχείριση της κίνησης του δικτύου, της κατανομής των πόρων και των παρεμβολών

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της κατανομής πόρων, της διαχείρισης παρεμβολών και της κίνησης σε ένα **UDN** είναι περίπλοκες και εξαρτώμενες μεταξύ τους. Η σωστή ρύθμιση και των τριών παραγόντων στον επιθυμητό βαθμό δημιουργούν τεχνικές για μεταβλητά και ευέλικτα μοτίβα επαναχρησιμοποίησης των πόρων, όπως εξισορρόπηση φορτίου, ενίσχυση της σύνδεσης μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης, ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των σταθμών βάσης κ. α.. Σε μια περίπτωση βέλτιστης κατανομής πόρων και έχοντας λάβει υπόψη την κατανομή της κίνησης του



δικτύου, τις παρεμβολές και τις απαιτήσεις απόδοσης, φαίνεται σημαντική βελτίωση στην αποδοτικότητα της χρήσης των πόρων του δικτύου, γεγονός που με τη σειρά του προκαλεί λιγότερες παρεμβολές και οδηγεί σε υψηλότερη αποτελεσματικότητα φάσματος (**Spectrum Efficiency-SE**). Η επίπτωση μιας παρεμβολής σε ένα **UDN** σε μεγαλύτερο επίπεδο, απαιτεί επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μεγαλύτερης κλίμακας, που γίνεται μέσω κλιμακωτών αλγορίθμων. Επίσης, η βέλτιστη λύση για ένα **UDN** μπορεί να γίνει και μέσω των βέλτιστων λύσεων για μερικές συστάδες σταθμών βάσεων, αγνοώντας τους μακρινούς παράγοντες. Τέλος, μια τέτοια επίλυση για ένα σύμπλεγμα **UDN** της τάξης των 100 σταθμών βάσεων περίπου και των 1000 χρηστών, μπορεί να επιτευχθεί μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα χρησιμοποιώντας έναν οικιακό-κανονικό υπολογιστή.

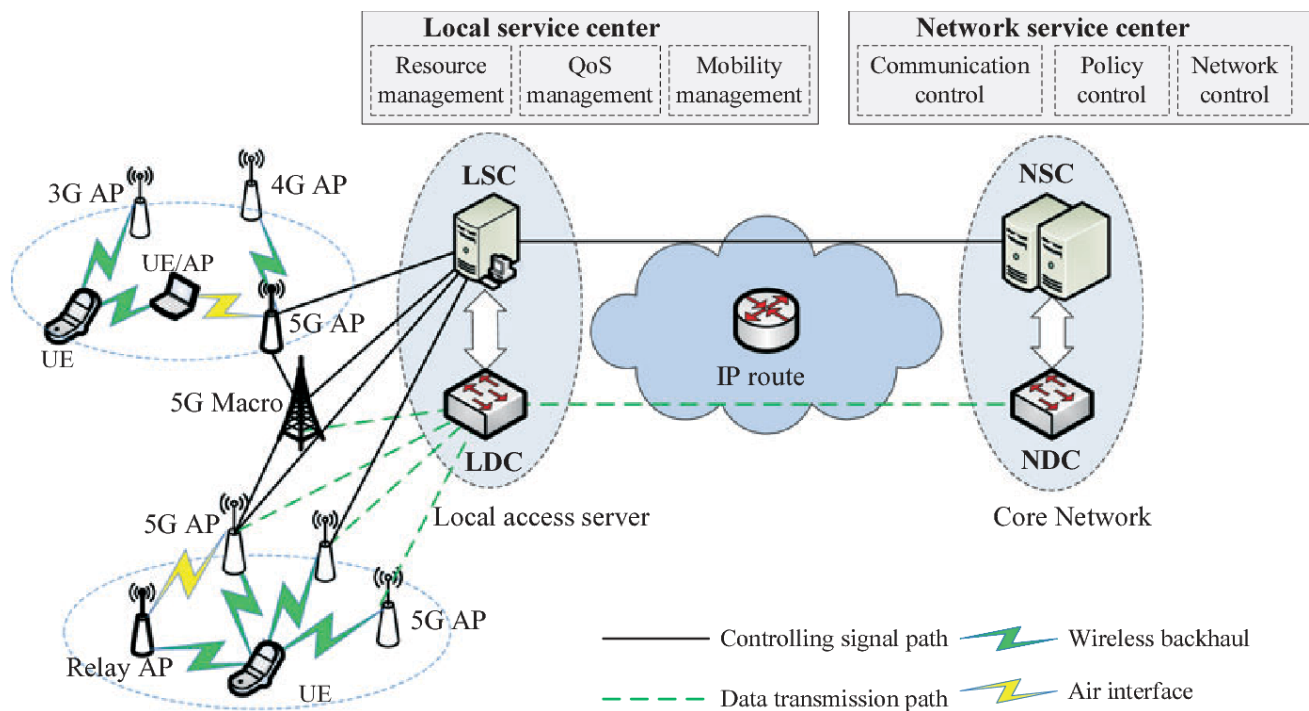
2.2.2.4.3 Η προτυποποίηση των UDN σε 5G δίκτυο

Η χρησιμοποίηση των προτύπων οδηγεί σε γρήγορες λύσεις και εναλλακτικές σε ένα δίκτυο κάνοντας την τελική προσαρμογή του πιο βέλτιστη. Μιλώντας για ένα δίκτυο **UDN**, μιλάμε για την προτυποποίηση της κατάστασης ενεργοποίησης / απενεργοποίησης σταθμών βάσεων, την ανακατανομή του φορτίου κίνησης και συνήθως την εναλλαγή μεταξύ των σταθμών βάσης. Στα κυψελοειδή πρότυπα μπορούν να εξεταστούν η υποστήριξη πιο γρήγορων φορέων, γρήγορης επιλογής και αλλαγής φορέα, μείωσης ή αφαίρεσης συνεχόμενων σημάτων, απλούστευση των μηχανισμών σύνδεσης των κόμβων, μετατόπιση του φορτίου μεταξύ των σταθμών βάσης και των φορέων κ.α. ([36]). Τέλος, ένα **UDN** είναι πολύ πιθανό να αποτελεί μέρος μόνο ενός μη ομοιογενούς δικτύου ή ενός τμήματος ενός ιεραρχικού δικτύου. Η αρχιτεκτονική **RAN** στο 5G είναι πιο βελτιωμένη έχοντας εισάγει τη δομή του **CU-DU (Central Unit & Distribution Unit)** ([37]), η υλοποίηση του **UDN** ωφελείται με παρόμοιες προσεγγίσεις ενός **C-RAN** δικτύου.

Τέλος, ορίζουμε με το ακρωνύμιο **UUDN (User-Centric Ultra-Dense Networks)** ([38]), την φιλοσοφία που αναφέρει ότι ο χρήστης πλέον μπορεί και εξυπηρετεί το δίκτυο και τη μέθοδο "de-cellular". Ουσιαστικά αυτό που αναφέραμε παραπάνω για την δομή **CU-DU**. Ένα **UUDN** αποτελεί ένα ασύρματο δίκτυο, στο οποίο η πυκνότητα **AP** είναι συγκρίσιμη με την πυκνότητα του χρήστη ώστε να οργανωθεί μια ομάδα **AP (APGroup)**. Αυτή η ομάδα των **AP** θα αποτελεί και την δικτυακή κάλυψη που θα εξυπηρετεί κάθε χρήστη χωρίς όμως τη συμμετοχή του χρήστη. Με λίγα λόγια, το **UUDN** επιτρέπει στον χρήστη να αισθάνεται σαν ένα δίκτυο που τον ακολουθεί πάντα. Έτσι, το δίκτυο θα πρέπει να γνωρίζει έξυπνα το περιβάλλον της ασύρματης επικοινωνίας του χρήστη και στη



συνέχεια να οργανώνει την απαιτούμενη ομάδα AP και να δεσμεύει τον πόρο, για να εξυπηρετήσει τον χρήστη. Με αυτόν τρόπο, ο χρήστης αισθάνεται πάντα στο κέντρο ενός "κελιού" (**User-Centric**).



Εικόνα 21 - User-Centric Ultra-Dense Networks

Πηγή: <https://www.semanticscholar.org/paper/Security-architecture-and-scheme-of-user-centric-Chen-Chen/1c6aef1d049fd11238c433b5cfe7488ee00aa044/figure/4>

2.2.2.5 Direct Short-Range Communication (DSRC)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των 5G δικτύων είναι αυτή του Διαδικτύου Πραγμάτων (**IoT**) πάνω στο οποίο, θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο **κεφάλαιο 3** παρακάτω, στο οποίο θα αναφερθούν και άλλες εφαρμογές που συνδέονται με αυτό και στις οποίες στηρίζεται η υλοποίηση του. Τέτοια παραδείγματα είναι η επικοινωνία τύπου M2M (Machine to Machine) που αφορά την άμεση επικοινωνία αυτοματοποιημένων συσκευών μεταξύ τους και η V2V (Vehicle to Vehicle) που αφορά την άμεση επικοινωνία μεταξύ οχημάτων. Για να καθίσταται δυνατή η υλοποίηση όλων των παραπάνω, πρέπει να μπορούν δύο συσκευές που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους να επικοινωνούν αποδοτικά. Η ιδέα που οδηγεί στην



πραγματοποίηση του στόχου αυτού είναι η άμεση επικοινωνία μικρής εμβέλειας - Direct Short Range Communication (**DSRC**) ([39]), που αποτελεί ένα σύγχρονο πρότυπο επικοινωνίας. Σχεδιάστηκε αποκλειστικά για την αυτοκινητοβιομηχανία. Το νέο πρότυπο της IEEE 802.11p, το πρότυπο της IEEE 1609 (Wave) και το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI – TC-ITS) αποτέλεσαν τα 3 κυριότερα πρότυπα για την δημιουργία του νέου προτύπου.

Η μελέτη για την δημιουργία και τον σχεδιασμό του νέου προτύπου ξεκίνησε το 1999. Εδραιώθηκε το 2009 και σταδιακά άρχισαν οι δοκιμές. Είναι σχεδιασμένο αποκλειστικά για γρήγορα κινούμενα αντικείμενα με μικρή εμβέλεια. Αποτελείται από μικρά Ad-hoc δίκτυα με εύρος ζώνης τα 75 MHz και περιοχή συχνοτήτων έως και **5.9 GHz**. Σχεδιάστηκε για να παρέχει στοιχεία που αφορούν πληροφορίες κίνησης σχετικά με ένα δεύτερο κινούμενο αντικείμενο. Αυτά τα στοιχεία αφορούν την θέση του αντικειμένου και την ταχύτητα κίνησης του οχήματος.

Ουσιαστικές διαφορές που έπαιξαν ρόλο για να επικρατήσει ενάντια στο πρότυπο LTE ήταν η αρκετά χαμηλή καθυστέρηση που υπάρχει αλλά και οι 360 μοίρες που υποστηρίζει η εμβέλεια κάλυψης του. Παρέχει πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας και δεν μολύνει τόσο πολύ το περιβάλλον που δραστηριοποιείται. Μεταδίδει την θέση που θα βρίσκεται το κάθε όχημα, την ταχύτητα που θα κινείται το όχημα και την επιτάχυνση του οχήματος. Ακόμη θα μπορεί να ελέγξει την κατάσταση της μετάδοσης των ταχυτήτων και την κατάσταση των φρένων και του τιμονιού. Τέλος, θα μπορεί να καταγράψει το ιστορικό της πορείας που ακολούθησε και να προβλέπει πιθανό δρομολόγιο.

2.2.2.5.1 Σηματοδοσία και πολλαπλή πρόσβαση (Signaling and multiple access)

Για να είναι όμως αποδοτική η άμεση επικοινωνία μικρής εμβέλειας και να μπορέσει να λειτουργήσει αποδοτικά, έτσι ώστε να υλοποιηθούν οι εφαρμογές του IoT, αλλά και των υπόλοιπων εφαρμογών των 5G δικτύων που θα κάνουν χρήση οι χρήστες των δικτύων αυτών, είναι απαραίτητη η εξέλιξη των υπάρχοντων τρόπων σηματοδοσίας και πολλαπλής πρόσβασης.

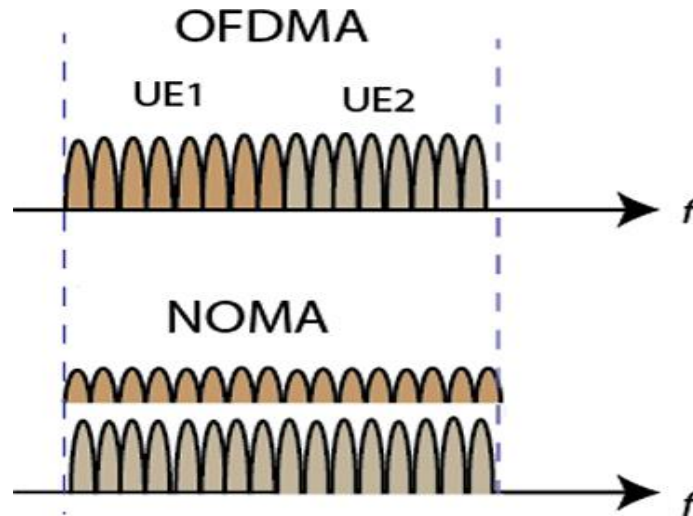
Ο διαμοιρασμός του σήματος και ο τρόπος που παρέχεται ένα σήμα όπως και η δυνατότητα της πολλαπλής πρόσβασης έχει αλλάξει ουσιαστικά από τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς έως σήμερα και τείνει να αλλάξει και άλλο για τα 5G δίκτυα. Από την εποχή της αναλογικής συχνότητας, καταλήξαμε στην ψηφιακή εποχή του 2G που βασιζόταν τόσο στην διαίρεση συχνότητας (**FDMA**-Frequency Division Multiple Access) τεχνολογία, αλλά και στην διαίρεση χρόνου (**TDMA**-Time Division Multiple



Access). Αμέσως μετά, έχουμε την ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (**OFDM**-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) που σε συνδυασμό με τις προαναφερόμενες **FDMA** και **TDMA** χρησιμοποιείται εξ' ολοκλήρου από τα 4G δίκτυα. Επομένως, παρατηρούμε ότι με τον ερχομό των 5G δικτύων θα έχουμε σημαντικές αλλαγές στη σηματοδότηση και στην πολλαπλή πρόσβαση ώστε να επιτύχουμε τις δυνατότητες των 5G δικτύων και να αποφεύγονται φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ των σημάτων των διαφορετικών συσκευών που εκπέμπουν στον ίδιο χώρο, ειδικά στην περίπτωση της **DSRC**. Αυτό δείχνει η **SCMA** (Subcarrier Multiple Access), η οποία είναι μια άλλη τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης για 5G δίκτυα και αποτελεί ένα συνδυασμό **OFDMA** και **CDMA** (Code Division Multiple Access). Τέλος, στο παιχνίδι της πολλαπλής πρόσβασης, έχουμε και τη **NOMA** (Non-orthogonal Multiple Access), η οποία χρησιμοποιεί παραλλαγές της διαίρεσης συχνότητας.

Ουσιαστικά, τα χαρακτηριστικά των συστημάτων **OMA** (Orthogonal Multiple Access) μπορούν να συνοψιστούν γενικά ως εξής:

- Στο **TDMA**, οι πληροφορίες του κάθε χρήστη αποστέλλονται σε χρονικές θυρίδες οι οποίες δεν είναι επικαλυπτόμενες, πράγμα το οποίο προϋποθέτει τα δίκτυα που βασίζονται σε **TDMA** να απαιτούν ακριβή συγχρονισμό στο πεδίο του χρόνου, γεγονός που πολλές φορές είναι δύσκολο, ειδικότερα στα 5G, στα οποία έχουμε μαζικό αριθμό χρηστών.
- Στο **FDMA** και ιδιαίτερα στην ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (**OFDMA**), οι πληροφορίες για κάθε χρήστη αντιστοιχούν σε ένα υποσύνολο υποφορέων.
- Σύμφωνα με την τεχνική **CDMA**, χρησιμοποιούνται κώδικες για τον διαχωρισμό των χρηστών που μοιράζονται το ίδιο κανάλι.
- Το **NOMA** αποτελεί μια σύμπραξη όλων των πολλαπλών προσβάσεων που παρέχουν ορθογώνια πρόσβαση στους χρήστες είτε σε χρόνο, συχνότητα, κώδικα ή χώρο και η ιδιαιτερότητα του είναι ότι πολλοί χρήστες λειτουργούν στην ίδια ζώνη, την ίδια στιγμή.



Εικόνα 22 - NOMA-OFDMA

Πηγή: <https://www.intechopen.com/books/towards-5g-wireless-networks-a-physical-layer-perspective/non-orthogonal-multiple-access-noma-for-5g-networks>

Το **NOMA** με τον τρόπο λειτουργίας του προωθεί τη μαζική συνδεσιμότητα χρηστών, μειώνει την καθυστέρηση, βελτιώνει τη δικαιοσύνη των χρηστών και τη φασματική απόδοση και αυξάνει την αξιοπιστία σε σύγκριση με τις τεχνικές ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (**OMA**).

3 Εξελίξεις στα 5G Δίκτυα (προ υπάρχουσες και νέες τεχνολογίες - Release 17 3GPP)

Στα παραπάνω κεφάλαια, έγινε αναφορά στις εφαρμογές που υλοποιούνται στα δίκτυα 5^{ης} γενιάς και καταλάβαμε ότι αυτά, αποτελούν την ένωση σε όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύωσης και δικτυακές εφαρμογές με τις μελλοντικές σε ένα ενιαίο δίκτυο. Ήδη από τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς είχε αρχίσει να χρησιμοποιείται ο απομακρυσμένος έλεγχος έξυπνων συσκευών είτε αυτοματοποιημένα, δηλαδή μία έξυπνη συσκευή να ελέγχει μία άλλη, είτε από έναν χρήστη. Και λόγω της ευρείας χρήσης που είχαν οι εφαρμογές αυτές, θεωρείται ότι δημιουργήθηκε ένα νέο διαδίκτυο με συνδεδεμένες συσκευές, το Διαδίκτυο Πραγμάτων (Internet of Things – **IoT**) που αναφέρθηκε και σε παραπάνω



εισαγωγικό κείμενο. Οι συνδέσεις αυτές μπορεί να είναι συνδέσεις συσκευών μεταξύ τους (**D2D**), όπου αυτός ο τρόπος αφορά την απευθείας επικοινωνία συσκευών που ελέγχονται από χρήστες, όπως τα έξυπνα τηλέφωνα, τα tablets κ.λπ., συσκευών με μηχανές (**M2D**), όπου ο τρόπος αυτός αφορά την επικοινωνία συσκευών που ελέγχονται από κάποιον χρήστη με μία αυτοματοποιημένη “μηχανή”, ή και μηχανών μεταξύ τους (**M2M**). Στα 5G δίκτυα αυτό αναμένεται να έχει πολύ ευρεία εξάπλωση και μέχρι το 2020 αναμένεται οι συνδεδεμένες, μέσω M2M συνδέσεων, μηχανές να φθάσουν τα 20.4 δισεκατομμύρια (**[60]**). Έτσι, το Διαδίκτυο Πραγμάτων (**IoT**) θα γιγαντωθεί στα 5G δίκτυα.

Το Διαδίκτυο Πραγμάτων, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένας όρος που περιγράφει ένα δίκτυο σαν το Internet, συνδεδεμένο με αυτό, στο οποίο όμως είναι συνδεδεμένες έξυπνες συσκευές, οι οποίες όντας αυτόνομες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους ή να τις ελέγχει κάποιος από απόσταση. Θεωρείται ότι είναι ένας τομέας του Internet ή ακόμα και ένα παράλληλο Διαδίκτυο. Αναμένεται να επιφέρει αλλαγές ακόμη και στον τρόπο ζωής όλης της ανθρωπότητας, αυτοματοποιώντας σχεδόν όλες τις καθημερινές λειτουργίες των οχημάτων, της κυκλοφορίας, της υγείας, των διαφόρων ειδών συσκευών που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι στην καθημερινότητα τους και των χρηστών τους. Για τον λόγο αυτό, στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα γίνει αναφορά στις διάφορες εφαρμογές που θα διαμορφώσουν το IoT στα 5G δίκτυα.

Οι καινούργιες τεχνολογίες και τα πρότυπα ορίζονται πάλι από την 3GPP, όπου περισσότερες βελτιώσεις του συστήματος 5G αναμένεται να ακολουθήσουν στην **Έκδοση 17** (Release 17), που έχει προγραμματιστεί να παραδοθεί το 2021. Στο TSG (Technical Specification Group) #87e συμφωνήθηκε από τις ηγεσίες της **TSG** και **WG** η αλλαγή του χρονοδιαγράμματος Rel-17 ανά 3 μήνες, σύμφωνα με το οποίο, το **Stage 3** του **Rel-17** θα παγώσει τον Σεπτέμβριο του 2021. Στην παρακάτω **Εικόνα 23**, θα δούμε μερικές από τις καινούργιες τεχνολογίες που θα αναπτυχθούν σύμφωνα με την 3GPP και αφορούν το μέλλον του δικτύου.



Release 17

- NR MIMO
- NR Sidelink enh.
- 52.6 - 71 GHz with existing waveform
- Dynamic Spectrum Sharing (DSS) enh.
- Industrial IoT / URLLC enh.
- **Study** - IoT over Non Terrestrial Networks (NTN)
- NR over Non Terrestrial Networks (NTN)
- NR Positioning enh.
- Low complexity NR devices
- Power saving
- NR Coverage enh.
- **Study** - NR eXtended Reality (XR)
- NB-IoT and LTE-MTC enh.
- 5G Multicast broadcast
- Multi-Radio DCCA enh.
- Multi SIM
- Integrated Access and Backhaul (IAB) enh.
- NR Sidelink relay
- RAN Slicing
- Enh. for small data
- SON / Minimization of drive tests (MDT) enh.
- NR Quality of Experience
- eNB architecture evolution, LTE C-plane / U-plane split
- Satellite components in the 5G architecture
- Non-Public Networks enh.
- Network Automation for 5G - phase 2
- Edge Computing in 5GC
- Proximity based Services in 5GS
- Network Slicing Phase 2
- Enh. V2x Services
- Advanced Interactive Services
- Access Traffic Steering, Switch and Splitting support in the 5G system architecture
- Unmanned Aerial Systems
- 5GC LoCation Services
- Multimedia Priority Service (MPS)
- 5G Wireless and Wireline Convergence
- 5G LAN-type services
- User Plane Function (UPF) enh. for control and 5G Service Based Architecture (SBA)

These are some of the Rel-17 headline features, prioritized during the December 2019 Plenaries (TSG#86)

Start of work: January 2020

Full details of the content of Rel-17 are in the Work Plan: www.3gpp.org/specifications/work-plan

© 3GPP - February 2020

Εικόνα 23 – Μελλοντικές Τεχνολογίες 5G

Πηγή: <https://www.3gpp.org/release-17>

Παρακάτω θα αναλύσουμε με λίγο περισσότερη λεπτομέρεια κάποια από είδη των συνδέσεων που ήδη λειτουργούν και αναφέραμε **παραπάνω** και κάποιες τεχνολογίες που ήδη δοκιμάζονται πιλοτικά ([62], [63]) αλλά θα πάρουν χώρα τα επόμενα προσεχή χρόνια.

3.1 M2M(Machine to Machine)

Η τεχνολογία **Machine - to - Machine** αποτελεί μία από τις τελευταίες συνδετήριες μονάδες των ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους. Διαθέτει 3 μοντέλα σύνδεσης που αφορούν την διαφορά συνδεσμολογίας και έχει να κάνει με το αν υπάρχει εξωτερικός εξυπηρετητής ή όχι, αλλά και των συνδυασμό των 2.



Εικόνα 24 – Χρήσεις Τεχνολογίας M2M στα δίκτυα 5G

Πηγή:<https://datamobile.ag/5g/5g-the-future-of-m2m-through-massive-machine-type-communication-mmtc/>

Κατά το πρώτο μοντέλο όπου ο εξυπηρετητής εφαρμογών συνδέεται με το δίκτυο του παρόχου, οι συσκευές M2M συνδέονται και επικοινωνούν χωρίς τη χρήση εξωτερικού εξυπηρετητή SCS (Service Capability Server).

Στο δεύτερο μοντέλο έχουμε απευθείας σύνδεση του δικτύου του παρόχου με τις συσκευές μέσω SCS. Στην περίπτωση αυτή ο SCS μπορεί να είναι από μία λειτουργία την οποία έχει προγραμματίσει ο πάροχος του δικτύου έως ένας πάροχος υπηρεσιών M2M, οποίος δεν ελέγχεται από τον πάροχο του δικτύου και είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.

Στην τρίτη περίπτωση, έχουμε ένα υβριδικό μοντέλο, στο οποίο συνδυάζονται τα 2 παραπάνω μοντέλα που αναφέρθηκαν. Έτσι ο εξυπηρετητής εφαρμογών συνδέεται στον πάροχο για να επικοινωνήσει απευθείας μέσω SCS με τις συσκευές M2M. Τελικά, η επικοινωνία στο επίπεδο χρήστη με την επικοινωνία στο επίπεδο ελέγχου μέσω του SCS είναι ανεξάρτητες.

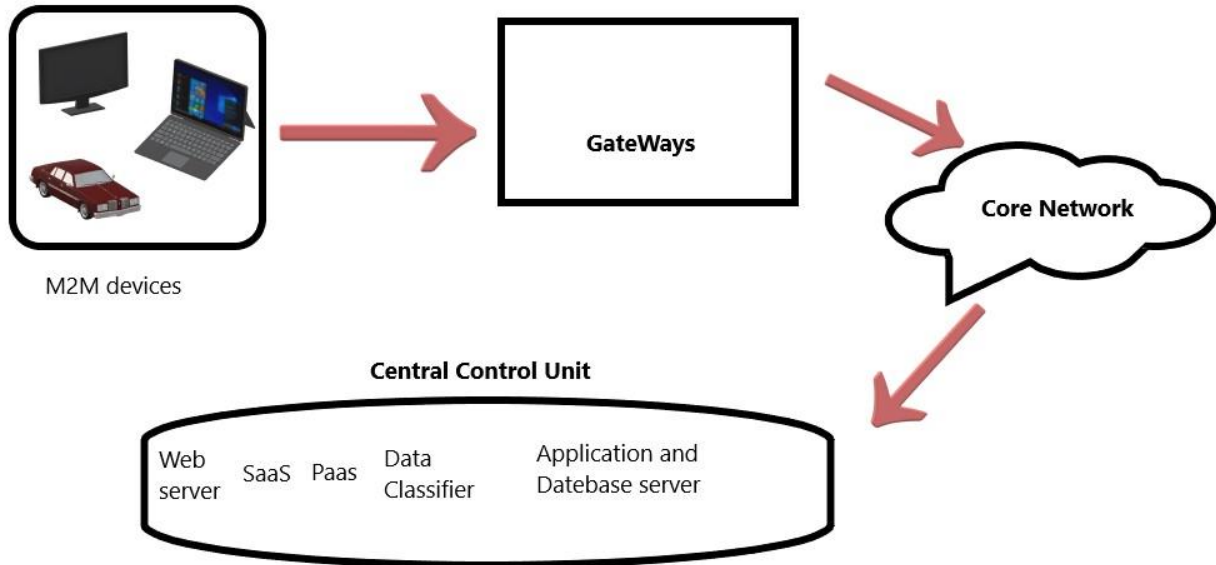
Στις παραπάνω περιπτώσεις αναφερόμαστε στις εκδόσεις 12 έως 14 της 3GPP. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση του 5G πρέπει τα ετερογενή δίκτυα να μπορούν να παρέχουν πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών M2M και τεχνολογιών πρόσβασης. Μιλάμε πλέον δηλαδή από την



έκδοση 15 και έπειτα, για επικοινωνίες **MTC** στην οποία συσκευές ή «πράγματα» συνδέονται στο Διαδίκτυο ή συνδέονται άμεσα με αυτό και επικοινωνούν μεταξύ τους με μικρή ή χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Στην εποχή των 5G, αναπτύσσονται νέες εφαρμογές, για να εξυπηρετούν έναν πολύ μεγάλο αριθμό «πραγμάτων», εισάγοντας το λεγόμενο massive (διευρυμένο) **MTC [26] (mMTC)**. Η κοινή χρήση φάσματος σε δίκτυα 5G διασφαλίζει την κάλυψη των υπηρεσιών μεταξύ συσκευών και μηχανών οπουδήποτε και όποτε χρειαστεί. Μπορεί επίσης, να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό συσκευών M2M με διαφορετικές εφαρμογές και υπηρεσίες.

Η αρχιτεκτονική της επικοινωνίας M2M στα δίκτυα 5G παρουσιάζεται παρακάτω στην **Εικόνα 25** και αποτελείται από 3 οντότητες: 1) την κεντρική μονάδα ελέγχου (**CCU**), 2) το ετερογενές κεντρικό δίκτυο και 3) το δίκτυο περιοχής M2M. Τα δίκτυα περιοχής M2M περιλαμβάνουν κυρίως μεγάλο αριθμό συσκευών M2M που διαθέτουν αισθητήρες με τεχνολογίες όπως **WiFi, Bluetooth** και **RFID**. Οι πύλες M2M χρησιμοποιούνται ως διεπαφή μεταξύ της περιοχής M2M και των βασικών δικτύων και τα δεδομένα από τις συσκευές M2M μεταδίδονται στο **CCU** ή στο **cloud** μέσω των δικτύων πυρήνα (**Core Network**). Οι συσκευές M2M μπορούν να ταξινομηθούν σε πρωτογενείς και δευτερογενείς συσκευές. Οι πρωτογενείς συσκευές είναι νόμιμες για λειτουργία στο φάσμα, ενώ οι δευτερογενείς συσκευές M2M χρησιμοποιούν το φάσμα ευκαιριακά και μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μη αδειοδοτημένο φάσμα μόνο σε περίπτωση που είναι σε **cognitive 5G** (“γνωστικό” δίκτυο).

Η χρήση πολλαπλών πυλών (**gateways**) μπορεί να αυξήσει την απόδοση της επικοινωνίας M2M σε **cognitive δίκτυα 5G** και μπορεί να είναι χρήσιμη στη μείωση των παρεμβολών που προκαλούνται στις κύριες συσκευές M2M σε ένα τέτοιο σύστημα-δίκτυο όπου υπάρχουν πολλοί χρήστες. Επίσης η χρήση τους, μπορεί να μειώσει τη συνολική ισχύ μετάδοσης του συστήματος και να αυξήσει τη απόδοση ενός συνεργατικού δικτύου (**Cooperative Network**). Τέλος, η ζήτηση για ελεύθερο φάσμα αυξάνεται εκθετικά με τον τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και ιδιαίτερα με την εμφάνιση της επικοινωνίας M2M.



Εικόνα 25-M2M Αρχιτεκτονική

3.2 D2D (Device to Device)

Η τεχνολογία **D2D** στοχεύει στην επικοινωνία και στην **απευθείας δρομολόγηση** δεδομένων μεταξύ κοντινών **UE**. Έτσι με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα δε χρειάζεται να δρομολογούνται μέσω του **eNB** και το δίκτυο κορμού του παρόχου. Εξαιτίας της μικρής απόστασης που έχουν τα **UE**, τα **D2D** δίκτυα προσφέρουν **ενεργειακή εξοικονόμηση**, αυξάνουν το **ρυθμό μετάδοσης**, μειώνουν την **καθυστέρηση** και διευρύνουν τη **φασματική απόδοση**. Οι εφαρμογές **D2D** περιλαμβάνουν διαμοιρασμό πολυμεσικού περιεχομένου, gaming, επέκταση κάλυψης, επανάκαμψη από καταστροφές κ.λπ..

Η D2D επικοινωνία μπορεί να χρησιμοποιεί αδειοδοτημένο ή μη αδειοδοτημένο φάσμα αποκτώντας το μέσω τεχνικών **cognitive radio**. Με την μελέτη του τρόπου εγκαθίδρυσης της **D2D** επικοινωνίας, η οποία θα πρέπει να είναι πλήρως ελεγχόμενη και αυτόνομη από το **gNB**, θα επιτευχθεί η βέλτιστη χρήση του φάσματος.



3.3 V2X (Vehicle to Everything)

Η τεχνολογία **V2X** πρωτοπαρουσιάστηκε από την **3GPP** με την έκδοση 14 (**Release 14**), δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο 4^{ης} Γενιάς Δίκτυο να παρέχει υποστήριξη στον κόσμο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Σύμφωνα με το **Release-14**, η αρχική υποστήριξη του **V2X** ήταν η ανταλλαγή μηνυμάτων σχετικά με τη θέση του οχήματος, της ταχύτητας και την κατεύθυνσης των γύρω οχημάτων μεταξύ τους, αλλά και με τις μονάδες υποδομής και τους πεζούς.

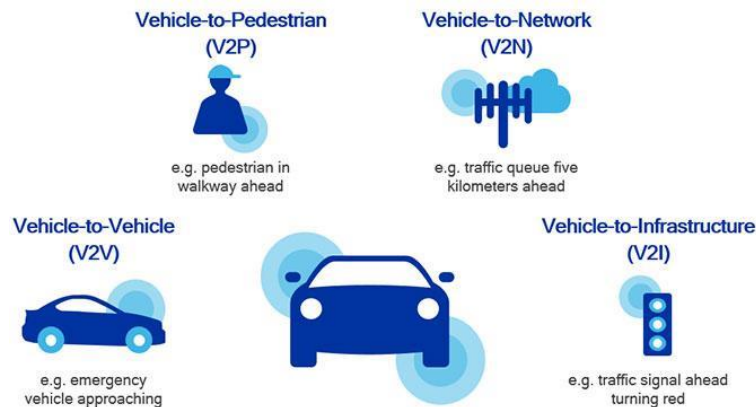
Στην έκδοση 15 (**Release-15**), έγινε εισαγωγή χαρακτηριστικών, όπως η **64QAM** κωδικοποίηση και η **μείωση της καθυστέρησης** όπως και **μελέτη** σχετικά με την **ποικιλομορφία** μετάδοσης των μέσων.

Με το **Release-16**, η 3GPP ξεκίνησε την μελέτη σχετικά με τη μεθοδολογία αξιολόγησης των νέων περιπτώσεων του **V2X**, έτσι ώστε να αναπτυχθούν τεχνικές λύσεις που να υποστηρίζουν τις περιπτώσεις χρήσης του νέου **5G V2X**.

Η ενότητα Vehicle-to-Everything ανήκει στην ομάδα των λεγόμενων έξυπνων πόλεων (**Smart Cities**) και θα αποτελεί, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές του Internet of Things (**IoT**). Αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των νέων τεχνολογιών που πρόκειται να εισαχθούν δειλά δειλά στην ζωή μας. Η τεχνολογία Vehicle-to-Everything ([53]--[59]) εστιάζει τις λειτουργίες της στις μεταφορές που γίνονται καθημερινά.

Ουσιαστικά μέσω διάφορων αισθητήρων, σχεδιασμένων αυτοματισμών και υποδομών θα παρέχεται στον άνθρωπο/οδηγό κάποια σήμανση ενός γεγονότος που ακολουθεί. Αυτές οι σημάνσεις έχουν απώτερο σκοπό την μείωση των θανατηφόρων ατυχημάτων αλλά και των ατυχημάτων γενικότερα.

Βασίζεται στην αρχιτεκτονική προτύπου Long-Term Evolution (LTE), η οποία στηρίχθηκε από ένα καινούργιο πρότυπο ασύρματης τεχνολογίας με το όνομα Direct Short Range Communication (αναφέρθηκε παραπάνω στο **υποκεφάλαιο 2.2.2.5**) εξειδικευμένο αποκλειστικά για την οχηματοβιομηχανία και εξελίσσεται έτσι ώστε να ενταχθεί στα πολυαναμενόμενα 5G δίκτυα.



Εικόνα 26 - Vehicle-to-Everything

Πηγή: <https://www.rcrwireless.com/20200206/analyst-angle/c-v2x-5g-transform-cars-analyst-angle>

Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση αυτής της τεχνολογίας είναι η ανάπτυξη και δοκιμασία διαφόρων μικροεπεξεργαστών που θα εγκατασταθούν στα συστήματα πλοήγησης του οχήματος μέσω ενός λογισμικού. Γνωστές αρμόδιες εταιρείες στον τομέα αυτό ήδη εργάζονται για την κατασκευή ενός τέτοιου λογισμικού. Η πρώτη εφαρμογή σύμφωνα με τις ανακοινώσεις που έχουν γίνει, έλαβε χώρα μέσα στο 2017. Αρχικά θα μπει σε εφαρμογή η επικοινωνία αυτοκινήτου προς αυτοκίνητο, η οποία επείγει άμεσα. Αναμένεται μέχρι το **2022** να γίνει πλήρης αξιοποίηση περαιτέρω εφαρμογών, χρονιά που αναμένεται τα 5G δίκτυα να είναι σε αρκετά ώριμο στάδιο εξέλιξης.

Αν αναλογιστεί κανείς πως οι μελέτες είχαν αρχίσει το 1999 και κατέληξαν σε ένα προχωρημένο στάδιο μέχρι το 2009, τότε μιλάμε για τρομερή ανάπτυξη. Συνεπώς λίγα χρόνια μετά, βλέπουμε πως η παραγωγή της νέας τεχνολογίας αρχίζει να μπαίνει στην αγορά. Μια μελέτη που κόστισε σχεδόν είκοσι χρόνια τώρα είναι προ των πυλών.

3.3.1 V2V (Vehicle-to-Vehicle)

Σ' αυτήν την κατηγορία παρατηρούμε μια ομιλία αυτοκινήτων μεταξύ τους. Τα παρομοιάζουμε ως 2 ανθρώπους που έρχονται σε συνομιλία. Φυσικά αυτή η διαδικασία δεν γίνεται ποτέ ορατή στους οδηγούς, αλλά βασίζεται στο πρότυπο **DSRC** που αναλύσαμε πιο πάνω, στην ένότητα **Direct Short-Range Communication (DSRC)**. Ο οδηγός παίρνει ειδοποιήσεις για καταστάσεις των άλλων οδηγών. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέσω λογισμικού που είναι εγκατεστημένο στην οθόνη του αυτοκινήτου. Αν η κατάσταση των άλλων αυτοκινήτων δεν επιδεικνύει κίνδυνο για τον οδηγό του οχήματος μας,



τότε δεν υπάρχει καμιά ανησυχία. Τα οχήματα αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Δηλαδή το όχημα ενός οδηγού Α κρατάει ασφαλή απόσταση από το όχημα ενός οδηγού Β. Το κάθε όχημα έχει την δική του ακτίνα εμβέλειας κίνησης. Αν αισθανθεί κάποια εισερχόμενη κίνηση στην ακτίνα εμβέλειας του τότε αυτόματα η ταχύτητα του ελαττώνεται για να μην έχουμε ατύχημα. Άλλη περίπτωση χρήσης βρίσκουμε όταν το όχημα ενός οδηγού Α τρέχει με μεγάλη ταχύτητα και μπροστά υπάρχει όχημα ενός οδηγού Β με μικρότερη ταχύτητα, γίνεται αυτόματα φρενάρισμα για αποφυγή σύγκρουσης. Ήδη άρχισαν οι μελέτες και οι δοκιμές για αυτή την κατηγορία. Λένε πως θα είναι η πρώτη κατηγορία υλοποίησης. Μέχρι στιγμής 16 κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν βάλει σε εφαρμογή κατασκευές με υποστήριξη αυτής της τεχνολογίας.



Εικόνα 27 - V2V σύνδεση

Πηγή: <https://wtvox.com/fashion-innovation/the-future-of-driving-with-v2v-and-v2i-technology/>

3.3.2 V2D (Vehicle-to-Device)

Εν αντιθέσει με την προηγούμενη κατηγορία εδώ συναντάμε και πάλι το βασικό στέλεχος της τεχνολογίας το αυτοκίνητο, το οποίο βρίσκεται σε επικοινωνία με μικρότερες συσκευές και όχι με ολόκληρο όχημα αυτή την φορά. Κλασικό παράδειγμα έχουμε την περίπτωση ενός ποδηλάτου καθώς κινείται στο οδικό δίκτυο. Μέσω της ανερχόμενης τεχνολογίας **DSRC** όταν κάποιο ποδήλατο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με κάποιο όχημα, αυτό εκπέμπει το δικό του σήμα στην ακτίνα εμβέλειας του. Ακολούθως αποφεύγεται κάποια σύγκρουση καθώς μέσω της νέας τεχνολογίας τα δύο



οχήματα αλληλοεπιδρούν και επικοινωνούν μεταξύ τους. Η ανίχνευση της συσκευής γίνεται μέσω tracking device, η οποία συνδέεται με τα διάφορα οχήματα που βρίσκονται στην εμβέλεια της.

3.3.3 V2P (Vehicle-to-Pedestrian)

Ειδικά μέσα στις πόλεις οι άνθρωποι που περπατούν στα πεζοδρόμια είναι εκατομμύρια. Περπατούν ακριβώς δίπλα στο δρόμο με υψηλό κίνδυνο ατυχήματος. Φυσικά εκτός από την απροσεξία των πεζών, υπάρχουν και οι οδηγοί που δεν δίνουν προτεραιότητα στους πεζούς λόγω βιασύνης και έλλειψης υπομονής. Από την άλλη, υπάρχουν και οι πεζοί που πιστεύουν πως βρίσκονται μόνοι τους μέσα στο δρόμο διασχίζοντας όποτε θέλουν τους δρόμους και χωρίς να έχουν την προσοχή τους στην κίνηση των αυτοκινήτων. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ένα αρνητικό δεδομένο. Ο πεζός πρέπει οπωσδήποτε να έχει μαζί του έξυπνη κινητή συσκευή για τον εντοπισμό της θέσης του. Δεδομένου ότι ο πεζός έχει μαζί του κινητή συσκευή, εκπέμπει την θέση του στους οδηγούς αυτοκινήτων. Αυτοί με την σειρά τους παίρνουν ειδοποίηση σε περίπτωση που ένας πεζός αρχίζει να βηματίζει ώστε να περάσει απέναντι και αν όλα λειτουργήσουν ομαλά, αποφεύγεται το ατύχημα. Οι απόψεις σχετικά με την υλοποίηση τέτοιων εφαρμογών δίστανται, καθώς η ακρίβεια της θέσης και η υποχρεωτική μεταφορά κινητής συσκευής καθιστά αβέβαιη την ασφάλεια των πεζών. Βέβαια, είναι γεγονός πως σπάνια υπάρχει πεζός χωρίς το κινητό στις μέρες μας, αλλά κανένας δεν μας διαβεβαιώνει πως κρατάει κινητή συσκευή. Εξάλλου, η ακρίβεια της θέσης του πεζού ακόμη χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση, καθώς ακόμη τα σφάλματα υπάρχουν και ίσως και λίγα μέτρα να κοστίσουν ανθρώπινες ζωές. Στο πρόβλημα της ακρίβειας της θέσης των δεδομένων, θα βάλει τέλος σιγά σιγά η είσοδος των 5G δικτύων, τα οποία όπως προείπαμε έχουν μέλημά τους την ελάχιστη καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων και με όσο το δυνατόν ελάχιστα σφάλματα.

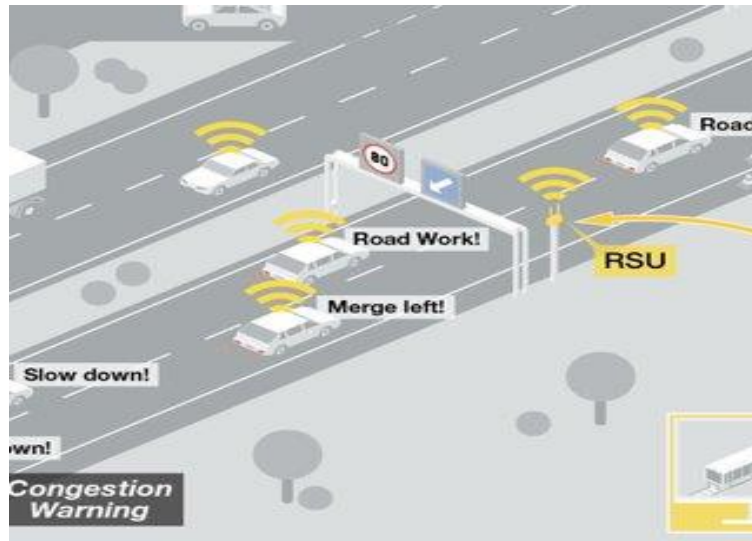


Εικόνα 28 - Vehicle to Pedestrian αρχιτεκτονική

Πηγή: <http://japan-product.com/honda-demonstrates-advanced-vehicle-to-pedestrian-and-vehicle-to-motorcycle-safety-technologies/>

3.3.4 Vehicle-to-Infrastructure (V2I)

Στην τελευταία μας κατηγορία βλέπουμε το αυτοκίνητο να έχει ασύρματη επικοινωνία με το σύστημα οδικής κυκλοφορίας. Έτσι ο οδηγός του οχήματος ενημερώνεται γρηγορότερα για την σήμανση των φαναριών που ακολουθούν αλλά και για την κυκλοφοριακή κίνηση που υπάρχει. Αυτόματα ενημερώνεται και για τις σημάνσεις που υπάρχουν πάνω στις ταμπέλες σχετικά με το όριο ταχύτητας και τα διάφορα άλλα σήματα κινδύνου. Ακόμη λαμβάνει πληροφορία για το αν υπάρχει κάποιος δρόμος-οδός που είναι κλειστός λόγω οδικών έργων. Αναμένεται να μπει σε εφαρμογή το 2022.



Εικόνα 29 - Vehicle to Infrastructure αρχιτεκτονική

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/C-ITS-illustration-The-beacon-message-is-known-as-a-CAM-Cooperative-Awareness_fig1_325681154

3.4 Βελτιώσεις στην μετάδοση μικρών δεδομένων (Small data enchantments)

Στο **Release 15** και **16** δεν επιτρέπεται η μετάδοση δεδομένων από χρήστη ο οποίος είναι σε ανενεργή κατάσταση. Οπότε καταλαβαίνουμε ότι και για μετάδοση πολύ μικρού όγκου δεδομένων, η συσκευή του χρήστη θα πρέπει να συνεχίσει τη σύνδεση, πράγμα το οποίο είναι ασύμφορο στη γενική σηματοδότηση αλλά και στην κατανάλωση ενέργειας της συσκευής. Οπότε, στην **έκδοση 17**, θα εισαχθεί η δυνατότητα μετάδοσης μικρών δεδομένων όταν η συσκευή θα βρίσκεται σε ανενεργή κατάσταση.

3.5 NR Light

Το Massive Cellular IoT είναι ένα από τα τρία σενάρια χρήσης που ορίζονται από το ITU-R. Για το LTE, έχουν καθοριστεί δύο τεχνολογίες για το σκοπό αυτό: επικοινωνίες τύπου μηχανής (LTE-M) και στενή ζώνη IoT (NB(narrow band)-IoT). Τα LTE-M και NB-IoT υποστηρίζουν μέγιστους ρυθμούς δεδομένων περίπου **1 Mb / s** και **160 kb / s**, αντίστοιχα, με επέκταση κάλυψης τουλάχιστον **15 dB**.



Παρά την υψηλή απόδοση του **NR** (New Radio) στην έκδοση 15 (**Release 15**), ενδέχεται να είναι υπερβολικά περίπλοκο για εφαρμογές όπου η υψηλή απόδοση, η καθυστέρηση και η αξιοπιστία δεν είναι κρίσιμος παράγοντας λειτουργίας. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση, το NR αναμένεται να αναβαθμιστεί ώστε να υποστηρίζει μια ελαφρύτερη έκδοση του σημερινού NR, το **NR-Light**, για τις συσκευές **IoT** καθημερινής και πιο απλής χρήσης, π.χ. smartwatches, κάμερες παρακολούθησης, βιομηχανικούς αισθητήρες κ.α... Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων του NR-Light αναμένεται να είναι 5 με 10 **Mbps**, 2 - 25 **Mbps** σε μεταδόσεις βίντεο και 5-50 **Mbps** για υψηλής ταχύτητας φορητές συσκευές, ο οποίος είναι τουλάχιστον 100 φορές χαμηλότερος από τις πρώτες συσκευές NR σύμφωνα με το **Release 17**, το οποίο συμβάλλει σε πολύ καλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Άλλα προσχέδια που συζητούνται για βελτιωμένη εξοικονόμηση ενέργειας στον εξοπλισμό χρήστη UE (π.χ. σήμα αφύπνισης) είναι υποψήφια χαρακτηριστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το **NR-Light**. Τέλος, η μείωση της πολυπλοκότητας και της κατανάλωσης ενέργειας των συσκευών, αποτελούν στόχοι προς επίτευξη, χωρίς όμως να διακυβεύεται η δυνατή κάλυψη και χωρίς να προορίζεται να αντικαταστήσει συσκευές ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος **mMTC** (συσκευές eMTC / NB-IoT).

3.6 NR σε συχνότητες άνω του 52,6 GHz

Στην περίπτωση του **release 15** και **16** της **3GPP**, αναφερόμασταν για συχνότητες έως 52,6 **GHz**. Στην περίπτωση της έκδοσης 17, η υποστήριξη του φάσματος θα επεκταθεί στα 71 **GHz**. Οπότε, η συγκεκριμένη βελτίωση του **Release 17** θα καλύπτει την αρχική ζώνη των 60 **GHz** (57-66 **GHz**) και παράλληλα και την πρόσφατα αναγνωρισμένη ζώνη συχνοτήτων 66-71 **GHz**. Αυτή η επέκταση σε ζώνες υψηλότερης συχνότητας, θα εισαγάγει νέες αριθμολογίες με υψηλότερα διαστήματα υποφορέων (subcarriers) και σχετικές πτυχές συγχρονισμού. Θα περιλαμβάνει επίσης, για παράδειγμα, διαδικασίες φυσικού επιπέδου και πτυχές πρωτοκόλλου που απαιτούνται για λειτουργία σε ζώνες χωρίς άδεια μεταξύ 52,6 **GHz** και 71 **GHz**.

3.7 Βελτιώσεις ως προς την ενεργειακή κατανάλωση

Όλα τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες για μειωμένη κατανάλωση ενέργειας μεταξύ **NR** και **UE** έχουν ήδη εισαχθεί με το **Release 16**. Στην έκδοση 17 φυσικά, θα εξεταστούν πρόσθετα χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας, που έχουν ως στόχο ιδιαίτερα τις συσκευές που θα



βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής και αδρανούς λειτουργίας. Αυτό θα περιλαμβάνει μέσα για τη μείωση των περιττών λήψεων του paging του χρήστη.

3.8 Extended Reality – 5G

Εδώ και μερικά χρόνια, το 5G έχει συσχετιστεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, ότι με την είσοδο του θα εισάγει και νέες ψηφιακές εφαρμογές και υπηρεσίες. Η εικονική (VR) και η επαυξημένη (AR) πραγματικότητα, αποτελούν δύο από αυτές τις υπηρεσίες. Ωστόσο, η πρώτη δεν έχει τόσο μεγάλη εξέλιξη όσο η δεύτερη και οι προσπάθειες της βιομηχανίας είναι στραμμένες προς την AR. Το 5G, ως υποδομή ασύρματης επικοινωνίας, θα είναι σε θέση να ικανοποιήσει τις απαιτούμενες από πόρους απαιτήσεις (απαιτούμενο εύρος ζώνης, χαμηλή καθυστέρηση κ.α.) νέων υπηρεσιών και εφαρμογών Extended Reality (XR).



Εικόνα 30- VR and AR

Πηγή: <https://www.cio.com/article/3243032/5-practical-ways-ar-can-be-used-in-business-today.html>

Ο συνδυασμός των 2 παραπάνω τεχνολογιών μας φέρνουν το αποτέλεσμα της τεχνολογίας XR όπως βλέπουμε και στην παρακάτω **Εικόνα 31**:



XR is the future



Εικόνα 31 - XR τεχνολογία

Πηγή: <http://danielschristian.com/learning-ecosystems/2018/02/10/what-really-is-the-difference-between-ar-mr-vr-xr-10-other-items-re-ar-vr-and-mr/>

Το βασικό μέρος των εφαρμογών **XR** είναι ο **3D ήχος** και τα **ογκομετρικά οπτικά** μέσα (ολογράμματα) που διακρίνει ο χρήστης. Το περιβάλλον είναι εικονικό, επανυξημένο και φαίνεται στον πραγματικό κόσμο. Το βασικό των δεδομένων αυτών είναι ότι, αποτελούν μια πλήρης τρισδιάστατη αναπαράσταση σκηνών και αντικειμένων που επιτρέπουν εμπειρίες που είναι **6DOF** (6 Degrees of freedom)¹¹.

3.9 Νέες τεχνολογίες και προσθήκες καινούργιων χαρακτηριστικών σε ήδη υπάρχουσες (Release 17)

Όπως αναφέραμε και στα παραπάνω κεφάλαια, η εξέλιξη του νέου δικτύου 5G (NR) προχωράει με ταχύτατους ρυθμούς από τότε που η 3GPP τυποποίησε την πρώτη έκδοση του NR (release 15) το 2018. Έως τώρα έχει ολοκληρωθεί η έκδοση 16 και έχει σχεδόν εγκριθεί η κυκλοφορία της έκδοσης

¹¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Six_degrees_of_freedom



17 και τα χαρακτηριστικά της. Ο συνολικός σχεδιασμός του δικτύου αποτελείται από πολλά βασικά στοιχεία και η επέκταση του σε πολύ υψηλότερες συχνότητες φορέα είναι σημαντική έως υποχρεωτική, λόγω της συνεχούς ζήτησης για περισσότερη κίνηση και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων χρήστη. Ο απλουστευμένος σχεδιασμός του 5G NR βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του δικτύου, μειώνοντας τις παρεμβολές, ενώ η συνεργασία με LTE δίκτυα θα επιτρέψουν τη χρήση υπαρχόντων κυψελοειδών δικτύων.

Τα στοιχεία εργασίας που είχαν εγκριθεί από την 3GPP το 2019 θα οδηγήσουν στην εισαγωγή νέων χαρακτηριστικών για τις κύριες περιπτώσεις χρήσης ([61]): 1) βελτιωμένες ευρυζωνικές κινητές συσκευές (**eMBB**), 2) URLLC και 3) μαζικές επικοινωνίες συσκευών-μηχανής (**mMTC**). Ο κύριος σκοπός είναι να υποστηριχθεί η ταχύτατη αύξηση της κίνησης δεδομένων των συσκευών-χρηστών και να γίνει προσαρμογή του 5G NR σε περιπτώσεις χρήσης στην αυτοκίνηση, στη δημόσια ασφάλεια, στα media, κ.α..

3.9.1 Περίπτωση **eMBB** (Enhanced Mobile Broadband)

3.9.1.1 Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και περιπτώσεις χρήσης

- **Data collection:** Βελτιώσεις για την υποστήριξη δικτύων αυτόνομης οργάνωσης (self-organizing networks - SON) με βελτιωμένους μηχανισμούς συλλογής δεδομένων.
- **UE power saving:** Βελτίωση των μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για την μη συνεχή λήψη και την τυφλή αποκωδικοποίηση των καναλιών ελέγχου
- **IAB (Integrated Access and Backhaul/Backhauling):** 1) Προσθήκες νέων χαρακτηριστικών για υποστήριξη αλλαγών σε τοπολογίες δικτύου. 2) Βελτίωση των αμφίδρομων συνδέσεων πρόσβασης και των συνδέσμων επιστροφής (ταυτόχρονη λειτουργία σε σύνδεση παιδιού-κόμβου και κόμβου-γονέα). 3) Βελτίωση στον τρόπο δρομολόγησης.
- **MIMO:** Δημιουργία βελτιώσεων, βασισμένες στην εμπειρία από τα εμπορικά δίκτυα που εστιάζουν στη λειτουργία multi-beam κυρίως.



- **DSS (Dynamic Spectrum Sharing)** : Βελτίωση στον προγραμματισμό των cross-carrier και άλλες επιπρόσθετες και γενικότερες βελτιώσεις προγραμματισμού.
- **Διαχείριση QoE και βελτιστοποιήσεις μεταξύ της λειτουργίας διαφορετικών υπηρεσιών**: Δημιουργία γενικού πλαισίου, για την ενεργοποίηση και διαμόρφωση της συλλογής αναφοράς και μέτρησης QoE, για διάφορες περιπτώσεις χρήσης 5G.
- **Διπλή συνδεσιμότητα πολλών ασύρματων δικτύων (multi-radio)**: Πιο αποτελεσματικός μηχανισμός ενεργοποίησης και απενεργοποίησης δευτερογενών κελιών και αλλαγή / προσθήκη πρωτογενούς-δευτερογενούς κυττάρου υπό όρους.
- **Κάλυψη δικτύου**: Εστίαση στις περιπτώσεις χρήσης κινητής ευρυζωνικής και φωνητικής υπηρεσίας, με εξαίρεση την περίπτωση χρήσης ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος.

3.9.1.2 Προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και περιπτώσεων χρήσης

- **Εύρος συχνοτήτων από το NR 52,6Hz - 71Hz**: Διευρυμένο εύρος συχνοτήτων που επιτρέπουν την εκμετάλλευση διευρυμένου φάσματος, το οποίο συμπεριλαμβάνει και την μη αδειοδοτημένη ζώνη των **60 Hz**. Ορισμός νέου μηχανισμού για πρόσβαση καναλιού από την **OFDM** (ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας) ώστε να συμμορφώνεται με τις νομοθετικές απαιτήσεις που ισχύουν για το μη αδειοδοτημένο φάσμα.
- **Multicast και broadcast μεταδόσεις**: Στόχος οι εφαρμογές του Internet of Things (IoT), το V2X, δημόσια ασφάλεια, οι παραδόσεις λογισμικού και η δημόσια ασφάλεια.
- **Υποστήριξη συσκευών με πολλαπλές SIM**: Ειδοποίηση του δικτύου όταν ένα UE αλλάζει δίκτυα και αποφυγή σύγκρουσης τηλεειδοποίησης (paging¹² collision avoidance).
- **Υποστήριξη μη επίγειων δικτύων**: Υποστήριξη δορυφόρων, ειδικά σε περιπτώσεις χαμηλής γήινης τροχιάς και γεωστατικών δορυφόρων και πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου.

¹² <https://en.wikipedia.org/wiki/Pager>



- **Αναμετάδοση Sidelink**: Αναμετάδοση L2 έναντι L3, η οποία περιλαμβάνει, αναμετάδοση single-hop, UE σε UE και UE σε network.

3.9.2 Περίπτωση **URLLC** (Ultra-Reliable Low-Latency Communication)

3.9.2.1 Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και περιπτώσεις χρήσης

- **Υποστήριξη IIoT και URLLC**: Βελτίωση στην υποστήριξη αυτοματισμού και του URLLC, το οποίο περιέχει βελτιώσεις στο φυσικό στρώμα (physical layer) και βελτιώσεις στον χρόνο συγχρονισμού. Επίσης, προσδιορίζονται βελτιώσεις για τη λειτουργία του URLLC/IIoT σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα τα οποία λειτουργούν σε μη αδειοδοτημένες ζώνες.
- **Positioning(θέση)**: Υψηλότερη ακρίβεια τοποθεσίας στο περιβάλλον και χαμηλότερη καθυστέρηση (ειδικότερα σε περιπτώσεις χρήσης **IIoT**).
- **Sidelink**¹³: 1)Βελτιώνεται η κατανομή των πόρων. 2) Ασυνεχής λήψη του Sidelink. 3) Η τεχνολογία εστιάζει στην τεχνολογία V2X και την δημόσια ασφάλεια.
- **RAN slicing**: Προσθήκη μηχανισμών που επιτρέπουν σε γρήγορη πρόσβαση του **UE** στο συγκεκριμένο κελί που υποστηρίζει το προοριζόμενο slice. Επίσης, γίνεται προσθήκη μηχανισμών για την υποστήριξη της συνέχισης της υπηρεσίας για τεχνολογία ενδο-ραδιοπρόσβασης και σε περίπτωση διακοπής του handover.

¹³ http://www.sharetechnote.com/html/LTE_Advanced_D2D_Radio.html



3.9.2.2 Προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και περιπτώσεων χρήσης

- **Επεκτεινόμενη πραγματικότητα (XR reality)** : Αξιολόγηση των αναγκών σε ταυτόχρονη παροχή πολύ υψηλών ρυθμών δεδομένων παράλληλα με χαμηλό λανθάνων χρόνο και τρόπο αποδοτικό σε πόρους.

Προορισμός για υποστήριξη διάφορων μορφών επαυξημένης πραγματικότητας και εικονικής πραγματικότητας που αναφέρεται ως τεχνολογία XR(X-tended Reality).

3.9.3 Περίπτωση mMTC (Massive Machine-Type Communications)

3.9.3.1 Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες και περιπτώσεις χρήσης

- **Περιορισμένες μεταδόσεις δεδομένων σε ανενεργή κατάσταση**: Μείωση της επιβάρυνσης της εγκατάστασης σύνδεσης.

Παραδείγματα χρήσης: wearables αισθητήρες και άλλοι ποικίλοι αισθητήρες, μηνύματα τύπου keepalive¹⁴.

3.9.3.2 Προσθήκη νέων χαρακτηριστικών και περιπτώσεων χρήσης

- **Υποστήριξη συσκευών μειωμένης ικανότητας στο NR**: Στοχεύει σε εφαρμογές και υπηρεσίες μεσαίου επιπέδου, όπως για παράδειγμα, επικοινωνίες τύπου μηχανής για βιομηχανικούς αισθητήρες, παρακολούθηση βίντεο, και φορητές συσκευές με ρυθμούς δεδομένων μεταξύ των ρυθμών δεδομένων **Narrowband** IoT / LTE-M και των ρυθμών δεδομένων με πλήρη ρυθμό μετάδοσης στο NR. Επίσης, θα μπορεί και θα αντιμετωπίζει ζητήματα πολυπλοκότητας, εξοικονόμησης ενέργειας των UE's και βελτίωσης της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των συσκευών.

3.9.4 Συμπεράσματα

Οι εκδόσεις της 3GPP στα release 16 και 17 αλλά και οι νέες προσθήκες στο release 17 θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επέκταση τόσο της διαθεσιμότητας όσο και της δυνατότητας

¹⁴ <https://en.wikipedia.org/wiki/Keepalive>



εφαρμογής του νέου δικτύου 5G σε ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών και περιπτώσεων χρήσης τόσο στις περιπτώσεις της βιομηχανίας όσο και στις δημόσιες υπηρεσίες. Παραπάνω λοιπόν αναλύθηκαν βελτιώσεις σε ήδη υπάρχουσες δυνατότητες και χαρακτηριστικά και δυνατότητες που τείνουν να αναπτυχθούν στο νέο δίκτυο 5G. Τέλος, η γενικότερη φιλοδοξία της εξέλιξης του 5G NR θα πρέπει να καλύπτει το όραμα της «παντού και πανταχού συνδεσιμότητας» με δυνατότητες σύνδεσης οποιασδήποτε συσκευής οπουδήποτε και οποτεδήποτε, με την διασφάλιση ότι το NR παρέχει υψηλό βαθμό ενεργειακής απόδοσης, τόσο από πλευράς δικτύου όσο και από πλευράς συσκευών με την παράλληλη διατήρηση της ικανότητάς του να συνυπάρχει ομαλά με το LTE και τα προγενέστερα δίκτυα.

Τέλος, στους παρακάτω πίνακες θα δούμε επιγραμματικά τις διαφορές, τις προσθήκες περιπτώσεων χρήσης σε υπάρχουσες τεχνολογίες και την προσθήκη νέων τεχνολογιών στις εκδόσεις 15 ,16 και 17 (Release 15 ,16 & 17) της 3GPP.

<u>Release 15</u>	<u>Release 16</u>	<u>Release 17</u>
NR	NR-U (unlicensed Spectrum)	NR MIMO
New Radio (Φάση 1)	New Radio (Φάση 2)	NR Coverage (νέες προσθήκες)
massiveMTC και IoT	IIoT (Industrial Internet of things)	Αυτοματοποίηση Δικτύου 5G (Φάση 2)
V2X (Φάση 2)	V2X (Φάση 3)	V2X (νέες προσθήκες)
WLAN και μη αδειοδοτημένη χρήση φάσματος	Πρόσβαση δορυφόρων στο 5G δίκτυο	DSS (Δυναμική κοινή χρήση φάσματος)
Slicing	URLLC (Ultra reliable and Low Latency Communication)	URLLC and IIoT (νέες προσθήκες)
Σύστημα Κινητής επικοινωνίας σιδηροδρόμων (FRMCS- Mobile Communication System for Railways)	Σύστημα Κινητής επικοινωνίας σιδηροδρόμων (FRMCS- Mobile Communication System for Railways) (Φάση 2)	RAN Slicing
Πρόσβαση Τρίτων σε υπηρεσίες 5G	Integrated Access and Backhaul	Integrated Access and Backhaul (νέες προσθήκες)
		NR Positioning
		Multi SIM
		5G Multicast αναμετάδοση
		Power Saving



Release 16 (Προσθήκες σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες).	Release 16 (Προσθήκες καινούργιων τεχνολογιών)
Multiple-Input and Multiple-Output, διαμόρφωση δέσμης (beamforming)	Ανασυγκρότηση και ολοκληρωμένη πρόσβαση (Integrated access and backhaul - IAB)
Δυναμική αξιοποίηση φάσματος από κοινού	καινούργιο Δίκτυο στο μη αδειοδοτημένο φάσμα
Διπλή συνδεσιμότητα και συνάθροιση φορέα	Λειτουργίες που σχετίζονται με το Βιομηχανικό Διαδίκτυο Πραγμάτων (IIoT) και με την αξιόπιστη επικοινωνία πολύ χαμηλού λανθάνοντος χρόνου (URLLC)
Εξοικονόμηση ενέργειας από την μεριά του εξοπλισμού χρήστη	Ευφυή συστήματα μεταφοράς (ITS) και επικοινωνίες (V2X)
	Θέση (Positioning)

eMBB (Προσθήκη σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες) Release 17	
<u>Data collection</u>	Βελτιώσεις για την υποστήριξη δικτύων αυτόνομης οργάνωσης (self-organizing networks - SON) με βελτιωμένους μηχανισμούς συλλογής δεδομένων.
<u>UE power saving</u>	Βελτίωση των μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για την μη συνεχή λήψη και την τυφλή αποκωδικοποίηση των καναλιών ελέγχου.
<u>Integrated Access and Backhaul/Backhauling</u>	1) υποστήριξη αλλαγών σε τοπολογίες δικτύου. 2) Βελτίωση των αμφίδρομων συνδέσεων πρόσβασης και των συνδέσμων επιστροφής. 3) Βελτίωση στον τρόπο δρομολόγησης.
<u>MIMO</u>	Δημιουργία βελτιώσεων, βασισμένες στην εμπειρία από τα εμπορικά δίκτυα που εστιάζουν στη λειτουργία multi-beam.
<u>Dynamic Spectrum Sharing</u>	Βελτίωση στον προγραμματισμό των cross-carrier.
<u>Διαχείριση QoE και βελτιστοποιήσεις μεταξύ της λειτουργίας διαφορετικών υπηρεσιών</u>	Δημιουργία γενικού πλαισίου, για την ενεργοποίηση και διαμόρφωση της συλλογής αναφοράς και μέτρησης QoE, για διάφορες περιπτώσεις χρήσης 5G.
<u>Διπλή συνδεσιμότητα πολλών ασύρματων δικτύων (multi-radio)</u>	Πιο αποτελεσματικός μηχανισμός ενεργοποίησης και απενεργοποίησης δευτερογενών κελιών.
<u>Κάλυψη δικτύου</u>	Εστίαση στις περιπτώσεις χρήσης κινητής ευρυζωνικής και φωνητικής υπηρεσίας.



eMBB (Προσθήκη νέων τεχνολογιών) Release 17	
<u>Εύρος συχνοτήτων από το NR 52,6 hz- 71hz</u>	Διευρυμένο εύρος συχνοτήτων που επιτρέπουν την εκμετάλλευση διευρυμένου φάσματος.
<u>Multicast και broadcast μεταδόσεις</u>	Στόχος οι εφαρμογές του Internet of Things.
<u>Υποστήριξη συσκευών με πολλαπλές SIM</u>	Ειδοποίηση του δικτύου όταν ένα UE αλλάζει δίκτυα και αποφυγή σύγκρουσης τηλεειδοποίησης.
<u>Υποστήριξη μη επίγειων δικτύων</u>	Υποστήριξη δορυφόρων.
<u>Αναμετάδοση Sidelink</u>	Αναμετάδοση L2 έναντι L3, η οποία περιλαμβάνει, αναμετάδοση single-hop, UE σε UE και UE σε network.

URLLC (Προσθήκη σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες) Release 17	
<u>Υποστήριξη IoT και URLLC</u>	Βελτίωση στην υποστήριξη αυτοματισμού και του URLLC.
<u>Positioning(θέση)</u>	Υψηλότερη ακρίβεια τοποθεσίας στο περιβάλλον και χαμηλότερη καθυστέρηση.
<u>Sidelink</u>	1)Βελτιώνεται η κατανομή των πόρων. 2) Ασυνεχής λήψη του Sidelink. 3) Η τεχνολογία εστιάζει στην τεχνολογία V2X και την δημόσια ασφάλεια
<u>RAN slicing</u>	Προσθήκη μηχανισμών που επιτρέπουν σε γρήγορη πρόσβαση του UE στο συγκεκριμένο κελί που υποστηρίζει το προοριζόμενο slice.

URLLC (Προσθήκη νέων τεχνολογιών) Release 17	
<u>Επεκτεινόμενη πραγματικότητα (XR reality)</u>	Αξιολόγηση των αναγκών σε ταυτόχρονη παροχή πολύ υψηλών ρυθμών δεδομένων παράλληλα με χαμηλό λανθάνων χρόνο και τρόπο αποδοτικό σε πόρους.

mMTC (Προσθήκη σε ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες) Release 17	
<u>Περιορισμένες μεταδόσεις δεδομένων σε ανενεργή κατάσταση</u>	Μείωση της επιβάρυνσης της εγκατάστασης σύνδεσης.



mMTC (Προσθήκη νέων τεχνολογιών) Release 17

Υποστήριξη συσκευών
μειωμένης ικανότητας στο
NR

Στοχεύει σε εφαρμογές και υπηρεσίες μεσαίου επιπέδου, όπως για παράδειγμα, επικοινωνίες τύπου μηχανής.



Επίλογος - Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήθηκαν με λεπτομέρεια οι περισσότερες τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν για την σωστή και αποτελεσματική δόμηση των νέων κινητών δικτύων 5G. Η συνεχής αύξηση των χρηστών και των έξυπνων συσκευών, ανάγκασε σε εξέλιξη και αναβάθμιση των δικτύων, θέλοντας έτσι να προσφέρει στους χρήστες έναν μεγάλο όγκο χρήσιμων εφαρμογών, οι οποίες όμως απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων και παράγουν επίσης ένα μεγάλο πλήθος κίνησης δεδομένων μεταξύ τους, πράγμα το οποίο καθιστά τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν οι χρήστες να είναι ολοένα και πιο απαιτητικές σε πόρους. Σαν αντίκτυπο τα νέα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έρχονται αντιμέτωπα με έναν αυξανόμενο κολοσσό πλήθους δεδομένων και την εξυπηρέτηση εφαρμογών που έχουν κύρια προ-απαίτηση πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε συνδυασμό με μικρές χρονικές καθυστερήσεις, πράγμα το οποίο προ-απαιτεί τεράστιο εύρος ζώνης ακόμα και στην περίπτωση που οι χρήστες είναι εν κινήσει. Οπότε αναφέροντας όλα τα παραπάνω, μιλάμε για μια αναγκαία εξέλιξη των δικτύων, αφού τα προϋπάρχοντα δίκτυα δεν έχουν την δυνατότητα και τους κατάλληλους πόρους να αντιμετωπίσουν μια τέτοια πληροφοριακή συμφόρηση. Για να γίνει αυτή η επίτευξη όμως και να διεκπεραιωθούν οι στόχοι των δικτύων πέμπτης γενιάς πρέπει να υπάρξει συγκεκριμένη γραμμή καθοδήγησης για την αλλαγή της δομής και της αρχιτεκτονικής, πράγμα το οποίο θα καταστεί πιο εύκολο αν δοθεί έμφαση στην συνύπαρξη των προτύπων και στην σταθερή βελτίωση των ήδη υπάρχοντων δικτύων 4G+. Επίσης, κάτι πολύ ουσιαστικό και σημαντικό είναι να υπάρχει δυνατότητα ευελιξίας εξαιτίας της ταχύτατης αλλαγής που υπάρχει στον κόσμο της πληροφορικής και της τεχνολογίας. Θα πρέπει ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών και τα πιθανά σενάρια χρήσης να μπορεί να γίνει οποτεδήποτε μια ουσιαστική αλλαγή στην αρχιτεκτονική ή στην δομή των δικτύων.

Οι προσπάθειες και τα ερευνητικά προγράμματα είναι πολλά και όντας όλα μαζί σε συνδυασμό έχουν σκοπό να αντιμετωπίσουν τα οικονομικά, χωρικά και δομικά εμπόδια, ώστε να μπορέσουμε όλοι μας μετά το 2020 να εισέλθουμε σε έναν κόσμο με ασύλληπτες ταχύτητες, μηδενικές καθυστερήσεις και να απολαύσουμε τις καθημερινές ευκολίες, σαν κάτοχοι των δυνατοτήτων των δικτύων αυτών.



Αναφορές

- [1] Copyright 2019 whatsag.com, “**A History of the G Mobile Generations**”, 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://whatsag.com/mobile%20%20%20%20%20technology/generation_history.php
- [2] Wikipedia, “**1G**”, April 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/1G>
- [3] Copyright 2019 whatsag.com, “**The History of 2G**”, 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://whatsag.com/mobile-technology/the-history-of-2g.php>
- [4] Copyright 2019 whatsag.com, “**The History of 3G**”, 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://whatsag.com/mobile-technology/the-history-of-3g.php>
- [5] Wikipedia, “**3G**”, June 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/3G>
- [6] Copyright 2019 whatsag.com, “**The History of 4G**”, 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://whatsag.com/mobile-technology/the-history-of-4g.php>
- [7] Wikipedia, “**4G**”, February 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://el.wikipedia.org/wiki/4G>
- [8] Patrick Marsch, Omer Bulakci, Olav Queseth, Mauro Boldi, “**Architectural and Functional Considerations and Long Term Research**”, 2018.
- [9] Frédéric Firmin, “**The evolved Packet Core**”. Accessed: 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core>
- [10] Dahlman E., Parkvall S., & Skold J., “**4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G**”, (2016).
- [11] Samsung Copyright 2017, “**4G-5G Interworking: RAN-level and CN-level Interworking**”, June 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white_paper/4g-5g-interworking/global-networks-insight-4g-5g-interworking-0.pdf
- [12] Copyright Huawei Technologies, “**Partnering with the industry for 5G Security Assurance**”, 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/trust-center/huawei-5g-security-white-paper-4th.pdf>
- [13] ©3GPP Copyright 2020, “**About 3GPP**”, 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.3gpp.org/about-3gpp>
- [14] Wikipedia, “**TSG**”, February 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/TSG>



- [15] SDxCentral Staff, “**5G Standards: What you need to know**”, October 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-standards/>
- [16] IEEE Communication Society, “**New ITU-T Standards for IMT 2020 (5G) + 3GPP Core Network Systems Architecture**”, November 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://techblog.comsoc.org/tag/itu-t/>
- [17] Ανάκτηση από ιστοσελίδα: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/3F/01/T3F010000010001PDFE.pdf
- [18] Copyright Huawei Technologies, “**E2E Architecture Overview**”, 2019-Aug-1. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/e2e-architecture-overview/thread/554267-100305>
- [19] 5G PPP, “**View on 5G Architecture**”, 2019 June. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf
- [20] Patrick Marsch, Icaro Da Silva, Ömer Bulakci, Milos Tesanovic, Salah Eddine El Ayoubi, Thomas Rosowski, Alexandros Kaloylos, Mauro Boldi, “**5G Radio Access Network Architecture- Design Guidelines and Key Considerations**”, IEEE Communications Magazine (Volume: 54, Issue: 11), November 2016. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/research-papers/5g-radio-access-network-architecture--design-guidelines-and-key-considerations>
- [21] Gabriel Brown: “**Service-Based Architecture for 5G Networks**”. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://www.3g4g.co.uk/5G/5Gtech_6004_2017_11_Service-Based-Architecture-for-5G-Core-Networks_HR_Huawei.pdf
- [22] SDxCentral Staff, “**The role of C-RAN in 5G Networks**”, January 15 2018. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/cran/>
- [23] Wikipedia, “**C-RAN**”, December 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/C-RAN>
- [24] Erik G. Larsson, IEEE 5G Tech Focus, “**Massive MIMO for 5G**”. Volume 1, Number 1, March 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/march-2017/massive-mimo-for-5g>
- [25] Wikipedia, “**MIMO-OFDM**”, May 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO-OFDM>
- [26] © Copyright 2017 5G Americas, “**3GPP Release 13 to Release 15 and beyond**” February 2017: https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/3GPP_Rel_13_15_Final_to_Upload_2.28.17_AB.pdf



- [27] Phillip Tracy on 15-AUGUST- 2016, “ **What is mmWave and how does it fit into 5G?**”. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.rcrwireless.com/20160815/fundamentals/mmwave-5g-tag31-tag99>
- [28] Dr.Maziar Nekovee, “ **Radio Technologies for Spectrum Above 6 GHz**” , 17 March 2015. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://pdfs.semanticscholar.org/9134/c04818a92d2a8e14e2f567b33d5e9bf22b25.pdf>
- [29] Miurel Tercero, Peter von Wrycza, Aditya Amah, Joerg Widmer, Maria Fresia, Valerio Frascolla, Javier Lorca, Tommy Svensson, Marie-Hélène Hamon, Sandrine Destouet Roblot, Arnesh Vijay, Michael Peter, Victoria Sgardoni, Mythri Hunukumbure, Jian Luo, Nikola Vucic, “**5G Systems: The mmMAGIC project perspective on Use cases and Challenges between 6-100 GHz**” . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: http://eprints.networks.imdea.org/1294/1/WP1_Paper_5G_systems_The_mmMAGIC_project_perspecti-vevr3.pdf
- [30] S. Salous, V. Degli Esposti, F. Fuschini, D. Dupleich, R. Müller, R. S. Thomä, K. Haneda, J.M. Molina-GarciaPardo, J. Pascual-Garcia, D. P. Gaillot, M. Nekovee, S. Hur, 5 December 2016, “**Millimeter-wave Propagation Characterization and Modelling Towards 5G Systems**”. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://dro.dur.ac.uk/20493/1/20493.pdf>
- [31] Qualcomm, “**Breaking the wireless barriers to mobilize 5G NR mmWave**”, ,2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-nr-mmwave-deployment-strategy-presentation.pdf>
- [32] Qualcomm, “**5G NR mmWave outdoor and indoor deployment strategy**”,2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/deploying-5g-nr-mmwave-for-indoor-outdoor.pdf>
- [33] Azizi Othman, “**User Ultra Dense Networks for 5G In Urban Areas**”, December 2018. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://www.researchgate.net/publication/329862975_User_Ultra-Dense_Networks_For_5G_In_Urban_Areas
- [34] Jialing Liu, Weimin Xiao, Chih-Lin I, Chenyang Yang, Anthony Soong, “**Ultra Dense networks for 5G**”, Volume 1, Number 1, March 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://futurenetworks.ieee.org/tech-focus/march-2017/ultra-dense-networks-udns-for-5g>
- [35] Liu and W. Xiao, “**Advanced Carrier Aggregation Techniques for Multi-Carrier Ultra-Dense Networks**”, IEEE Commun. Mag., July 2016.
- [36] 3GPP TR38. 802 “**NR Access Tech Physical Layer Aspects**”, Mar. 2017
- [37] “**5G NR gNB Logical Architecture and Its Functional Split Options**” ,Oct.2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.techplayon.com/5G-nr-gnb-logical-architecture-functional-split-options/>
- [38] Zhonglin Chen, Shanzhi Chen, Hui Xu, Bo Hu. “**Security Architecture and scheme of user-centric ultra-dense network(UUDN)**”, Published 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:



- <https://www.semanticscholar.org/paper/Security-architecture-and-scheme-of-user-centric-Chen-Chen/1c6aef1d049fd11238c433b5cfe7488ee00aa044>
- [39] ©2019 Autotalks Ltd, “**DSRC vs C-V2X for Safety Applications**” . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.auto-talks.com/technology/dsrc-vs-c-v2x-2/>
- [40] SDxCentral Staff, “**In the world of 5G, Virtualization is Everything**”, November 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-virtualization/?c_action=related_articles
- [41] inSlidShare, “**How Operator core networks evolve towards 5G – Digital Futures 2025**”, December 2015. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.slideshare.net/OvumTelecoms/how-operator-core-networks-evolve-towards-5g-digital-futures-2025>
- [42] SDxCentral Staff, “**What is software Defined Networking(SDN)**”, August 2016. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/networking/sdn/definitions/what-the-definition-of-software-defined-networking-sdn/>
- [43] SDxCentral Staff, “**How 5G SDN Will Bolster Networks**”, October 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-sdn/>
- [44] SDxCentral Staff, “**NFV**”, October 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/networking/nfv/>
- [45] SDxCentral Staff, “**How 5G NFV will Enable the 5G Future**”, October 2017. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-nfv/>
- [46] X.Foukas, G.Patounas, A.Elmokashfi, M.K.Marina, “**Network Slicing in 5G: Survey and Challenges**”, IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 5, pp. 94-100
- [47] Akhil Gupta and Rakesh kumar jha “**A survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies**” vol 3, pp 1206-1232, AUG 2015
- [48] T. Taleb, K. Samdanis, B Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, “**On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration**”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19, No. 3, Third Quarter 2017, pp 1657-1981
- [49] Telefonaktiebolaget LM Ericsson 1994-2020, “**Ericsson Network Functions Virtualization Infrastructure**” . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.ericsson.com/en/portfolio/digital-services/cloud-infrastructure/nfvi>
- [50] Jean-Luc Aufranc (CNXSOFT) March 7, 2016 “**The First Devices and Routers with Wi-Fi 802.11ad Delivering Up 7Gbit/s Transfer Rates at 60 GHz**” . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.cnx-software.com/2016/03/07/the-first-devices-and-routers-with-wifi-802-11ad-delivering-up-7gbits-transfer-rates-at-60-ghz-will-be-available-this-year/>



- [51] SDxCentral Staff, “**What is a Virtual Network Function or VNF;**”, October 2014. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.sdxcentral.com/networking/nfv/definitions/virtual-network-function/>
- [52] Yousaf, F.Z., Sciancalepore, V.Liebsch, M. γ Costa-Pérez, X., “**MANOaaS: A Multi-Tenant NFV MANO for 5G Network Slices**” IEEE Communications Magazine, 57 (5), pp.103109, (2019) . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28823/MANOaaS_IEEECM_2019_ps.pdf?sequence=1
- [53] Birgit Ahlborn, “**Five Reasons why we benefit from V2X**”, May 2016. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://blog.nxp.com/automotive/five-reasons-why-we-benefit-from-v2x>
- [54] © 2020 STMicroelectronics, “**Vehicle- to- Everything (V2X)**” . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.st.com/en/applications/telematics-and-networking/vehicle-to-everything-v2x.html>
- [55] Copyright © 2005-2020 Broadcom, “**The next Frontier of car Technology :Connecting to Everything**”, July 2015. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.broadcom.com/blog/the-next-frontier-of-car-technology-connecting-to-everything>
- [56] Embedded Computing Design, “**Introduction to V2X**”, September 2018. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.embedded-computing.com/automotive/introduction-to-v2x>
- [57] Unex Technology 2020, “**Innovation and Invention - We connect all things to possibilities**”, 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.unex.com.tw/company/about>
- [58] MARBEN-Products, “**Full-Featured software solution for V2X Equipment**”. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.marben-products.com/>
- [59] Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 63-70, 2010, “**V2X-Based Traffic Congestion Recognition and Avoidance**”. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/13-1/07-IE440.pdf>
- [60] Shancang Li, Li Da Xu, Shanshan Zhao, “**5G Internet of Things: A Survey, Journal of Industrial Information Integration**”, 2018.
- [61] Janne peisa, patrik persson, stefan parkvall, erik dahlman, asbjørn grøvlen, christian hoymann, dirk gerstenberger, “**5G Evolution: 3GPP RELEASES 16 & 17 OVERVIEW**”, March 2020 . [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.ericsson.com/49bdd9/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2020/5g-nr-evolution.pdf>
- [62] Ericsson.com: “**A look at key innovation areas of 3GPP Rel-17**”, 2019. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.ericsson.com/en/blog/2019/12/3gpp-rel-17>
- [63] Janne Peisa, Patrik Persson, Stefan Parkvall, Erik Dahlman, Asbjorn Grovlen, Christian Hoymann, Dirk Gerstenberger, “**5G Evolution: 3GPP releases 16 & 17 overview**”, March 2020. [Online]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/01/5G-Evolution-3GPP-R16-R17-FINAL.pdf>



Ακρωνύμια

1G	1st Generation
2G	2nd Generation
3G	3rd Generation
4G	4th Generation
5G	5th Generation
BS	Base Station
CoMP	Coordinated multipoint
C-RAN	Cloud Radio Access Network
CU-DU	Central Unit & Distribution Unit
DAS	Distributed antenna system
DNS	Domain name System
FDD	Frequency Division Decode
FDM	Frequency division multiplexing
FDMA	Frequency division multiplexing access
GPRS	General Packet Radio Services
IoT	Internet of things
IP	Internet Protocol
ITU	International telecommunication union
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine – to –Machine
Mbps	Megabits per second
MHz	Mega Hertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mm Wave	Millimeter wave
mMIMO	Massive MIMO
DoF	Degrees of Freedom
NFV	Network function virtualization
NFs	Network Functions
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
NFVO	Network Functions Virtualization Orchestrator
MANO	Management and Orchestration
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
QoS	Quality of Service
RAT	Radio access technology
RDS	radio dot system
Rx	Receiver
SDN	Software defined network
VNFs	Virtualized network functions
SE	Spectrum Efficiency
TDD	Time division Duplex
Tx	Transmitter



UDN	Ultra dense network
WLAN	Wireless local area network
ITU	International Telecommunication Union
3GPP	3rd Generation Project
IETF	International Engineering Task Force
TSG	Technical Specification Group
CDMA	Code Division Multiple Access
SCMA	Subcarrier Multiple Access
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
OAM	Operations, Administration, and Maintenance
HCS	Hierarchical Cell Structure
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
IAB	Integrated Access and Backhaul/Backhauling
IIoT	Industrial Internet of Things
mMTC	Massive Machine-Type Communications
NR	New Radio
SON	Self-Organizing Networks
UE	User Equipment
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
XR	Anything Reality
D2D	Device to Device
eNodeB	Evolved NodeB
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2P	Vehicle-to-Pedestrian
V2I	Vehicle-to-Industrial
V2X	Vehicle-to-Everything
gNB	Next Generation Node B
5GC	5G Core
MTC	Machine Type Communications
NGMN	Next Generation Mobile Network